

AL ME CO2 LASER

TECHNOLOGICAL

1998

ITT - MME
1998
AAE



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

Αριθ. Εισ.: 1845/1

Ημερ. Εισ.: 21-07-1998

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

1998

ΑΛΕ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΘΕΜΑ

<<Παραμετρική Ανάλυση Συγκόλλησης Κραμάτων
Αλουμινίου της Σειράς 6xxx με CO₂ laser>>

ΦΟΙΤΗΤΗΣ : Νικόλαος Δ. Αλεξόπουλος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

ΒΟΛΟΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 1998

αρ. εισ 109/ΠΑ.....



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

004000050795

στους γοκείς μου
στον αδελφό μου Χάρη,
(τον πρωτοπόρο ερευνητή της οικογένειας)
και σε όλους εκείνους που πίστεψαν σε εμένα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Δρ. Γρ. Ν. Χαϊδεμενόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή Φυσικής Μεταλλουργίας και Διευθυντή του Εργαστηρίου Υλικών, θα ήθελα να απονεύμω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες τόσο για την συμπαράσταση, την διάθεση και την καθοδήγησή του σε όλο το διάστημα εκπλήρωσης της μελέτης, όσο και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου για την διεκπεραίωση αυτής της μελέτης.

Εξέχουσες ευχαριστίες θα ήθελα να απονεύμω στην Άννα Ζερβάκη υπεύθυνη του τμήματος εφαρμογών Laser της Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. Α.Ε. και υποψήφια Διδάκτωρα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, τόσο για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια της αφού χωρίς αυτήν δεν θα ήταν δυνατή η εκπλήρωση της διπλωματικής εργασίας, όσο και για τη γενικότερη συμβολή της στη μέχρι τώρα πορεία μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Αντώνη Κατσαμά και Αποστόλη Βασιλάκο υπ. Διδάκτορες του Τμήματος για την αμέριστη βοήθεια, για την συνεχή παρότρυνση αλλά και για την άψογη συνεργασία, την οποία είχαμε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Η. Χοντζόπουλο και το προσωπικό του LIC, τόσο για την διάθεση του CO₂ laser, όσο και για την εξυπηρέτηση που προσφέρθηκε στο πρόσωπό μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΕΝΟΤΗΤΑ 1	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	3
1.1 Εισαγωγή	3
1.2 Η δέσμη laser σαν πηγή θερμότητας	10
1.2.1 Χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας	10
1.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών της πηγής θερμότητας στις συγκολλήσεις	11
1.3 Συμπεριφορά των υλικών κατά την συγκόλληση με laser	14
1.3.1 Αλληλεπίδραση δέσμης υλικού κατά τη συγκόλληση	14
1.3.2 Λειτουργικές παράμετροι κατά τη συγκόλληση	22
1.4 Χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων	33
1.4.1 Τύποι συγκόλλησης και γεωμετρία των συγκολλήσεων	33
1.4.2 Σφάλματα συγκολλήσεων	36
1.5 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου	49
1.5.1 Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου	49
1.5.2 Ονοματολογία των κραμάτων και σκληρότητα	50
1.5.3 Κράματα μη-επιδεχόμενα θερμική κατεργασία	53
1.5.4 Κράματα επιδεχόμενα θερμική κατεργασία	55
1.6 Χρήσεις των κραμάτων αλουμινίου στη βιομηχανία	61
1.6.1 Αεροπορική βιομηχανία	61
1.6.2 Αυτοκινητοβιομηχανία	63
1.6.3 Βιομηχανία συσκευασίας	65
1.7 Μέθοδοι εργαστηριακής ανάλυσης - ποιοτικός έλεγχος	67
1.8 Μη-Καταστρεπτικές δοκιμές	67
1.8.1 Γενικά	67

1.8.2 Οπτικός έλεγχος	68
1.8.3 Έλεγχος ραδιογραφίας	68
1.8.4 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά	70
1.9 Καταστροφικές δοκιμές	71
1.9.1 Μεταλλογραφική ανάλυση	71
1.9.2 Διαδικασία μικροσκοπικής ανάλυσης	73
1.10 Συγκολλησιμότητα των κραμάτων αλουμινίου	75

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή	77
2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων πειράματος	79
2.3 Πειράματα <i>bead on plate</i>	80

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

3.1 Α' Σειρά πειραμάτων	81
3.2 Β' Σειρά πειραμάτων	83
3.3 Γ' Σειρά πειραμάτων	91
3.4 Δ' Σειρά πειραμάτων	99
3.5 Ε' Σειρά πειραμάτων	107

ΕΝΟΤΗΤΑ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1.1 :** Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης [1].
- Πίνακας 1.2 :** Παγκόσμιες πωλήσεις σε βιομηχανικά laser [2].
- Πίνακας 1.3 :** Χαρακτηρισμός αλουμινίου με κριτήριο την καθαρότητα [5].
- Πίνακας 2.1 :** Χημική σύσταση κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν.
- Πίνακας 3.1 :** Συνθήκες Α' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.
- Πίνακας 3.2 :** Συνθήκες Β' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.
- Πίνακας 3.3 :** Πίνακας συσχέτισης Β' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.
- Πίνακας 3.4 :** Συνθήκες Γ' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.
- Πίνακας 3.5 :** Πίνακας συσχέτισης Γ' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.
- Πίνακας 3.6 :** Συνθήκες Δ' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.
- Πίνακας 3.7 :** Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου της Δ' σειράς πειραμάτων.
- Πίνακας 3.8 :** Πίνακας συσχέτισης Δ' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.
- Πίνακας 3.9 :** Συνθήκες Ε' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.
- Πίνακας 3.10 :** Πίνακας συσχέτισης Ε' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.1 :** Παγκόσμια κατανομή εφαρμογών για βιομηχανικά laser [2].
- Σχήμα 1.2 :** Γεωγραφική κατανομή παραγωγής βιομηχανικών συστημάτων laser [2].
- Σχήμα 1.3 :** Διαθέσιμες εντάσεις από διαφορετικές μεθόδους συγκόλλησης [3].
- Σχήμα 1.4 :** Σχηματική σύγκριση της συγκόλλησης laser (αριστερά) με συγκόλληση τόξου με πολλά περάσματα (δεξιά) σε κάλυβα πάχους 15 mm [3].
- Σχήμα 1.5 :** Τύποι συγκόλλησης (α) Αγωγής και (β) Περιοχής υψηλής απορρόφησης - *keyhole* [3].
- Σχήμα 1.6 :** Σχηματισμός της περιοχής υψηλής απορρόφησης και ισόθερμες τήξης κατά τη συγκόλληση [3].
- Σχήμα 1.7 :** Τυπική βαθιά συγκόλληση με θερμικό κύκλο κοντά στη ΘΕΖ, με μετρήσεις από θερμοστοιχείο [3].
- Σχήμα 1.8 :** Διαφορά στο βάθος διείσδυσης P σαν συνάρτηση της ισχύος της δέσμης P σε κάλυβα με ταχύτητα συγκόλλησης 1 m/min [3].
- Σχήμα 1.9 :** Επίδραση του *mode* στην συγκόλληση [3].
- Σχήμα 1.10 :** Μεταβολή της διείσδυσης της δέσμης για CO₂ και Nd:YAG [3].
- Σχήμα 1.11 :** Επίδραση της πόλωσης σε δύο κάθετες τομές μιας κυκλικής συγκόλλησης [3].
- Σχήμα 1.12 :** Χαρακτηριστικά της δέσμης, διάμετρος και απόκλιση [3].
- Σχήμα 1.13 :** Διακύμανση του παράγοντα ποιότητας δέσμης Q για διαφορετικά είδη laser και διάφορες ισχύς [3].
- Σχήμα 1.14 :** Μεταβολή στη μορφή της συγκόλλησης σε συνάρτηση με το εστιακό σημείο στην επιφάνεια του δοκιμίου. $P = 15$ kW, $v = 1$ m/min, $f = 600$ mm, $t = 20$ mm [3].
- Σχήμα 1.15 :** Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στη μορφή της συγκόλλησης. $P = 10$ kW, $f = 600$ mm [3].
- Σχήμα 1.16 :** Επίδραση του προστατευτικού αερίου στη μορφή της συγκόλλησης. $P = 5$ kW, $v = 1$ m/min, $f = 450$ mm [3].
- Σχήμα 1.17 :** Επίδραση του κενού στην διείσδυση της δέσμης σε κάλυβα, σε ταχύτητα, $v = 1$ m/min [3].
- Σχήμα 1.18 :** Διαφορετικοί τύποι συγκόλλησης, ραφών και θέσεων συγκόλλησης [3].
- Σχήμα 1.19 :** Γεωμετρία σε συγκόλληση τήξης.
- Σχήμα 1.20 :** Διαφορετικοί τύποι ατελειών, οι οποίοι μπορούν να συμβούν σε συγκόλληση με laser [3].
- Σχήμα 1.21 :** Μηχανισμός της ρηγματώσης κατά τη στερεοποίηση [4].
- Σχήμα 1.22 :** Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην στερεοποιημένη δομή [3].
- Σχήμα 1.23 :** Τυπικές θέσεις για ρηγματώση με παρασυρμένο υδρογόνο στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη [4].
- Σχήμα 1.24 :** Μορφή της διασιρωματικής διάσχισης σε τυπικές ενώσεις [4].

- Σχήμα 1.25 :** Σχηματικός *wormhole* σε διπλή συγκόλληση με γόμωση [4].
- Σχήμα 1.26 :** Οι τρεις κύριοι τύποι σπηλαιώσεων [4].
- Σχήμα 1.27 :** Τοποθεσίες γραμμικών εγκλεισμάτων σκουριάς [4].
- Σχήμα 1.28 :** Ατέλειες λόγω έλλειψης διείδυσης [4].
 (α) Μη - ευθυγράμμιση σε συγκόλληση δέσμης ηλεκτρονίων,
 (β) Μη - ευθυγράμμιση σε συγκόλληση τόξου σε αλουμίνιο,
 (γ) Τυπική ατέλεια σε διπλή συγκόλληση,
 (δ) Τυπική ατέλεια σε μονή συγκόλληση.
- Σχήμα 1.29 :** Κράματα αλουμινίου και συστήματα ονοματολογίας [6].
- Σχήμα 1.30 :** Δείγματα εξέλασης από κράματα **Al-Mg-Si** [6].
- Σχήμα 1.31 :** Τα όρια στη χημική σύσταση των πιο συνηθισμένων κραμάτων σειράς **6xxx**, μαζί με όρια διαρροής για την κατάσταση T6 [6].
- Σχήμα 1.32 :** Χαρακτηριστικά γήρανσης του κράματος 6061 σε μορφή ελάσματος [5].
- Σχήμα 1.33 :** Απαιτήσεις λειτουργίας σε κατασκευαστικά μέλη ενός τυπικού μεταφορικού αεροσκάφους [6].
- Σχήμα 1.34 :** Υλικά που χρησιμοποιούνται σε επιλεγμένα μεταφορικά αεροσκάφη *Boeing* [6].
- Σχήμα 1.35 :** Σημερινή και προβλεπόμενη χρήση των υλικών σε οχήματα [6].
- Σχήμα 1.36 :** Σκελετός αυτοκινήτου της *Alcoa* κατασκευασμένος από κράματα αλουμινίου [6].
- Σχήμα 1.37 :** Σχηματική διάταξη της μεθόδου ραδιογραφίας.
- Σχήμα 1.38 :** Διαμήκης και εγκάρσια τομή της ραφής [10].
- Σχήμα 1.39 :** Μακροσκόπιο Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος.
- Σχήμα 1.40 :** Μικροσκληρόμετρο Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος.
- Σχήμα 1.41 :** Γεωμετρική μορφή της μεθόδου *VICKERS*.
- Σχήμα 1.42 :** Τρόπος μικροσκληρομέτρησης και γεωμετρικά μεγέθη συγκόλλησης.
- Σχήμα 2.1 :** Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης της laser συγκόλλησης.
- Σχήμα 3.1 :** Μικρορηγματώσεις και πορώδες στα δοκίμια A16, A17, A18 και A19 (από αριστερά).
- Σχήμα 3.2 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A18.
- Σχήμα 3.3 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A19.
- Σχήμα 3.4 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A21.
- Σχήμα 3.5 :** Φωτογραφία των πειραμάτων στο έλασμα.
- Σχήμα 3.6 :** Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου A18.
- Σχήμα 3.7 :** Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A19, A24 και A25.
- Σχήμα 3.8 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6063-T6 (Δοκ. A16 έως A25).
- Σχήμα 3.9 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6063-T6 (Δοκ. A16 έως A25).
- Σχήμα 3.10 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A28.
- Σχήμα 3.11 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A30.
- Σχήμα 3.12 :** Φωτογραφία του δοκιμίου A37.

- Σχήμα 3.13 :** Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A27 και A28.
- Σχήμα 3.14 :** Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A29, A30 και A32.
- Σχήμα 3.15 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-O (Δοκ. A26 έως A39).
- Σχήμα 3.16 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-O (Δοκ. A26 έως A39).
- Σχήμα 3.17 :** Φωτογραφία του δοκιμίου B04.
- Σχήμα 3.18 :** Φωτογραφία του δοκιμίου B17.
- Σχήμα 3.19 :** Φωτογραφία του δοκιμίου B19.
- Σχήμα 3.20 :** Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων B04 και B09.
- Σχήμα 3.21 :** Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων B14, B17 και B19.
- Σχήμα 3.22 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-T6 (Δοκ. B01 έως B20).
- Σχήμα 3.23 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-T6 (Δοκ. B01 έως B20).
- Σχήμα 3.24 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με το πλάτος της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).
- Σχήμα 3.25 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τη διείδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).
- Σχήμα 3.26 :** Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με το λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΤ II Lasermat, στο οποίο μεταξύ άλλων φορέων συμμετείχαν η ΕΑΒ, η ΕΒΕΤΑΜ και το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και έχει ως στόχο την μελέτη των κατεργασιών βιομηχανικών υλικών με δέσμες laser.

Τα κράματα που μελετήθηκαν, παραχωρήθηκαν από την ΕΑΒ και την ΕΒΕΤΑΜ, και ανήκουν στη σειρά 6xxx (**Al-Mg-Si**). Διαιρέθηκαν 3 κράματα αλουμινίου, 6061, 6063 και 6082, στα οποία έγιναν πειράματα *bead on plate*, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των κραμάτων, κατά την αλληλεπίδραση του υλικού με την δέσμη laser.

Στην πρώτη ενότητα αυτής της εργασίας, επιχειρείται μια βιβλιογραφική αναδρομή στις συγκολλήσεις laser, καθώς και μία ταξινόμηση των κραμάτων αλουμινίου. Στην δεύτερη ενότητα, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Τα πειράματα έγιναν με τη χρήση 3 διαφορετικών laser διοξειδίου του άνθρακα ισχύος 1.5, 3 και 5 kW. Συγκεντρωτικά έγιναν 77 δοκιμαστικά περάσματα *bead on plate* σε πάχος ελασμάτων 1.6 mm των παραπάνω κραμάτων, με διαφορετική αρχική θερμική κατεργασία.

Εν συνεχεία, τόσο στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος, όσο και στο Εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας της ΕΒΕΤΑΜ, 67 δοκίμια εξετάσθηκαν μακροσκοπικά για να μετρηθεί το βάθος διείσδυσης, η ζώνη τήξης και το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης. Ενδεικτικές φωτογραφίες από σχεδόν όλες τις σειρές πειραμάτων παρουσιάζονται στην τρίτη ενότητα. Η μικροσκληρότητα των δοκιμίων μετρήθηκε σε βάθος 1 mm από την επιφάνεια τους, εξετάζοντας όλες τις κρίσιμες περιοχές της συγκόλλησης. Θεωρήθηκε σκόπιμο να μην δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αρχική και την σχηματιζόμενη μικροδομή των δοκιμίων, καθώς κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, επιχειρείται μια προσπάθεια ολοκλήρωσης της παραμετρικής ανάλυσης, ενώ δίνεται έμφαση στην οριοθέτηση των διαφόρων μηχανισμών τήξης (αγωγής και περιοχής υψηλής απορρόφησης) οι οποίοι λαμβάνουν χώρα κατά τη συγκόλληση laser, σε σχέση με την προσδιδόμενη ισχύ και ενέργεια. Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην τέταρτη ενότητα, εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα, ενώ βέβαια προτείνονται ορισμένα θέματα για μελλοντική έρευνα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Το χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των laser στις κατεργασίες των υλικών είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, που από πλήρη έλεγχο μπορεί να μεταφερθεί πάνω στην επιφάνειά τους. Εάν και τα πρώτα αποτελέσματα φάνηκαν πολύ ελπιδοφόρα για την κοπή των μετάλλων, ήταν πολύ απογοητευτικά για τη συγκόλληση. Πράγματι, όταν η πρώτη γενιά των CO₂ laser (~ 100 W) χρησιμοποιήθηκαν για συγκόλληση, το μόνο αποτέλεσμα ήταν μία ελαφριά θέρμανση του τεμαχίου, χωρίς κανένα λιώσιμο της επιφάνειας. Στην αρχή της δεκαετίας του '60, πολλοί μηχανικοί θεωρούσαν πως δεν υπάρχει μέλλον στην συγκόλληση με laser, και προέβλεπαν ότι δεν θα μπορούσε ποτέ να παράγει συγκολλήσεις συγκρίσιμες με αυτές της μεθόδου με δέσμη ηλεκτρονίων. Ο κύριος περιορισμός της συγκόλλησης με laser, ήταν η κακή "σύζευξη" μεταξύ δέσμης και υλικού, εξαιτίας της υψηλής ανακλαστικότητας της ακτινοβολούμενης επιφάνειας και της μικρής απορρόφησης της ενέργειας από το τεμάχιο προς κατεργασία. Ωστόσο, ακόμα και σε εκείνα τα αρχικά στάδια κάποια επιτυχή αποτελέσματα εμφανίστηκαν με τη χρησιμοποίηση υψηλότερων ενεργειών (400 W), επιτυγχάνοντας συγκόλληση τύπου αγωγής (*conduction mode welding*) σε λεπτούς χάλυβες. Άλλες εφαρμογές που αφορούσαν σημειακή συγκόλληση με Nd:YAG laser εμφανίστηκαν εκείνη τη χρονική περίοδο σε μικροσυγκολλήσεις ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Μόλις το 1971, επειτεύθηκε συγκόλληση με επίδραση της περιοχής υψηλής απορρόφησης (*keyhole welding*), με χρήση πηγής CO₂ laser υψηλότερης ισχύος, ανοίγοντας πολλούς δρόμους και ελπίδες για αυτή την εφαρμογή, και την ανταγωνιστικότητα, έως ένα σημείο, σε σχέση με την τεχνολογία συγκόλλησης με δέσμη

ηλεκτρονίων. Πρέπει να σημειωθεί, πως το πρώτο σύστημα για συγκόλληση laser, εγκαταστάθηκε το 1975 στην Αμερική, στην παραγωγή μπαιαριών από μόλυβδο, που χρησιμοποιήθηκαν στις επικοινωνίες. Στις μέρες μας, η εξέλιξη της τεχνολογίας των lasers, και η καλύτερη κατανόηση των θεμελιωδών φαινομένων που διέπουν την αλληλεπίδραση δέσμης - υλικού, έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες με καινούργιες εφαρμογές στις συγκολλήσεις. Αυτές οι εφαρμογές, ενδεικτικά περιλαμβάνουν την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία ενέργειας, την αμυντική βιομηχανία και τις βιομηχανίες κατασκευής οικιακών συσκευών.

Η μεγάλη διάδοση της συγκόλλησης με laser στην βιομηχανία, οφείλεται στο γεγονός ότι η υιοθέτηση της μεθόδου αυτής, κατά την παραγωγική διαδικασία έχει σαν άμεσες συνέπειες :

1. την αύξηση της παραγωγικότητας,
2. την υψηλότερη ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων,
3. τα δύο παραπάνω οδηγούν σε παραγωγή ανταγωνιστικών προϊόντων.

Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων laser είναι αρκετά έναντι των άλλων μεθόδων, ενώ το κυριότερο μειονέκτημα προς το παρόν 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 :

1. Υψηλή πυκνότητα ενέργειας με κατάλληλη εστίαση της δέσμης.
2. Υψηλή ενεργειακή απόδοση (προσδιδόμενη ενέργεια / απορροφούμενη ενέργεια).
3. Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής.
4. Γρήγορο και απότομο σταμάτημα-ξεκίνημα, σε αντίθεση με τις μεθόδους τόξου.
5. Η ικανότητα της δέσμης laser να μεταφέρεται σε σχετικά υψηλές αποστάσεις από το υλικό, χωρίς σημαντική εξασθένιση ή υποβάθμιση εξ' αιτίας της συνεκτικής της φύσης.
6. Πραγματοποίηση της συγκόλλησης στην ατμόσφαιρα, έναντι της μεθόδου με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW) όπου απαιτείται η παρουσία υψηλού κενού.

7. Δεν παράγονται ακτίνες x, επικίνδυνες για την υγεία, σε αντίθεση με την EBW.
8. Πολύ στενή ραφή συγκόλλησης (με τη μορφή *keyhole*) με αποτέλεσμα μικρότερες παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις.
9. Πολύ μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) εξ' αιτίας της εστίασης της δέσμης σε πολύ μικρά σημεία. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να κολληθούν υλικά ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές.
10. Χαμηλός ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (*heat input*) εξ' αιτίας των υψηλών ταχυτήτων με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ψύξης (μείωση θερμικού κύκλου).
11. Δεν χρειάζονται ηλεκτρόδια ούτε πρόσθεση υλικού (αυτογενής συγκόλληση).
12. Αμελητέα μόλυνση της συγκόλλησης, με την χρησιμοποίηση κατάλληλου προστατευτικού αερίου (αδρανούς).
13. Η ευκολία αυτοματισμού καθώς και η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση της δέσμης σε άλλες κατεργασίες αποτελούν χαρακτηριστικές ικανότητες της μεθόδου.

Τα μειονεκτήματα καθώς και οι περιορισμοί στη χρησιμοποίηση της τεχνικής, είναι :

1. 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. Συνεπώς, η μέθοδος ενδείκνυται για περιορισμένο όγκο παραγωγής, κατόπιν τεχνο-οικονομικής μελέτης, ενώ συγκρινόμενη με την EBW είναι πιο οικονομική επειδή δεν απαιτείται η ύπαρξη κενού.
2. Δυσκολία στην συγκόλληση υλικών υψηλής ανακλασικότητας (π.χ. αλουμίνιο) διότι δεν μπορούν να απορροφήσουν την προστιδόμενη πυκνότητα ενέργειας.
3. Συγκόλληση αγωγής, μικρού βάθους διείσδυσης, σε χαμηλές πυκνότητες ενέργειας της τάξης των 10^5 W/cm^2 .
4. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε οπτική ενέργεια, είναι πολύ μικρή, με απόδοση για CO₂ laser της τάξεως του 5%.

Στον πίνακα 1.1 [1] παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης. Όπως φαίνεται η συγκόλληση laser υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων στα περισσότερα σημεία, αλλά το υψηλό κόστος εξοπλισμού (περίπου δεκαπλάσιο των μεθόδων τόξου [1]) δεν επιτρέπει την ευρεία εφαρμογή της.

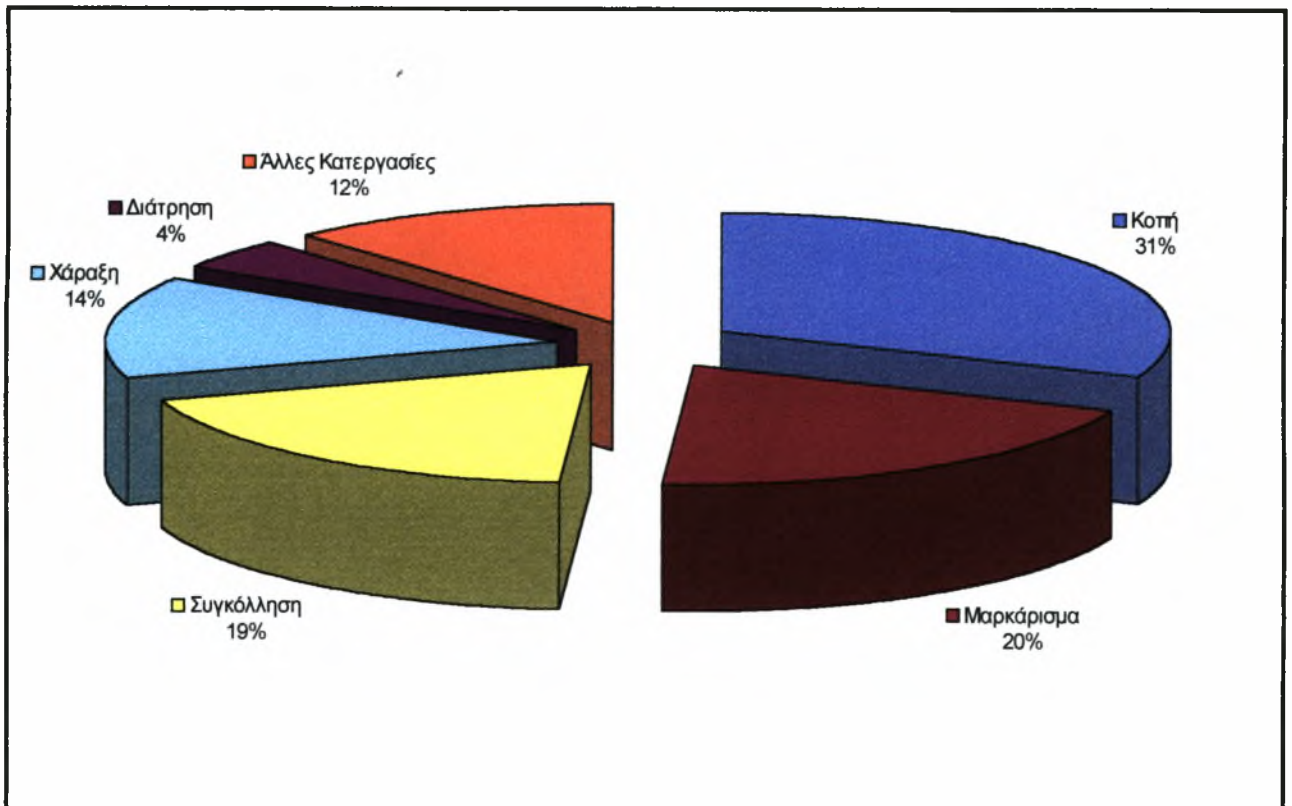
Πίνακας 1.1 : Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης [1].

Ποιότητα	LBW	EBW	GTAW	Resistance	Ultrasonic
1. Ρυθμός	OK	OK	NO	OK	NO
2. Χαμηλή πρόσδοση θερμότητας	OK	OK	NO	OK	OK
3. Μικρή Θ.Ε.Ζ.	OK	OK	NO	-	OK
4. Εμφάνιση (προφίλ) της δέσμης	OK	OK	NO	-	OK
5. Simple fixturing	OK	NO	NO	-	-
6. Αξιοπιστία Εξοπλισμού	OK	-	OK	OK	-
7. Συγκόλληση στον αέρα	OK	NO	-	OK	-
8. Βαθιά Διείδυση	NO	OK	-	NO	-
9. Συγκόλληση Μαγνητικών υλικών	OK	NO	OK	OK	OK
10. Συγκόλληση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας.	NO	OK	OK	OK	OK
11. Συγκόλληση υλικών ευαίσθητων στην θερμοκρασία	OK	OK	NO	NO	OK
12. Πρόσβαση στην σύνδεση	OK	-	-	NO	NO
13. Περιβάλλον, Θόρυβος, Αναθυμιάσεις	OK	OK	NO	NO	NO
14. Κόστος Εξοπλισμού	NO	NO	OK	-	-
15. Κόστος Λειτουργίας	-	-	-	-	-

όπου :

LBW : Συγκόλληση με laser, *EBW* : Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων, *GTAW* : Συγκόλληση τόξου με βολφράμιο, *Resistance* : Συγκόλληση με αντίσταση, *Ultrasonic* : Συγκόλληση με υπερήχους.

Τα κυριότερα χρησιμοποιούμενα σήμερα στην βιομηχανία lasers για κατεργασίες υλικών, είναι το CO₂ και το Nd:YAG, συνεχούς ή παλμικής λειτουργίας. Το μήκος κύματος του CO₂ laser είναι 10.6 μm ενώ το αντίστοιχο του Nd:YAG είναι 1.06 μm. Στο σχήμα 1.1 [2] φαίνεται ότι μόνο ένα 19% από τις εφαρμογές των βιομηχανικών CO₂ lasers αντιστοιχεί στις συγκολλήσεις.



Σχήμα 1.1 : Παγκόσμια κατανομή εφαρμογών για βιομηχανικά laser [2].

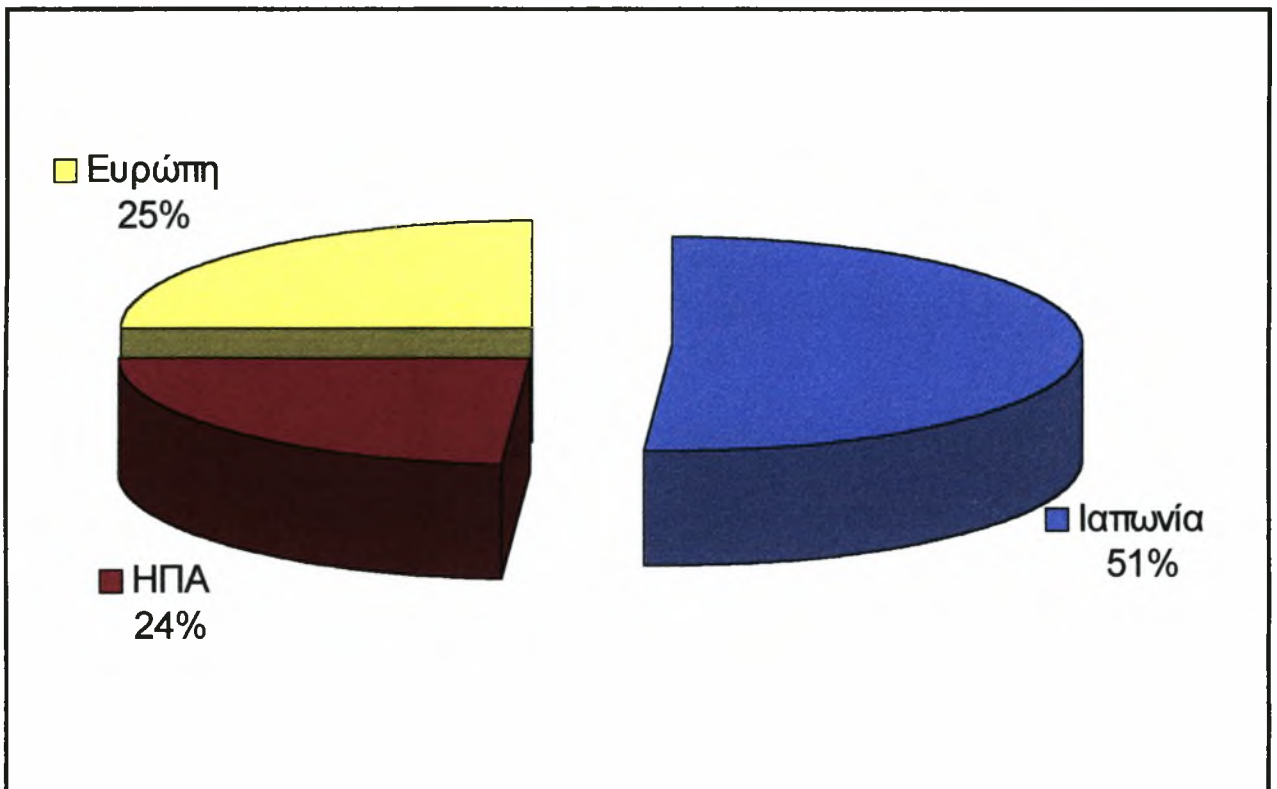
Από όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν, και τα μειονεκτήματα του μεγάλου κεφαλαίου επένδυσης και του σχετικά μικρού συντελεστή μετατροπής της ενέργειας, μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα, πως οι εφαρμογές, στις οποίες το laser υπερέχει, είναι αυτές που χρησιμοποιούν την υψηλή πυκνότητα ενέργειας στις κατεργασίες των υλικών, με την μικρότερη "αναταραχή" στο δοκίμιο. Περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν στην παράγραφο 1.2. Η αποδοτική χρησιμοποίηση του χρόνου, είναι επίσης αναγκαία, προκειμένου να αποδώσει την αρχική επένδυση. Συνεπώς, η επένδυση πρέπει να γίνει, για την δημιουργία γρήγορης, ακριβούς και εύκολης προς επανάληψη διεργασίας, παραγωγής εξαρτημάτων με μεγάλη ακρίβεια, εάν το laser, μπορεί να προσφέρει τεχνικά και οικονομικά οφέλη σε σχέση με τις ανταγωνιστικές τεχνικές.

Η διάδοση των εφαρμογών laser, που έχουν οικονομικό κέρδος για τις επιχειρήσεις που τα χρησιμοποιούν, μπορεί να επιβεβαιωθεί και με το αυξανόμενο επίπεδο των πωλήσεων σε συστήματα laser. Στον πίνακα 1.2, φαίνονται οι αυξήσεις στις πωλήσεις των laser κατά τα έτη 1996 και 1997.

Πίνακας 1.2 : Παγκόσμιες πωλήσεις σε βιομηχανικά laser [2].

Τύπος laser	Μονάδες κατά εκτίμηση	
	1996	1997
CO ₂	6033	7641
YAG	4351	5854
Excimer	157	257
Σύνολο	10541	13752
ξία σε M\$		
CO ₂	390	451
YAG	147	203
Excimer	62	107
Σύνολο	599	761

Με δεδομένο τον ρυθμό ανάπτυξης, να ξεπερνά το 10% στα τέλη της δεκαετίας του '80, και με μικρότερους ρυθμούς ανάπτυξης στην αρχή της δεκαετίας του '90, οι πωλήσεις βιομηχανικών laser, αναμένονται να δείξουν μεγάλη άνοδο χρόνο με το χρόνο. Στο σχήμα 2.2, φαίνεται πως η Ιαπωνία παράγει τα μισά από αυτά τα laser, με την Ευρώπη και τις ΗΠΑ να μοιράζονται την παραγωγή του υπόλοιπου μισού. Εκτιμώντας τις πωλήσεις των laser, μαζί με τις πωλήσεις των συστημάτων laser, προκύπτει μια παγκόσμια αγορά για βιομηχανικά συστήματα laser της τάξεως των \$3 δις. (2.6 δις. ECU).



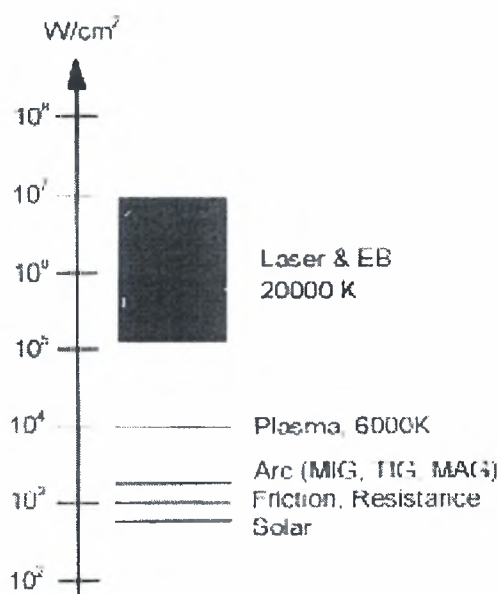
Σχήμα 1.2 : Γεωγραφική κατανομή παραγωγής βιομηχανικών συστημάτων laser [2].

1.2 Η Δέσμη laser σαν πηγή θερμότητας

1.2.1 Χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας

α) Πυκνότητα Ενέργειας (Ένταση)

Οι πυκνότητες ισχύος που χρησιμοποιούνται σε συγκόλληση με laser, ποικίλλουν από $10^4 - 10^7 \text{ W/cm}^2$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3 [3], οι συμβατικές μέθοδοι συγκόλλησης, βρίσκονται τουλάχιστον 1000 φορές πιο κάτω σε απόδοση ισχύος. Ας σημειωθεί, πως με παλμική λειτουργία, μπορούν να επιτευχθούν ακόμα μεγαλύτερες ισχύς για άλλες εφαρμογές, όπως η διάτρηση. Μόνο με την δέσμη ηλεκτρονίων *EB*, είναι δυνατή η παραγωγή υψηλών πυκνοτήτων ισχύος, όπως με την δέσμη laser για συγκόλληση.



Σχήμα 1.3 : Διαθέσιμες εντάσεις από διαφορετικές μεθόδους συγκόλλησης [3].

β) Μεταφορά δέσμης

Η δέσμη laser μπορεί να μεταδοθεί εύκολα και γρήγορα (ταχύτητα φωτός) από ένα σημείο σε ένα άλλο καθορισμένο σημείο σε μια σχετικά μεγάλη απόσταση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με κατάλληλη διάταξη ανακλαστικών καθρεπτών για τα CO₂ laser, ή με οπτικές ίνες για Nd:YAG laser. Επομένως, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σύστημα laser σε διαφορετικούς σταθμούς εργασίας.

γ) Πρόδοση θερμότητας

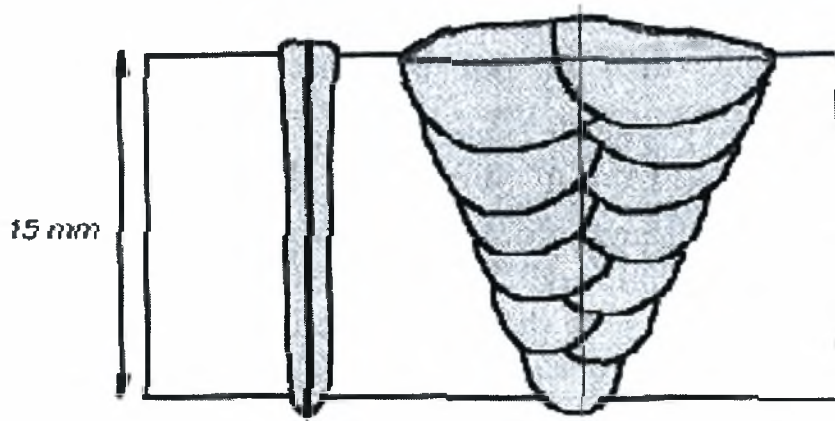
Η ισχύς της δέσμης laser, μπορεί εύκολα να ελεγχθεί από ηλεκτρικές παραμέτρους. Το σημείο εστίασης και οι ενδεχόμενες διακυμάνσεις του, καθώς και η ταχύτητα της κεφαλής, ελέγχεται με υψηλή ακρίβεια. Επομένως η πρόδοση θερμότητας στο προς επεξεργασία τεμάχιο, μπορεί να υποδειχτεί και να ελεγχθεί τόσο σε μικρές ή μεγάλες χρονικές περιόδους με μεγάλη ακρίβεια. Μπορεί να γίνει ραφή που να ικανοποιεί τη γεωμετρική διαμόρφωση της ένωσης, ή τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του στερεοποιημένου μετάλλου (πρόσθετο υλικό). Η διεργασία μπορεί να ελεγχθεί αυτόματα με τη βοήθεια μικροεπεξεργασιών και CNC συστημάτων.

1.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών της πηγής θερμότητας στις συγκολλήσεις

α) Λεπτές συγκολλήσεις

Οι συγκολλήσεις τύπου υψηλής απορρόφησης (*keyhole welding*) από δέσμη laser, χαρακτηρίζονται από τις υψηλές τιμές του λόγου βάθους προς πλάτος της συγκόλλησης. Τιμές του λόγου από 3 έως 6 μπορούν εύκολα να εξασφαλισθούν, και μπορεί φθάσουν έως το 10 και πλέον. Η συγκόλληση έχει γενικά μικρό πλάτος, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) είναι πολύ μικρή, καθώς η πρόδοση θερμότητας στο τεμάχιο είναι ελεγχόμενη. Συνεπώς οι παραμορφώσεις παραμένουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ δύο συγκολλήσεων, που έγιναν με δέσμη laser και με συγκόλληση TIG με πολλαπλά περάσματα. Η ολική πρόδοση θερμότητας είναι περίπου 25 φορές υψηλότερη στη

μέθοδο *TIG* από την συγκόλληση *laser*, και η προκύπτουσα γωνιακή παραμόρφωση είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη στην συγκόλληση *TIG*. Πρέπει να υπογραμμιστεί το γεγονός ότι το χαμηλό επίπεδο των παραμορφώσεων που προκύπτουν με την συγκόλληση *laser*, οφείλεται στη χαμηλή πρόσδοση θερμότητας, που αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις το κύριο πλεονέκτημα της. Άλλη μια συνέπεια της συγκόλλησης είναι η ομοιογένεια των παραμενουσών τάσεων, οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη στερεοποίηση, και επομένως μειώνουν τον παράγοντα ενίσχυσης των τάσεων σε περιβάλλον κόπωσης.



Σχήμα 1.4 : Σχηματική σύγκριση της συγκόλλησης *laser* (αριστερά) με συγκόλληση τόξου με πολλά περάσματα (δεξιά) σε κάλυβα πάχους 15 mm [3].

β) Παραγωγικότητα

Οι υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης που συνήθως χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση με δέσμη *laser*, συνδυαζόμενες με τα άλλα χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας και της ευελιξίας μεταφοράς της δέσμης, επιτρέπουν την επίτευξη υψηλών ρυθμών παραγωγής. Το κόστος ανά τεμάχιο μπορεί να γίνει αρκετά ανταγωνιστικό σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους, μολονότι η επένδυση είναι αρκετά πιο μεγάλη για συγκόλληση *laser*.

γ) Επαναληψιμότητα και ποιότητα

Η σταθερότητα της ισχύς της δέσμης μπορεί να είναι ακριβής στο 2% για πηγές laser < 5 kW. Σε συνάρτηση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της πηγής, η πρόσδοση θερμότητας μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια, που εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα με σταθερή ποιότητα. Επιπρόσθετα, η αυτοματοποίηση της διεργασίας συγκόλλησης με laser, επιτρέπει την παρακολούθηση της πλειοψηφίας των λειτουργικών παραμέτρων κατά την διεργασία, καθώς και την καταγραφή τους, σαν ένα πειστήριο της διεργασίας. Αυτό εκπροσωπεί ένα σημαντικό επιχείρημα για την διασφάλιση ποιότητας.

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με δέσμη laser, προϋποθέτουν ένα αριθμό υποχρεώσεων στην προετοιμασία των κομματιών που θα συναρμολογηθούν, και πρέπει να γίνουν σεβαστά. Τα προβλήματα αυτά θα συζητηθούν στις ενότητες 1.3 και 1.4.

1.3 Συμπεριφορά των υλικών κατά την συγκόλληση με laser

Η ενότητα αυτή, ασχολείται με τα παρακάτω σημεία :

1. Φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την αλληλεπίδραση δέσμης υλικού κατά την συγκόλληση.
2. Επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων του laser στην ποιότητα της συγκόλλησης.
3. Συγκολλησιμότητα των υλικών, χαρακτηρισμός της γεωμετρίας των συγκολλήσεων, και ατέλειες που υπάρχουν στις συγκολλήσεις.

1.3.1 Αλληλεπίδραση δέσμης υλικού κατά τη συγκόλληση

Καθώς η δέσμη του laser, προσπίπτει στην επιφάνεια του τεμαχίου, ένα μέρος της ανακλάται και ένα άλλο μέρος απορροφάται. Η απορροφημένη ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα με σύνθετους μηχανισμούς [3]. Με απλά λόγια, τα φωτόνια στην δέσμη laser, διεγείρουν τα ηλεκτρόνια των επιφανειακών ατόμων του τεμαχίου, τα οποία αλλάζουν τροχιές και πέφτουν στο αρχικό τους επίπεδο, παράγοντας θερμότητα. Αυτό το φαινόμενο, επιτυγχάνεται σε πολύ μικρό χρόνο $\sim 10^{-12}$ sec, το οποίο είναι ουσιαστικά στιγμιαίο.

α) Απορρόφηση της δέσμης του laser

Η ικανότητα του υλικού να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια είναι μια από τις βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν την συγκόλληση laser. Σύμφωνα με τον νόμο του Beer [3], η απορρόφηση της προσπίπτουσας ισχύος από το υλικό περιγράφεται από την σχέση :

$$I(z) = I_0 \exp. (-a z)$$

όπου :

- I_0 : είναι η προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος της δέσμης [W/cm^2]
 $I(z)$: είναι η πυκνότητα ισχύος σε βάθος z του υλικού [W/cm^2]
 a : είναι η απορρόφηση ή ο συντελεστής εξασθένησης [$10^4/cm$]

Το μήκος απορρόφησης σε ένα υλικό ορίζεται ως η απόσταση κατά την οποία, η πυκνότητα ισχύος μειώνεται κατά $1/e$. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση του Beer, το μήκος απορρόφησης είναι πολύ μικρό, ενώ η απορροφώμενη ενέργεια της δέσμης από το υλικό, μετατρέπεται σε θερμότητα στην επιφάνειά του.

Μια σπουδαία μεταβλητή στις συγκολλήσεις laser είναι και ο συντελεστής απορρόφησης ή τήξης (*thermal coupling factor*) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της απορροφώμενης ενέργειας προς την προσδιδόμενη. Όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής απορρόφησης τόσο λιγότερη ενέργεια χάνεται άσκοπα, ενώ αυξάνει ο συντελεστής απόδοσης της συγκόλλησης. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού όπως η διηλεκτρική σταθερά, η ηλεκτρική αντίσταση, η επιφανειακή του κατάσταση και η θερμοκρασία του, όσο και από την φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως το μήκος κύματος και η διάθλαση.

Η θερμοκρασία του υλικού παίζει σπουδαίο ρόλο στην απορρόφηση. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος το υλικό μπορεί να απορροφήσει περίπου το 4% της ενέργειας της δέσμης του CO₂ laser, σε θερμοκρασίες τήξης ο βαθμός απορρόφησης αυξάνει στα 30%, ενώ σε θερμοκρασίες εξάιμισης φθάνει ακόμα και στο 90% [3]. Για αυτό το λόγο κατά την δημιουργία της περιοχής υψηλής απορρόφησης, όπου το υλικό εξαιμίζεται, επιτυγχάνεται υψηλό βάθος διείσδυσης, αφού η περιοχή αυτή, συμπεριφέρεται σαν μέλαν σώμα και απορροφά περισσότερο από 95% της προσπίπτουσας ισχύος. Συνεπώς, προκειμένου να δημιουργηθεί η περιοχή υψηλής απορρόφησης, πρέπει να υπάρξει ένας συνδυασμός της πυκνότητας ισχύος και της ισχύος της δέσμης (> 1 kW).

Η γενικότερη κατάσταση και φύση του δοκιμίου παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση. Για παράδειγμα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η απορρόφηση μιας CO₂ δέσμης laser, ανέρχεται στο 4% για χάλυβα, ενώ για αλουμίνιο βρίσκεται στο 1%. Όσο αυξάνει η τραχύτητα της επιφανείας του υλικού, αυξάνεται και η απορροφητικότητα, γι' αυτό η αμμοβολή ενδείκνυται για καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η απορρόφηση

από 5% σε μια φρεζαρισμένη επιφάνεια, εκτοξεύεται στο 50% για μια αμμοβολημένη επιφάνεια.

Το μήκος κύματος της δέσμης, επηρεάζει σημαντικά τον βαθμό απορρόφησης. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και για τον ίδιο κάλυβα, η απορρόφηση για το Nd:YAG ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) είναι 30%, σε σύγκριση με 4% για το CO₂ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) [3].

β) Θερμοκρασιακός κύκλος κατά τη συγκόλληση

Η ισχύς που απορροφάται από το δοκίμιο, μετατρέπεται σε θερμότητα στην επιφάνεια και διαδίδεται με θερμική αγωγή διαμέσω του υλικού, και αντίστοιχα μπορεί να θερμάνει να λιώσει ή να εξαιμίσει το υλικό, σε συνάρτηση με την πυκνότητα ισχύος της δέσμης και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Η πυκνότητα ισχύος μπορεί να συσχετισθεί με τον νόμο του *Stefan-Boltzmann* [3] :

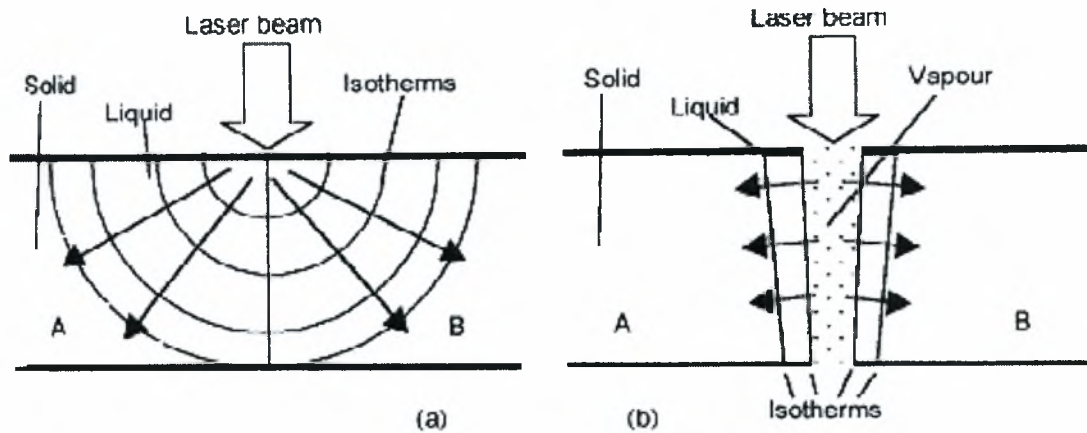
$$I = \sigma \cdot T^4$$

όπου :

σ : είναι η σταθερά του *Stefan-Boltzmann*

T : είναι η θερμοκρασία της εκπέμπουσας επιφάνειας

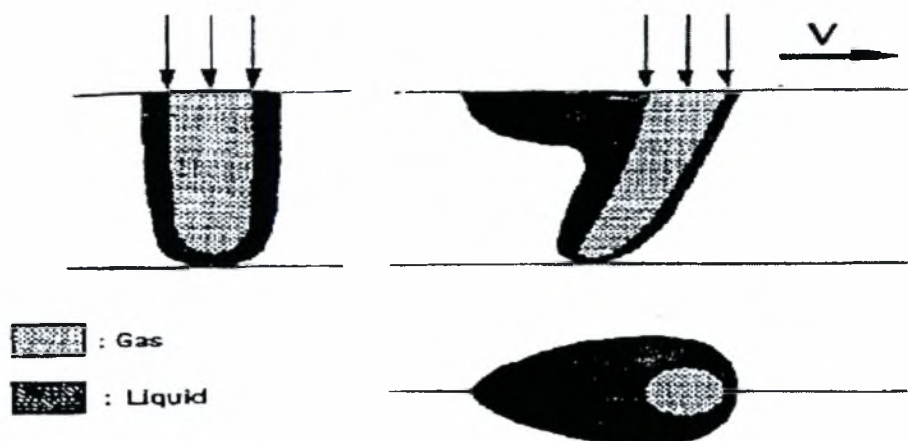
Για μια δεδομένη πυκνότητα I , μπορεί κάποιος να καθορίσει την ισοδύναμη θεωρητική θερμοκρασία. Η μέση θερμοκρασία του ήλιου, είναι περίπου 6000 K, που αντιστοιχεί σε μια πυκνότητα ισχύος περίπου 10^4 W/m^2 . Μια πυκνότητα τάξεως των 10^6 W/m^2 , που χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις με μεγάλο βάθος διείσδυσης, αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία περίπου 20000 K, η οποία είναι φυσικά ικανή να εξαιμίσει κάθε γνωστό μέταλλο. Για πυκνότητες ισχύος των 10^5 W/m^2 , η επιφάνεια του δοκιμίου θερμαίνεται έως την θερμοκρασία τήξης και μπορεί ακόμα και να υπερθερμανθεί. Η θερμότητα διαδίδεται με αγωγή από την επιφάνεια διαμέσω του δοκιμίου. Οι ισόθερμες είναι ημισφαιρικές σε ένα ισοτροπικό υλικό. Το σχήμα 1.5 δείχνει μια συγκόλληση του κομματιού Α με το κομμάτι Β, υποθέτοντας πως όλο το μέταλλο που βρίσκεται μέσα στην ισόθερμη τήξης, πρέπει να είναι λιωμένο. Τυπικές συγκολλήσεις αυτού του είδους, ονομάζονται συγκολλήσεις αγωγής, και μπορούν να πραγματοποιηθούν με τις συμβατικές συγκολλήσεις τόξου ή με πλάσμα.



Σχήμα 1.5 : Τύποι συγκόλλησης (α) Αγωγής και (β) Περιοχής υψηλής απορρόφησης - *keyhole* [3].

Για πυκνότητες τάξεως πάνω από 10^6 W/m^2 , το μέταλλο που βρίσκεται κάτω από τη δέση εξατμίζεται, δημιουργώντας μια οπή, της οποίας η διάμετρος είναι αντίστοιχη της διαμέτρου της προσπίπτουσας δέσης. Το βάθος αυτής της οπής, εξαρτάται από τις λειτουργικές παραμέτρους και το προς κατεργασία υλικό. Η δέση του laser, απορροφάται από την οπή και μεταδίδεται στο δοκίμιο διαμέσω των τοιχωμάτων της οπής. Οι ισόθερμες είναι κυλινδρικές, με ένα πολύ υψηλό θερμοκρασιακό *gradient*. Η συγκόλληση του τεμαχίου Α με το Β προϋποθέτει τήξη μιας σιενής ζώνης μετάλλου που βρίσκεται μεταξύ των ισόθερμων τήξης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται συγκόλληση περιοχής υψηλής απορρόφησης - *keyhole*. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή αυτή, που καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα τηγμένου μετάλλου, είναι γεμάτη με πλάσμα, σε μια πίεση ελαφρά μεγαλύτερη από των περιβάλλοντων τοιχωμάτων. Η συγκεκριμένη περιοχή, είναι δυναμικά σταθερή κάτω από τις υδροστατικές δυνάμεις του λιωμένου μετάλλου που περιβάλλει το εσωτερικό της τρύπας, της πίεσης των ατμών μέσα στην περιοχή υψηλής απορρόφησης και της επιφανειακής τάσης του τηγμένου μετάλλου. Όταν η δέση μετακινείται στο δοκίμιο, η εν λόγω περιοχή κινείται ωθώντας το τηγμένο υλικό από τα εμπρός στο πίσω μέρος της, όπου αυτό στερεοποιείται, δημιουργώντας την ένωση μεταξύ των δύο τεμαχίων. Στο σχήμα 1.6, φαίνεται σχηματικά η μορφή της περιοχής υψηλής απορρόφησης και του τηγμένου μετάλλου κατά τη συγκόλληση. Αυτές οι μορφές έχουν ισχυρή εξάρτηση από την ταχύτητα συγκόλλησης, η οποία μπορεί να επηρεάσει την

γωνία διείσδυσης της δέσμης μέσα στην περιοχική υψηλής απορρόφησης, καθώς και στη διαμόρφωση των δενδριτών που θα σχηματισθούν κατά τη σιτερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου.



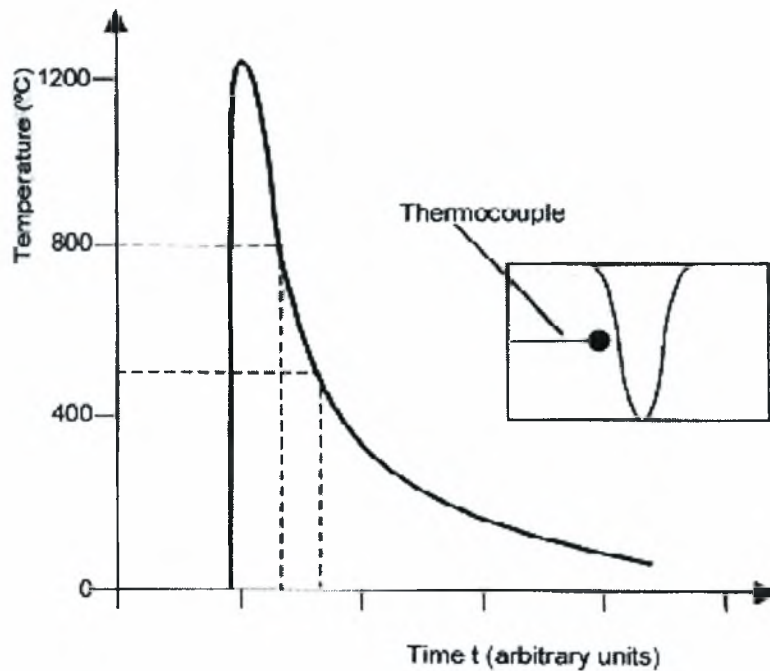
Σχήμα 1.6 : Σχηματισμός της περιοχής υψηλής απορρόφησης και ισόθερμες τήξης κατά τη συγκόλληση [3].

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πυκνότητες ενέργειας μεγαλύτερες από 10^7 W/m^2 , πραγματοποιείται υπέρμετρη εξάτμιση και καθίσταται δύσκολη η πραγματοποίηση συγκολλήσεων με λεία επιφάνεια. Η μετάβαση από την συγκόλληση με αγωγή στην συγκόλληση με περιοχική υψηλής απορρόφησης, μπορεί να επιτευχθεί, εάν η ολική ισχύς της δέσμης είναι μεγαλύτερη από 1 kW για δέσμες CO_2 laser. Αυτό ερμηνεύει το γιατί με τις πρώτες γενεές laser πηγών της τάξεως των 400 W, δεν μπορούσε να επιτευχθεί βαθιά διείσδυση, παράγοντας την συγκόλληση.

Μόλις μετά την ανάπτυξη laser πηγών πολλών kW, μπόρεσε να καταστεί η συγκόλληση με laser ελπιδοφόρα, μολονότι κάποιες εφαρμογές συγκόλλησης με αγωγή, όπως η σημειακή συγκόλληση (*spot weld*) είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία.

Στο σχήμα 1.7, παρουσιάζεται μια τυπική συγκόλληση με μεγάλο βάθος διείσδυσης σε κάλυβα πάχους 20 mm, συγκολλημένο με ταχύτητα 1 m/min και με μια δέσμη laser, ισχύος 15 kW. Ένα θερμοστοιχείο που είχε τοποθετηθεί κοντά στην ΘΕΖ, δίνει τον θερμοκρασιακό κύκλο κατά την διεργασία της συγκόλλησης. Παρατηρείται υψηλός ρυθμός θέρμανσης και ψύξης, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, ενώ ιδιαίτερη σημασία έχει ο χρόνος ψύξης μεταξύ των $800\text{ }^\circ\text{C}$ και των $500\text{ }^\circ\text{C}$, όπου λαμβάνει χώρα ο μαριενσιτικός μετασχηματισμός. Ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας παίρνει πολύ υψηλές τιμές, τάξεως $100000\text{ }^\circ\text{C/cm}$. Σε αυτό τον υψηλό ρυθμό θέρμανσης - ψύξης,

οφείλονται οι σκληρές και εύθραυστες δομές που μπορούν να εμφανιστούν σε χυτοσιδήρους.



Σχήμα 1.7 : Τυπική βαθιά συγκόλληση με θερμικό κύκλο κοντά στη ΘΕΖ, με μειρήσεις από θερμοστοιχείο [3].

Η μορφή της ζώνης τήξης στη συγκόλληση, καθορίζεται κυρίως από το βάθος και το πλάτος της, προσδιορίζεται από την πυκνότητα ισχύος της δέσμης και την διάδοση της θερμότητας στο υλικό. Η ΘΕΖ είναι μια περιοχή εξωτερικά της ζώνης τήξης, η οποία υφίσταται μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς κατά τους κύκλους θέρμανσης - ψύξης. Το μέγεθός της, είναι συνάρτηση του υλικού και του πραγματικού εφαρμοζόμενου θερμικού κύκλου.

γ) Δημιουργία του "νέφους" από πλάσμα : έναρξη και διάδοση

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα της δέσμης του laser, χαρακτηρίζεται από ένα ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, συνδυασμένη με το laser, αυξάνει με την ένταση της δέσμης και είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο του μήκους κύματος λ . Το υψηλό επίπεδο του ηλεκτρικού πεδίου θα δημιουργήσει μια εκκένωση στα αέρια, που οδηγεί σε ένα περιβάλλον θερμικά ιονισμένου μετάλλου στη ζώνη αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται νέφος πλάσματος. Η έναρξη του πλάσματος, το οποίο εξαρτάται από τη φύση του βομβαρδισμένου στόχου και του μήκους κύματος του laser, διαδίδεται από το στόχο προς την πηγή του laser. Η διάδοση του πλάσματος είναι μικρότερη από την ταχύτητα, όταν η πυκνότητα της δέσμης είναι περίπου 10^6 W/m^2 , και γίνεται υπερηχητική όταν η πυκνότητα φτάνει τα $10^7 - 10^8 \text{ W/m}^2$. Σε όλες τις περιπτώσεις, το νέφος που δημιουργείται κατά την συγκόλληση θα έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα στην προσπίπτουσα δέσμη του laser :

1. Θα απορροφήσει ένα σημαντικό μέρος της δέσμης laser, αποτρέποντάς την να φτάσει απευθείας στο δοκίμιο. Το νέφος θα υπερθερμανθεί, και θα αρχίσει να συμπεριφέρεται σαν μια δεύτερη πηγή θερμότητας, εκπέμποντας την θερμότητά του στο δοκίμιο, δρώντας ως μια πηγή θερμότητας από την επιφάνεια. Αυτό το φαινόμενο, θα επιδράσει καταλυτικά στο σχηματισμό συγκόλλησης μορφής 'καρφιού' (*nail head shape*), που συχνά συναντάται σε συγκολλήσεις, όταν η επίδραση του πλάσματος είναι σημαντική.
2. Μπορεί να υποβιβάσει την ποιότητα της δέσμης, με το να τροποποιήσει τις συνθήκες οπτικής εστίασης, όπως π.χ. να μετακινήσει το πραγματικό σημείο εστίασης της δέσμης από την αρχική της θέση.

Πολλοί τρόποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με σκοπό τη μείωση της επίδρασης του "νέφους" από πλάσμα :

1. Απομάκρυνση του νέφους με χρήση, μιας κάθετης στη δέσμη, ροής ενός ουδέτερου αερίου, όπως το ήλιο ή το αργό, που απομακρύνει το πλάσμα μηχανικά από την περιοχή αλληλεπίδρασης.

2. Η δημιουργία του πλάσματος δεν είναι αυθόρμητη, αλλά χρειάζεται κάποιο συγκεκριμένο μικρό χρόνο. Συγκεκριμένα, εάν κάποιος χρησιμοποιήσει το laser με χρονική υστέρηση, τότε δεν θα υπάρξει δημιουργία πλάσματος.
3. Όπως έχει αναφερθεί [3], μειώνοντας το μήκος κύματος ελαττώνονται τα προβλήματα από τη δημιουργία του πλάσματος. Παράλληλα, το φαινόμενο του πλάσματος, δείχνει να είναι ανάλογο της ισχύος της δέσμης, και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου του μήκους κύματος.
4. Σε συγκόλληση laser σε συνθήκες κενού (πίεση μερικών mbar), παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διεύδυση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, και η επίδραση του πλάσματος ήταν ουσιαστικά αμελητέα. Το φαινόμενο της δημιουργίας πλάσματος, ουσιαστικά εξαλείφεται σε πυκνότητες τόσο υψηλές, όπως 10^6 W/m^2 , που χρησιμοποιούνται για συγκόλληση με περιοχική υψηλής απορρόφησης. Αυτή η λύση όμως έχει το μειονέκτημα της χρησιμοποίησης ενός θαλάμου κενού ή μιας ειδικής συσκευής, προκειμένου να εξασφαλιστεί το επίπεδο της χαμηλής πίεσης γύρω από τη ζώνη αλληλεπίδρασης.
5. Η συγκόλληση με laser, συνήθως πραγματοποιείται με σχετικά υψηλές ταχύτητες. Βρέθηκε [3] πως όταν χρησιμοποιηθούν ταχύτητες μεγαλύτερες από 1 - 2 m/min, η επίδραση του πλάσματος μειώνεται. Φαίνεται πως το δημιουργούμενο πλάσμα από την αλληλεπίδραση, παραμένει πάντα πίσω από το σημείο πρόσκρουσης της δέσμης και με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η έναρξή του. Όταν χρησιμοποιηθούν χαμηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης (40 - 100 cm/min), η επίδραση του πλάσματος γίνεται σημαντική και καθίσταται επιτακτική η καταστολή του, προκειμένου να επιτευχθούν ενώσεις σωστές και σε μεγάλο βαθμό να μπορούν να αναπαραχθούν.

1.3.2 Λειτουργικές παράμετροι κατά τη συγκόλληση

Η μορφή της συγκόλλησης και η ποιότητά της, είναι σε πλήρη εξάρτηση από διάφορες παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες :

1. Σε αυτές που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της δέσμης,
2. Σε αυτές που σχετίζονται με τις μεταβλητές της συγκόλλησης,
3. Σε αυτές που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του υλικού και τη συγκολλησιμότητά του,
4. Σε αυτές που σχετίζονται με το σχεδιασμό της συγκόλλησης.

Παράμετροι συσχετισμένοι με τη δέσμη

α) Ισχύς δέσμης

Οι δέσμες laser δίδουν συνεχόμενη ισχύ (*continuous wave, cw*) ή μια σειρά διακριτών παλμών, που καθορίζονται από τη διάρκεια των παλμών και τη συχνότητα. Τα CO₂ laser συνήθως χρησιμοποιούνται σε μορφή συνεχούς λειτουργίας, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και σε παλμική μορφή. Για την συγκόλληση σε συνεχή λειτουργία, η διεύθυνση αυξάνει με την ισχύ της δέσμης για μια δεδομένη ταχύτητα συγκόλλησης. Το όριο του 1 kW για ένα CO₂ laser, πρέπει να ξεπεραστεί, προκειμένου να εμφανιστεί το φαινόμενο της περιοχής υψηλής απορρόφησης. Έχει γίνει αποδεκτό [3], πως η διεύθυνση της δέσμης p είναι μια συνάρτηση της ισχύς της δέσμης P , η οποία μπορεί να εκφραστεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8, σαν :

$$p = C \cdot P^b$$

όπου :

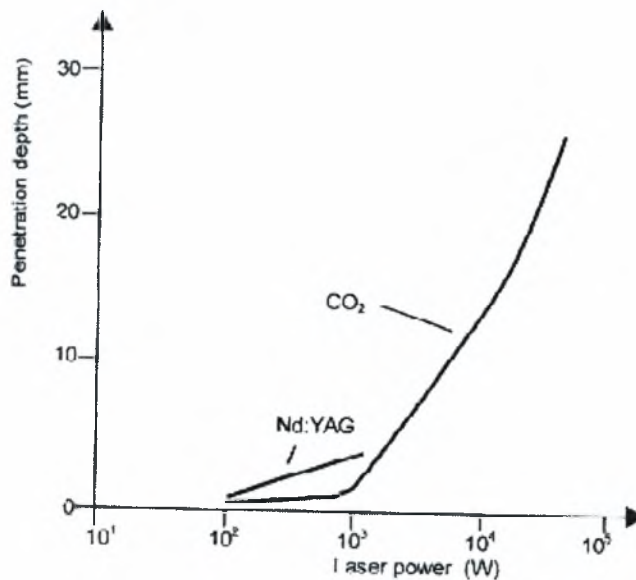
p : είναι η διεύθυνση της δέσμης

P : είναι η ισχύς της δέσμης

b : παίρνει τιμές 0.7 ή 0.8

Για την παλμική συγκόλληση, η ένωση μπορεί να είναι σημειακή συγκόλληση ή μια συνεχή ένωση, που πραγματοποιείται με μια συνέχεια αλληλοκαλυπτόμενων σημείων. Η αλληλοκάλυψη μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει το 80%. Συνήθως η ένωση είναι μια συνέχεια συγκολλήσεων αγωγής, αλλά εάν ο ρυθμός επανάληψης είναι ικανοποιητικά υψηλός, η περιοχική υψηλής απορρόφησης μπορεί να διατηρηθεί, προκειμένου να αποκτηθεί συνεχής ένωση.

Για την ίδια ταχύτητα συγκόλλησης και την ίδια μέση ισχύ, το Nd:YAG laser, έχει τη δυνατότητα να παράγει συγκολλήσεις με μεγαλύτερη διείσδυση από το CO₂ laser. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο μήκος κύματος, το οποίο επιτρέπει καλύτερη εστίαση και επομένως υψηλότερη πυκνότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.



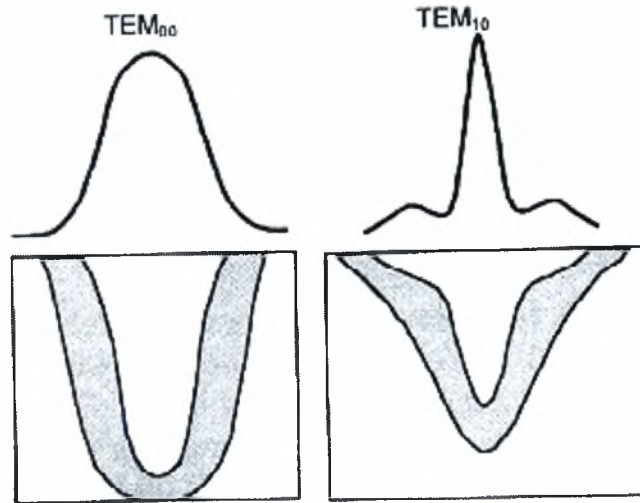
Σχήμα 1.8 : Διαφορά στο βάθος διείσδυσης p σαν συνάρτηση της ισχύος της δέσμης P σε κάλυβα με ταχύτητα συγκόλλησης 1 m/min [3].

β) Κατανομή της ισχύος της δέσμης (TEM)

Σε σταθερές και μεταβλητές κοιλότητες, διαφορετικές μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (*Transverse Electromagnetic Mode* - TEM) μπορούν να συμβούν. Αυτές οι μορφές, καθορισμένες από το (TEM), δίνουν μια ποικιλία πιθανών κατανομών της ενέργειας, σε μια κάθετη τομή της δέσμης, ή διαφορετικά, η δυνατότητα της εστίασης της δέσμης του laser, εξαρτάται από την (TEM).

Όταν η κατανομή της δέσμης είναι *Gaussian*, τότε η μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι TEM₀₀. Τότε η διάμετρος της δέσμης μπορεί να αποκτήσει την

μικρότερη δυνατή τιμή στο σημείο εστίασης, ενώ προφανώς η πυκνότητα ενέργειας λαμβάνει την μέγιστη τιμή της. Για μια δέσμη που ακολουθεί την κατανομή *Gauss* η διάμετρος της ορίζεται ως το $1/e^2$ της αρχικής ισχύος του laser. Έτσι η εστιασμένη δέσμη περιέχει περίπου το 87% της συνολικής αρχικής ισχύος.



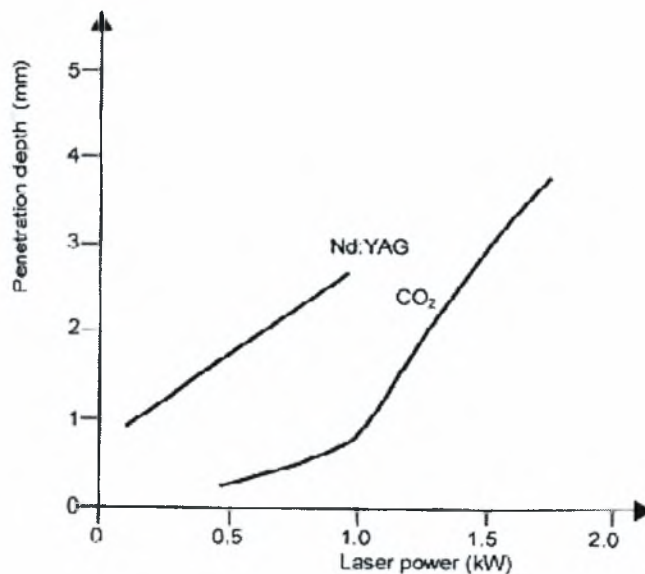
Σχήμα 1.9 : Επίδραση του *mode* στην συγκόλληση [3].

γ) Μήκος κύματος

Έχει ήδη δειχτεί πως το μήκος κύματος της δέσμης του laser, επιδρά στα διαφορετικά φαινόμενα, που συνοδεύουν την συγκόλληση :

1. απορροφητικότητα της δέσμης του laser από το υλικό,
2. εστίαση της δέσμης, η οποία είναι ανάλογη του μήκους κύματος,
3. σχηματισμός του πλάσματος στη ζώνη αλληλεπίδρασης.

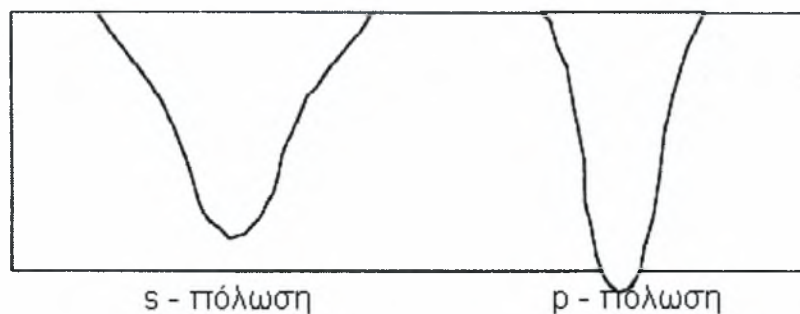
Στο σχήμα 1.10, συγκρίνεται η διεύθυνση της δέσμης ενός Nd:YAG και CO₂ laser, της ίδιας ισχύος. Πρέπει όμως να σημειωθεί το γεγονός, πως σε πολύ υψηλές ενέργειες (>10 kW), η επίδραση του μήκους κύματος δεν είναι τόσο ζωτικής σημασίας σε γενικότερες εφαρμογές συγκολλήσεων σε μεγάλα πάχη.



Σχήμα 1.10 : Μειαβολή της διείσδυσης της δέσμης για CO₂ και Nd:YAG [3].

δ) Πόλωση

Η πόλωση μιας δέσμης laser, αναφέρεται στον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου στην κατεύθυνση της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Σε μια μη-πολωμένη δέσμη, το πεδίο προσανατολίζεται κατακόρυφα της κατεύθυνσης διάδοσης. Σε γραμμικά πολωμένες δέσμες, το ηλεκτρικό πεδίο είναι πάντοτε προσανατολισμένο, παράλληλα στην ίδια κατεύθυνση. Τέτοιες δέσμες, θα δώσουν διαφορετικές μορφές συγκόλλησης σε δύο κατακόρυφες κατευθύνσεις. Το σχήμα 2.11, δείχνει αυτή την επίδραση. Από την άλλη πλευρά, καθίσταται πλεονεκτική σε περιπτώσεις γραμμικών συγκολλήσεων, η χρησιμοποίηση γραμμικά πολωμένων δεσμών, των οποίων ο προσανατολισμός είναι δεδομένος σε σχέση με τη ραφή. Τέτοια εφαρμογή, χρησιμοποιείται κυρίως σε συγκολλήσεις σωλήνων.

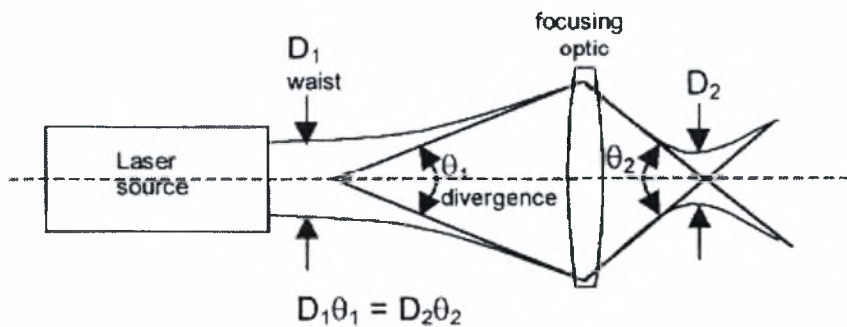


Σχήμα 1.11 : Επίδραση της πόλωσης σε δύο κάθετες τομές μιας κυκλικής συγκόλλησης [3].

Η πόλωση της δέσμης του laser, μπορεί να δημιουργηθεί από τους καθρέπτες στην κοιλότητα του CO₂ laser. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, πως η γραμμικά πολωμένες δέσμες, μπορούν να μετατραπούν σε κυκλικά πολωμένες δέσμες, με την προσθήκη μίας οπτικής συσκευής, που αποτελείται από 2 ή 4 καθρέπτες με τις κατάλληλες διπλοδιαθλαστικές επικαλύψεις, που βρίσκονται σωστά στο οπτικό πέρασμα του laser.

Παράμετροι συσχετισμένοι με τη διεργασία

Αυτοί οι παράμετροι σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της δέσμης, τη σχετική κίνηση της δέσμης με το δοκίμιο και το γύρω περιβάλλον σχετικά με τη ζώνη αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 1.12 : Χαρακτηριστικά της δέσμης, διάμετρος και απόκλιση [3].

ε) Διάμετρος δέσμης και εστίαση

Η δέσμη του laser, καθορίζεται από το μήκος κύματος λ , διαδίδεται από τον διαπερατό καθρέπτη της πηγής με μια συγκεκριμένη απόκλιση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.12. Η συσκευή εστίασης (φακοί ή καθρέπτες), συγκεντρώνει τη δέσμη σε ένα σημείο, του οποίου η διάμετρος είναι :

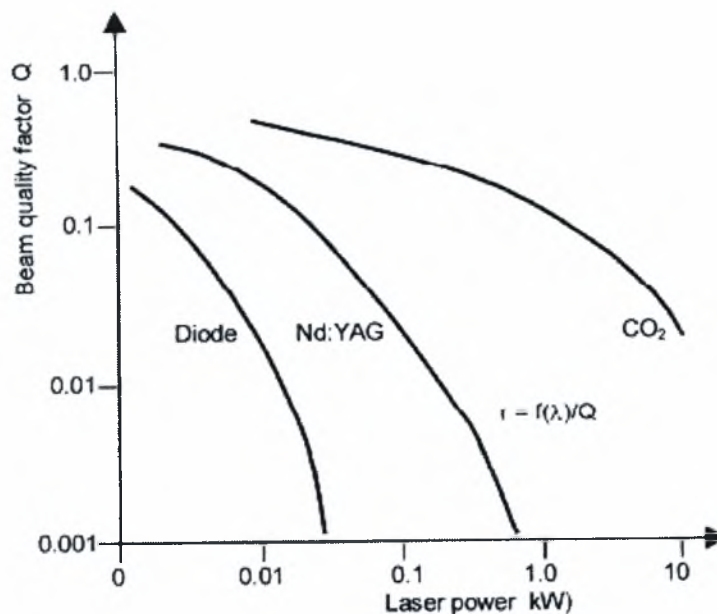
$$d = C \cdot \lambda \cdot \frac{f}{D}$$

όπου :

- C** : είναι σταθερά ίση με $C = 2.44$ για μια *Gaussian* δέσμη TEM₀₀, και μπορεί πάρει μεγαλύτερες τιμές για δέσμες με πολλαπλά modes.
- f** : είναι το εστιακό μήκος της συσκευής εστίασης, που είναι συνήθως περίπου 75-100 mm για τα laser χαμηλής ισχύος και 60-1000 mm για δέσμες υψηλής ισχύος (>10 kW).
- D** : είναι η διάμετρος της δέσμης στο οπτικό εστίασης.

Υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον καθορισμό της διαμέτρου της δέσμης στην εστίαση, μολονότι για αυτή τη μέτρηση υπάρχουν αρκετές συσκευές, καθώς και για τη απ' ευθείας μέτρηση της πυκνότητας. Παράλληλα, τα όρια της *Gaussian* κατανομής, δεν είναι ακριβέστατα καθορισμένα, και η διάμετρος της δέσμης μπορεί να οριστεί συμβατικά ως I_0/e^2 , I_0/e , ή από τη διάμετρο που περιέχει ένα δεδομένο ποσοστό της ισχύος της δέσμης, π.χ. 80% ή 90%. Σε κάθε περίπτωση, η διάμετρος της δέσμης, δεν μπορεί να διαχωριστεί, σε εφαρμογές συγκόλλησης, από την πυκνότητα, η οποία είναι ουσιαστικά διαθέσιμη στο άκρο της διαμέτρου, που εισέρχεται στην περιοχική υψηλής απορρόφησης.

Πρακτικά, η δυνατότητα εστίασης της δέσμης laser, εξαρτάται από την ολική ισχύ της δέσμης που μεταφέρεται στο δοκίμιο. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο, τόσο πιο δύσκολη είναι η εστίαση στην θεωρητική της τιμή. Στο σχήμα 1.13, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα CO₂, Nd:YAG και Diode lasers (οι συνηθέστερες πηγές που χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις), και για διάφορες ισχύς.



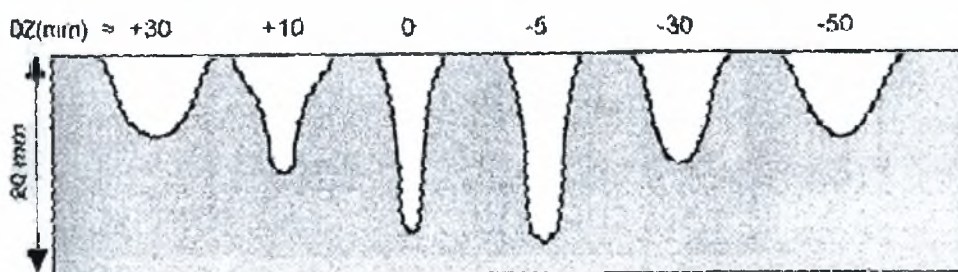
Σχήμα 1.13 : Διακύμανση του παράγοντα ποιότητας δέσμης Q για διαφορετικά είδη laser και διάφορες ισχύς [3].

Άλλη μια σημαντική παράμετρος στη συγκόλληση είναι το βάθος της εστίασης της συγκεντρωμένης δέσμης. Αυτή η παράμετρος είναι ουσιαστικά το μήκος στον άξονα του laser, όπου η πυκνότητα της δέσμης, μειώνεται έως ένα συγκεκριμένο ποσοστό, και είναι όπου η διάμετρος της δέσμης αυξάνεται κατά μια συγκεκριμένη τιμή. Συνήθως, προκειμένου να αποκτηθεί μια μεταβολή 10% στην I , η διάμετρος της δέσμης πρέπει να αυξηθεί κατά 5%. Το βάθος της εστίασης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλου πάχους, π.χ. για > 5 mm πάχος, και λιγότερο σημαντικό για συγκολλήσεις σε ελάσματα με μικρό πάχος.

στ) Θέση του σημείου εστίασης στην επιφάνεια

Στη συγκόλληση σχετικά λεπτών ελασμάτων < 5 mm, το σημείο εστίασης συνήθως τοποθετείται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Όταν συγκολλούνται ελάσματα, σχετικά μεγάλου πάχους > 10 mm, το σημείο εστίασης μπορεί να βρεθεί μέσα στο δοκίμιο, σε ένα δεδομένο βάθος, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διείσδυση. Σε μερικές άλλες περιπτώσεις, αποκτά ενδιαφέρον η αποεστίαση της δέσμης και θέτοντας το σημείο εστίασης, πάνω από την επιφάνεια, με απώτερο στόχο, την κάλυψη κάποιων μικρο-ανωμαλιών στην επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτό, μπορεί να επιτευχθεί είτε εστιάζοντας

πάνω από την επιφάνεια ή κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, θα υπάρξει μια μείωση στην ένταση της δέσμης, η οποία πρέπει να παραμείνει μέσα στα απαιτούμενα όρια, για να επιτευχθεί σωστή συγκόλληση. Στο σχήμα 1.14, παρουσιάζεται η επίδραση της θέσης του εστιακού σημείου, σε φύλλο χάλυβα 20 mm με δέσμη 15 kW και με ένα εστιακό μήκος 600 mm.



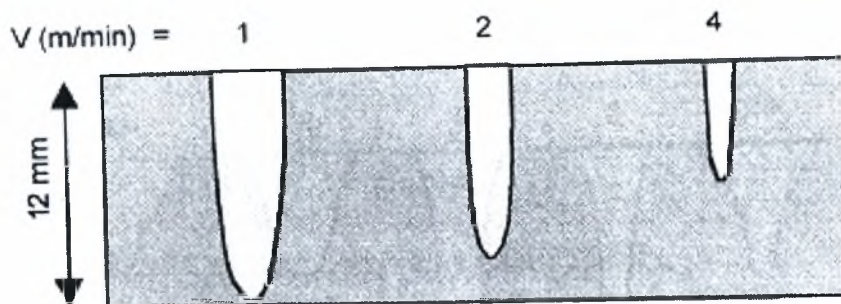
Σχήμα 1.14 : Μεταβολή στη μορφή της συγκόλλησης σε συνάρτηση με το εστιακό σημείο στην επιφάνεια του δοκιμίου. $P = 15 \text{ kW}$, $v = 1 \text{ m/min}$, $f = 600 \text{ mm}$, $t = 20 \text{ mm}$ [3].

ζ) Ταχύτητα συγκόλλησης

Για μια δεδομένη ισχύ της δέσμης, η διεύθυνση της συγκόλλησης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας συγκόλλησης, όπως έχει προταθεί από τη θεωρία μεταφοράς θερμότητας. Στο σχήμα 1.15, παρουσιάζονται μερικές τομές συγκόλλησης σε χάλυβα, σε διαφορετικές ταχύτητες, που ουσιαστικά επιβεβαιώνουν της προηγούμενη σχέση.

Σε αρκετά υψηλές ταχύτητες (1 - 5 m/min), υπάρχει η πιθανότητα να σχηματιστεί κύρτωση, δημιουργώντας ασυνέχειες στο στερεοποιημένο μέταλλο. Αυτό οφείλεται στη δυναμική φύση της κίνησης του τηγμένου μετάλλου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του τηγμένου μετάλλου, τόσο πιο δύσκολη είναι η διατήρηση και η σταθεροποίηση της ισορροπίας. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί ένα πραγματικό περιορισμό για τις υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, που μπορούν να επιτευχθούν χωρίς επαφή μεταξύ του σιόχου και της πηγής θερμότητας.

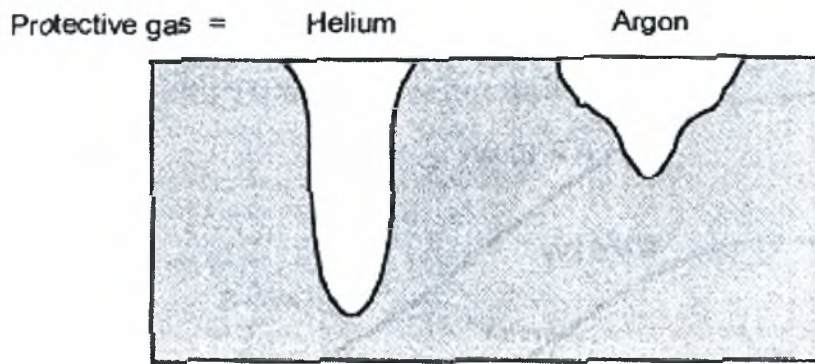
Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης ταχυτήτων $> 2 \text{ m/min}$, είναι η ασθενή επίδραση του πλάσματος κατά τη συγκόλληση.



Σχήμα 1.15 : Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στη μορφή της συγκόλλησης.
 $P = 10 \text{ kW}$, $f = 600 \text{ mm}$ [3].

η) Προστατευτικό αέριο και περιβάλλον γύρω από τη ζώνη αλληλεπίδρασης

Η προστασία του τηγμένου μετάλλου από την οξείδωση κατά τη συγκόλληση, αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα, προκειμένου να επιτευχθεί σωστή συγκόλληση. Η προστασία αυτή, συνήθως επιτυγχάνεται στις συμβατικές συγκολλήσεις τόξου, με κατάλληλο προστατευτικό αέριο, το οποίο μπορεί να είναι ήλιο ή αργό. Για οικονομικούς λόγους, καθίσταται προτιμότερη η χρησιμοποίηση του αργό, το οποίο είναι πολύ πιο φθηνό στην Ευρώπη, σε σχέση με το ήλιο. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως με προστατευτικό αέριο το ήλιο, μπορούν να παραχθούν βαθύτερης διεύθυνσης συγκολλήσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.16, λόγω του υψηλού δυναμικού ιονισμού (24.46 eV σε σχέση με 15.68 eV για το αργό). Παρ' όλα αυτά, σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, χρησιμοποιείται για οικονομικούς λόγους το αργό, θυσιάζοντας μέρος της απόδοσης σε διεύθυνση.

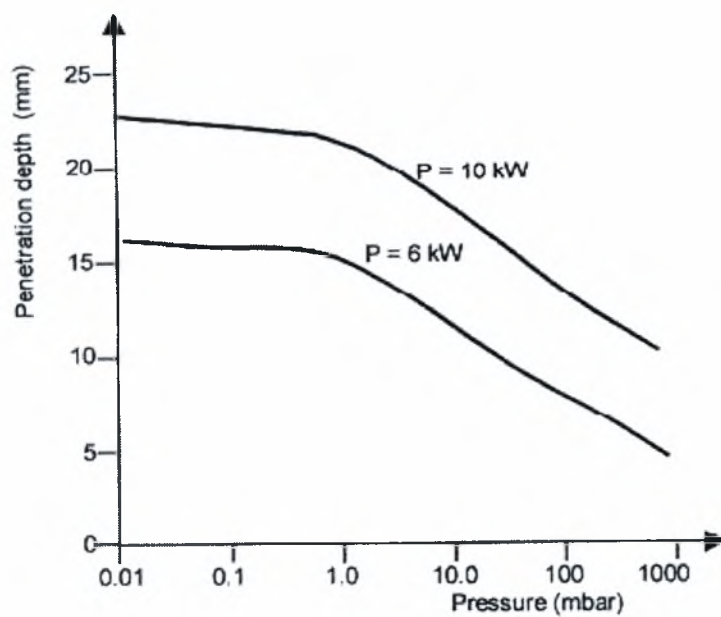


Σχήμα 1.16 : Επίδραση του προστατευτικού αερίου στη μορφή της συγκόλλησης.
 $P = 5 \text{ kW}$, $v = 1 \text{ m/min}$, $f = 450 \text{ mm}$ [3].

Άλλος ένας σημαντικός ρόλος του προστατευτικού αερίου, είναι η απομάκρυνση του πλάσματος από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ειδικά σχεδιασμένα ακροφύσια, τα οποία προσανατολίζουν ένα προστατευτικό αέριο (ήλιο ή αργό) στη σωστή κατεύθυνση, προκειμένου να απομακρύνουν το πλάσμα από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Υπάρχουν πολλά εμπορικά συστήματα για την απομάκρυνση του πλάσματος, ανάλογα με το είδος και τη γεωμετρία της συγκόλλησης (γραμμική ή κυκλική). Οι παράμετροι που επηρεάζουν της απόδοση της απομάκρυνσης του πλάσματος είναι :

1. Η ροή του αερίου,
2. Η κατεύθυνση της ροής, πρέπει να είναι ικανή να εξαλείψει το πλάσμα, χωρίς να αναταράσσει το τηγμένο μέταλλο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, προκειμένου να αποφευχθούν ανωμαλίες και ατέλειες στην ποιότητα της συγκόλλησης,
3. Η ταχύτητα του αερίου που βγαίνει από το ακροφύσιο.

Η συγκόλληση με laser υπό συνθήκες κενού ($< 10^{-3} \text{ mbar}$), βελτιώνει σημαντικά τη διεσδυτικότητα της δέσμης, καθώς και την επίδραση του πλάσματος στη ζώνη αλληλεπίδρασης, η οποία εξαφανίζεται σε χαμηλές πιέσεις. Στο σχήμα 1.17, παρουσιάζεται η διείδυση που μπορεί να επιτευχθεί σε διαφορετικές πιέσεις για μια δεδομένη ισχύ δέσμης και ταχύτητα συγκόλλησης. Πρέπει να σημειωθεί πως ακόμα για πιέσεις στο επίπεδο του mbar, η απόδοση βελτιώνεται. Τέλος, μολονότι τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά λόγω κόστους, δεν καθίσταται δυνατή η χρησιμοποίηση στη βιομηχανία, αλλά μόνο στα ερευνητικά κέντρα.



Σχήμα 1.17 : Επίδραση του κενού στην διείσδυση της δέσμης σε κάλυβα, σε ταχύτητα, $v = 1 \text{ m/min}$ [3].

1.4 Χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων

1.4.1 Τύποι συγκόλλησης και γεωμετρία των συγκολλήσεων

Είναι απαραίτητο χαρακτηριστικό, η γνώση της τελικής χρησιμοποίησης της συγκόλλησης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η σχεδίασή της. Γενικά, μπορεί κανείς να διαχωρίσει δύο ειδών συγκολλήσεων :

1. Συγκολλήσεις που υποβάλλονται σε σχετικά χαμηλά φορτία. Μερικές φορές, απαιτείται υψηλή ποιότητα, για να επιτευχθεί τέλεια στεγανοποίηση, μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων της ύλης.
2. Συγκολλήσεις που υποστηρίζουν μηχανικές δυνάμεις, στατικού ή δυναμικού φορτίου.

Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.18, οι τύποι της συγκόλλησης, μπορούν να ταξινομηθούν ως :

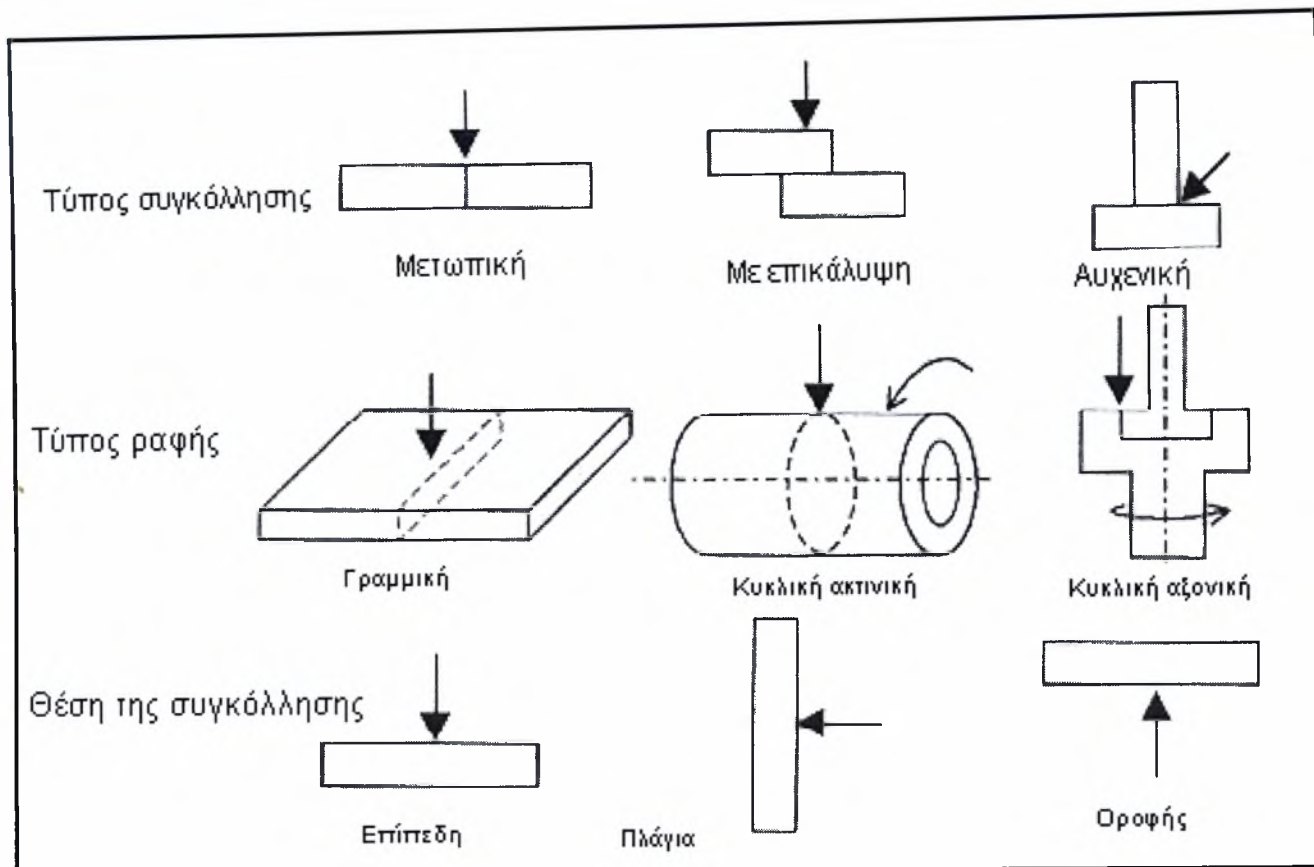
1. συγκόλληση συμβολής ή μειωπική συγκόλληση (*butt weld*),
2. συγκόλληση με επικάλυψη, με πολλές παραλλαγές (*lap weld*),
3. αυθενική συγκόλληση (*Tee weld*).

Ο τύπος της ραφής, μπορεί να είναι :

1. γραμμική (*linear*),
2. κυκλική ακτινική (*circular radial*) ή κυκλική αξονική (*circular axial*).

Η συγκόλληση μπορεί να είναι :

1. συνεχής,
2. σημειακές συγκολλήσεις επικάλυψης ή μια διαδοχή μικρών συγκολλήσεων,
3. σημειακές συγκολλήσεις (*spot weld*).

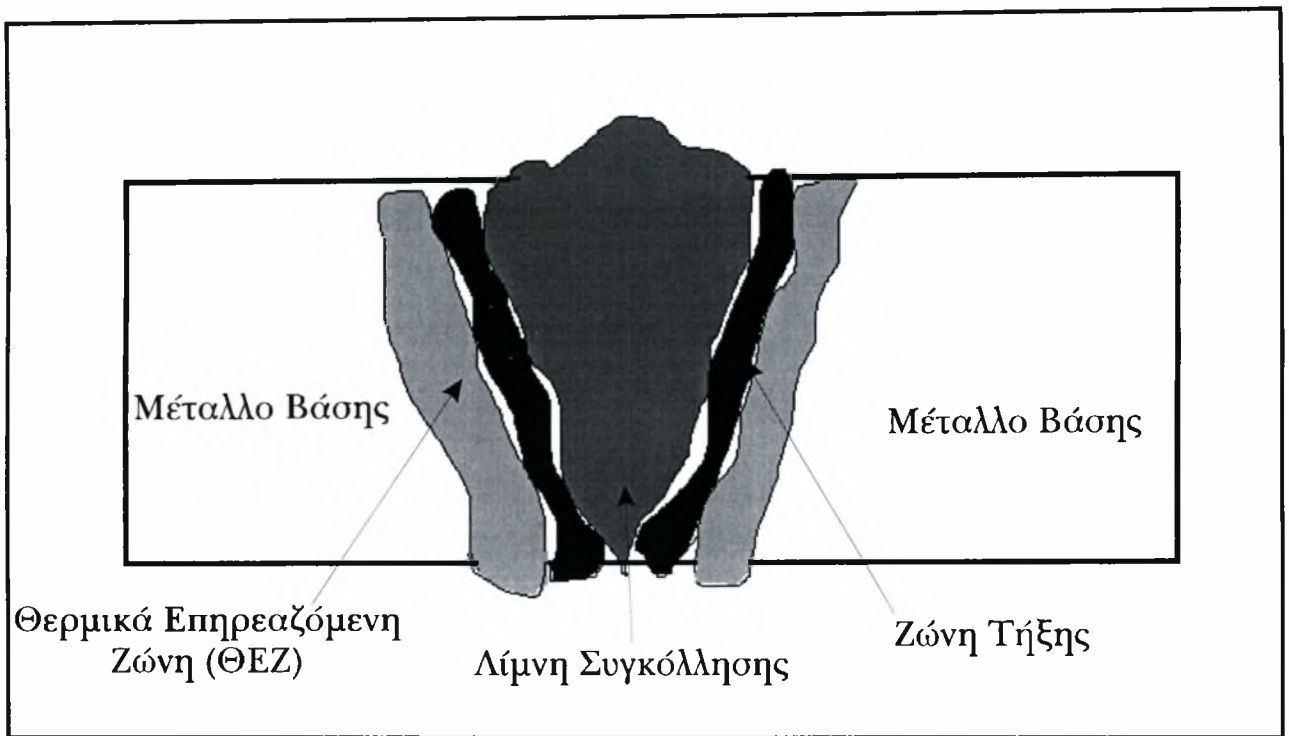


Σχήμα 1.18 : Διαφορετικοί τύποι συγκόλλησης, ραφών και θέσεων συγκόλλησης [3].

Η συγκόλληση μπορεί επίσης να είναι πλήρους διείσδυσης ή μερικής διείσδυσης. Ο άξονας της δέσμης μπορεί να είναι κάθετος (στην επίπεδη θέση), οριζόντιος (στην πλάγια θέση). Τέλος μπορεί να εντοπιστεί σε επίπεδο (2D) ή στο χώρο (3D). Η ιδανική μορφή μιας συγκόλλησης με laser, είναι :

1. πλήρης διείσδυση, με σκοπό την ομογενοποίηση και την αποφυγή παραμορφώσεων,
2. κανονικές και ελαφρά κεκλιμένες πλευρές, για να διευκολυνθεί η έξοδος των αερίων που προέρχονται από το τηγμένο μέταλλο,
3. κανονικά πάνω και κάτω επίπεδα, χωρίς *undercut*, για καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση.

Η επίπεδη θέση συγκόλλησης είναι η πιο πρακτική και ικανοποιητική, όταν το πάχος της συγκόλλησης είναι < 10 mm. Σε μεγαλύτερα πάχη, είναι προτιμότερη η πλάγια θέση, με σκοπό, η επίδραση της βαρύτητας, να μην επηρεάσει την σιεροποίηση του μετάλλου. Η μορφή της συγκόλλησης, θα είναι ασύμμετρη για ελάσματα πολύ μεγάλου πάχους.



Σχήμα 1.19 : Γεωμετρία σε συγκόλληση τήξης.

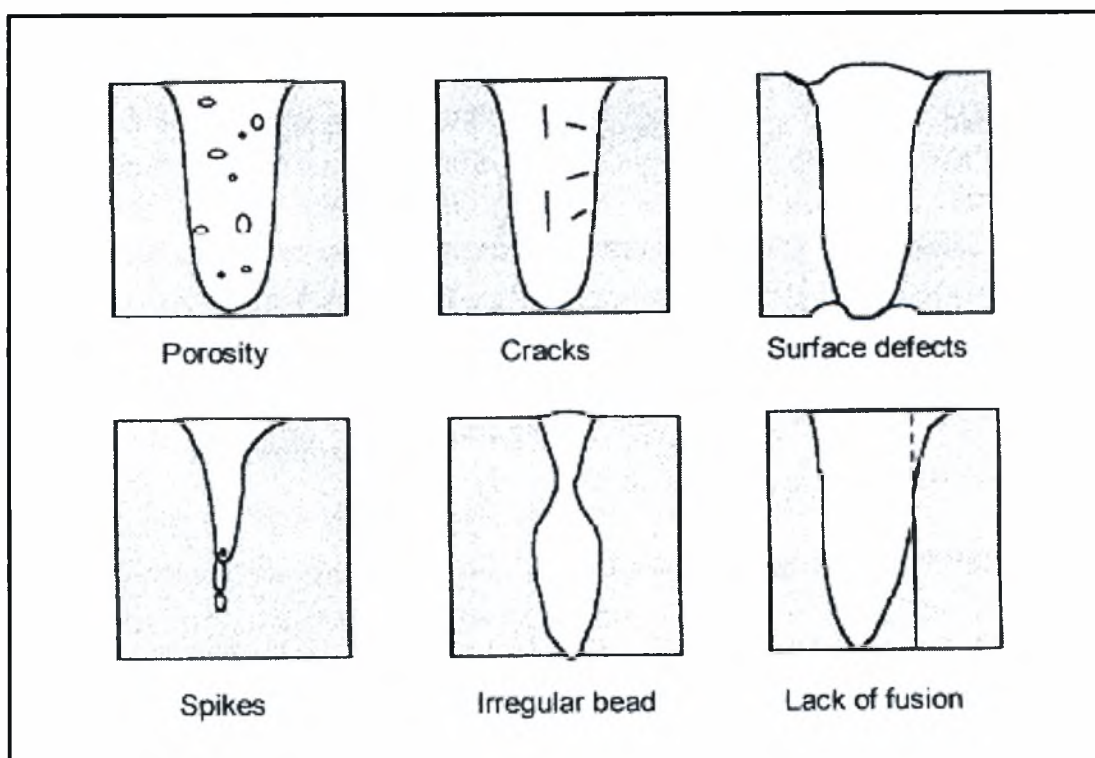
Η φύση της συγκόλλησης, συνεχής ή διακεκομμένη, καθορίζεται από τη τελική χρήση του εξαρτήματος. Τρανιαχτό παράδειγμα, αποτελούν τα διάφορα μέρη του σκελετού του αυτοκινήτου, που συγκολλούνται με συνεχή τρόπο, και προσφέρουν ακαμψία στο αυτοκίνητο. Όμως, αυτή η υψηλή ακαμψία είναι αρκετά ζημιογόνα στην ασφάλεια των επιβαίων σε περίπτωση σύγκρουσης. Η καλύτερη λύση είναι η κατασκευή ασυνεχών συγκολλήσεων, οι οποίες δίδουν δομή μικρότερης ακαμψίας, με σκοπό τη παραμόρφωση, κάτω από μια σύγκρουση, και να απορροφήσουν ένα μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται από την κρούση.

1.4.2 Σφάλματα συγκολλήσεων

Οι μη-καταστρεπτικές μέθοδοι ποιοτικού ελέγχου, χρησιμοποιούνται ευρέως για την τελική αποδοχή της κατασκευής που συγκολλήθηκε με τήξη. Μια αντιπροσωπευτική κατάταξη των ατελειών, δίδεται από άρθρο του *International Institute of Welding* [4], στο οποίο οι ατέλειες υποδιαιρούνται στις ακόλουθες ομάδες :

1. Ρήγματα
2. Σπηλαιώσεις - Κοιλότητες
3. Στερεά Εγκλείσματα
4. Ατελής τήξη και διείδυση
5. Ατελές σχήμα

Βασικά χαρακτηριστικά των οφθαλμάτων αυτών καθώς και των αιτιών που τα προκαλούν, αναπτύσσονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.20 : Διαφορετικοί τύποι ατελειών, οι οποίοι μπορούν να συμβούν σε συγκόλληση με laser [3].

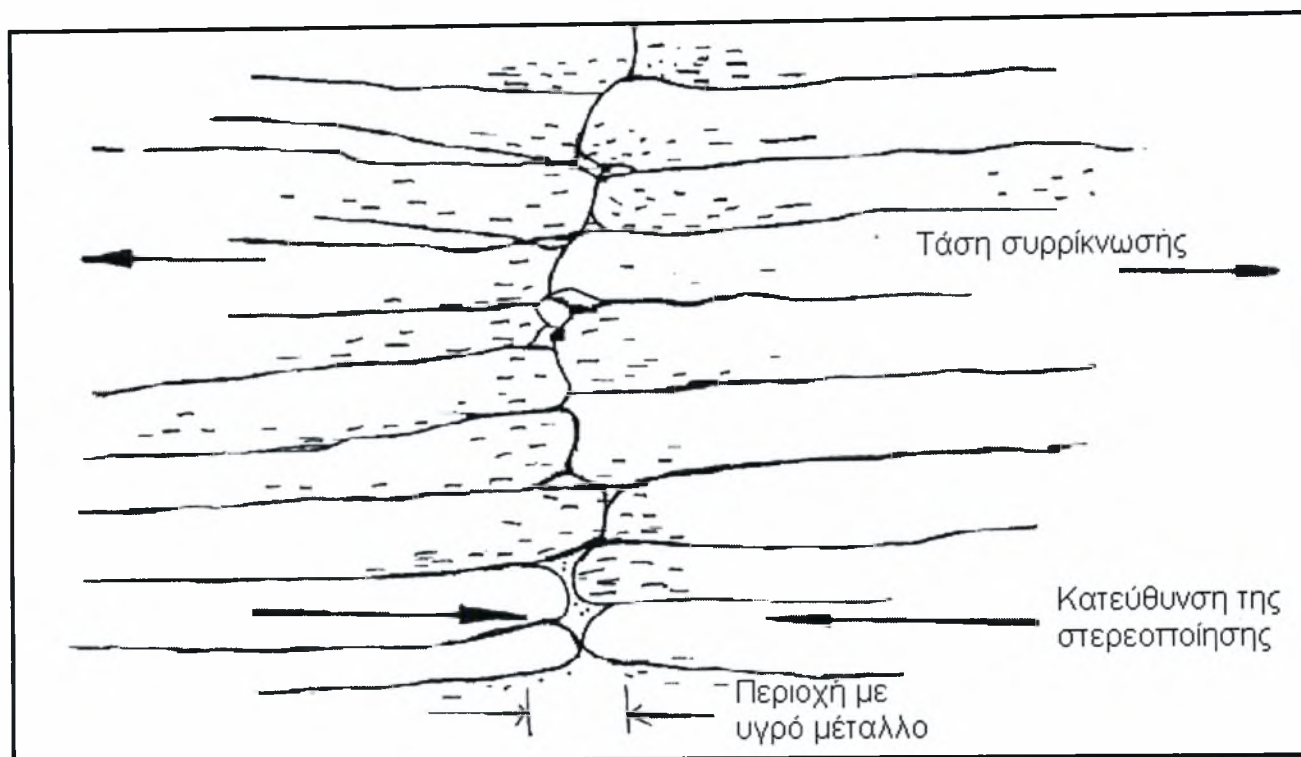
i) Ρήγματα

Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί, από τους οποίους, υπάρχει η πιθανότητα σχηματισμού ρηγμάτων στην περιοχή της συγκόλλησης, ειδικά εάν κάποιος λάβει υπόψη του την πληθώρα των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μηχανήματα, και τα οποία πρέπει να συγκολληθούν με τήξη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των ρηγμάτων σε χάλυβες από τα πρακτικά του *Welding Institute* [4]. Οι κυριότερες περιπτώσεις ρηγματώσεων, είναι :

- (α) Ρηγμάτωση κατά την στερεοποίηση,
- (β) Ψυχρή ρηγμάτωση λόγω εγκλωβισμού υδρογόνου στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη,
- (γ) Διαοιρωματική διάσχιση,
- (δ) Ρηγμάτωση λόγω επαναθέρμανσης.

(α) Ρηγμάτωση κατά την στερεοποίηση

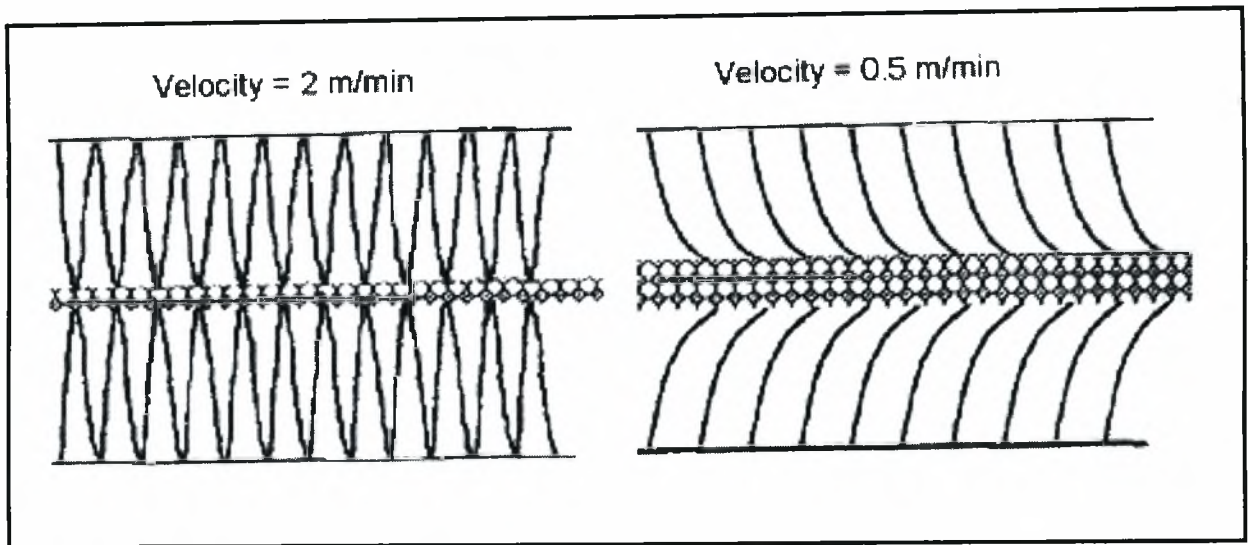
Στα πιο πολλά εμπορικά κράματα, η διαλυτοποίηση, εξαιτίας των διαφορετικών ρυθμών ψύξης, λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης της συγκόλλησης και παρουσιάζεται με λεπτές μεμβράνες υγρού ανάμεσα στους στερεοποιημένους κόκκους, οι οποίες ευνοούνται από στοιχεία όπως ο *S* και *P* που παρουσιάζουν μικρό σημείο τήξης [3]. Εάν αυτή η κατάσταση συμπίπτει με την παρουσία θερμικών εφελκυστικών παραμορφώσεων, οι μεμβράνες αυτές που έχουν πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, θα διαρρηχθούν και θα καταλήξουν σε ρήγματα στερεοποίησης. Ορισμένα υλικά, είναι εξαρχής ευαίσθητα σε τέτοιου είδους ρηγμάτωση, εξαιτίας της σύνθεσής τους ή εξαιτίας του μεγάλου εύρους του ρυθμού στερεοποίησης, όπως ο μπρούνιζος, που είναι πολύ επιρρεπής σε τέτοιου είδους ρηγμάτωση. Αυτή την ιδιότητα, την κατέχουν πολλά κράματα αλουμινίου, και συνήθως η λύση σε τέτοια προβλήματα εμπλέκει τη δημιουργία μιας δραστηκής αλλαγής στη σύνθεση του λιωμένου υλικού, προκειμένου να δώσει μια τελική σύνθεση της συγκόλλησης, με μικρότερο εύρος στον ρυθμό ψύξης.



Σχήμα 1.21 : Μηχανισμός της ρηγματώσης κατά τη στερεοποίηση [4].

Μολονότι η χημική σύσταση του λιωμένου υλικού, είναι ένας από τους κύριους παράγοντες στον καθορισμό εάν υπάρχει ή όχι κίνδυνος ρηγματώσης κατά την στερεοποίηση, πρέπει να σημειωθεί πως το ρήγμα δεν θα συμβεί, εάν δεν λάβουν χώρα ταυτόχρονα οι θερμικές εφελκυστικές παραμορφώσεις.

Η ταχύτητα της συγκόλλησης είναι μια σημαντική παράμετρος, αφού καθώς αυξάνει η ταχύτητα, αυξάνει και η προδιάθεση για ρηγματώση. Οι υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης τείνουν να δημιουργήσουν μία κεντρική οριακή γραμμή, η οποία δεν μπορεί εύκολα να παραλάβει την παραμόρφωση κατά την στερεοποίηση, ενώ χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης, παράγουν μεγάλους δενδρίτες, που μπορούν να υποστηρίξουν τις παραμορφώσεις. Η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην στερεοποιημένη δομή, φαίνεται στο σχήμα 1.22. Το εγκάρσιο προφίλ μιας ραφής συγκόλλησης είναι σημαντικό, καθώς ρηγματώσεις στο κέντρο μπορούν να δημιουργηθούν, εάν η ραφή είναι πολύ σιενή και βαθιά, ή πολύ πλατιά και ρηχή.



Σχήμα 1.22 : Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην στερεοποιημένη δομή [3].

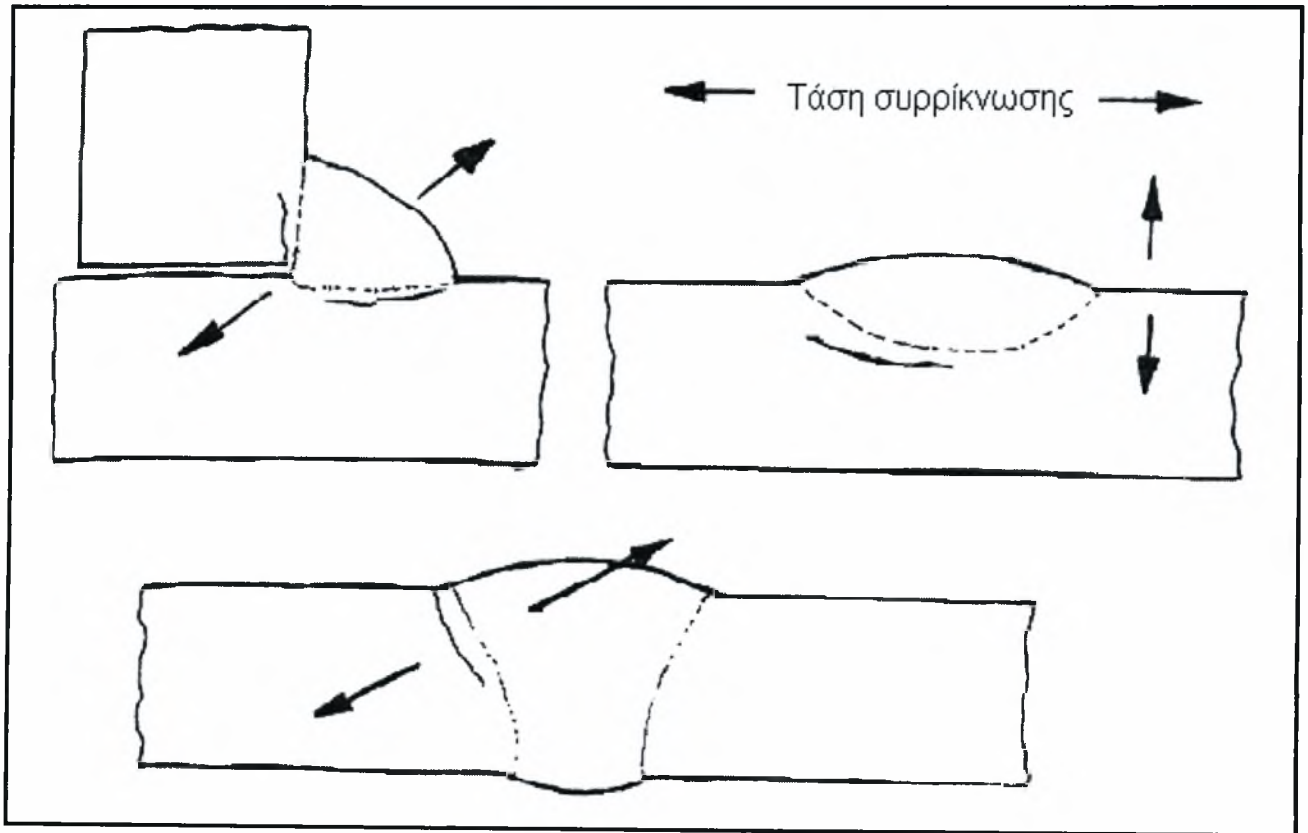
(β) Ψυχρή ρηγματίωση λόγω εγκλωβισμού υδρογόνου στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη

Αυτός ο τύπος ρηγματίωσης, είναι ένα φαινόμενο, το οποίο μπορεί να συμβεί στη συγκόλληση σκληρυμένων φερριτικών καλύβων. Πάντοτε λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μικρότερες των 150 °C.

Τρεις παράγοντες εμπλέκονται : η παρουσία υδρογόνου, παραμένουσες τάσεις και η μικροδομή. Το υδρογόνο προέρχεται από τα αναλώσιμα της συγκόλλησης, αλλά περισσότερο από υγρασία κατά τη ροή υλικού, καθώς και από την παρουσία ακαθαρσιών - ρύπων στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης. Το υδρογόνο, είναι πολύ διαλυτό στο συγκολλημένο μέταλλο, όταν βρίσκεται σε τηγμένη κατάσταση, αλλά σχεδόν αδιάλυτο σε θερμοκρασία δωματίου. Διαχέεται από τη λίμνη τήξης στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και στη κοντινή περιοχή του μετάλλου βάσης, με ρυθμό που εξαρτάται από την θερμοκρασία. Ο ρυθμός ψύξης του λιωμένου μετάλλου, καθώς και το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης έχουν παράλληλα σημαντική επίδραση. Όσο μεγαλύτερη είναι η λίμνης συγκόλλησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το υδρογόνο να διαφύγει πριν τη στερεοποίηση.

Η ευαισθησία σε ρηγματίωση υδρογόνου, μεγαλώνει με την σκληρότητα της θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης και η σκληρότητα αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, και σε ένα μικρότερο βαθμό με την αύξηση της περιεκτικότητας διαφόρων κραματικών στοιχείων. Η ρηγματίωση εξαιτίας του υδρογόνου, μπορεί να αποτραπεί με την αποφυγή υψηλών σκληροτήτων στη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, με έλεγχο της χημικής σύστασης, το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης, καθώς και του πάχους του ελάσματος. Η

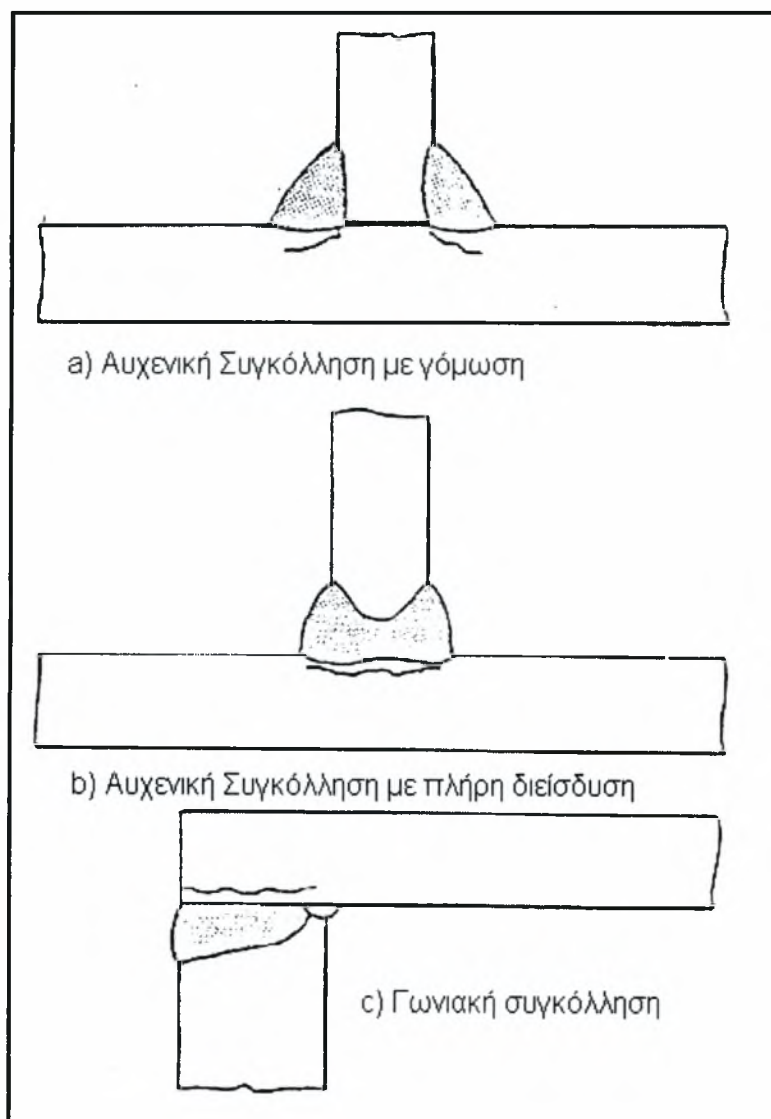
ρηγμάτωση εξαιτίας του υδρογόνου, μπορεί επίσης να συμβεί σε λιωμένο μέταλλο όπου οι χημικές συστάσεις συνήθως καταλήγουν σε χαμηλότερη σκληρότητα. Παρόλο την πιθανότητα, η περιεκτικότητα σε υδρογόνο να είναι μεγάλη, χαμηλή σκληρότητα καταλήγει σε μικρή προδιάθεση για ρήγμα.



Σχήμα 1.23 : Τυπικές θέσεις για ρηγμάτωση με παρασυρμένο υδρογόνο στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη [4].

(γ) Διαστρωματική διάσχιση

Η διαστρωματική διάσχιση είναι ένα πρόβλημα που οφείλεται στην χαμηλή ολκιμότητα κατά το πάχος του ελάσματος. Η ρηγμάτωση έχει μια χαρακτηριστική εμφάνιση σκαλοπατιού, με τα σκαλιά να είναι παράλληλα με την επιφάνεια, στην οποία πραγματοποιήθηκε συγκόλληση. Η τάση του υλικού για διαστρωματική διάσχιση, εξαρτάται κυρίως από τη διασπορά των εγκλεισμάτων στη λίμνη συγκόλλησης. Τα είδη των εγκλεισμάτων που αυξάνουν το ενλόγω πρόβλημα, είναι λωρίδες από μαγγανιούχα πυριτικά άλατα, σουλφίδια μαγγανίου και οξειδία του αλουμινίου.



Σχήμα 1.24 : Μορφή της διαστρωματικής διάσχισης σε τυπικές ενώσεις [4].

(δ) Ρηγματίωση λόγω επαναθέρμανσης

Η θερμική κατεργασία μετά την συγκόλληση, συνήθως αναφέρεται ως αποιατική, είτε έχει υπάρξει είτε όχι ουσιαστική απομάκρυνση των παραμένουσων τάσεων. Οι λόγοι για μια τέτοια κατεργασία, συχνά εμπερικλείουν την ανάγκη της απομάκρυνσης των τάσεων με σκοπό τη βελτίωση της αντοχής σε θραύση, την αποφυγή ρηγματίωσης από εργοδιάβρωση, ή τελικά την ελαχιστοποίηση διαστασιακών αλλαγών κατά την επόμενη κατεργασία του υλικού. Η απομάκρυνση των παραμενουσών τάσεων, πραγματοποιείται με την επιτρεπόμενη πλαστική παραμόρφωση, η οποία γίνεται δυνατή καθώς η αντοχή του υλικού μειώνεται με την αυξανόμενη θερμοκρασία.

Εάν για κάποιο μεταλλουργικό λόγο, η παραμόρφωση των κόκκων και η ολίσθηση των ορίων των κόκκων δεν συμβεί, τότε μπορεί να δημιουργηθεί ρηγματίωση. Ρήγματα από επαναθέρμανση, μπορούν να συμβούν είτε στη λίμνη συγκόλλησης είτε στη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη της ραφής, και είναι γενικά συσχετισμένα με γεωμετρικές συγκεντρώσεις τάσεων ή με μικρές ατέλειες.

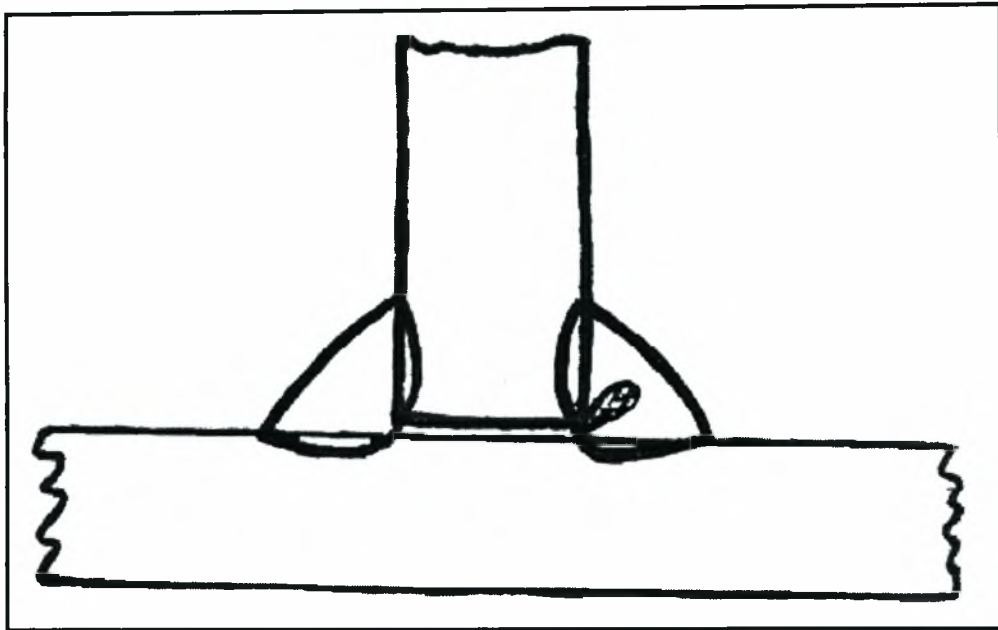
Η θερμική κατεργασία, εμπεριέχει έλεγχο του ρυθμού θέρμανσης, της μέγιστης θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής, σύμφωνα με τη σύνθεση και το πάχος των υλικών προς συγκόλληση.

ii) Σπηλαιώσεις - Κοιλότητες

Οι σπηλαιώσεις μπορεί να οφείλονται στο προσεταιευτικό αέριο ή στη συρρίκνωση, παρόλο που οι σπηλαιώσεις συρρίκνωσης μπορεί να περιέχουν αέριο, το οποίο διαχύεται σε αυτές και κατά τη διάρκεια αλλά και μετά το σχηματισμό τους. Με τον όρο "αέριο πορώδες" στη βιβλιογραφία των συγκολλήσεων [4], συνήθως εννοούνται σφαιρικοί πόροι, που προέρχονται από κάποια φυσική ή χημική αντίδραση, η οποία έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η κατανομή ενός τέτοιου πορώδους, εξαρτάται από την κατανομή της πηγής του αερίου. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να είναι εντελώς τοπικό, εξαιτίας μιας στιγμιώδους αλλαγής στις συνθήκες συγκόλλησης. Το πορώδες μπορεί να προέρθει από εκτεταμένη υγρασία στα αναλώσιμα, ή ακόμα και από διαφορά στη διαλυτότητα του αερίου μεταξύ στερεού και υγρού μετάλλου συγκόλλησης.

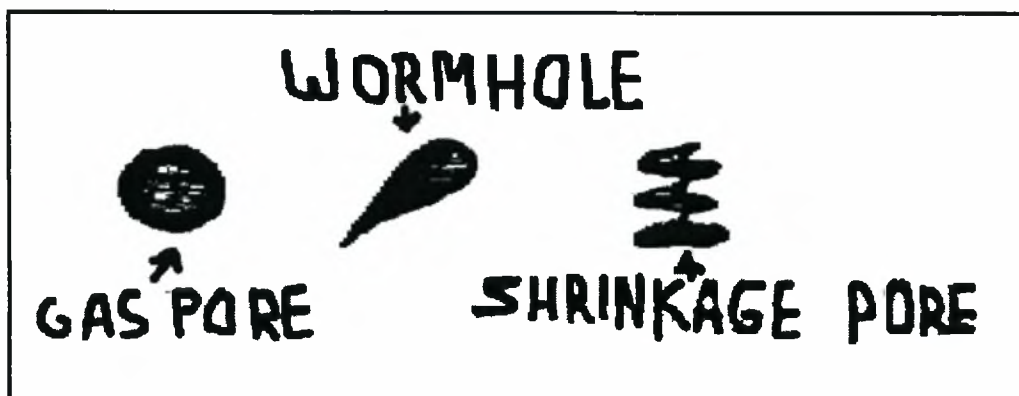
Το πορώδες σε συγκολλήσεις αλουμινίου, οφείλεται στο γεγονός ότι υδρογόνο, το οποίο προέρχεται από μεμβράνες ένυδρων οξειδίων που βρίσκονται σε αιελώς

καθαρισμένες επιφάνειες ή το σύρμα γόμωσης είναι πολύ διαλυτό στο υγρό συγκολλημένο μέταλλο και σχετικά αδιάλυτο στο στερεό συγκολλημένο μέταλλο, και τελικά αποδεσμεύεται κατά τη στερεοποίηση.



Σχήμα 1.25 : Σχηματικός *wormhole* σε διπλή συγκόλληση με γόμωση [4].

Οι σπηλαιώσεις αερίου μπορεί επίσης να προέλθουν λόγω εγκλωβισμού στο μέτωπο της συγκόλλησης, όπως στις συγκολλήσεις συμβολής. Τέτοιες σπηλαιώσεις, είναι συνήθως διαμήκεις στη κατεύθυνση κατά την οποία το αέριο διαφεύγει και ονομάζονται "*wormholes*". Σπηλαιώσεις αυτού του γενικού σχήματος οφείλονται σε ένα συνδυασμό της επίδρασης του αερίου και της συρρίκνωσης, που συνήθως συσχετίζεται με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης.



Σχήμα 1.26 : Οι τρεις κύριοι τύποι σπηλαιώσεων [4].

Πραγματικό πορώδες συρρίκνωσης είναι ένα σπάνιο φαινόμενο στη συγκόλληση. Μπορεί να διακριθεί από το πορώδες αερίου, κυρίως από το ασύμμετρο σχήμα του. Σπηλαιώσεις αερίου μπορούν να δημιουργηθούν με γραμμικό σχηματισμό, παράλληλο στον άξονα της συγκόλλησης. Τέτοιες σπηλαιώσεις μπορεί να πάρουν το σχήμα μιας *wormhole*, παρόλο το γεγονός ότι όταν είναι μικρές, μπορεί να είναι ουσιαστικά σφαιρικές. Τέλος, είναι σπάνιο για πραγματικό γραμμικό πορώδες να εμφανιστεί από μόνο του, χωρίς να το συνοδεύει μία επίπεδη ατέλεια.

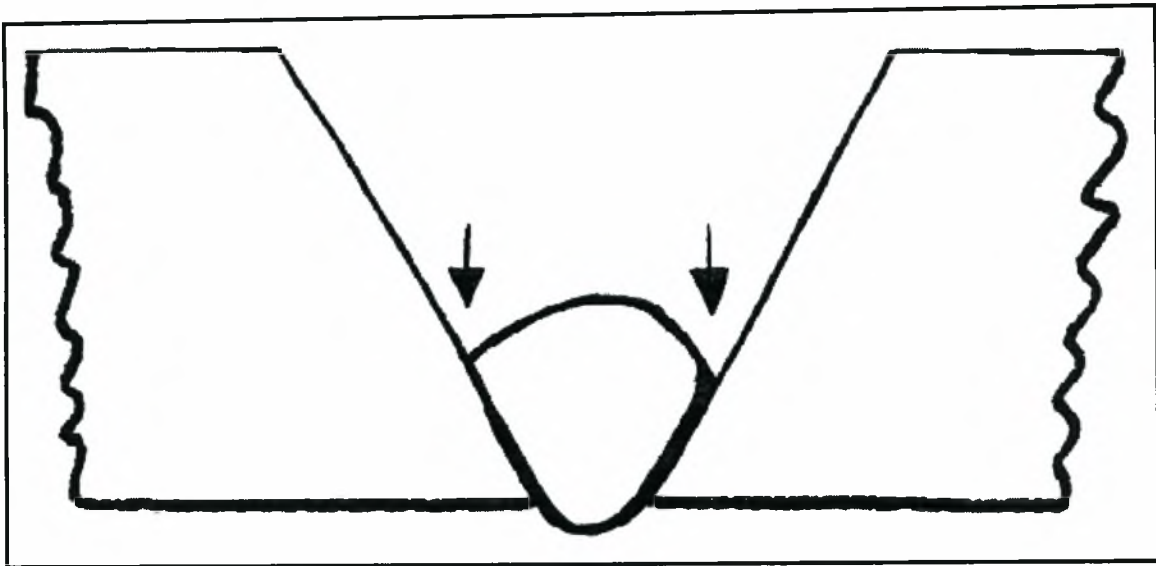
iii) Στερεά Εγκλείσματα

Τα κύρια στερεά εγκλείσματα, τα οποία μπορούν να εμφανιστούν σε συγκολλήσεις είναι σκουριά, στερεά ροής υλικού και οξείδια, όλα από τα οποία είναι μη-μεταλλικά, καθώς και βολφράμιο και χαλκός, τα οποία είναι μεταλλικά.

Όταν η ροή υλικού από ένα χειροκίνητο ηλεκτροδίο μεταλλικού τόξου ή μία άλλη ροή που προσατεύει τη διεργασία της συγκόλλησης επανατακεί, τότε σχηματίζει μια προστατευτική επίστρωση λιωμένης σκουριάς στην συγκολλημένη επιφάνεια. Όταν η συγκόλληση ψύχεται, αυτή η σκουριά στερεοποιείται, και για κάποιο λόγο, σωματίδια από αυτό το επανατηγμένο υλικό, βρίσκονται εγκλωβισμένα στο συγκολλημένο μέταλλο, και το αποτέλεσμα είναι τα εγκλείσματα σκουριάς. Τέτοια εγκλείσματα μπορεί να οφείλονται σε ανεπαρκή απομάκρυνση της σκουριάς από προηγούμενο πέρασμα σε πολυπερασματική συγκόλληση ή σε εγκλωβισμό εξαιτίας έλλειψης δεξιότητας χειρισμού από μέρους του συγκολλητή, ή σε κάποιο ειδικό χαρακτηριστικό στη γεωμετρία της ένωσης.

Σε μια συγκόλληση με πολλά περάσματα, το αρχικό πέρασμα είναι υπερβολικά κυριωμένο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.27. Η λιωμένη σκουριά εναποθέεται και εγκλωβίζεται στις άκρες της ραφής, και αυτή η παγίδευση, κανονικά φαίνεται σαν γραμμές παράλληλες με τον άξονα της συγκόλλησης. Η πλειοψηφία αυτών των εγκλεισμάτων σκουριάς έχουν ένα όμοιο ύψος και πλάτος, και σπάνια υπερβαίνουν τα 2 mm.

Ο όρος 'εγκλείσματα ροής υλικού', χρησιμοποιείται για εγκλωβισμένα μόρια μη-λιωμένης ροής. Τέτοια εγκλείσματα είναι σχετικά σπάνια και συνήθως συσχείζονται με φθαρμένα ηλεκτρόδια ή με σοβαρά λάθη στη τεχνική που χρησιμοποιείται, όπως π.χ. συγκόλληση με εμβαπτισμένο τόξο.



Σχήμα 1.27 : Τοποθεσίες γραμμικών εγκλεισμάτων σκουριάς [4].

Η πιθανότητα εμφάνισης εγκλεισμάτων οξειδίων, εξαρτάται από την σύσταση του υλικού. Τα περισσότερα μέταλλα θα σχηματίσουν οξείδια, αλλά ειδική φροντίδα πρέπει να λαμβάνεται κατά την κατασκευή των ηλεκτροδίων και των υλικών γόμωσης, με σκοπό τη διοχέτευση ισχυρών αντί-οξειδωτικών, τα οποία θα σχηματίσουν αόρατα και αβλαβή μόρια οξειδίων παρά μεμβράνες οξειδίων. Τα χειρότερα υλικά, από την άποψη του σχηματισμού μεμβράνης οξειδίου, είναι κράματα που περιέχουν σημαντικές ποσότητες αλουμινίου, μαγνήσιο και τα κράματά του, αλουμίνιο και τα κράματά του καθώς το βηρύλλιο και ο χαλκός. Η αιτία σχηματισμού των εγκλεισμάτων οξειδίων, συνήθως σχετίζεται με ανεπαρκή ροή υλικού ή προσίαση και το σχήμα τους εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα των οξειδίων και του συγκολλημένου μετάλλου. Στο αλουμίνιο, για παράδειγμα, οι πυκνότητες είναι πολύ όμοιες και το σχήμα της μεμβράνης οξειδίων, μπορεί να είναι εντελώς ακανόνιστο.

Τα εγκλείσματα βολφραμίου προκύπτουν από δύο κύριες πηγές. Σε συγκόλληση TIG το ηλεκτρόδιο βολφραμίου έχει ένα μία λιωμένη άκρη, και εάν ακουμπά άθελα τη λίμνη συγκόλλησης από ένα λάθος του συγκολλητή, όχι μόνο βολφράμιο μεταφέρεται στο συγκολλημένο μέταλλο, αλλά και το ίδιο το ηλεκτρόδιο φθείρεται και δεν μπορεί περαιτέρω να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Η άλλη κύρια μορφή εγκλείσματος βολφραμίου, οφείλεται στη χρήση υψηλού ρεύματος σε σχέση με τη διάμετρο του χρησιμοποιούμενου ηλεκτροδίου. Τέτοια εγκλείσματα τείνουν να τοποθετούνται τυχαία κατά μήκος ενός σημαντικού μέρους της συγκόλλησης.

Στις περισσότερες συσκευές συγκόλλησης τόξου με αναλώσιμα ηλεκτρόδια, εμπεριέχονται χάλκινη σιαγώνα, η οποία συγκρατεί το ηλεκτρόδιο, χάλκινο ακροφύσιο ή ένας σωλήνας επαφής, στα οποία ιδιόμορφα φαινόμενα συμβαίνουν. Εάν για κάποιο λόγο, συμβεί διακοπή στην τροφοδοσία της συγκόλλησης, είναι δυνατό για το τόξο να πυρακιώσει τη χάλκινη συσκευή, η οποία από μόνη της, γίνεται αναλώσιμο ηλεκτρόδιο, και μόρια χαλκού μεταφέρονται στη λίμνη συγκόλλησης. Τα εγκλείσματα χαλκού μπορεί να είναι ανώδυνα, εάν το μέταλλο βάσης έχει ως κύριο κραματικό στοιχείο τον χαλκό, αλλά σε συγκολλήσεις χαλύβων και κραμάτων αλουμινίου, ο χαλκός σχηματίζει εύθραυστες φάσεις. Το ρίσκο τέτοιων εγκλεισμάτων, γίνεται μεγαλύτερο σε μηχανικές κατεργασίες συγκόλλησης.

iv) Ατελής τήξη και διείδυση

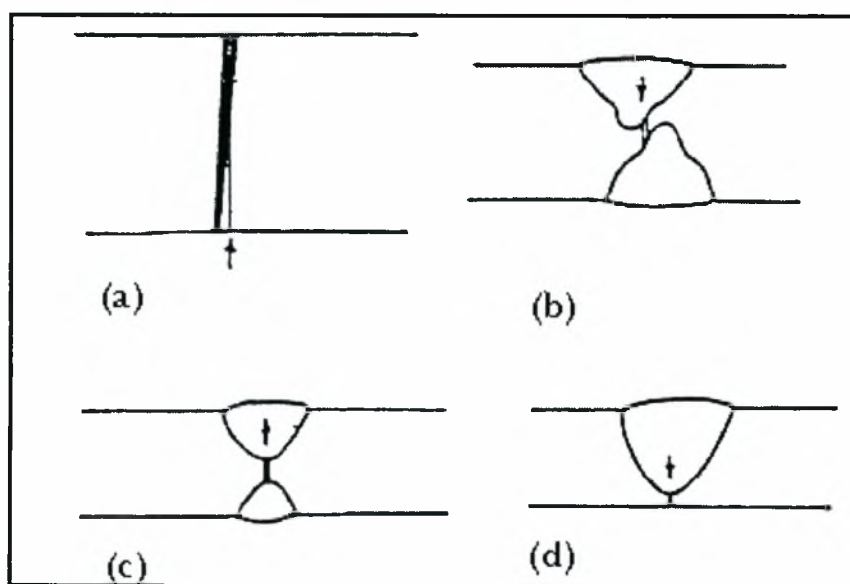
Η ατελής τήξη περιλαμβάνει έλλειψη πλευρικής τήξης, π.χ. μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και μετάλλου βάσης, έλλειψη τήξης από διαδοχικά περάσματα, π.χ. μεταξύ επακόλουθων περασμάτων και έλλειψη τήξης της βάσης μεταξύ συγκολλημένου μετάλλου και μετάλλου βάσης, όπου η συγκόλληση έχει πλήρως διεισδύσει αλλά όχι σωστά τηχθεί. Ένα επιπλέον λάθος που συχνά αναφέρεται ως ατελής διείδυση, είναι μία ειδική περίπτωση έλλειψης τήξης, η οποία οφείλεται στην αποτυχία του συγκολλημένου μετάλλου να επεκταθεί έως τη βάση των ελασμάτων.

Η εμφάνιση τέτοιου είδους ατελειών, οφείλεται αποκλειστικά σε λάθη στην τεχνική συγκόλλησης, το κύριο από τα οποία είναι η προσπάθεια απόθεσης συγκολλημένου μετάλλου, το οποίο είναι πολύ κρύο. Είναι επίσης δυνατή, η ανεπαρκής πρόσδοση θερμότητας, που μπορεί να προέρχεται από εσφαλμένη εκλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, όπως ισχύ, ταχύτητα, προστατευτικό αέριο κλπ.

Μολονότι μπορεί κάποιος να πετύχει καλή τήξη και διείδυση σε υλικά με μικρή αγωγιμότητα, εκλέγοντας σωστά τις παραμέτρους συγκόλλησης, είναι όμως πολύ πιο δύσκολο σε υλικά με υψηλή αγωγιμότητα, όπως ο χαλκός με μεγάλο πάχος, να επιτύχει καλή διείδυση.

ν) Ατελές Σχήμα

Η εξωτερική εμφάνιση μιας ένωσης με συγκόλληση, είναι συχνά μεγαλύτερης σημασίας στον καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης ένωσης σε λειτουργία, παρά από τις εσωτερικές τριών διαστάσεων ατελειών όπως είναι οι σπηλαιώσεις και τα στερεά εγκλείσματα. Η πιο συχνά παρατηρούμενη ατέλεια σε αυτή τη κατηγορία είναι η υποκοπή (*undercut*), το οποίο προκύπτει από την τήξη του μετάλλου βάσης και την ακόλουθη απομάκρυνσή του από την πίεση της διεργασίας της συγκόλλησης. Πολλές διεργασίες συγκόλλησης μπορούν, στα όριά τους, να γίνουν διεργασίες κοπής, και το πρόβλημα οξύνεται με τις υψηλής πυκνότητας ενέργειας διεργασίες, όπως το τόξο πλάσματος, η δέσμη ηλεκτρονίων και laser, και υψηλής διεύθυνσης (Class 1) μεταλλικά ηλεκτρόδια τόξου, όπως επίσης και στη συγκόλληση υλικών υψηλής αγωγιμότητας, τα οποία απαιτούν υψηλές πηγές θερμότητας.



Σχήμα 1.28 : Ατέλειες λόγω έλλειψης διεύθυνσης [4].

- (α) Μη - ευθυγράμμιση σε συγκόλληση δέσμης ηλεκτρονίων,
- (β) Μη - ευθυγράμμιση σε συγκόλληση τόξου σε αλουμίνιο,
- (γ) Τυπική ατέλεια σε διπλή συγκόλληση,
- (δ) Τυπική ατέλεια σε μονή συγκόλληση.

Ο λανθασμένος συνδυασμός της προετοιμασίας της επιφάνειας και της πρόσδοσης θερμότητας, μπορεί να καταλήξει σε υπέρμετρη διείσδυση, η οποία χαρακτηρίζεται από μια υπέρμετρη προεξοχή στην περιοχή της βάσης του συγκολλημένου μετάλλου. Σε λεπτά υλικά, αυτή η υπέρμετρη διείσδυση, μπορεί να προχωρήσει ένα στάδιο παραπάνω και να καταλήξει σε ολοκληρωτική κατάρρευση του συγκολλημένου μετάλλου, που οδηγεί σε τρύπες στη συγκόλληση. Η ορολογία που χρησιμοποιείται για αυτό το φαινόμενο είναι "*burn - through*".

Γραμμικές και γωνιακές μη-ευθυγραμμίσεις των ενώσεων, μπορούν ελαστικά να μην θεωρούνται σαν ατέλειες συγκόλλησης, ωστόσο έχουν μια βαθιά επίδραση στην λειτουργία της ένωσης, και πολλές προδιαγραφές δηλώνουν μέγιστα όρια σε τέτοιες μη-ευθυγραμμίσεις.

1.5 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου

1.5.1 Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου

Αλουμίνιο που να ξεπερνά το 99.99% σε καθαρότητα, παρασκευάστηκε με την ηλεκτρολυτική μέθοδο *Hoopes* και ήταν διαθέσιμο στις αρχές του 1920. Από το 1925 και μετά, η έρευνα στο καθαρό αλουμίνιο εντάθηκε με πολλές δημοσιεύσεις, καθώς υπήρξε σχετική ευκολία για την παρασκευή του μετάλλου στην υψηλή-περιεκτικότητας φόρμα του. Παράλληλα υπήρξε έντονο ενδιαφέρον για τις ιδιότητες του αλουμινίου σαν καθαρό μέταλλο. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές του καθαρού αλουμινίου, εντάσσονται στα πεδία της κατασκευής ελασμάτων, σε ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς και σε ημιαγωγούς.

Ο χαρακτηρισμός του αλουμινίου με βάση την καθαρότητά του φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1.3 : Χαρακτηρισμός αλουμινίου με κριτήριο την καθαρότητα [5].

<i>Aluminium</i> %	Χαρακτηρισμός
99.5000 έως 99.7900	<i>Εμπορική</i> καθαρότητα
99.8000 έως 99.9490	<i>High</i> καθαρότητα
99.9500 έως 99.9959	<i>Super</i> καθαρότητα
99.9960 έως 99.9990	<i>Extreme</i> καθαρότητα
Πάνω από 99.9990	<i>Ultra</i> καθαρότητα

1.5.2 Ονοματολογία των κραμάτων και σκληρότητα

α) Ονοματολογία των κραμάτων

Η εκλογή των κραμάτων αλουμινίου για χρήση στη μηχανολογία, ήταν συχνά δύσκολη, διότι οι προδιαγραφές και οι ονομασίες των κραμάτων διέφεραν από χώρα σε χώρα. Επιπλέον, σε ορισμένες χώρες, χρησιμοποιούνταν το σύστημα της αρίθμησης των κραμάτων με την χρονική σειρά της εξέλιξής τους, παρά με κάποιο άλλο λογικό τρόπο. Το σύστημα που ακολουθείται, βασίστηκε στην κατηγοριοποίηση που υπάρχει στις Ηνωμένες Πολιτείες, και αναλύεται παρακάτω.

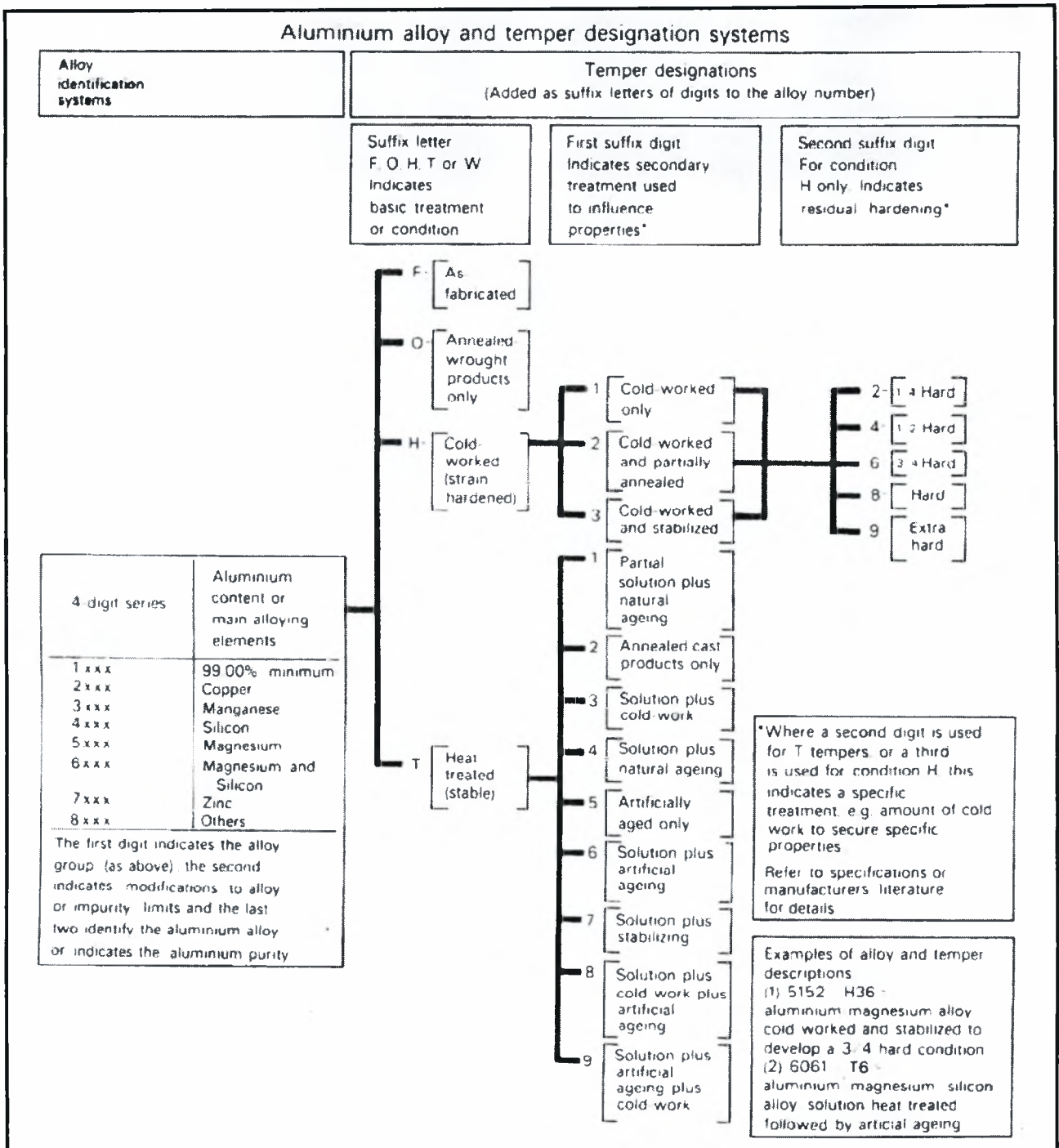
Το Διεθνές Σύστημα Ονομασίας Κραμάτων (*IADS*), δίδει σε κάθε επεξεργασμένο κράμα ένα νούμερο τρισψαφίων, από το οποίο, το πρώτο αντιστοιχεί στο κύριο κραματικό στοιχείο. Η πρώτη σειρά κραμάτων είναι η **1xxx**, η οποία περιέχει μη κραματοποιημένο αλουμίνιο (με ελάχιστο 99% αλουμίνιο), η **2xxx** έχει τον χαλκό (**Cu**) ως κύριο κραματικό στοιχείο, η σειρά **3xxx** έχει το μαγγάνιο (**Mn**), η σειρά **4xxx** το πυρίτιο (**Si**), η σειρά **5xxx** το μαγνήσιο (**Mg**), η σειρά **6xxx** το πυρίτιο **Si** και το μαγνήσιο (**Mg**) και τέλος η σειρά **7xxx** το ψευδάργυρο (**Zn**) και το μαγνήσιο (**Mg**), ως κύρια κραματικά στοιχεία. Η σειρά **8xxx**, χρησιμοποιείται σε σύνθετα υλικά, και δεν καλύπτεται από την παραπάνω ονοματολογία. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί, πως τα κατεργασμένα κράματα της σειράς **4xxx**, χρησιμοποιούνται κυρίως για ηλεκτρόδια συγκόλλησης και φύλλα χαλκοκόλλησης, παρά για κατασκευαστικούς λόγους.

Το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο είναι σημαντικά στη σειρά **1xxx**, και λιγότερο στα άλλα κράματα. Στη σειρά **1xxx**, η ελάχιστη καθαρότητα του αλουμινίου, δηλώνεται από αυτά τα ψηφία, π.χ. το 1145 έχει μια ελάχιστη καθαρότητα του 99.45%, ενώ το 1200 έχει ελάχιστη καθαρότητα 99.00%. Σε όλες τις άλλες σειρές, το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο, έχουν ελάχιστη σημασία, και χρησιμεύουν μόνο στην αναγνώριση των διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου στις διάφορες σειρές. Οπότε, τα 3003, 3004 και 3005 είναι διαφορετικά (**Al-Mn**) κράματα, όπως ακριβώς και τα 5082 και 5083 δηλώνουν απλά δύο τύπους (**Al-Mg**) κραμάτων. Το δεύτερο ψηφίο υποδηλώνει καθαρότητα ή μετατροπές του κράματος. Εάν το δεύτερο ψηφίο είναι μηδέν, υποδηλώνει το αρχικό κράμα, ενώ ακέραιοι 1 έως 9, οι οποίοι δίδονται διαδοχικά, υποδηλώνουν τις μετατροπές του κράματος. Μια στενή σχέση συνήθως υπάρχει μεταξύ των κραμάτων, π.χ.

5352 είναι συσχετισμένο σε μεγάλο βαθμό με το 5052 και το 5252, όπως και το 7075 και το 7475 διαφέρουν ελαφρά στη σύνθεση.

Β) Ονοματολογία σκληρότητας & θερμικής κατεργασίας

Προκειμένου να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες ενός κράματος και ο τρόπος με τον οποίο θα επιτευχθούν αυτές, μέρος του *IADS* αποτελεί ένα σύστημα ονοματολογίας σκληρότητας. Χρησιμοποιούνται τόσο γράμματα, όσο και ψηφία, τα οποία προστίθενται σαν καταλήξεις στον αριθμό του κράματος. Το σύστημα ασχολείται ξεχωριστά από τη μία πλευρά με τα κράματα μη-θερμικής κατεργασίας, και από την άλλη πλευρά με τα κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία. Λεπτομέρειες της ονοματολογίας του συστήματος, παρουσιάζονται στο σχήμα 1.29. Τέλος κράματα, τα οποία διατίθενται "όπως παράχθηκαν" (*as received*) και "ανοπτημένα" (*annealed*), καθορίζονται με τις καταλήξεις **F** και **O** αντίστοιχα.



Σχήμα 1.29 : Κράματα αλουμινίου και συστήματα ονοματολογίας [6].

1.5.3 Κράματα μη-επιδεχόμενα θερμική κατεργασία

Τα κράματα που ανήκουν στην ομάδα αυτή, έχουν συγκεκριμένες συστάσεις, δεν αυξάνουν την αντοχή τους με θερμική κατεργασία, και είναι κυρίως καθαρά αλουμίνια, καθώς και κράματα με μαγγάνιο και μαγνήσιο ως κύρια κραματικά στοιχεία. Περίπου 95% από τα φύλλα και ελάσματα που παράγονται από αλουμίνιο, γίνονται από αυτές τις τρεις ομάδες κραμάτων. Η αντοχή αποκτάται με την πλαστική παραμόρφωση, συνήθως με ψυχρή κατεργασία κατά την παρασκευή, σε συνεργασία με την διασπορά των στερεών διαλυμάτων (*Al-Mn*), (*Al-Mg*) ή ακόμα και (*Al-Mn-Mg*). Τα κράματα της σειράς **8xxx**, ουσιαστικά δεν ανταποκρίνονται στην θερμική κατεργασία, και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως σε εδράσεις και καπάκια μπουκαλιών.

α) Υψηλής περιεκτικότητας αλουμίνιο (σειρά 1xxx)

Αυτή η ομάδα περιέχει υψηλής περιεκτικότητας (*Super-purity SP*) αλουμίνιο (99.99%) με διαβαθμίσεις της εμπορικής περιεκτικότητας (*Commercial-purity CP*) αλουμίνιο, περιέχοντας έως και 1% ακαθαρσίες ή μικρότερες προσμίξεις. Τα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί σαν επεξεργασμένα προϊόντα, τα διάφορα **CP** είναι διαθέσιμα στις περισσότερες μορφές. Εφαρμογές βρίσκουν στους ηλεκτρικούς αγωγούς, στον εξοπλισμό χημικών διεργασιών, στο αλουμινόχαρτο και σε αρχιτεκτονικά προϊόντα που απαιτούν διακοσμητικά φινιρίσματα.

β) Κράματα *Al-Mn* και *Al-Mn-Mg* (σειρά 3xxx)

Η σειρά κραμάτων **3xxx**, χρησιμοποιείται όταν απαιτείται μέτρια αντοχή, συνδυασμένη με υψηλή ολκιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Τα εμπορικά κράματα (*Al-Mn*), περιέχουν έως και 1.25% μαγγάνιο. Τα κράματα αυτής της σειράς, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κουτιών για αναψυκτικά, που αυτή τη στιγμή καλύπτει την μεγαλύτερη χρήση των κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου.

γ) Κράματα Al-Mg (σειρά 5xxx)

Το αλουμίνιο και το μαγνήσιο σχηματίζουν οστερό διάλυμα σε μεγάλο εύρος συστάσεων από 0.8% έως και 5% μαγνήσιο. Η αντοχή μεταβάλλεται ανάλογα με το κράμα και τη σύσταση, από 40 MPa έως και 310 MPa. Η παραμόρφωση που μπορεί να επιτευχθεί, είναι πολύ μεγάλη, και συνήθως ξεπερνά το 25%.

Τα κράματα (**Al-Mg**) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται συγκόλληση. Χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή δοχείων μεταφοράς απορριμμάτων, μεγάλων δεξαμενών για τη μεταφορά πετρελαίου, γάλακτος και δημητριακών, καθώς και για τη κατασκευή συσκευών πίεσης, ειδικά εκεί όπου απαιτείται κρυογενετική αποθήκευση. Η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές ναυπηγικές εφαρμογές.

δ) Διάφορα κράματα (σειρά 8xxx)

Η σειρά αυτή, περιλαμβάνει ορισμένα κράματα που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας, όπου απαιτείται αντίσταση στη διάβρωση που προκαλεί το νερό σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Παράλληλα, άλλα κράματα χρησιμοποιούνται για καπάκια μπουκαλιών και σε εφαρμογές ηλεκτρικών αγωγών.

1.5.4 Κράματα επιδεχόμενα θερμική κατεργασία

Τα κράματα που ανήκουν στην ομάδα αυτή, οφείλουν την αντοχή τους σε κατάλληλη θερμική κατεργασία, και περιλαμβάνουν τις σειρές **2xxx**, **6xxx** και **7xxx**. Η ισοχυροποίηση επιτυγχάνεται με τον μηχανισμό της γήρανσης, και μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες : σε αυτά που έχουν μέτρια αντοχή και έχουν καλή συγκολλησιμότητα, (**Al-Mg-Si**) και (**Al-Zn-Mg**), και τα κράματα με υψηλή αντοχή, που έχουν αναπτυχθεί για αεροπορικές κατασκευές, όπως τα (**Al-Cu**), (**Al-Cu-Mg**) και (**Al-Zn-Mg-Cu**), πολλά από τα οποία έχουν περιορισμένη συγκολλησιμότητα.

α) Κράματα **Al-Cu** (σειρά **2xxx**)

Κράματα αυτής της σειράς, χρησιμοποιούνται όπου απαιτούνται καλές μηχανικές ιδιότητες. Κύριος εκπρόσωπος είναι το κράμα 2219, που έχει σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μαζί με καλή αντοχή σε ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλή σκληρότητα σε κρυογενετικές θερμοκρασίες. Επιπλέον, μπορεί με σχετική ευκολία να συγκολληθεί, και έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δεξαμενών υδροποιημένων καυσίμων, οι οποίες χρησιμεύουν ως προωθητικές δεξαμενές σε πυραύλους και διαστημικά οχήματα. Η αντίδραση στην τεχνητή γήρανση, κρίνεται θετική, καθώς περνώντας από την κατάσταση T6 στην κατάσταση T8, το όριο διαρροής αυξάνεται κατά 35%.

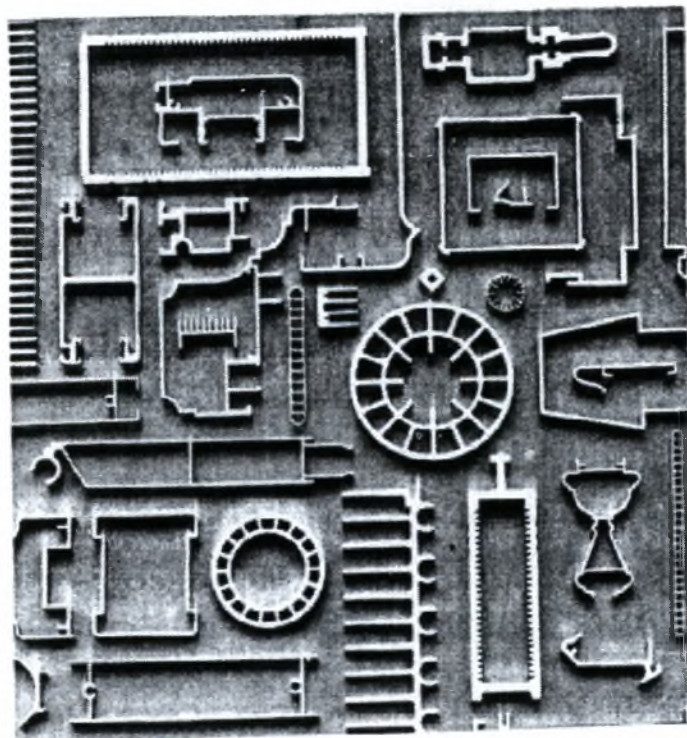
β) Κράματα **Al-Cu-Mg** (σειρά **2xxx**)

Αυτά τα κράματα χρονολογούνται από την συμπτωματική ανακάλυψη του φαινομένου της γήρανσης από τον *Alfred Wilm*, δουλεύοντας στο Βερολίνο το 1906 και προσπαθώντας να αναπτύξει ένα ισχυρό κράμα αλουμινίου για να αναπληρώσει τον μπρούτζο στην κατασκευή κουτιών για φυσίγγια. Η έρευνά του οδήγησε στην παραγωγή ενός κράματος, γνωστό ως *Ντουραλουμίνιο* (**Al-3.5Cu-0.5Mg-0.5Mn**), που γρήγορα χρησιμοποιήθηκε σε κατασκευαστικά στοιχεία του αερόπλοιου *Zeppelin*, και αργότερα σε αεροσκάφη. Μια τροποποιημένη εκδοχή αυτού του κράματος, είναι το 2017, που χρησιμοποιείται ακόμα, κυρίως με τη μορφή των ήλων, αλλά και πολλά άλλα σημαντικά

κράματα, όπως το 2014 και το 2024, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην κατασκευή αεροσκαφών.

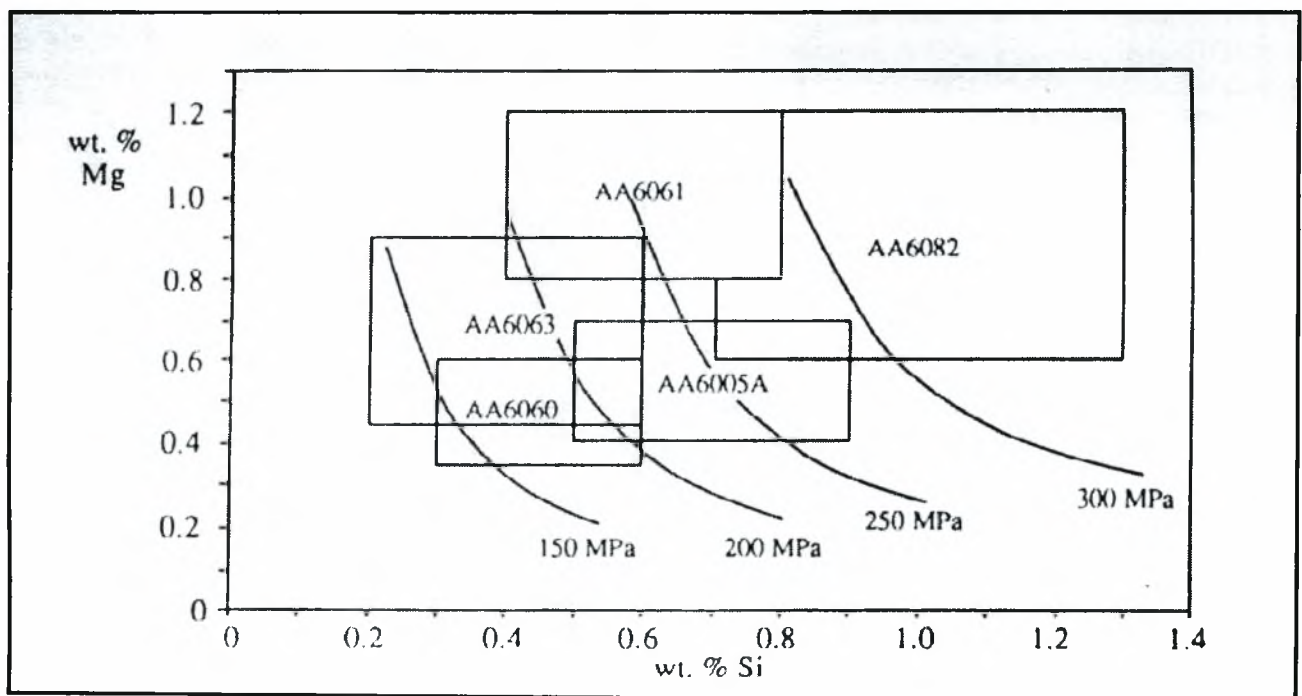
γ) Κράματα *Al-Mg-Si* (σειρά 6xxx)

Τα κράματα (*Al-Mg-Si*) χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως κατασκευαστικά κράματα μέτριας αντοχής, τα οποία έχουν τα πρόσθετα πλεονεκτήματα της καλής συγκολλησιμότητας, αντοχή σε διάβρωση, και δεν παρουσιάζουν ρηγματώσεις κατά την έργο-διάβρωση. Όπως ακριβώς και στη σειρά 5xxx, η σειρά 6xxx περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο ελάσματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.30. Μαγνήσιο και πυρίτιο προστίθενται σε αναλογίες, προκειμένου να σχηματιστεί το ψευδο-διμερές *Al-Mg₂Si* κράμα (*Mg:Si 1.73:1*), ή με περίσσεια του πυριτίου, για να σχηματιστεί η ένωση *Mg₂Si*. Τα εμπορικά κράματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες, και χαρακτηριστικές αντοχές των κραμάτων στην κατάσταση T6, παρουσιάζονται στο σχήμα 1.31.



Σχήμα 1.30 : Δείγματα εξέλασης από κράματα *Al-Mg-Si* [6].

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει κράματα με ίσες περιεκτικότητες μαγνησίου και πυριτίου, που κυμαίνονται από 0.8% έως 1.2%. Αυτά τα κράματα έχουν το πλεονέκτημα της βαφής στην πρέσα εξώθησης. Η βαφή μπορεί να γίνει με ροή νερού, αλλά σε λεπτά τεμάχια (< 3mm) υπάρχει η περίπτωση της ψύξης στον αέρα. Μείτρια αντοχή αναπτύσσεται με τη γήρανση στους 160 - 190 °C. Από την σειρά 6xxx το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα είναι το 6063, που έχει βρει ειδικές εφαρμογές σε αρχιτεκτονικά και διακοσμητικά φινιρίσματα. Στην κατάσταση T6, οι τυπικές ιδιότητές του είναι για επιμήκυνση 0.2%, όριο διαρροής 215 MPa και όριο θραύσης 245 MPa.



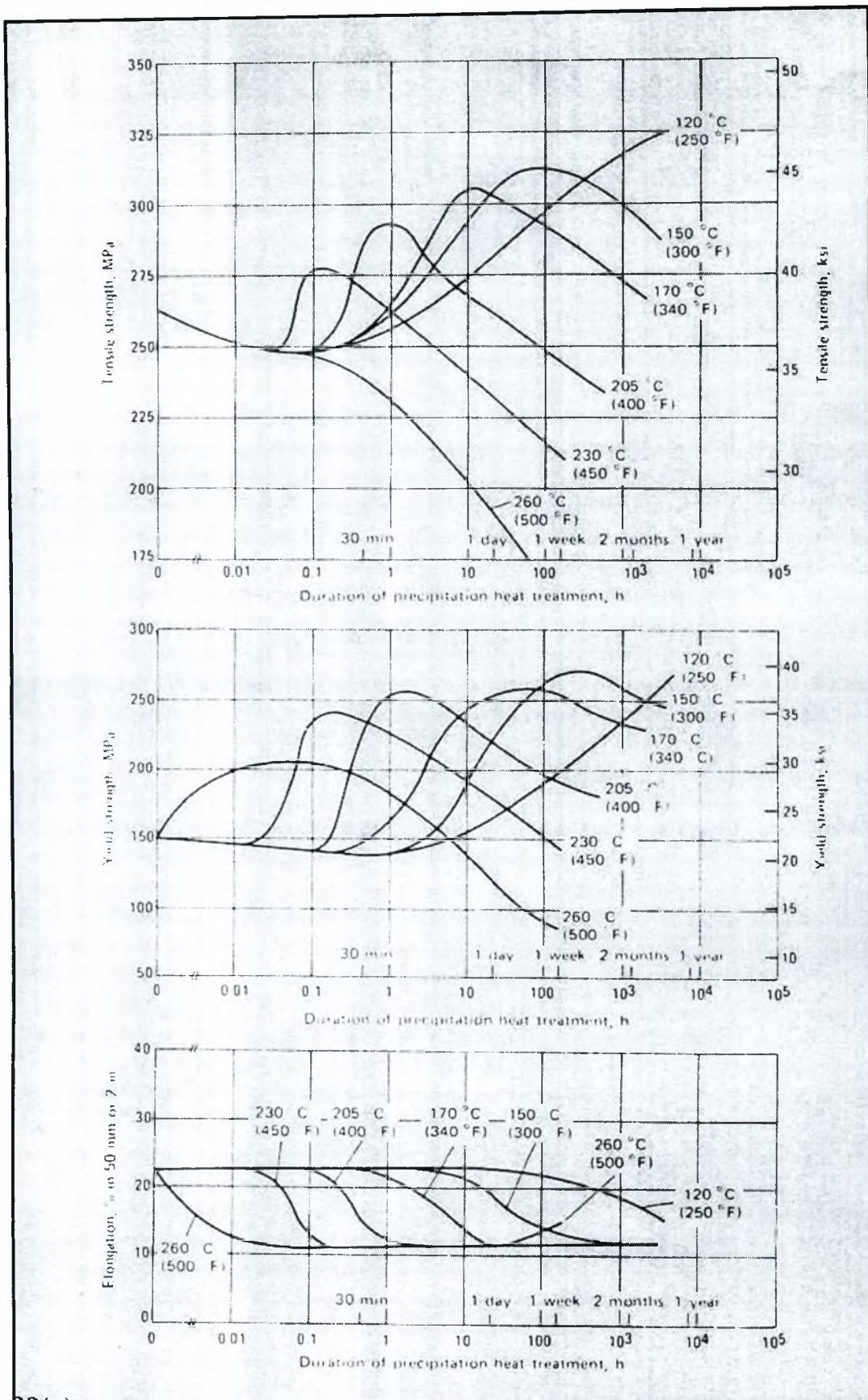
Σχήμα 1.31 : Τα όρια στη χημική σύσταση των πιο συνηθισμένων κραμάτων σειράς 6xxx, μαζί με όρια διαρροής για την κατάσταση T6 [6].

Οι άλλες δύο ομάδες, περιέχουν μαγνήσιο και πυρίτιο, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 1.4%, και αναπτύσσουν υψηλή αντοχή κατά τη γήρανση. Η μία ομάδα, διατηρεί τις συστάσεις του μαγνησίου και του πυριτίου σε κάποια αναλογία, με σκοπό τον σχηματισμό της Mg_2Si . Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το κράμα 6061 ($Al-1Mg-0.6Si$) στο οποίο προστίθεται 0.25% χαλκός για να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες μαζί με 0.2% χρώμιο, προκειμένου να αντισταθμίσει τις μη-επιθυμητές ιδιότητες του χαλκού στην αντοχή στη διάβρωση. Αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως γενικής φύσεως κατασκευαστικά υλικά. Τα κράματα στην άλλη ομάδα περιέχουν πυρίτιο,

περισσότερο από αυτό του απαιτείται για το σχηματισμό της φάσης Mg_2Si , και η παρουσία της περίσσειας του πυριτίου συμβάλλει θετικά στην γήρανση του κράματος, αφενός εκλεπύνοντας το μέγεθος της φάσης Mg_2Si , και αφετέρου καθιζάνοντας ως πυρίτιο. Ωστόσο, λόγω της τάσης του πυριτίου να κατακρημνίζεται στα όρια των κόκκων αυτών των κραμάτων, μπορεί επίσης να μειώσει την ολκιμότητα και να προκαλέσει περικρυσταλλική διάβρωση. Η παρουσία του χρωμίου (6151) και του μαγγανίου (6351) αντιτίθεται σε αυτό το φαινόμενο με το να ενισχύει την λεπτόκοκκη δομή, και να παρεμποδίζει την ανακρυστάλωση κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας.

Τελευταία έχει αναπτυχθεί το κράμα υψηλής αντοχής 6013 ($Al-Mg-Si-Cu$), το οποίο για επιμήκυνση 0.2% έχει όριο διαρροής 330 και 415 MPa, για τις καταστάσεις T6 και T8 αντίστοιχα. Αυτό το κράμα έχει ονομαστική σύσταση ($Al-1Mg-0.8Si-0.8Cu-0.35Mn$) και προωθείται για εφαρμογές στην αεροπορική βιομηχανία και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε χαλκό, το 6013 είναι επιρρεπές σε περικρυσταλλική διάβρωση, η οποία οφείλεται στην κατακρήμνιση φάσεων πλούσιων σε χαλκό, στα όρια των κόκκων της μητρικής φάσης.

Τα κράματα ($Al-Mg-Si$), συνήθως υφίστανται γήρανση στους 170 °C, ενώ η συνολική διεργασία κατακρήμνισης, θεωρείται πως είναι η πιο σύνθετη από όλα τα κράματα αλουμινίου που επιδέχονται θερμική κατεργασία. Κατά την εμπορική διεργασία, μπορεί να υπάρξει μία καθυστέρηση στη θερμοκρασία του φούρνου μεταξύ της βαφής και της τεχνητής γήρανσης, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τις μηχανικές ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού. Σε κράματα που περιέχουν περισσότερο από 1% Mg_2Si , μια καθυστέρηση 24 ωρών, προκαλεί μείωση έως και 10% στις εφελκυστικές ιδιότητες, σε σχέση με τις ιδιότητες που μπορούν να αποκτηθούν με τη σωστή γήρανση. Ωστόσο, μια τέτοια καθυστέρηση, μπορεί να αυξήσει τις εφελκυστικές ιδιότητες, εάν εφαρμοστεί σε συστάσεις με μικρότερο από 0.9% Mg_2Si . Ορισμένα χαρακτηριστικά της γήρανσης του κράματος 6061, παρουσιάζονται στο σχήμα 1.32.



Σχήμα 1.32 : Χαρακτηριστικά γήρανσης του κράματος 6061 σε μορφή ελάσματος [5].

δ) Κράματα *Al-Zn-Mg* (σειρά 7xxx)

Το σύστημα (***Al-Zn-Mg***) προσφέρει τις μεγαλύτερες δυνατότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου για την κατεργασία της γήρανσης, διότι τα υψηλής αντοχής κράματα, πάντοτε περιέχουν πολύ μικρές προσθήκες χαλκού, προκειμένου να βελιώσουν την αντοχή σε ρηγμαίωση κατά την έργο-διάβρωση. Ωστόσο, υπάρχουν κράματα μέτριας αντοχής, τα οποία έχουν μικρό ποσοστό χαλκού στη σύστασή τους, και έχουν το πλεονέκτημα της καλής συγκολλησιμότητας. Αυτά τα κράματα διαφέρουν από τα άλλα κράματα αλουμινίου με καλή συγκολλησιμότητα, στο ότι υφίστανται γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, η αντοχή που αποκτάται είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από τον ρυθμό ψύξης, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για συγκολλήσεις, καθώς δίχως επαναθέρμανση, μπορούν να αποκτήσουν αντοχή εφελκυσμού της τάξεως των 320 MPa. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το όριο διαρροής παίρνει τιμές διπλάσιες από εκείνες κατά τη συγκόλληση δύο ελασμάτων από τα κοινά κράματα (***Al-Mg***) και (***Al-Mg-Si***).

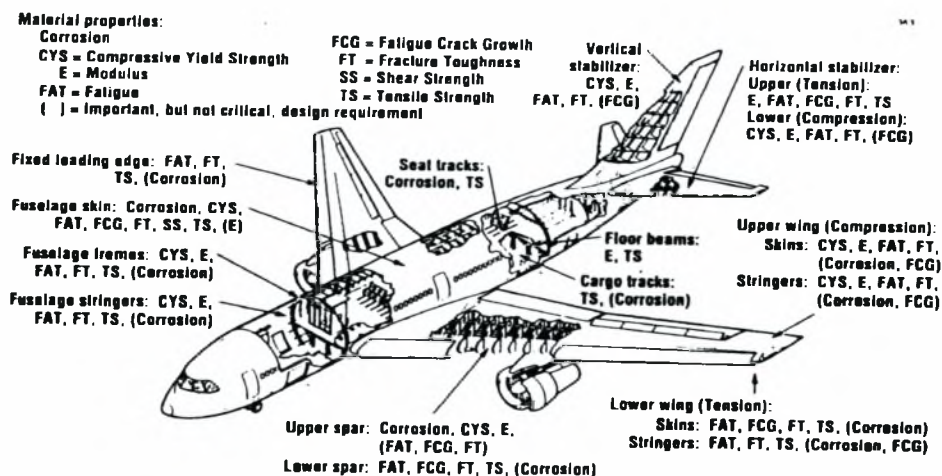
Τα κράματα (***Al-Zn-Mg***) που παρουσιάζουν καλή συγκολλησιμότητα, αναπτύχθηκαν αρχικά για την αμυντική βιομηχανία, αλλά ειδικά στην Ευρώπη, έχουν βρει πολλές εμπορικές εφαρμογές.

1.6 Χρήσεις των κραμάτων αλουμινίου στη βιομηχανία

1.6.1 Αεροπορική βιομηχανία

Οι σχεδιαστές των αεροσκαφών αναζητούν υλικά τα οποία θα τους επιτρέψουν να φτιάξουν κατασκευές με μικρό βάρος και κόστος, που θα τους επιτρέψουν τη μεταφορά μεγαλύτερου ωφέλιμου φορτίου, και παράλληλα να αντέχουν τόσο σε χαμηλές, όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου στην αεροπορική βιομηχανία, χρονολογείται αμέσως μετά την τυχαία ανακάλυψη του φαινομένου της γήρανσης το 1906. Αυτή η ανακάλυψη, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός κράματος, γνωστό ως Ντουραλουμίνιο, το οποίο γρήγορα χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του αερόπλοιου *Zeppelin*, καθώς και για το αεροσκάφος *Junkers F13* το 1913. Από τότε, τα κράματα αλουμινίου είναι τα κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή αεροσκαφών.

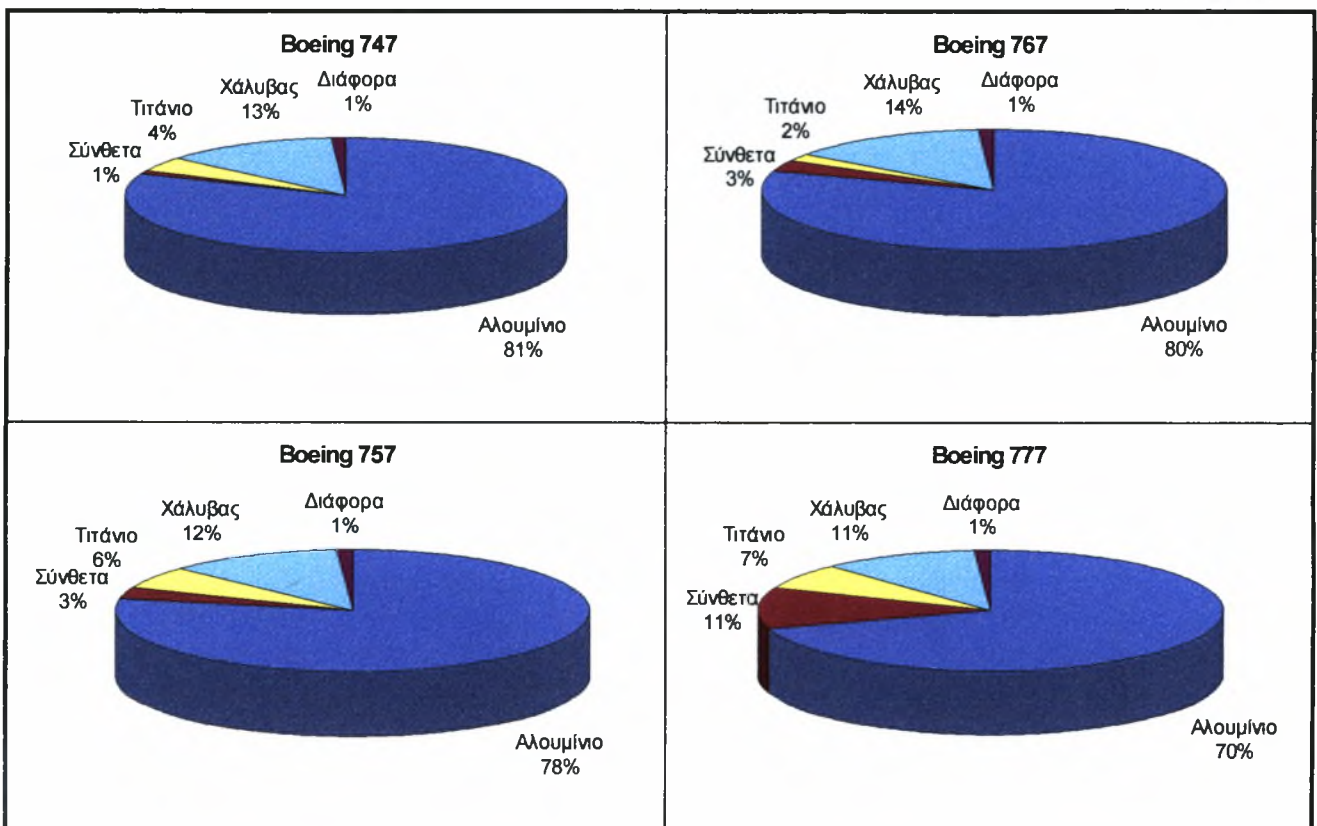
Fuselage skin	: 2024-T3, 7075-T6, 7475-T6
Fuselage stringers	: 7075-T6, 7075-T73, 7475-T76, 7150-T77
Fuselage frames/bulkheads	: 2024-T3, 7075-T6, 7050-T6
Wing upper skin	: 7075-T6, 7150-T6, 7055-T77
Wing upper stringers	: 7075-T6, 7150-T6, 7055-T77, 7150-T77
Wing lower skin	: 2024-T3, 7475-T73
Wing lower stringers	: 2024-T3, 7075-T6, 2224-T39
Wing lower panels	: 2024-T3, 7075-T6, 7175-T73
Ribs and spars	: 2024-T3, 7010-T76, 7150-T77
Empennage (tail)	: 2024-T3, 7075-T6, 7050-T76



Σχήμα 1.33 : Απαιτήσεις λειτουργίας σε κατασκευαστικά μέλη ενός τυπικού μεταφορικού αεροσκάφους [6].

Η επιλογή των υλικών για κατασκευαστικές εφαρμογές των αεροσκαφών, εξαρτάται κυρίως από τις διάφορες απαιτήσεις κατά τη λειτουργία. Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε ένα τυπικό μεταφορικό αεροσκάφος, παρουσιάζεται στο σχήμα 1.33.

Στο σχήμα 1.34, παρουσιάζονται τα υλικά κατασκευής τεσσάρων μεταφορικών αεροσκαφών, με το αλουμίνιο να κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (70 - 81%) έναντι άλλων υλικών όπως ο χάλυβας, τα κράματα τιτανίου, τα σύνθετα υλικά.



Σχήμα 1.34 : Υλικά που χρησιμοποιούνται σε επιλεγμένα μεταφορικά αεροσκάφη Boeing [6].

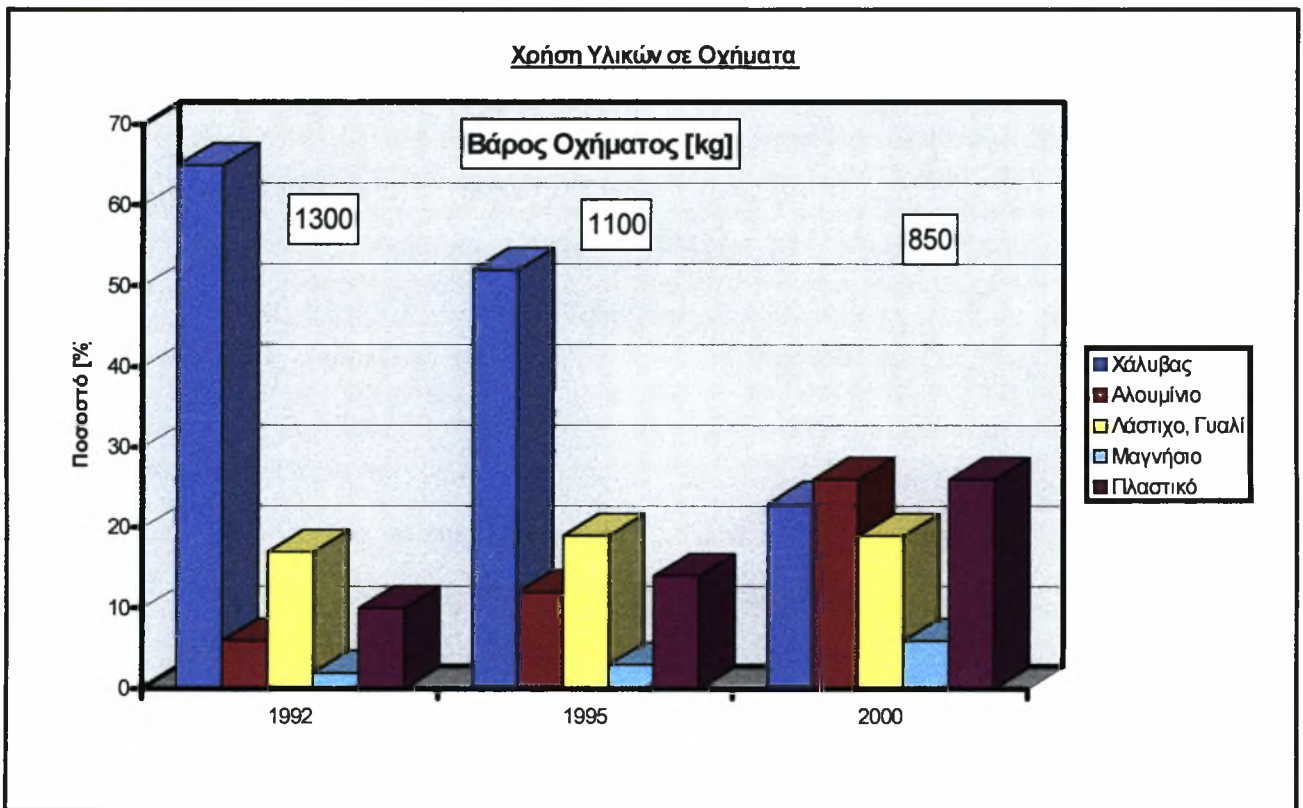
1.6.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η πρώτη προσπάθεια μείωσης του βάρους των αυτοκινήτων, πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του '70, και ήταν αποτέλεσμα της αύξησης της τιμής του πετρελαίου από τις χώρες της Μέσης Ανατολής. Παράλληλα, πολλές χώρες εφάρμοσαν νομοθεσίες, προκειμένου να μειώσουν τα καυσαέρια των αυτοκινήτων, τα οποία προκαλούν μόλυνση στο περιβάλλον. Σύμφωνα με την άποψη αυτή, μείωση του βάρους του αυτοκινήτου κατά 10%, εντιστοιχεί σε μείωση στην κατανάλωση καυσίμου κατά 5.5%. Επιπλέον, για κάθε kg βάρους που εξοικονομείται, εκτιμάται πως μειώνεται η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά 20 kg για ένα αυτοκίνητο που καλύπτει 170000 km.

Οι παραπάνω αιτίες, οδήγησαν στην κατασκευή μικρότερων οχημάτων, και στη χρήση ελαφρύτερων υλικών. Στις μέρες μας, η χρήση ελαφρύτερων υλικών έχει λάβει μεγάλες διαστάσεις, με τη χρησιμοποίηση κάποιων εξαρτημάτων, όπως ο κλιματισμός, το σύστημα ελέγχου των καυσαερίων, αλλά και εξαρτήματα που προσφέρουν προστασία στους κατόχους, όπως το ABS, προστατευτικοί δοκοί στις πόρτες του αυτοκινήτου.

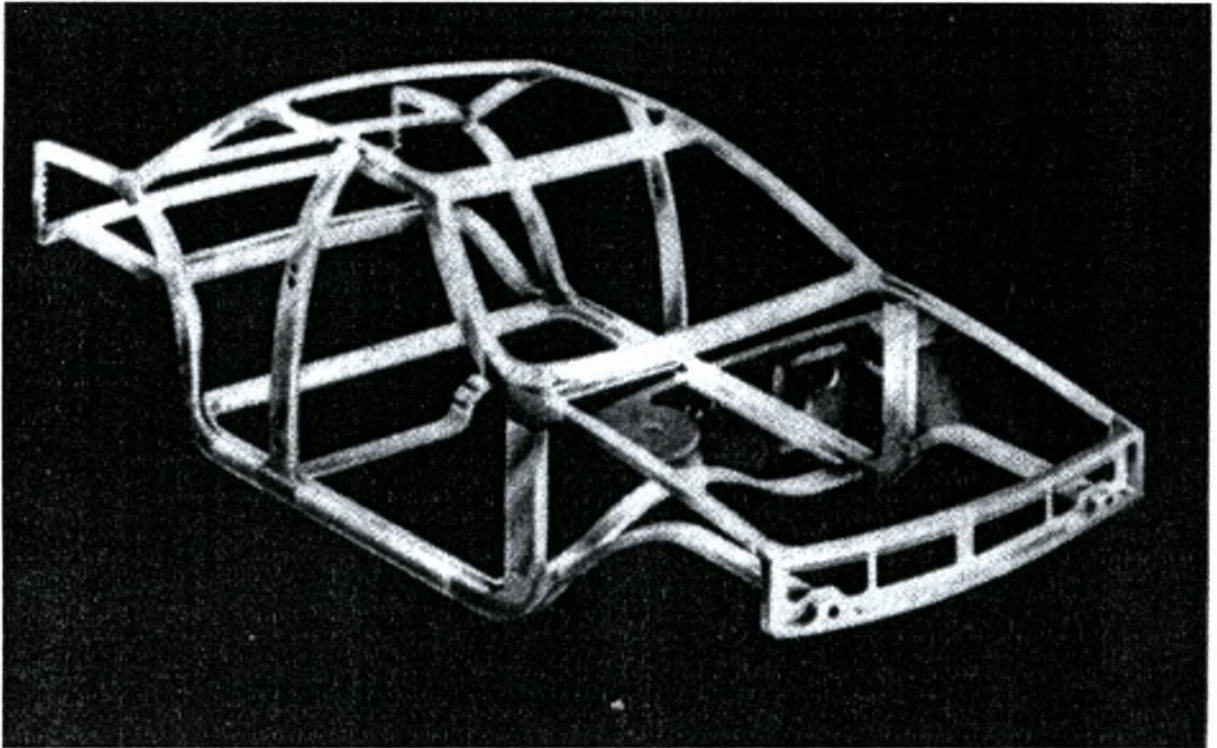
Η προσοχή εστιάστηκε στην αντικατάσταση του χάλυβα και του χυτοσιδήρου από κράματα αλουμινίου, τα οποία συνήθως οδηγούν σε εξοικονόμηση βάρους 40 έως 50%. Η μέση χρησιμοποίηση του αλουμινίου σε οχήματα που κατασκευάζονται στις ΗΠΑ, παρουσιάζει έντονα αυξητικές τάσεις. Η σημερινή και η προβλεπόμενη χρήση των υλικών σε ένα μεσαίου μεγέθους Ιαπωνικού αυτοκινήτου της *Toyota*, φαίνεται στο σχήμα 1.35. Σε αυτή την περίπτωση, το βάρος του οχήματος που κατασκευάστηκε το 1992, αναμένεται να μειωθεί κατά 35% έως το έτος 2000 με το ποσοστό του αλουμινίου να αυξάνει από το 5% στο 27%.

Ωστόσο, ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή υλικών είναι το κόστος, που για ελάσματα χάλυβα είναι περίπου 0.7\$ ανά kg, σε σύγκριση με 3-4\$ ανά kg για διάφορα κράματα αλουμινίου. Σε πολυτελή αυτοκίνητα όπως *Rolls Royce*, *Rover* και *Porsche* γίνεται εκτεταμένη χρήση των κραμάτων αλουμινίου σε διάφορα μέρη του αυτοκινήτου.



Σχήμα 1.35 : Σημερινή και προβλεπόμενη χρήση των υλικών σε οχήματα [6].

Η πρώτη συστηματική παραγωγή αυτοκινήτου, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο για την κατασκευή του αμαξώματος, ήταν το 1990 με το *Honda Acura NSX*. Ο αρχικός σκελετός ζύγιζε μόλις 210 kg, που αντιστοιχούσε σε μία μείωση 140 kg, από την αντίστοιχη κατασκευή από χάλυβα. Η εταιρία *Alcoa* αποφάσισε να ακολουθήσει μία ριζοσπαστική προσέγγιση στη σχεδίαση του σκελετού αυτοκινήτων, παρουσιάζοντας ένα σκελετό αυτοκινήτου από κράματα αλουμινίου (Σχήμα 1.36). Τα κράματα ήταν από τη σειρά 6xxx, ενώ είχε ληφθεί ειδική μέριμνα για την μείωση του πορώδους στις συγκολλήσεις.



Σχήμα 1.36 : Σκελετός αυτοκινήτου της *Alcoa* κατασκευασμένος από κράματα αλουμινίου [6].

1.6.3 Βιομηχανία συσκευασίας

Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, η χρήση του αλουμινίου στη βιομηχανία συσκευασίας, έχει αυξηθεί σε τέτοιο ποσοστό, που αποτελεί ουσιαστικά την μεγαλύτερη αγορά για αυτό το μέταλλο σε πολλές χώρες. Η ευρύτερη χρήση του αλουμινίου, οφείλεται στις ιδιότητές του, αφού είναι ένα ελκυστικό υλικό για τη συσκευασία τροφίμων και αναψυκτικών. Συγκεκριμένα έχει καλή αντοχή σε διάβρωση, είναι μη-τοξικό, ενώ είναι αδιαπέραστο από το φως, την υγρασία και τους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κράματα, τα οποία μπορούν εύκολα να παρασκευαστούν αλλά και να ανακυκλωθούν. Τα προϊόντα με την μεγαλύτερη παραγωγή είναι κουτιά για αναψυκτικά και το αλουμινόχαρτο για οικιακή χρήση.

α) Κουτιά

Η είσοδος του αλουμινίου στην αγορά των κουτιών έγινε το 1962, αντικαθιστώντας τον χάλυβα σε κουτιά από αναψυκτικά. Από τότε, η χρήση του αλουμινίου γενικεύτηκε σε όλα τα κουτιά. Η παγκόσμια κατανάλωση αυτών των κουτιών έφτασε τις 140×10^9 το 1993 και αναμένεται να φτάσει τις 236×10^9 το 2000. Η ανάπτυξη ήταν εντυπωσιακή στην Βόρεια Αμερική, όπου το αλουμίνιο κατείχε το 96% της αγοράς στα κουτιά αναψυκτικών το 1993. Περισσότερο από 2 εκατομμύρια τόνους αλουμινίου καταναλώθηκαν για τον λόγο αυτό, από τα οποία, τα 2/3 ανακυκλώθηκαν.

β) Αλουμινόχαρτο

Το αλουμινόχαρτο συχνά προσδιορίζεται σαν κυλινδρικό φύλλο από αλουμίνιο με πάχος που δεν ξεπερνά το 0.15 mm. Οι εφαρμογές του ποικίλουν τόσο στην οικιακή, όσο και την βιομηχανική του χρήση. Το πάχος καθορίζεται ανάλογα με το κράμα που θα χρησιμοποιηθεί και την καθαρότητα σε αλουμίνιο. Τα κράματα που χρησιμοποιούνται για αυτές τις εφαρμογές, είναι το 3003 και το 8011.

1.7 Μέθοδοι εργαστηριακής αξιολόγησης - ποιοτικού ελέγχου

Τα κυριότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ποιότητα - επιτυχία μιας συγκόλλησης είναι το βάθος διείσδυσης της ζώνης τήξης, το πλάτος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, η μορφή της λίμνης συγκόλλησης, η ύπαρξη ισχόν αιτειών - σφαλμάτων όπως πόροι, ρήγματα, εγκλείσματα κτλ. καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών, χρησιμοποιούνται τόσο οι μη καταστρεπτικές δοκιμές (*N.D.T.*), όσο και οι καταστρεπτικές (*D.T.*).

1.8 Μη-Καταστρεπτικές δοκιμές

1.8.1 Γενικά

Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές (*Non Destructive Testing*) χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα στην βιομηχανία για τον ποιοτικό έλεγχο των συγκολλητιών κατασκευών. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους έναντι των άλλων ελέγχων, είναι το γεγονός ότι εντοπίζουν διάφορα σφάλματα των συγκολλήσεων χωρίς να καταστρέφεται το δοκίμιο ενώ η μέθοδος μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές σε όλη την έκταση του δοκιμίου, βγάζοντας με τον τρόπο αυτό πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Όταν γίνεται αναφορά στον όρο σφάλμα ή ελαττωμα, θεωρείται κάποια ασυνέχεια στο υλικό η οποία μπορεί να προκαλέσει την ανεπιθύμητη αστοχία της κατασκευής κατά την διάρκεια της λειτουργία της. Τα κυριότερα ελαττώματα των συγκολλήσεων έχουν αναφερθεί στην ενότητα 1.4.

Στα πλαίσια των *NDT* έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι σύμφωνα με τις οποίες επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των ελαττωμάτων. Μερικές από αυτές είναι :

1. Ο οπτικός έλεγχος,
2. ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά,
3. ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (*Μαγνητοσκοπία*),
4. ο έλεγχος με υπέρηχους,
5. ο έλεγχος με δινορεύματα (*Eddy Current*),
6. ο έλεγχος ραδιογραφίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι παραπάνω μέθοδοι δεν είναι σε καμία περίπτωση ανταγωνιστικοί μεταξύ τους. Αντιθέτως η μια μέθοδος μπορεί να συμπληρώσει την άλλη, λαμβάνοντας έτσι πιο ακριβή αποτελέσματα. Η απόφαση για το ποια μέθοδο ή ποιός συνδυασμός θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά, εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι, η ιδιομορφία και οι περιορισμοί του εξεταζόμενου δοκιμίου, η φύση και ο προσανατολισμός των σφαλμάτων, ο βαθμός επιτυχίας της συγκόλλησης, το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας, ο αριθμός των δοκιμών και φυσικά το οικονομικό κόστος.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από μια δοκιμή *NDT*, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα. Οι γνώσεις και η πείρα του εξεταστή (*Level 1, 2, 3*) σε συνδυασμό με τον ορθό τρόπο χρησιμοποίησης των μέσων, αποτελούν καθοριστικά στοιχεία στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, διότι ως γνωστόν οι έλεγχοι *NDT* βασίζονται στην **έμμεση** παρατήρηση.

Από τις παραπάνω μεθόδους περιγράφονται στην συνέχεια εκείνες οι οποίες εφαρμόστηκαν στα δοκίμια των σειρών Β και Δ, δηλαδή ο οπτικός έλεγχος, ο έλεγχος της ραδιογραφίας και της μαγνητοσκοπίας.

1.8.2 Οπτικός έλεγχος

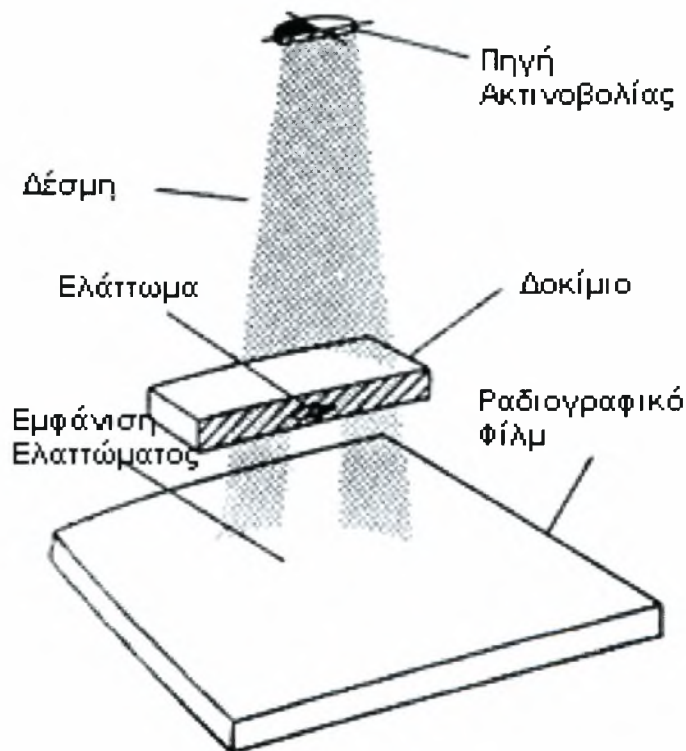
Ο οπτικός έλεγχος, είναι πρώτος έλεγχος που διενεργείται. Με τον οπτικό έλεγχο προσδιορίζεται η μορφή της συγκόλλησης και κάποια μεγάλα επιφανειακά σφάλματα, αλλά τα αποτελέσματα που εκλαμβάνονται δεν είναι επαρκή.

Συγκεκριμένα, γίνεται έλεγχος εάν υπάρχει πλήρης διείσδυση της ζώνης τήξης, εάν υπάρχει το φαινόμενο της ευθυγράμμισης (*misalignment*) σε συγκόλληση δύο ελασμάτων. Η κατάταξη των σφαλμάτων σε συγκολλήσεις, δίδεται από την προδιαγραφή ISO 5817, η οποία παρατίθεται στο παράρτημα.

1.8.3 Έλεγχος ραδιογραφίας

Η βιομηχανική ραδιογραφία είναι μια μη-καταστροφική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί ακτίνες x και γ , για τον προσδιορισμό τυχόν ελαττωμάτων των συγκολλήσεων.

Η αρχή λειτουργίας της ραδιογραφίας στηρίζεται στην ικανότητα των ακτινών x και γ να διαπερνούν στερεά υλικά, σ' ένα βαθμό ο οποίος ποικίλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, όπως π.χ. το μήκος κύματος. Όσο μικρότερο μήκος κύματος χρησιμοποιείται, τόσο περισσότερη ακτινοβολία απορροφάται. Ανάλογα με το πάχος, την πυκνότητα και την σύσταση του υλικού, μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα απορροφάται, ενώ ένα μέρος θα το διαπερνά, δίνοντας με αυτό τον τρόπο τα τυπωμένα αποτελέσματα. Αν υπάρχει ένα κενό ή μια ασυνέχεια στο υλικό, τότε σ' αυτήν την περιοχή η απορροφώμενη ακτινοβολία θα είναι διαφορετική. Αυτή η διαφορά απορρόφησης της ακτινοβολίας από το υλικό, καταγράφεται σ' ένα ραδιογραφικό φιλμ το οποίο τοποθετείται κάτω από το δοκίμιο. Στο σχήμα 1.37 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη της μεθόδου.



Σχήμα 1.37 : Σχηματική διάταξη της μεθόδου ραδιογραφίας.

Το ραδιογραφικό φιλμ εμφανίζεται ως μια ασπρόμαυρη ασαφή εικόνα με σκούρες και ανοιχτόχρωμες περιοχές, ανάλογα με το μέγεθος και το είδος των ελαττωμάτων (ρήγματα, πόροι, κτλ.), γι' αυτό και απαιτείται ιδιαίτερη γνώση και μελέτη του αντικειμένου έτσι ώστε να ερμηνευθούν με ακρίβεια τα αποτελέσματα.

Στον ραδιογραφικό έλεγχο χρησιμοποιούνται σήμερα 2 τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων : Η πρώτη είναι η καταγραφή σ' ένα ραδιογραφικό φιλμ μιας ασαφής διοδιάστατης εικόνας, και η δεύτερη είναι η άμεση παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μια οθόνη (*real time radiography* ή *radioscopy*). Η κύρια διαφορά των 2 τεχνικών είναι το γεγονός ότι στην δεύτερη, το τυχόν σφάλμα που θα ανιχνευτεί εμφανίζεται ως ένα ηλεκτρονικό σήμα (τριοδιάστατο) στην οθόνη. Έτσι παρέχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αλλά παράλληλα αυξάνεται και το κόστος του εξοπλισμού.

Η μέθοδος της ραδιογραφίας μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα σχεδόν τα στερεά υλικά και να αναγνωρίσει σφάλματα κάθε είδους, των οποίων το πάχος και η πυκνότητα διαφέρουν από το υπόλοιπο υλικό. Γενικά εντοπίζει σφάλματα τα οποία έχουν ένα εκτιμήσιμο πάχος και η κατεύθυνση τους είναι παράλληλη προς την δέσμη της ακτινοβολίας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων είναι τα εξής :

1. Εντοπίζει εσωτερικά σφάλματα (χωρίς περιορισμούς στο βάθος),
2. εφαρμόζεται και σε μη-φερρομαγνητικά κράματα, σε αντίθεση με τα μαγνητικά σωματίδια, σε συνθετικά και μη-μεταλλικά υλικά,
3. ανιχνεύει σημαντικές διαφορές στην σύσταση του υλικού,
4. καταγράφει σε μόνιμη βάση τα αποτελέσματα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι δεν ανιχνεύει σφάλματα κάθετα στην διεύθυνση της δέσμης, περιορίζεται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του δοκιμίου, ενώ βέβαια το κόστος εξοπλισμού είναι αυξημένο.

Κατά την μελέτη των δοκιμών της Δ' σειράς στα εργαστήρια της EBETAM, χρησιμοποιήθηκαν ακτίνες x και η τεχνική της αποτύπωσης των αποτελεσμάτων σε ραδιογραφικό φιλμ.

1.8.4 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά

Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά είναι ικανός να εντοπίσει ασυνέχειες σε συγκολλήσεις από φερρομαγνητικά και μη-φερρομαγνητικά υλικά, ακόμα και εάν το ελάττωμα δεν εμφανές με γυμνό μάτι. Το διεισδυτικό υγρό αποιύθεται στην επιφάνεια του

κομματιού, όπου παραμένει για μια χρονική περίοδο και διεισδύει στα ελαττώματα. Για την σωστή χρήση του ελέγχου με διεισδυτικά υγρά, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθαρισμός της επιφάνειας του κομματιού, με σκοπό την καλύτερη διείσδυση του υγρού. Τα βέλτιστα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν εάν η διαδικασία έχει γίνει σε περιβάλλον θερμοκρασίας 20 °C με 30 °C. Εάν το κομμάτι είναι κρύο, ο διεισδυτής μπορεί να παγώσει και να μεγαλώσει σε διαστάσεις, έτσι ώστε να μην μπορεί να διεισδύσει σε μικρά ελαττώματα. Εάν το κομμάτι ή ο διεισδυτής είναι πολύ ζεστά, τα πηκτικά συνθετικά του διεισδυτή μπορεί να εξατμιστούν, μειώνοντας την ευαισθησία.

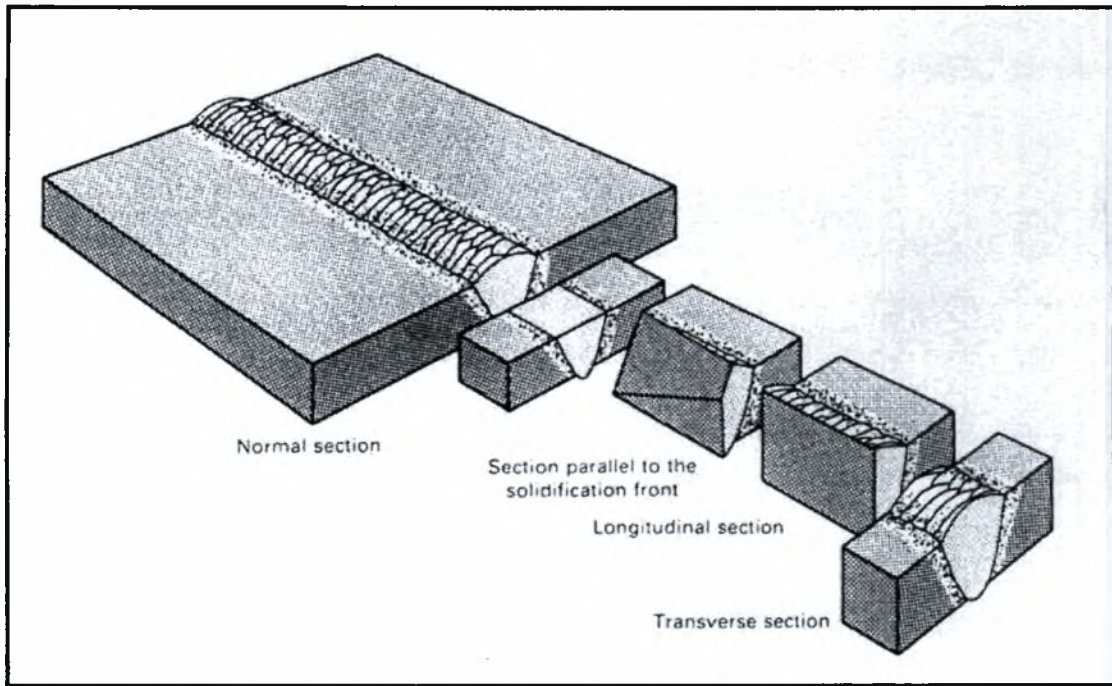
Μετά την περίοδο διείσδυσης, αφαιρείται η περίσσεια του διεισδυτή, που έχει παραμείνει στην επιφάνεια. Τότε αποτίθεται στην επιφάνεια ένα απορροφητικό, ανοικτού χρώματος εμφανιστικό υγρό. Αυτός ο εμφανιστής λειτουργεί ως στυπόχαρτο, εκλύοντας ένα μέρος του διεισδυτή, που είχε παραμείνει στα ελαττώματα της επιφάνειας. Καθώς ο διεισδυτής εκλύεται προς τα έξω, διαχύεται στον εμφανιστή, σχηματίζοντας ενδείξεις, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τα ελαττώματα της επιφάνειας. Ο ελεγκτής παρατηρεί αυτές τις χρωματιστές και φθορίζουσες ενδείξεις και βγάζει χρήσιμα συμπεράσματα.

Με την μέθοδο αυτή, πραγματοποιήθηκε έλεγχος στα δοκίμια της Β' σειράς πειραμάτων στα εργαστήρια της EBETAM.

1.9 Καταστρεπτικές δοκιμές

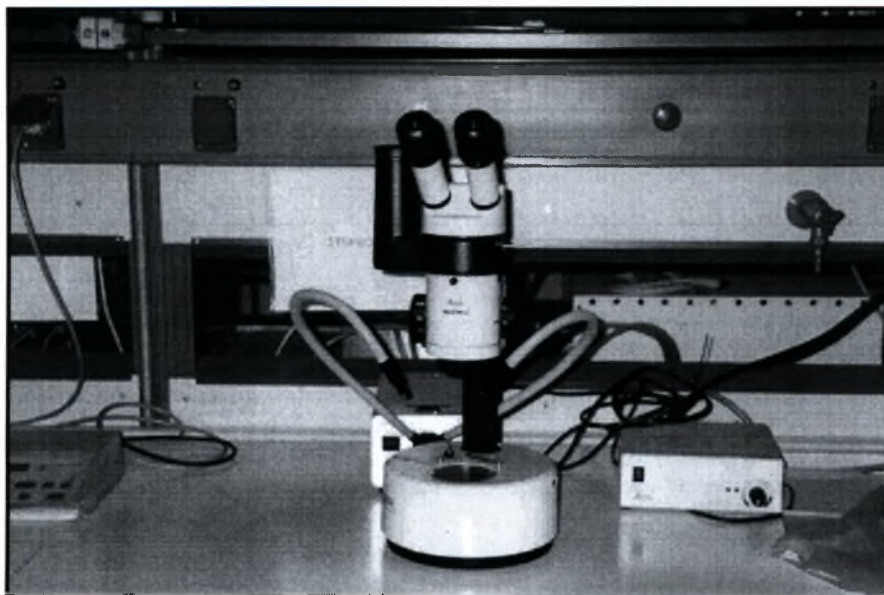
1.9.1 Μεταλλογραφική ανάλυση

Τα δοκίμια κόπηκαν από τα ελάσματα του αλουμινίου, στα οποία έγινε η συγκεκριμένη κατεργασία, στο κοπτικό εργαλείο του εργαστηρίου υλικών, τύπου *Labotom Struers*. Τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη, και λειάνθηκαν διαδοχικά στους δίσκους των 220, 500, 800, 1000 και 4000 Grid. Τα δοκίμια σιλβώθηκαν με αιώρημα αλουμίνας, και προσβλήθηκαν χημικά με το διάλυμα *Swab*. Το διάλυμα, εκλέχθηκε ειδικά για το λόγο ότι είναι κατάλληλο για την μακροσκοπική μελέτη συγκολλήσεων της συγκεκριμένης σειράς κραμάτων αλουμινίου.



Σχήμα 1.38 : Διαμήκης και εγκάρσια τομή της ραφής [10].

Δεν θεωρήθηκε σκόπιμη η περιγραφή της μικροδομής των συγκολλήσεων. Διότι κάτι τέτοιο, θα έφευγε από τα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Αντίθετα κρίθηκε σκόπιμος ο έλεγχος της μακροδομής, που ήταν η κρίσιμη πληροφορία, στην προσπάθεια για βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης. Για την μελέτη της μακροδομής χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο LEITZ ARISTOMET του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



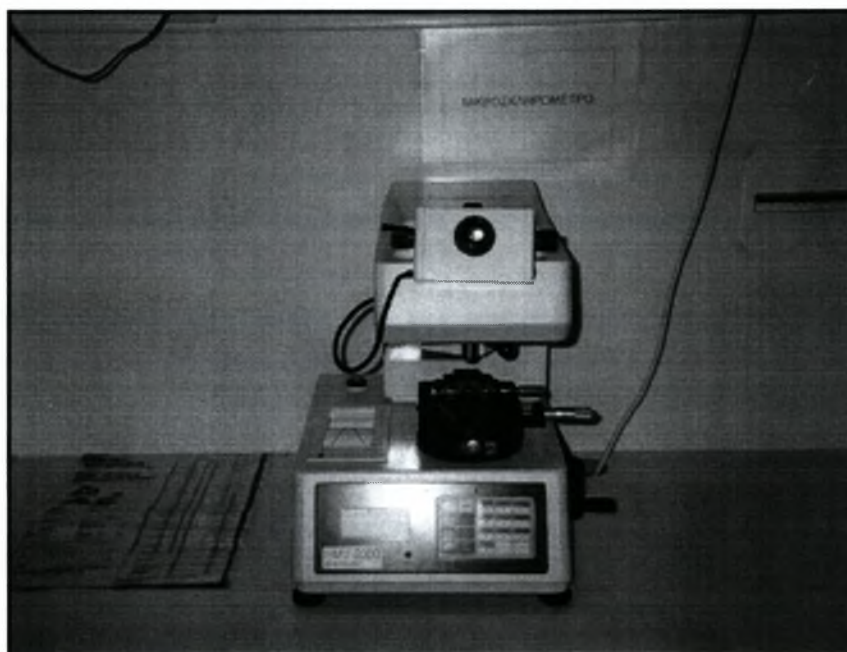
Σχήμα 1.39 : Μακροσκόπιο εργαστηρίου υλικών του Τμήματος.

Στα δοκίμια, έγινε μακροσκοπικός έλεγχος, και εξετάστηκε η διείδυση της λίμνης συγκόλλησης στο πάχος του υλικού. Παράλληλα, προσοχή εσιτάσθηκε στην παρουσία αιλειών στα δοκίμια της συγκόλλησης.

1.9.2 Διαδικασία μικροσκληρομέτρησης

Όπως είναι γνωστό, η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από την φύση του, την συνοχή του και από την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Σκληρότητα είναι η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό όταν μέσα από αυτό διεισδύει ένα σκληρότερο υλικό. Όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο διεισδυτή από διαμάντι. Η δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης έχει πολύ μεγάλη σημασία, διότι εκτός από το μέτρο αντίστασης του υλικού στη τριβή, δείχνει και την κατεργαστικότητα του υλικού.

Για την διεκπεραίωση των συγκεκριμένων σκληρομετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *VICKERS*. Στη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται διεισδυτής από διαμάντι (σκληρότερο υλικό) με σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας και με γωνία κορυφής 136° . Η μέθοδος αυτή είναι η ακριβέστερη και χρησιμοποιείται για την μέτρηση κάθε είδους σκληρότητας. Η μέθοδος *VICKERS* έχει μονάδες τάσης [Kp/mm^2]. Ορίζεται από τον λόγο του φορτίου P προς το εμβαδόν της ουλής S .

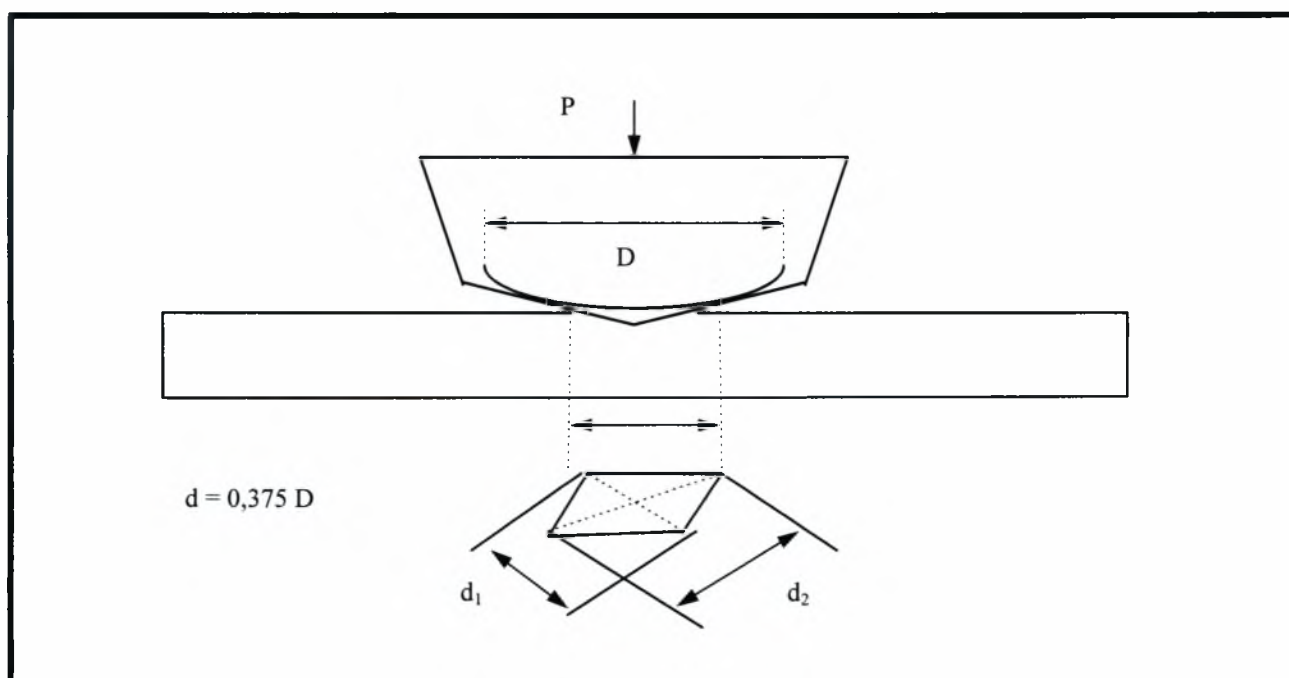


Σχήμα 1.40 : Μικροσκληρόμετρο εργαστηρίου υλικών του Τμήματος.

$$VHN = S/P \quad \eta \quad VHN = 1,8544 \cdot (P/d^2)$$

Όπου $d = (d_1 + d_2)/2$ (μέση τιμή των διαγωνίων)

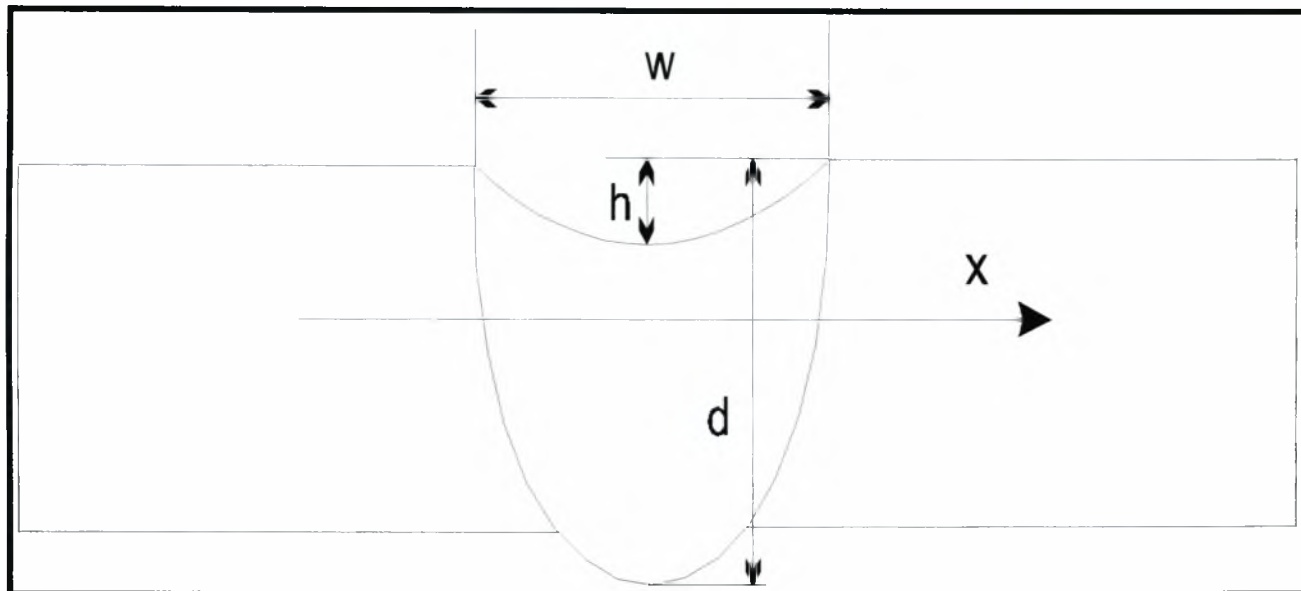
Το φορτίο κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος του μικροσκληρομέτρου, σε διάφορες τιμές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε βάρος 50 gr. Ο χρόνος συμπίεσης του διεισδυτή εξαρτάται από το υλικό, πρέπει όμως να είναι αρκετός ώστε να ολοκληρωθεί η πλαστική παραμόρφωση. Η δοκιμή γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Η ελεγχόμενη επιφάνεια πρέπει να είναι λεία και καθαρή και το φορτίο πρέπει να δρα κάθετα σε αυτή. Ο χρόνος συμπίεσης κυμαίνεται γύρω στα 10 sec. Σύμφωνα με τη συσκευή, μετρώνται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο οι διαμέτροι d_1 , d_2 και το όργανο δίδει την σκληρότητα ανάλογα με την μεγέθυνση. Στο σχήμα 1.41 φαίνεται παραστατικά η γεωμετρία της μεθόδου.



Σχήμα 1.41 : Γεωμετρική μορφή της μεθόδου VICKERS.

Συγκεκριμένα, τα δοκίμια σκληρομετρήθηκαν κατά τον άξονα x , παράλληλο προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, όπως δείχνει και το σχήμα 1.42. Στο συγκεκριμένο σχήμα, φαίνονται και τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη της συγκόλλησης, όπως το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης w , το βάθος διεיסδυσης της ζώνης τήξης d , και το ειδικό βάθος h .

Το βήμα της μέτρησης, διαφοροποιήθηκε ανάλογα με την περίπτωση, αλλά κυμάνθηκε από 150 έως 200 μm .



Σχήμα 1.42 : Τρόπος μικροσκληρομέτρησης και γεωμετρικά μεγέθη συγκόλλησης.

1.10 Συγκολλησιμότητα των κραμάτων αλουμινίου

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, εξαιτίας της σχετικά υψηλής τιμής του λόγου αντοχή προς βάρος και της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση. Όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 1.6, τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και στα ναυπηγεία. Η πλήρης αξιοποίηση των κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται από την ικανότητα, του να παράγουν σύνθετες κατασκευές, δηλαδή να μπορούν να συγκολληθούν. Είναι χαρακτηριστικό, πως σήμερα η αεροπορική βιομηχανία χρησιμοποιεί ηλώσεις στις κατασκευές της, γεγονός που είναι επιβαρυντικό τόσο από πλευράς κόστους, όσο από άποψη αντοχής της κατασκευής.

Από την άλλη πλευρά, οι συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζουν ορισμένα ελατώματα. Χαρακτηριστικά είναι ο σχηματισμός πορώδους, η ευπάθεια σε ρηγματώσεις, οι αλλαγές στην μικροδομή. Από την μικροδομή εξαρτώνται οι μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα) των κραμάτων αλουμινίου. Με την συγκόλληση, εισάγεται στο έλασμα θερμικό φορτίο, το οποίο διαταράσσει την ισορροπία στη μικροδομή, στις

περιοχές της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ. Συνεπώς, επιθυμητή είναι εκείνη η μέθοδος συγκόλλησης, η οποία "κατά το δυνατόν" δεν θα επιφέρει δραστικές αλλαγές, κυρίως σε έκταση.

Με σκοπό "κατά το δυνατόν" να διατηρηθούν οι ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου και στην περιοχή της συγκόλλησης, εφαρμόζεται η τεχνική laser. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.1, η συγκόλληση laser έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως :

1. Ελεγχόμενη πρόοδος θερμότητας,
2. μικρό χρόνο αλληλεπίδρασης,
3. αυξημένοι ρυθμοί στερεοποίησης, που παράγουν εκλεπτυσμένες δομές με βελτιωμένες ιδιότητες,

Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτό πως η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου με CO₂ laser, παρουσιάζει πολλά προβλήματα στην ανάπτυξη, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (τρεις φορές μεγαλύτερη από του χάλυβα) και υψηλής ανακλαστικότητας.

Σήμερα, αρκετές ερευνητικές ομάδες [*Kutsuna, Mazumder, Katayama*] ασχολούνται με το θέμα της συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου με laser, αποδεικνύοντας ότι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος, μπορούν να υπερκαλύψουν τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν, και να επιτύχουν συγκολλήσεις βιομηχανικά εφαρμόσιμες. Στα πλαίσια αυτά κινήθηκε και η παρούσα εργασία, προσπαθώντας να προσδιορίσει κατάλληλες πειραματικές συνθήκες για ανάπτυξη μεθόδου συγκολλήσεως με laser στα κράματα αλουμινίου της σειράς **6xxx**.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Η χημική σύσταση των κραμάτων [wt%] που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 : Χημική σύσταση κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν.

Κράμα	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
A 6063	0.38	0.51	0.28	0.032	0.026	0.046	bal.
A 6061	0.74	0.98	0.54	0.25	0.11	0.13	bal.
A 6082	1.02	0.74	0.32	0.05	0.79	0.02	bal.

Σχηματικά η πειραματική διάταξη δίδεται στο σχήμα 2.1 όπου και ορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. Η δέσμη του laser, δημιουργείται στην κοιλότητα με τους παραβολικούς καθρέπτες, και οδηγείται στην κεφαλή του laser, μέσω ενός συστήματος καθρεπτών, που επιτρέπει την σχετική κίνηση σε ένα άξονα (x). Το τεμάχιο προσδένεται στο τραπέζι εργασίας, το οποίο ελέγχεται από σύστημα CNC, με δυνατότητα κίνησης τριών αξόνων (x - y - z).

2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων πειράματος

Είναι γεγονός, πως σε μια συγκόλληση, γίνεται πρόσδοση ενέργειας από μια οποιαδήποτε χρησιμοποιούμενη πηγή στο υλικό. Κύριο πλεονέκτημα της συγκόλλησης με laser, σε σχέση με άλλες τεχνικές, είναι ο έλεγχος της πρόσδοσης αυτής της ενέργειας. Σε μια συγκόλληση με laser, πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο η πηγή ενέργειας, ώστε να επιτευχθεί πλήρη διείσδυση της ζώνης τήξης. Ωστόσο, αναγκαίος κρίνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης ή συντομότερα ΘΕΖ. Παράλληλα, κρίνεται σκόπιμη η ελαχιστοποίηση των παραμένουσων τάσεων, καθώς και η αποφυγή ατελειών, που υποβαθμίζουν την μηχανική αντοχή του υλικού. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ο λόγος πρόσδοσης θερμότητας (*heat input*), που ισούται :

$$n = \frac{Q}{u} \quad [\text{J} / \text{mm}]$$

Προφανώς, πρέπει να ελεγχθεί ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας n (*heat input*), προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική τήξη και ροή του υλικού, ή η μερική και ασθενική τήξη.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως δεν έχει γίνει κάποια προσπάθεια συγκόλλησης δύο διαφορετικών φύλλων αλουμινίου, αλλά μόνο περάσματα *bead on plate*. Στην πράξη, πριν επιχειρηθεί συγκόλληση, πραγματοποιούνται πειράματα *bead on plate*, τα οποία είναι απλά περάσματα της δέσμης του laser, πάνω από το προς συγκόλληση υλικό. Από αυτά τα πειράματα, καταλήγει κανείς στις βέλτιστες συνθήκες του laser, τις οποίες θα χρησιμοποιήσει τελικά για την συγκόλληση.

2.3 Πειράματα *bead on plate*

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκαν πέντε σειρές πειραμάτων, με διαφορετικά συστήματα laser διοξειδίου του άνθρακα, με διαφορετικά κράματα αλουμινίου. Συγκεντρωτικά εμφανίζονται στον πίνακα 2.2 πληροφορίες για τις πέντε σειρές πειραμάτων.

Πίνακας 2.2 : Συνοπτικές πληροφορίες για τις πέντε σειρές πειραμάτων.

Σειρά	Τύπος	Μεγ. ισχύς συστήματος	Κράμα	Επιφανειακή Κατεργασία	Χρόνος διεξαγωγής
A	EBETAM	1.5 kW	6063-T6	Καμία, αμμοβολή	Ιούλιος 1996
B	LIC	3 kW	6063-T6	αμμοβολή	Σεπτέμβριος 1996
Γ	LIC	3 kW	6061-O	αμμοβολή	Νοέμβριος 1996
Δ	LIVERPOOL	5 kW	6061-T6	αμμοβολή	Φεβρουάριος 1997
E	EBETAM	1.5 kW	6082-T6	χρωμ.ανοδίωση, επικαλ. γραφίτη, αμμοβολή	Ιούλιος 1997

Για την Α' σειρά πειραμάτων, έγινε μεταλλογραφική ανάλυση, ενώ για την Β' σειρά πειραμάτων, έγινε έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, μεταλλογραφική ανάλυση και μικροσκληρομετρήσεις. Για την Γ' σειρά, η αξιολόγηση περιλάμβανε μεταλλογραφική ανάλυση και μικροσκληρομετρήσεις. Για την Δ' σειρά, έγινε έλεγχος με ραδιογραφία, μεταλλογραφική ανάλυση και μικροσκληρομετρήσεις. Τέλος, για την Ε' σειρά, πραγματοποιήθηκε μόνο μεταλλογραφική ανάλυση.



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Α' Σειρά πειραμάτων

Στα 15 περάσματα που έγιναν σε αυτή την ομάδα, η ισχύς του laser διατηρήθηκε σταθερή στα 1560 W, ενώ το σημείο εστίασης της δέσμης του laser, διατηρήθηκε και αυτό σταθερό, - 1 mm από την επιφάνεια του υλικού. Η επιφάνεια των δοκιμών A01 έως A09, δεν είχε υποστεί καμία κατεργασία, ενώ η επιφάνεια των δοκιμών A11 έως A13, είχε υποστεί αμβολή (μέγεθος κόκκου άμμου 200μm), προκειμένου να αυξηθεί η απορροφητικότητα. Στα 4 πρώτα περάσματα, χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο ήλιο, ενώ στα υπόλοιπα περάσματα, χρησιμοποιήθηκε άζωτο, σε σταθερή πίεση 4 bar. Αναλυτικά οι συνθήκες δίνονται στον πίνακα 3.1, όπου σημειώνεται και ο αντίστοιχος Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας (*heat input*).

Πίνακας 3.1 : Συνθήκες Α' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.

A / A	Ισχύς Q [W]	Ταχύτητα u [m/min]	Αέριο	Σ.Εστίασης [mm]	Πίεση [bar]	Ρ.Π.Θ. [J/mm]
A01	1560	1.60	Ήλιο	- 1	4	0.97
A02	1560	1.20	Ήλιο	- 1	4	1.30
A03	1560	0.80	Ήλιο	- 1	4	1.95
A04	1560	0.60	Ήλιο	- 1	4	2.60
A05	1560	1.60	Άζωτο	- 1	4	0.97
A06	1560	1.20	Άζωτο	- 1	4	1.30
A07	1560	0.80	Άζωτο	- 1	4	1.95
A08	1560	0.60	Άζωτο	- 1	4	2.60
A09	1560	1.60	Άζωτο	- 1	4	0.97
A11	1550	1.60	Άζωτο	- 1	4	0.97
A12	1550	1.20	Άζωτο	- 1	4	1.29
A13	1550	0.60	Άζωτο	- 1	4	2.58
A14	1550	0.40	Άζωτο	- 1	4	3.87
A15	1550	0.20	Άζωτο	- 1	4	7.75

Κατά τη Α' σειρά πειραμάτων, τα αποτελέσματα δεν ήταν καθόλου ενθαρρυντικά. Στα περάσματα τα οποία έγιναν, σε έλασμα που δεν είχε υποστεί καμία επιφανειακή κατεργασία, η λίμνη συγκόλλησης ήταν αμελητέα και δύσκολη προς εντοπισμό. Τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα στα δοκίμια A11 έως A15, τα οποία είχαν υποστεί αμβολή, αλλά ακόμα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα.

Στα δοκίμια της Α' σειράς, η ζώνη τήξης του υλικού, ήταν τόσο μικρή, που ουσιαστικά ήταν μη-μετρήσιμη. Επομένως δεν ήταν δυνατή η μικροσκοπική μέτρηση των ενλόγω δοκιμίων.

Είναι γεγονός, πως από αυτή τη σειρά πειραμάτων, δεν αναμένονταν επιτυχή αποτελέσματα, καθώς ήταν τα πρώτα πειράματα, και έπρεπε να προσδιοριστεί το πεδίο παραμέτρων που θα εξασφάλιζαν την πλήρη διείσδυση στο συγκεκριμένο έλασμα. Όλα τα περάσματα έγιναν στο CO₂ laser της EBETAM, μέγιστης ισχύος 1.5 kW και με κατανόμη δέσμης TEM₀₀.

Στις ομάδες περασμάτων A01-A04 και A05-A09, χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες συνθήκες συγκόλλησης, με μοναδική διαφορά την χρήση προσιτατευτικού αερίου ηλίου και αζώτου αντίστοιχα, με σκοπό την καταγραφή της συμπεριφοράς των συγκολλήσεων στο προσιτατευτικό αέριο. Δυστυχώς, τα αποτελέσματα ήταν αποθαρρυντικά, καθώς η ακτινοβολούμενη επιφάνεια δεν είχε υποστεί καμία κατεργασία, με αποτέλεσμα σχεδόν όλη η δέσμη να ανακλασθεί. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός, πως σε όλα τα δοκίμια, δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός της ζώνης τήξης, παρά μόνο σε πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις.

Στην τρίτη ομάδα πειραμάτων A11-A15, αποφασίστηκε η κατεργασία της επιφάνειας των δοκιμίων, προκειμένου να αυξηθεί το ποσοστό της απορρόφησης της δέσμης από το υλικό. Πράγματι, τα αποτελέσματα ήταν σαφώς καλύτερα από τα προηγούμενα, αλλά και πάλι η ζώνη τήξης είχε περιορισμένες διαστάσεις. Δεδομένου πως το συγκεκριμένο laser, είχε φτάσει στα όριά του, ως προς ισχύ και ταχύτητα, αποφασίστηκε η χρησιμοποίηση ενός laser μεγαλύτερης ισχύος πάνω στο ίδιο υλικό, προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης.

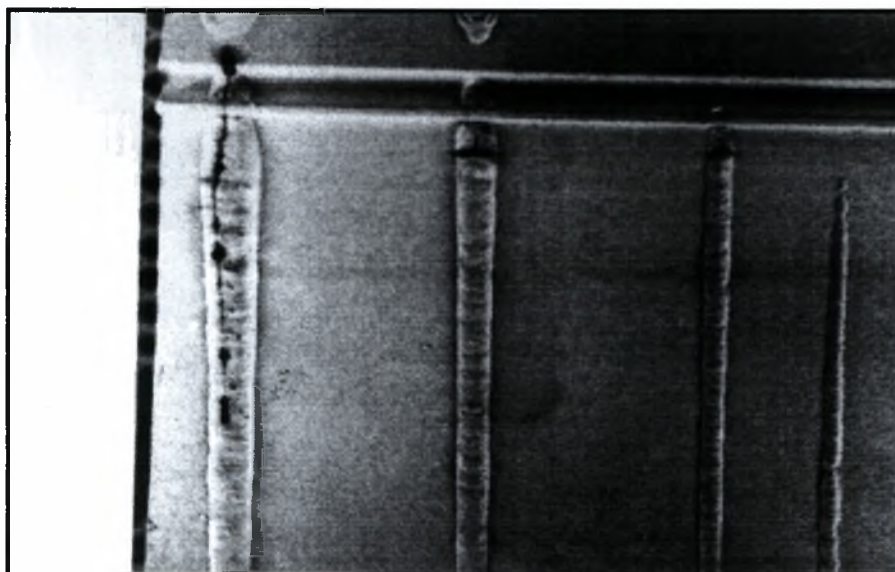
3.2 Β' Σειρά πειραμάτων

Στα 10 πειράματα που έγιναν σε αυτή την ομάδα, η ισχύς του laser μεταβλήθηκε από 1 kW έως 3 kW, ενώ το σημείο εστίασης της δέσμης του laser, διατηρήθηκε και αυτό σταθερό, - 1 mm από την επιφάνεια του υλικού. Στα όλα τα δείγματα η επιφάνεια είχε υποστεί αμμοβολή (μέγεθος κόκκου άμμου 200 μ m), προκειμένου να αυξηθεί η απορροφητικότητα. Στα όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο άζωτο, σε σταθερή πίεση 4 bar. Αναλυτικά οι συνθήκες δίνονται στον πίνακα 3.2, όπου σημειώνεται και το αντίστοιχος Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας (*heat input*).

Πίνακας 3.2 : Συνθήκες Β' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.

A / A	Ισχύς Q [W]	Ταχύτητα u [m/min]	Αέριο	Σ.Εστίασης [mm]	Πίεση [bar]	Ρ.Π.Θ. [J/mm]
A16	3000	1.65	Άζωτο	-1	4	1.82
A17	3000	2.25	Άζωτο	-1	4	1.33
A18	3000	4.50	Άζωτο	-1	4	0.67
A19	2000	4.50	Άζωτο	-1	4	0.44
A20	2000	2.25	Άζωτο	-1	4	0.89
A21	2000	6.00	Άζωτο	-1	4	0.33
A22	3000	6.00	Άζωτο	-1	4	0.50
A23	3000	9.00	Άζωτο	-1	4	0.33
A24	1500	1.50	Άζωτο	-1	4	1.00
A25	1000	1.50	Άζωτο	-1	4	0.67

Στα δοκίμια της Β' σειράς έγινε έλεγχος με διεισδυτικά υγρά. Στα πειράματα με την μεγαλύτερη λίμνη συγκόλλησης, παρατηρείται πολύ έντονο πορώδες, ενώ εμφανής είναι και η παρουσία ρηγματώσεων. Αντιπροσωπευτικά φαίνεται στο σχήμα 3.1 οι ρηγματώσεις στο δοκίμιο A16, ενώ τα μαύρα στίγματα στις ραφές, είναι πορώδες.



Σχήμα 3.1 : Μικρορηγματώσεις και πορώδες στα δοκίμια A16, A17, A18 και A19 (από αριστερά).

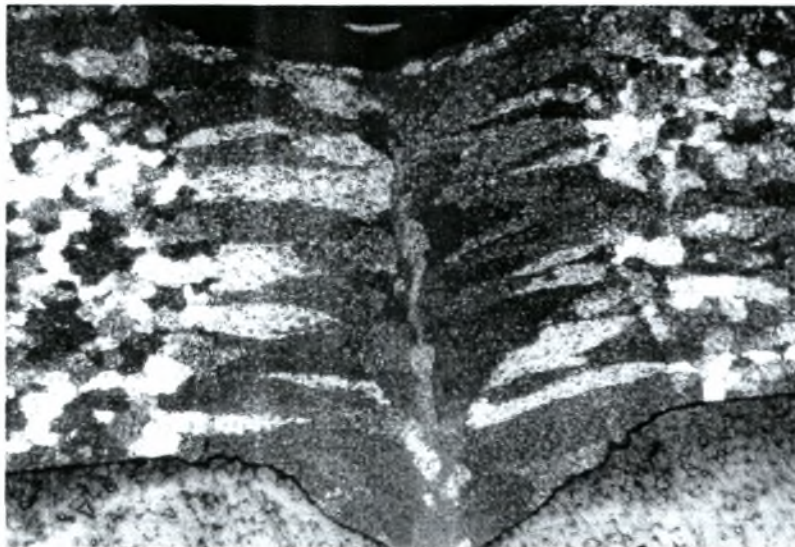
Τα δοκίμια εξετάσθηκαν μακροσκοπικά, όπου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2, ενώ παρουσιάζονται και ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμών.

Πίνακας 3.3 : Πίνακας συσχέτισης Β' σειράς πειραμάτων *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.

A / A	Heat Input n [J/mm]	Πλάτος w [mm]	Βάθος d [mm]	w / d [-]
A16	1.82	2.30	1.90	1.21
A17	1.33	1.82	1.84	0.99
A18	0.67	1.56	1.65	0.95
A19	0.44	1.31	1.72	0.76
A20	0.89	2.13	1.76	1.21
A21	0.33	0.84	1.52	0.55
A22	0.50	1.28	1.62	0.79
A23	0.33	1.05	1.56	0.67
A24	1.00	1.94	1.60	1.21
A25	0.67	1.40	1.60	0.88



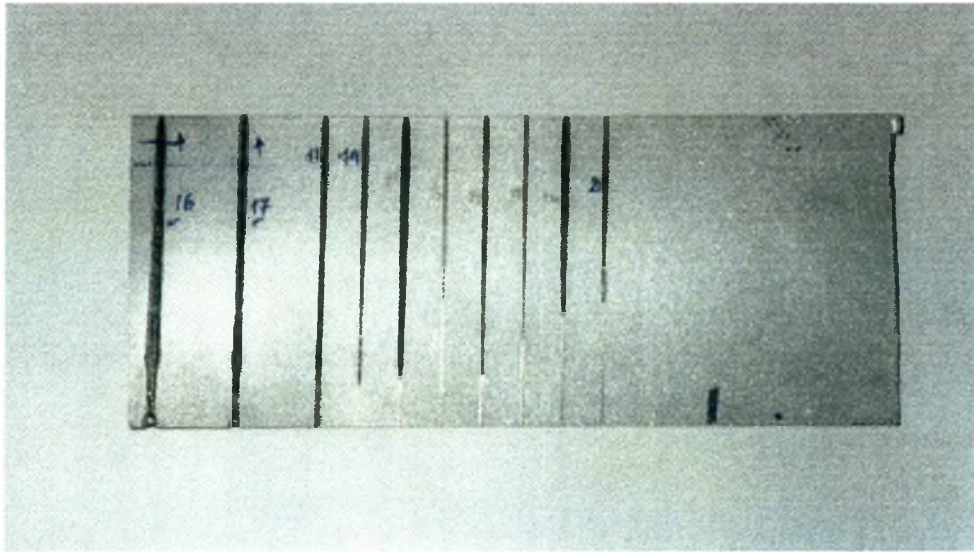
Σχήμα 3.2 : Φωτογραφία του δοκιμίου A18.



Σχήμα 3.3 : Φωτογραφία του δοκιμίου A19.

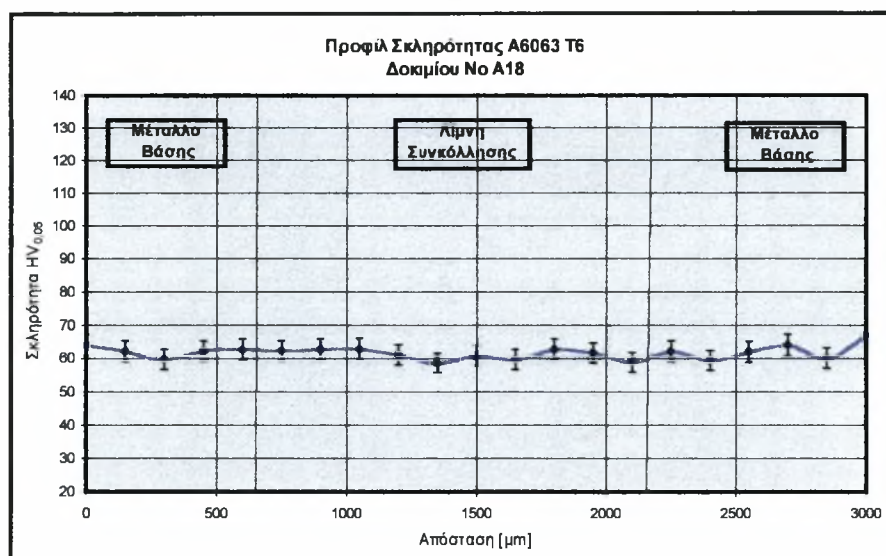


Σχήμα 3.4 : Φωτογραφία του δοκιμίου A21.

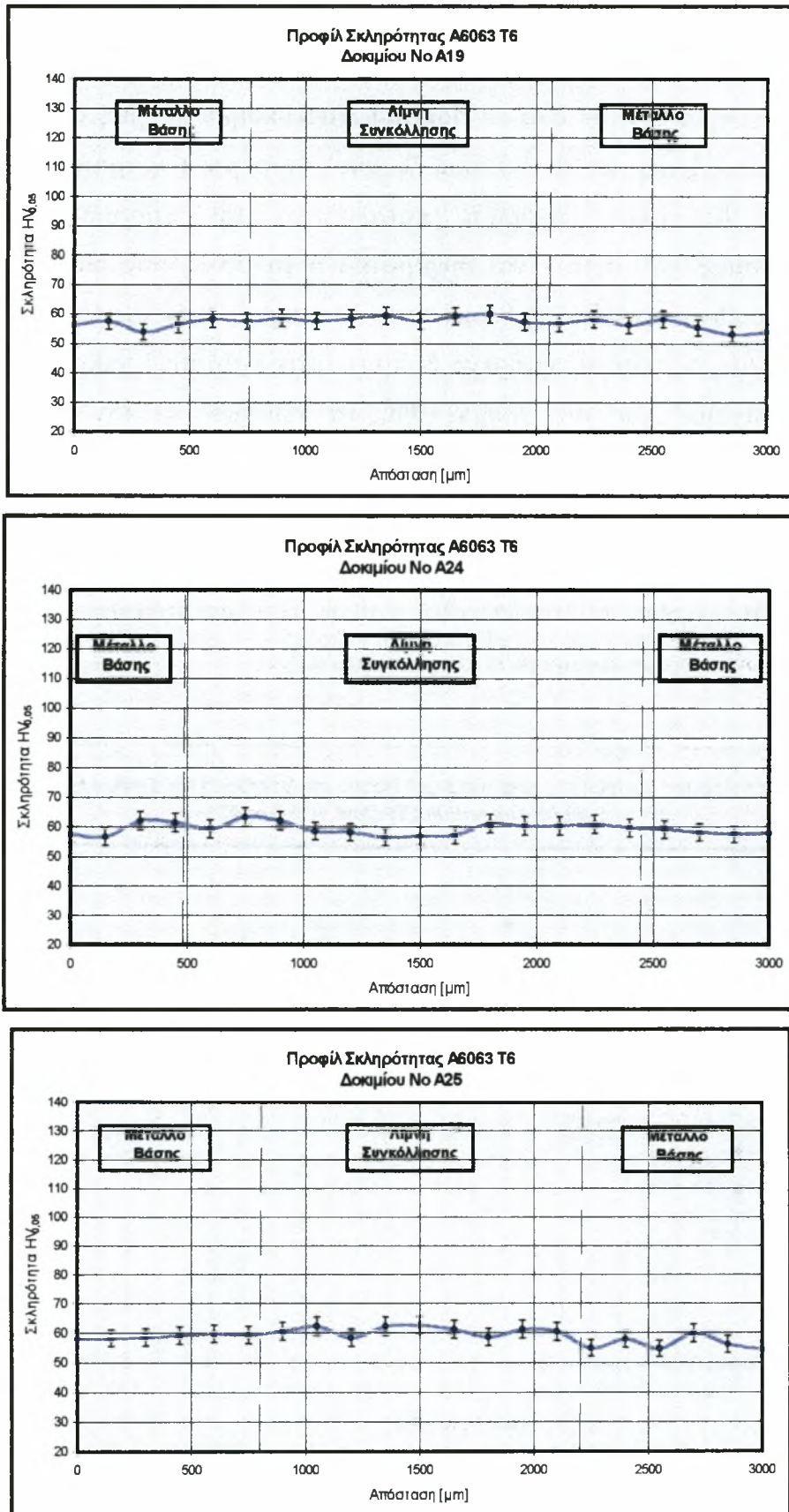


Σχήμα 3.5 : Φωτογραφία των περασμάτων στο έλασμα.

Κατά τη Β' σειρά των πειραμάτων, σε όλα τα δοκίμια επετεύχθηκε πλήρης διείσδυση. Ο έλεγχος της μικροσκληρότητας έλαβε χώρα σε όλα τα δοκίμια αυτής της σειράς πειραμάτων. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε στη μηχανή μικροσκληρομέτρησης ήταν 50 gr. ενώ ο χρόνος εντύπωσης ήταν 10 sec. Οι μετρήσεις έγιναν σε βάθος περίπου 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου, με βήμα 150 έως 300 μm ανάλογα με την περιοχική μικροσκληρομέτρησης, ξεκινώντας από το μέταλλο βάσης και καταλήγοντας πάλι σε αυτό. Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένα προφίλ σκληρότητας αυτής της σειράς.



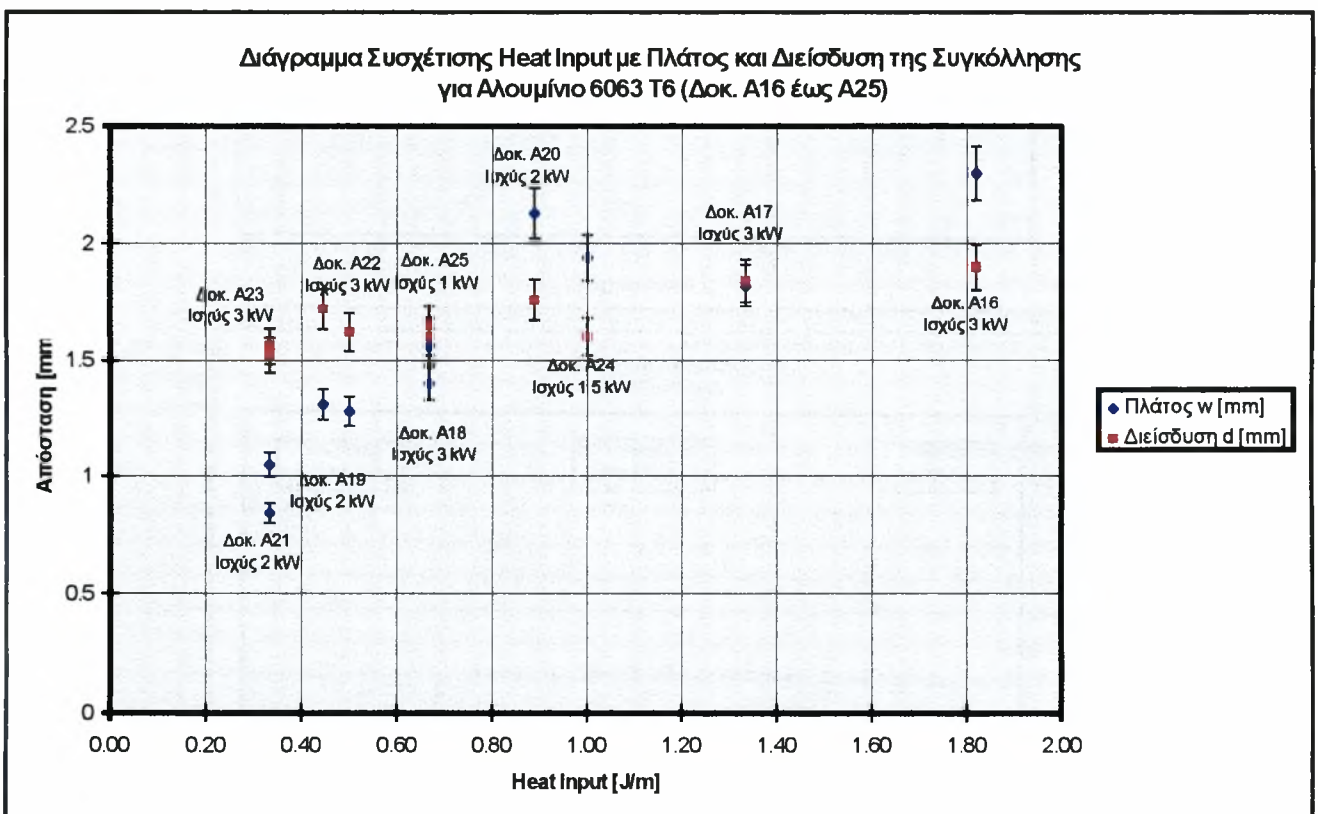
Σχήμα 3.6 : Προφίλ μικροσκληρότητας του δοκιμίου A18.



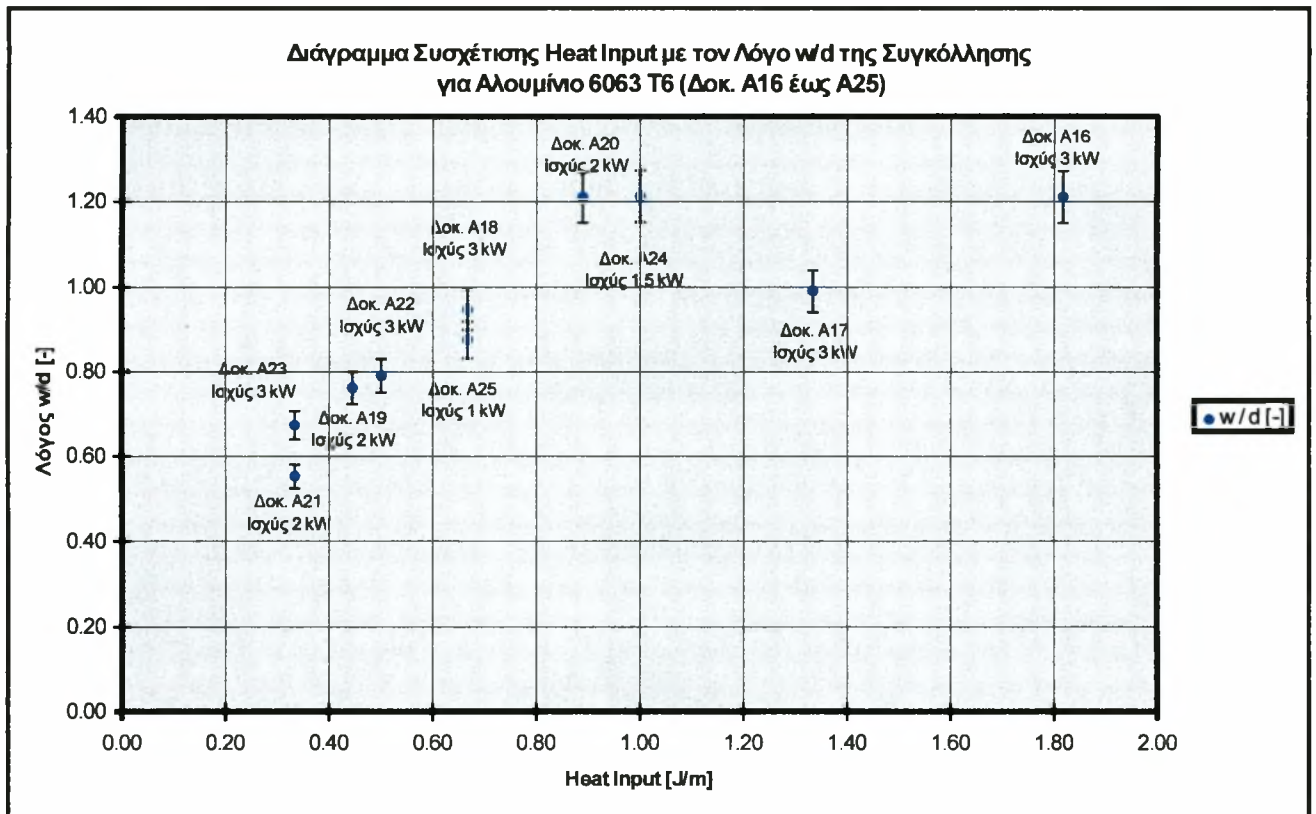
Σχήμα 3.7 : Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A 19, A24 και A25.

Όλα τα περάσματα έγιναν στο CO₂ laser του LIC/ΠΤΕ στο Κορωπί Αττικής, μέγιστης ισχύος 3 kW και με κατανομή δέσμης TEM₀₁*. Όπως φαίνεται τόσο στον πίνακα 3.3 όσο και στο σχήμα 3.8, σε όλα τα δοκίμια επιτεύχθηκε πλήρης διείσδυση, αφού σε όλες τις περιπτώσεις ξεπέρασε το 1.6 mm. Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, η αμμοβολή της επιφάνειας των δοκιμίων, επέδρασε καταλυτικά στην απορρόφηση μεγαλύτερου ποσοστού της δέσμης, το οποίο είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από εκείνο της Α' σειράς πειραμάτων. Οι ρυθμοί πρόσδοσης θερμότητας *heat input*, ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτούς της Α' σειράς, και σε ορισμένα δοκίμια ήταν κατά πολύ μικρότερος.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8, τα δοκίμια με τον μεγαλύτερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές τόσο στο πλάτος όσο και στη διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης. Οπότε μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, πως με μεγάλες τιμές του *heat input*, μπορούν να επιτευχθούν λίμνες συγκόλλησης με μεγάλο πλάτος, γεγονός που πρέπει να αποφευχθεί, καθώς τα μειονεκτήματα πολλαπλασιάζονται, για λόγους οι οποίοι έχουν αναφερθεί στην ενότητα 1.4.



Σχήμα 3.8 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείσδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6063-T6 (Δοκ. A 16 έως A25).



Σχήμα 3.9 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6063-T6 (Δοκ. A16 έως A25).

Στα δοκίμια με υψηλό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας, παρατηρήθηκαν επίσης μικρορήγματα και σε ορισμένα δοκίμια, έντονο πορώδες (Σχήμα 3.1). Είναι γεγονός, πως τα ρήγματα, οφείλονται στον ρυθμό θέρμανσης - ψύξης του δοκιμίου, ο οποίος ήταν πολύ έντονος, ενώ το πορώδες μπορεί να ερμηνευτεί ως ακαθαρσίες της επιφάνειας του δοκιμίου, ή ως εγκλωβισμένο προστατευτικό αέριο του ακροφυσίου.

Αντίθετα, στα δοκίμια A21 και A23, τα οποία είχαν και τον μικρότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας, έχει επιτευχθεί πλήρης διείδυση, με διατήρηση του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε χαμηλά επίπεδα. Βέβαια, μικρή λίμνη συγκόλλησης, σημαίνει λιγότερες ατέλειες, είτε αυτές είναι πόροι είτε μικρορήγματα, που σε τελική ανάλυση, σημαίνει μικρότερη μηχανική υποβάθμιση του υλικού.

Ο λόγος w/d, αποτελεί ένα κριτήριο αξιολόγησης της λίμνης συγκόλλησης, καθώς δίδει μια πρώτη εντύπωση της γεωμετρίας της λίμνης συγκόλλησης. Ένας μεγάλος λόγος w/d, προτιρεί σε τέτοια γεωμετρία, κατά την οποία το πλάτος της Λ.Σ. είναι αρκετά μεγάλο, σε σχέση με την διείδυση της Λ.Σ.. Στην περίπτωση που έχει επιτευχθεί πλήρης διείδυση, μεγάλες τιμές του παραπάνω λόγου, είναι ανεπιθύμητες, διότι υποδηλώνεται το μεγάλο μέγεθος του πλάτους της Λ.Σ., γεωμετρικό χαρακτηριστικό, που δεν είναι

επιθυμητό σε συγκολλήσεις. Σε περίπτωση που δεν έχει επιτευχθεί πλήρης διείσδυση, ο λόγος, παίρνει ακόμα πιο μεγάλες τιμές, καθώς ο παρονομαστής του κλάσματος, παίρνει μικρές τιμές.

Αντίθετα, μικρές τιμές του λόγου w/d (< 1), σημαίνει πως για διείσδυση περίπου ίση με το πάχος του φύλλου αλουμινίου (1.6 mm), το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης, κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα. Επιπλέον, αποκλείεται η περίπτωση, κατά την οποία, να δημιουργηθεί μικρή τιμή του λόγου w/d από κάποια μικρή διείσδυση (όχι της τάξεως του πάχους του φύλλου), με ακόμα πιο μικρότερο πλάτος Λ.Σ., για ευνόητους λόγους.

Στο σχήμα 3.9, παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης *heat input* και του λόγου w/d της συγκόλλησης. Ο λόγος w/d , παίρνει τιμές από 0.55 έως 1.21. Σε όλα τα δοκίμια επιτεύχθηκε πλήρης διείσδυση. Τα δοκίμια A21 και A23, έχουν τις μικρότερες τιμές του λόγου w/d , ενώ έχουν και την μικρότερη τιμή στο *heat input*, που δείχνει πως με την μικρότερη τιμή του *heat input*, επιτυγχάνονται καλύτερες συγκολλήσεις, με λιγότερα σφάλματα.

Τέλος, όσον αφορά την μικροσκοπική μελέτη, όπως φαίνονται στα σχήματα 3.6 και 3.7, δεν υπήρξε κάποια διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ μετάλλου βάσης και λίμνη συγκόλλησης. Επίσης, δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός της Θερμικά Επηρεαζόμενης Ζώνης της λίμνης συγκόλλησης, κυρίως λόγω του αντιδραστηρίου που χρησιμοποιήθηκε, που είναι καιάλληλο για μακροσκοπικό έλεγχο.

3.3 Γ' Σειρά πειραμάτων

Στα 14 περάματα που έγιναν σε αυτή την ομάδα, η ισχύς του laser μεταβλήθηκε από 2 kW έως 3 kW, ενώ το σημείο εστίασης της δέσμης του laser, διατηρήθηκε και αυτό σταθερό, - 1 mm από την επιφάνεια του υλικού. Στα όλα τα δείγματα η επιφάνεια είχε υποστεί αμμοβολή (μέγεθος κόκκου άμμου 200μm), προκειμένου να αυξηθεί η απορροφητικότητα. Στα όλα τα περάσματα χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο άζωτο, σε σταθερή πίεση 4 bar. Αναλυτικά οι συνθήκες δίνονται στον πίνακα 3.4, όπου σημειώνεται και το αντίστοιχος Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας (*heat input*).

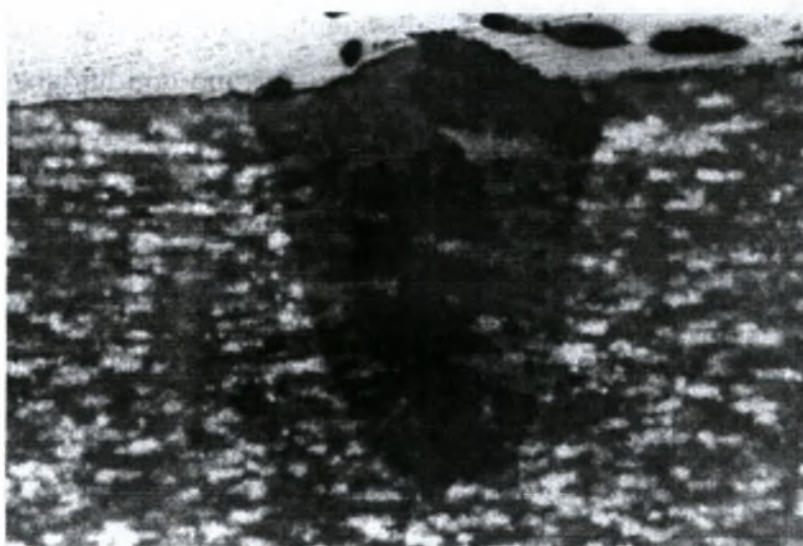
Πίνακας 3.4 : Συνθήκες Γ' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.

A /A	Ισχύς Q [W]	Ταχύτητα u [m/min]	Αέριο	Σ.Εστίασης [mm]	Πίεση [bar]	Ρ.Π.Θ. [J/mm]
A26	3000	15.00	Άζωτο	- 1	4	0.20
A27	3000	13.50	Άζωτο	- 1	4	0.22
A28	3000	12.00	Άζωτο	- 1	4	0.25
A29	3000	10.50	Άζωτο	- 1	4	0.29
A30	3000	9.00	Άζωτο	- 1	4	0.33
A31	3000	7.50	Άζωτο	- 1	4	0.40
A32	3000	6.00	Άζωτο	- 1	4	0.50
A33	2000	15.00	Άζωτο	- 1	4	0.13
A34	2000	13.50	Άζωτο	- 1	4	0.15
A35	2000	12.00	Άζωτο	- 1	4	0.17
A36	2000	10.50	Άζωτο	- 1	4	0.19
A37	2000	9.00	Άζωτο	- 1	4	0.22
A38	2000	7.50	Άζωτο	- 1	4	0.27
A39	2000	6.00	Άζωτο	- 1	4	0.33

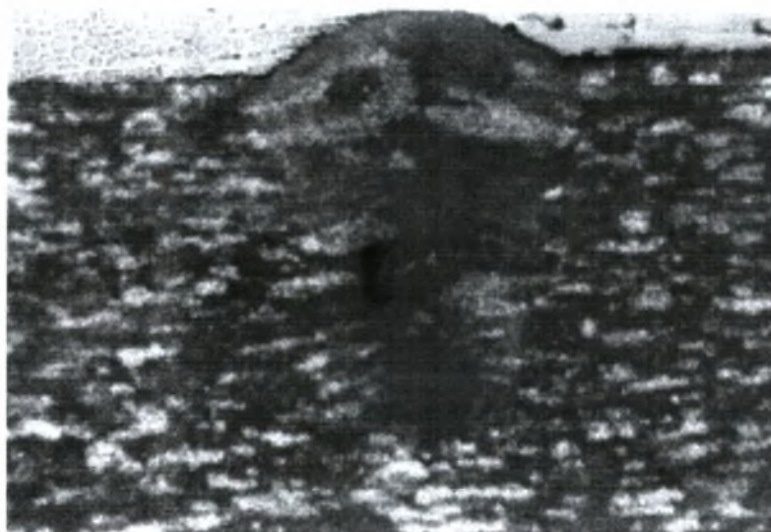
Τα δοκίμια της Γ' σειράς εξετάσθηκαν μακροσκοπικά, όπου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5, ενώ παρουσιάζονται και ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων.

Πίνακας 3.5 : Πίνακας συσχέτισης Γ' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.

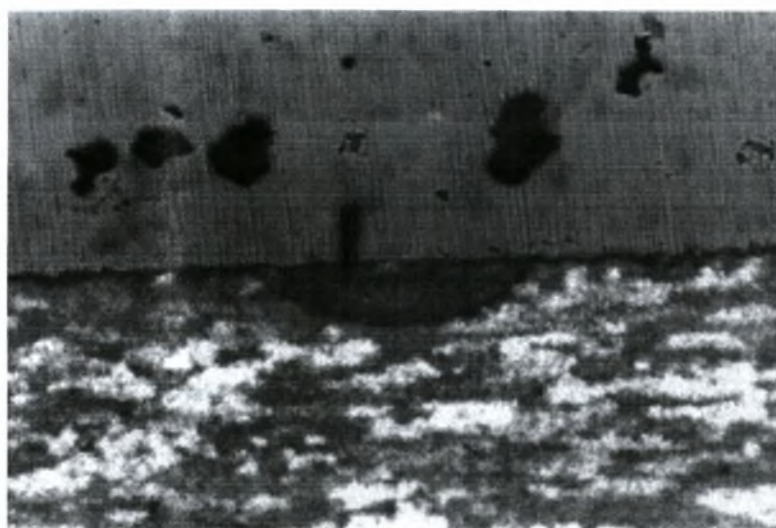
A / A	Heat Input <i>n</i> [J/mm]	Πλάτος <i>w</i> [mm]	Βάθος <i>d</i> [mm]	<i>w / d</i> [-]
A26	0.20	0.848	1.750	0.48
A27	0.22	0.752	2.001	0.38
A28	0.25	1.000	1.176	0.85
A29	0.29	0.992	1.116	0.89
A30	0.33	0.988	1.160	0.85
A31	0.40	1.018	1.330	0.77
A32	0.50	1.172	2.152	0.54
A33	0.13	0.497	0.106	4.69
A34	0.15	0.394	0.117	3.37
A35	0.17	0.436	0.096	4.54
A36	0.19	0.426	0.110	3.87
A37	0.22	0.417	0.105	3.97
A38	0.27	0.478	0.109	4.39
A39	0.33	0.426	0.112	3.80



Σχήμα 3.10 : Φωτογραφία του δοκιμίου A28.



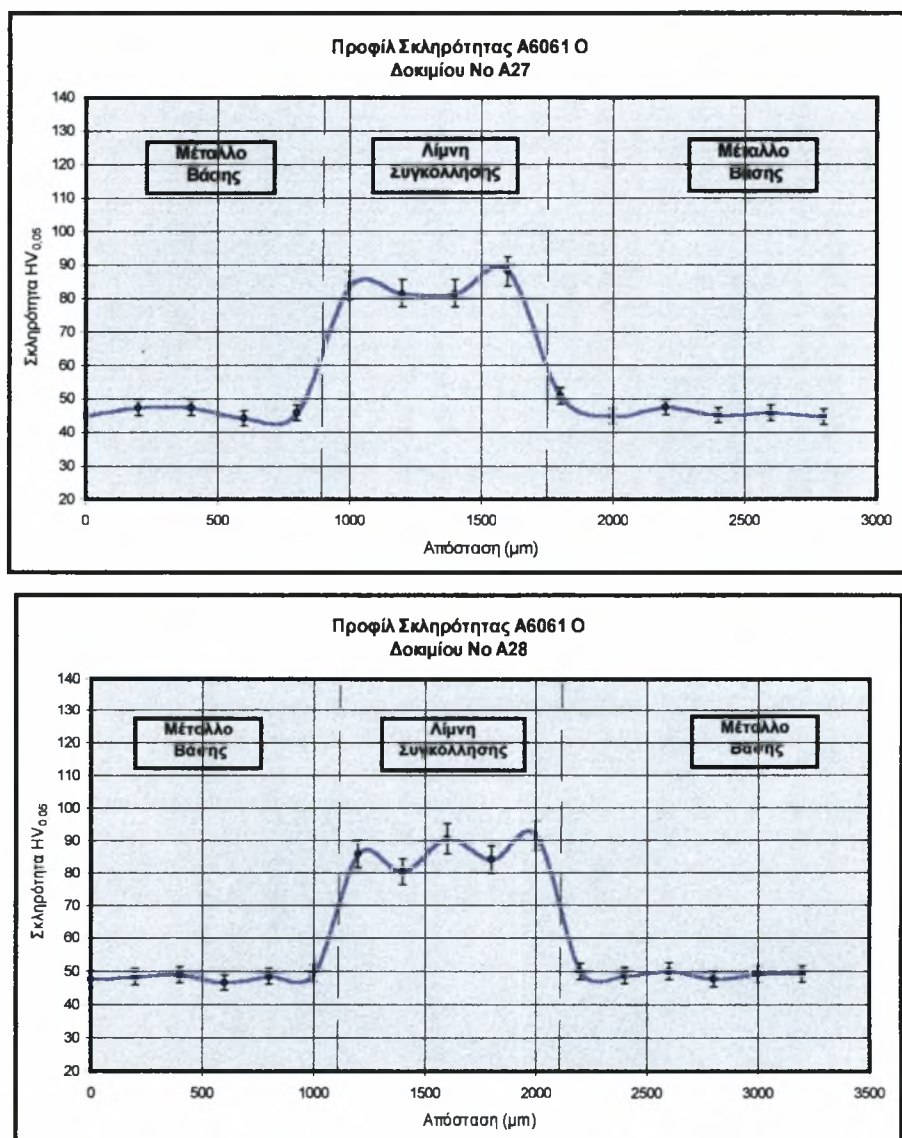
Σχήμα 3.11 : Φωτογραφία του δοκιμίου A30.



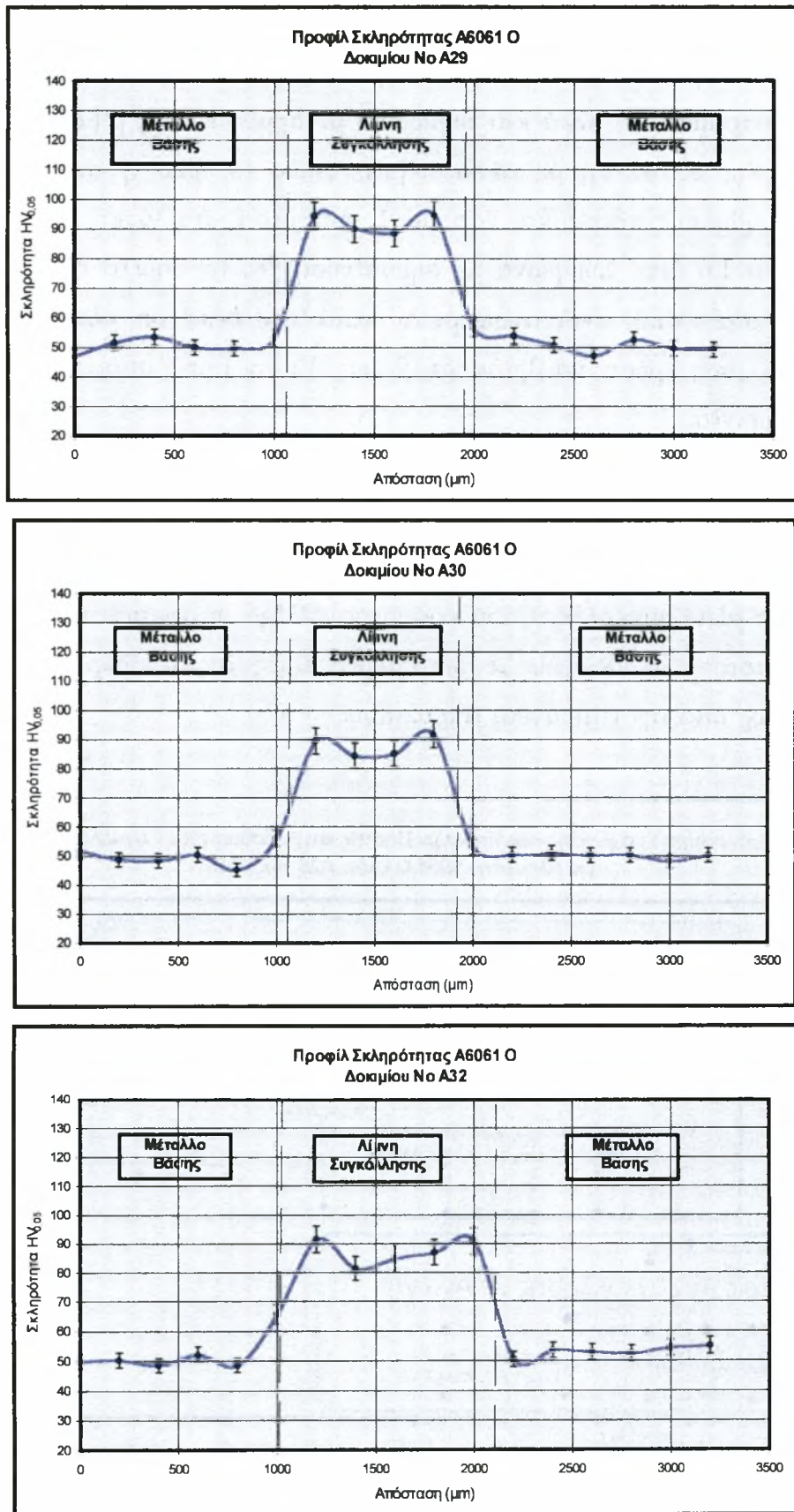
Σχήμα 3.12 : Φωτογραφία του δοκιμίου A37.



Ο έλεγχος της μικροσκληρότητας έλαβε χώρα σε ορισμένα από τα δοκίμια αυτής της σειράς πειραμάτων. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε στη μηχανή μικροσκληρομέτρησης ήταν 50 gr. ενώ ο χρόνος εντύπωσης ήταν 10 sec. Οι μετρήσεις έγιναν σε βάθος περίπου 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου, με βήμα 200 έως 300 μm ανάλογα με την περιοχή μικροσκληρομέτρησης, ξεκινώντας από το μέταλλο βάσης και καταλήγοντας πάλι σε αυτό. Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένα προφίλ σκληρότητας αυτής της σειράς, στα σχήματα 3.13 και 3.14.



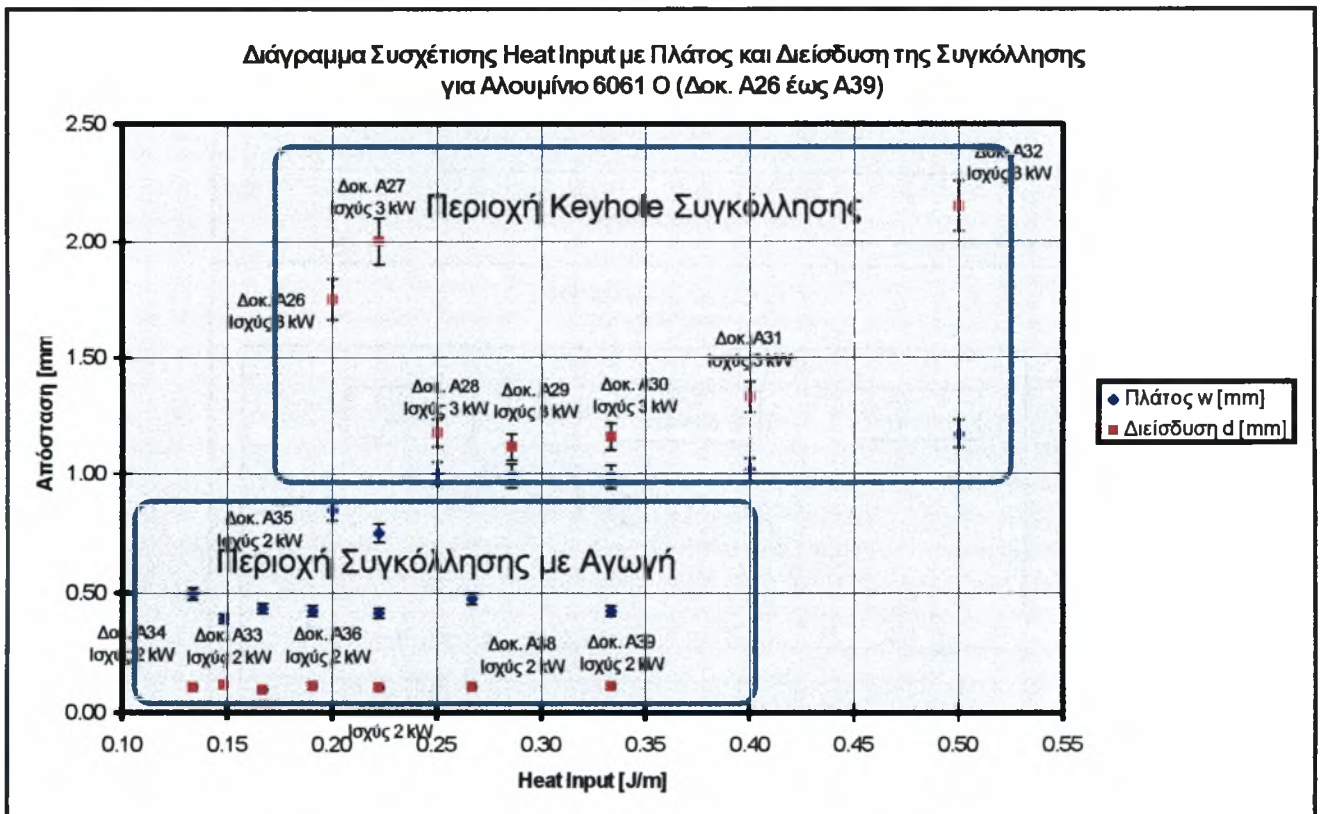
Σχήμα 3.13 : Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A27 και A28.



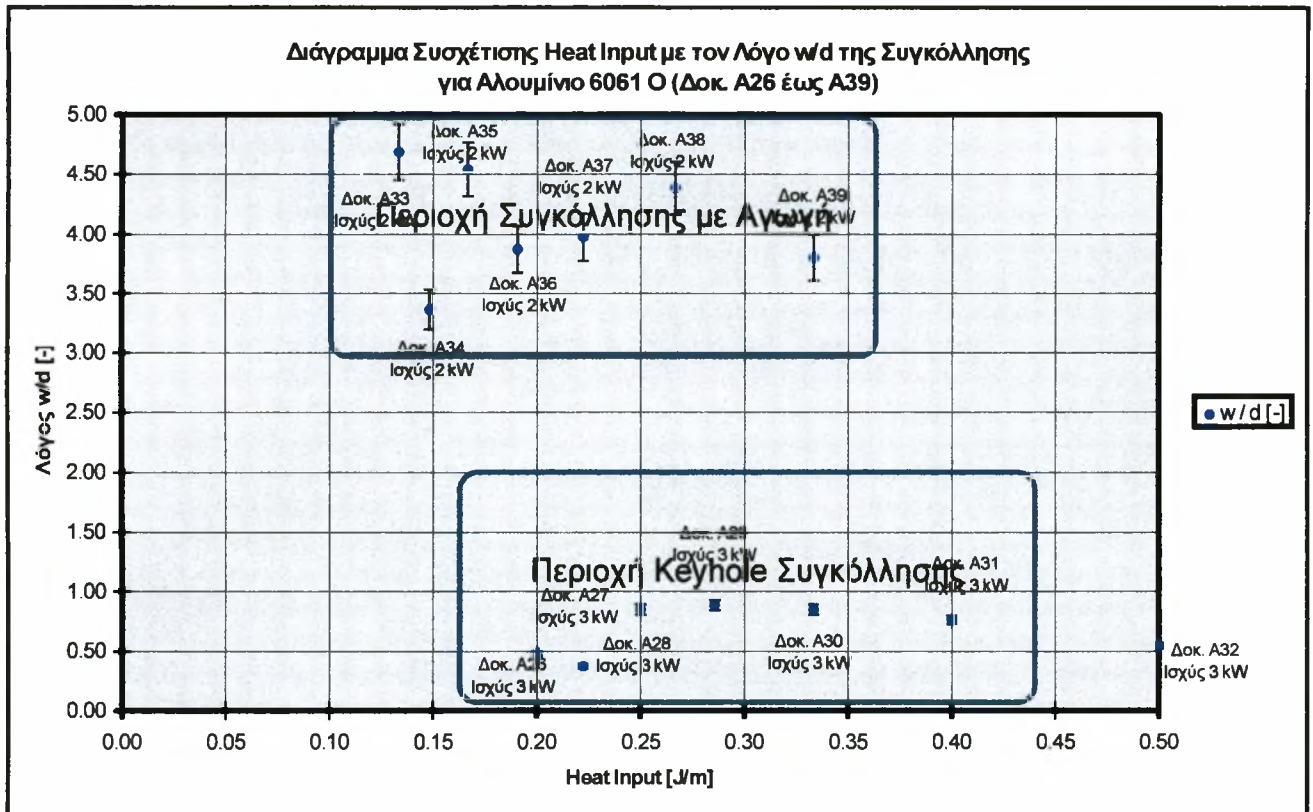
Σχήμα 3.14 : Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων A29, A30 και A32.

Όλα τα περάσματα έγιναν στο CO₂ laser του LIC/ΠΤΕ στο Κορωπί Αττικής, μέγιστης ισχύος 3 kW και με κατανομή δέσμης TEM₀₁*. Το αέριο επιλέχθηκε, αφού έχει αποδειχτεί και πειραματικά, αλλά και σύμφωνα με δημοσιεύσεις [7] & [8], πως παράγει πιο σωστές ραφές, σε σχέση με άλλα αέρια, όπως το ήλιο ή το αργό. Το σημείο εστίασης, διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με 1 mm μέσα στο υλικό, που προήλθε από φύλλο αλουμινίου 1.6 mm. Σύμφωνα με δημοσίευση [9], το σημείο εστίασης πρέπει να βρίσκεται μέσα στο υλικό, ενώ αναφέρεται κατά την *bead on plate* συγκόλληση του κράματος AlMg6, πως πρέπει να βρίσκεται 2 έως 3 mm, κάτω από την επιφάνεια του 4 mm φύλλου αλουμινίου.

Ειδικό χαρακτηριστικό της laser συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου, είναι το γεγονός κατά το οποίο το μέταλλο αρχίζει σχηματίζει μια περιοχή υψηλής απορρόφησης (*keyhole welding*), μόνο με την υπέρβαση μιας συγκεκριμένης ενεργειακής τιμής. Ειδικά, κατά την *bead on plate* συγκόλληση του κράματος AlMg6, η προσπίπτουσα ισχύς, πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.0 kW [9]. Σε μικρότερες τιμές της ισχύος του laser, η δέσμη ανακλάται εντελώς από την επιφάνεια του υλικού.



Σχήμα 3.15 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείσδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-O (Δοκ. A26 έως A39).



Σχήμα 3.16 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο *w/d* της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-O (Δοκ. A26 έως A39).

Το ίδιο φαινόμενο, παρουσιάζεται και στο ενλόγω κράμα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15, τόσο το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης, όσο και το βάθος της, παίρνουν πολύ μικρές τιμές για ισχύ 2 kW, ενώ είναι συγκριτικά καλύτερες με την χρήση των 3 kW.

Στα πειράματα που χρησιμοποιήθηκε ισχύς 3 kW, ο λόγος *w/d* παίρνει τιμές από 0.37 έως 0.88. Στα περισσότερα από τα δοκίμια 26 έως 32, επειεύχθηκε πλήρης διείδυση, ενώ στα δοκίμια A27 και A32, υπήρξε υπέρμετρη διείδυση. Αντίθετα, στα πειράματα των 2 kW, ο λόγος παίρνει τιμές από 3.36 έως 4.68. Η μεγάλη τιμή του λόγου *w/d* στα δοκίμια A33 έως A39, οφείλεται στην πολύ μικρή διείδυση της ζώνης τήξης (~ 0,1 mm). Την διαφορά αυτή, μπορεί να την διακρίνει κανείς στο σχήμα 3.16, όπου φαίνεται η συσχέτιση του ρυθμού πρόσδοσης ενέργειας με τον λόγο *w/d*, για τα δοκίμια με προσιπτούσα ισχύ 2 και 3 kW, αντίστοιχα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και η αύξηση στην σκληρότητα, η οποία παρατηρήθηκε στη Λ.Σ. των δοκιμίων, όπως φάνηκε στα σχήματα 3.13 και 3.14. Η διαφορά αυτή, είναι δύσκολο να εξηγηθεί μόνο με τον μακροσκοπικό έλεγχο, ωστόσο μπορεί να δοθεί μια εξήγηση για το φαινόμενο αυτό. Η αύξηση της σκληρότητας οφείλεται στην κατακρήμνιση της φάσης **Mg₂Si**.

3.4 Δ' Σειρά πειραμάτων

Στα 20 περάσματα, η ισχύς του laser, διατηρήθηκε σταθερή στα 4.5 kW, ενώ το σημείο εστίασης της δέσμης του laser, ήταν ακριβώς επάνω στην επιφάνεια του υλικού. Η επιφάνεια όλων των δοκιμών υποστεί αμμοβολή. Σε όλα τα περάσματα, χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο άζωτο. Η πίεση του προστατευτικού αερίου στα πρώτα 7 περάσματα, ήταν 14 bar, ενώ στα υπόλοιπα 13 περάσματα, χρησιμοποιήθηκε πίεση 4 bar. Στον πίνακα 3.6, παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθήκες της Δ' σειράς των περασμάτων *bead on plate*, καθώς και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας.

Πίνακας 3.6 : Συνθήκες Δ' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.

A / A	Ισχύς Q [W]	Ταχύτητα u [m/min]	Αέριο	Σ.Εστίασης [mm]	Πίεση [bar]	Ρ.Π.Θ. [J/mm]
B01	4500	8	Άζωτο	0	14	0.56
B02	4500	7	Άζωτο	0	14	0.64
B03	4500	6	Άζωτο	0	14	0.75
B04	4500	5	Άζωτο	0	14	0.90
B05	4500	4	Άζωτο	0	14	1.12
B06	4500	3	Άζωτο	0	14	1.50
B07	4500	2.4	Άζωτο	0	14	1.87
B08	4500	8	Άζωτο	0	4	0.56
B09	4500	7	Άζωτο	0	4	0.64
B10	4500	6	Άζωτο	0	4	0.75
B11	4500	5	Άζωτο	0	4	0.90
B12	4500	4	Άζωτο	0	4	1.12
B13	4500	3	Άζωτο	0	4	1.50
B14	4500	2.4	Άζωτο	0	4	1.87
B15	4500	7.5	Άζωτο	0	4	0.60
B16	4500	6.6	Άζωτο	0	4	0.68
B17	4500	6	Άζωτο	0	4	0.75
B18	4500	5.4	Άζωτο	0	4	0.83
B19	4500	4.8	Άζωτο	0	4	0.93
B20	4500	4.2	Άζωτο	0	4	1.07

Στα δοκίμια της Δ' σειράς έγινε έλεγχος με ραδιογραφία. Σε όλα τα δοκίμια, παρουσιάστηκε πορώδες, σε ορισμένα δοκίμια παρουσιάστηκαν ρηγματώσεις. Αντιπροσωπευτικά φαίνονται στον πίνακα 3.7 οι κυριότερες ατέλειες των δοκιμών της Δ' σειράς, ενώ στο παράρτημα παρουσιάζονται τα εκτενή αποτελέσματα, όπως παραλήφθησαν από την EBETAM.

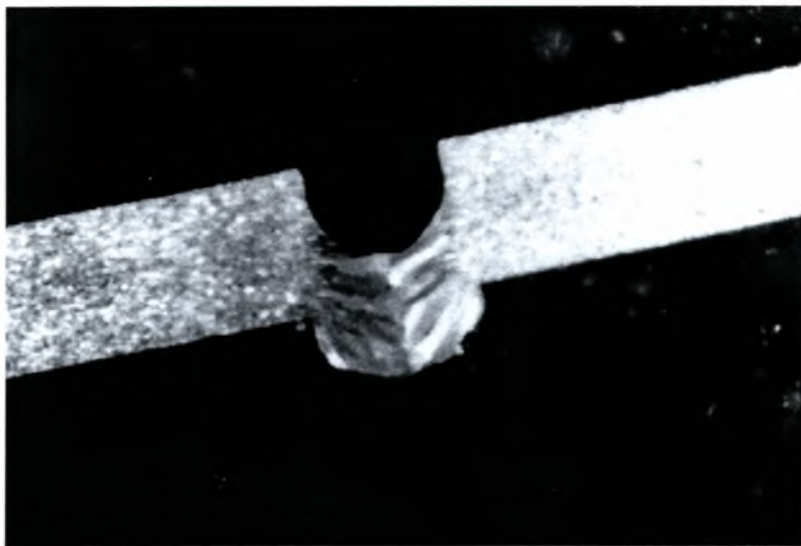
Πίνακας 3.7 : Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου της Δ' σειράς πειραμάτων.

Αριθμός Δοκιμίου	Περιγραφή Αιέλειας
B01	Πορώδες
B02	Πορώδες
B03	Πορώδες
B04	Πορώδες
B05	Πορώδες
B06	Πορώδες - 'Burn through'
B07	Πορώδες - 'Burn through'
B08	Πορώδες - ρήγμα κρατήρα
B09	Πορώδες - root concavity
B10	Πορώδες - ρήγμα κρατήρα- root concavity
B11	Πορώδες - root concavity
B12	Πορώδες
B13	Πορώδες
B14	'Burn through' - στερεά εγκλείσματα
B15	Πορώδες
B16	Πορώδες
B17	Πορώδες
B18	Πορώδες
B19	Πορώδες - υπέρμετρη διείσδυση
B20	Πορώδες

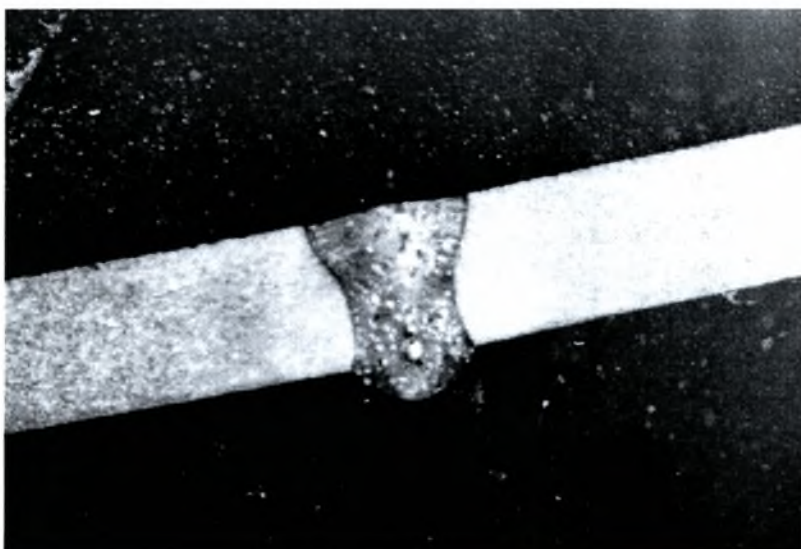
Στον πίνακα 3.8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Δ' σειράς των πειραμάτων *bead on plate*, ενώ παρουσιάζονται και ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων.

Πίνακας 3.8 : Πίνακας συσχέτισης Δ' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.

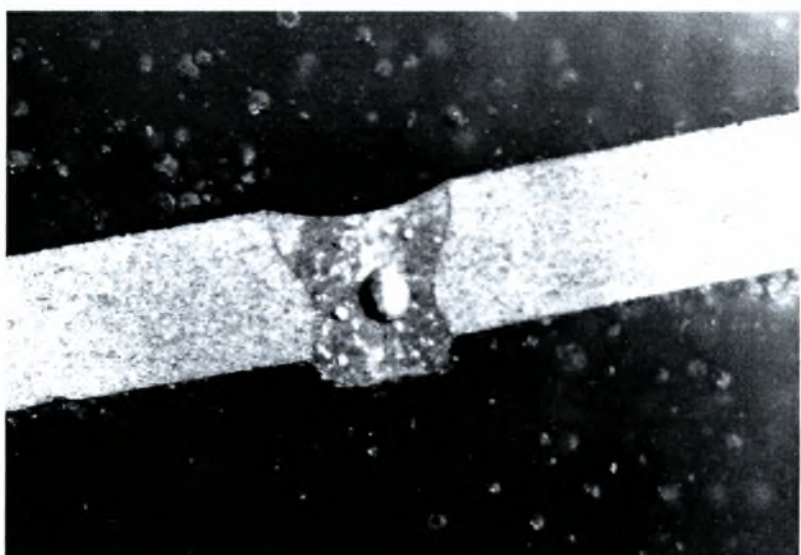
A / A	Heat Input n [J/mm]	Πλάτος w [mm]	Βάθος d [mm]	w / d [-]
B01	0.56	1.176	1.862	0.63
B02	0.64	1.272	1.982	0.64
B03	0.75	1.410	2.128	0.66
B04	0.90	1.712	2.110	0.81
B05	1.13	-	-	-
B06	1.50	-	-	-
B07	1.88	-	-	-
B08	0.56	1.414	1.580	0.89
B09	0.64	1.430	1.764	0.81
B10	0.75	-	-	-
B11	0.90	1.688	2.048	0.82
B12	1.13	-	-	-
B13	1.50	-	-	-
B14	1.88	3.028	2.186	1.39
B15	0.60	-	-	-
B16	0.68	-	-	-
B17	0.75	1.582	1.842	0.86
B18	0.83	-	-	-
B19	0.94	1.824	1.772	1.03
B20	1.07	-	-	-



Σχήμα 3.17 : Φωτογραφία του δοκιμίου B04.

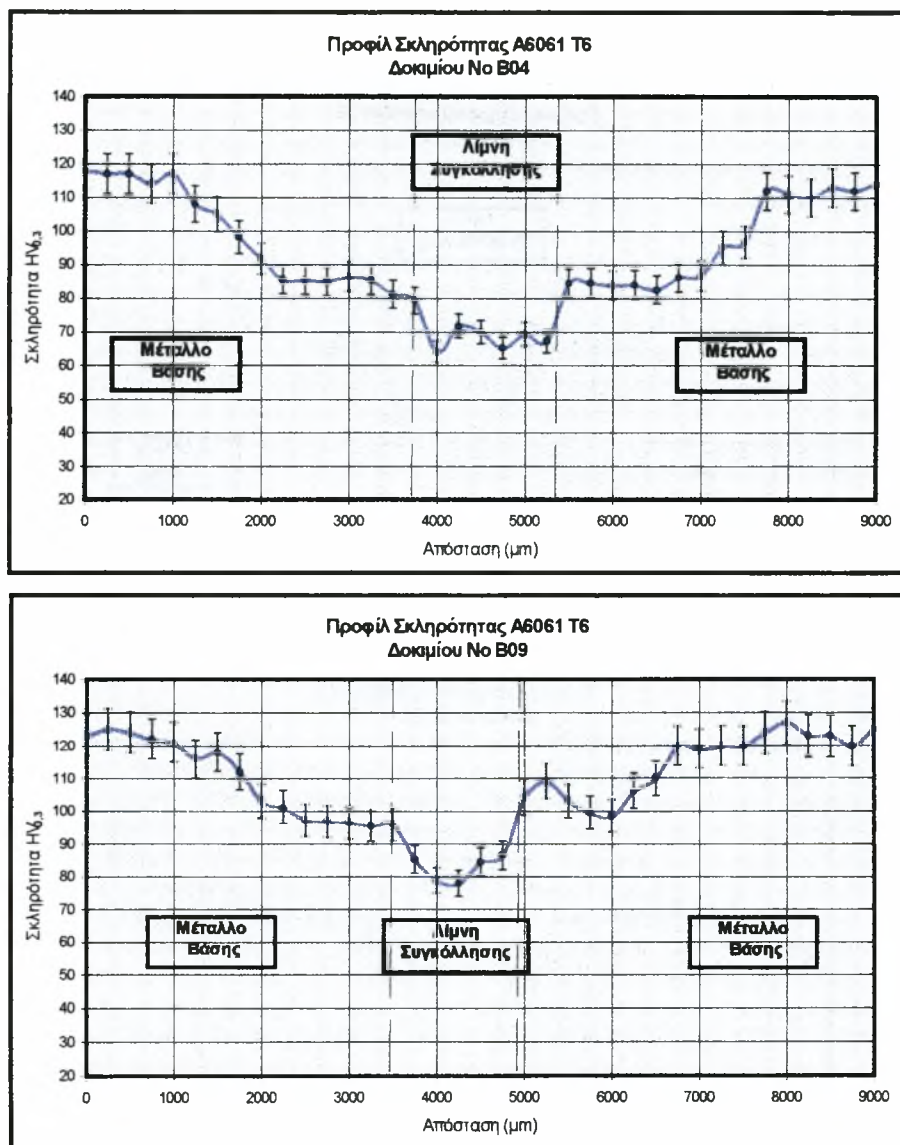


Σχήμα 3.18 : Φωτογραφία του δοκιμίου B17.

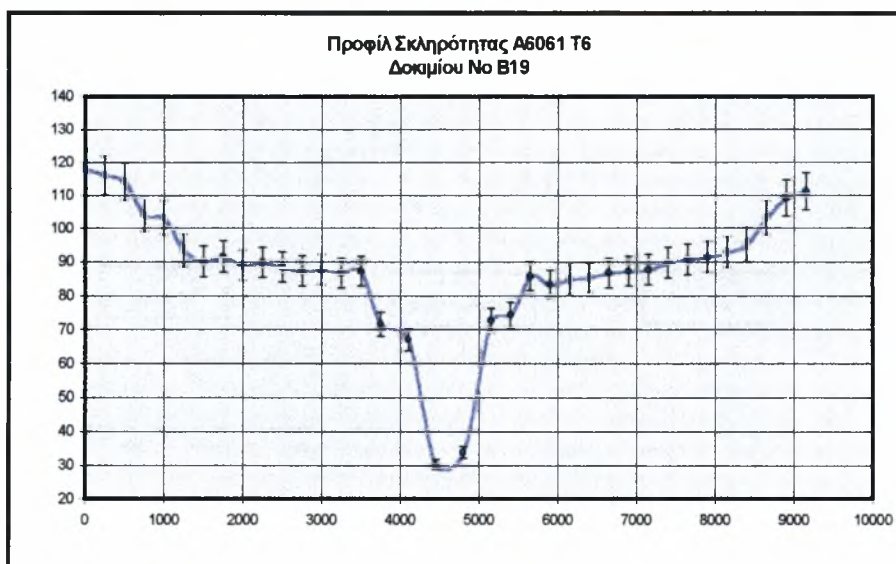
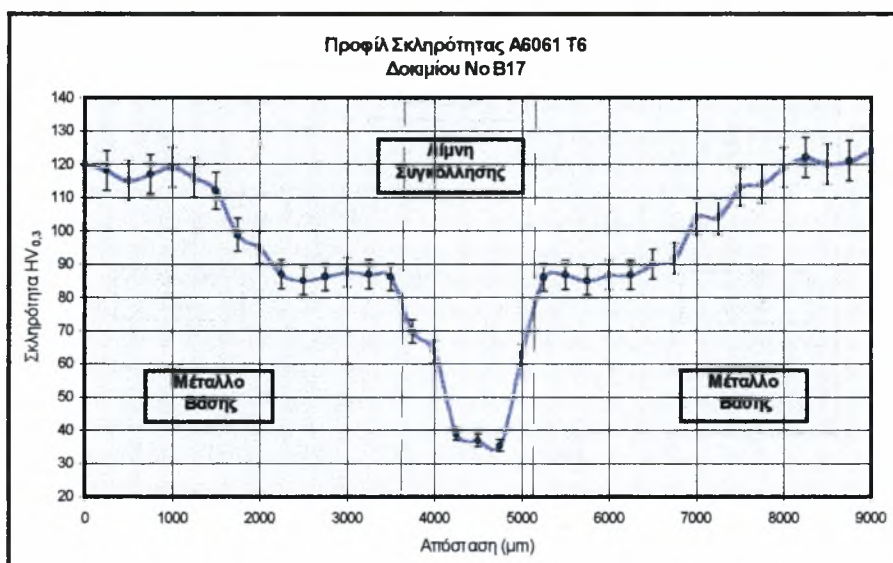
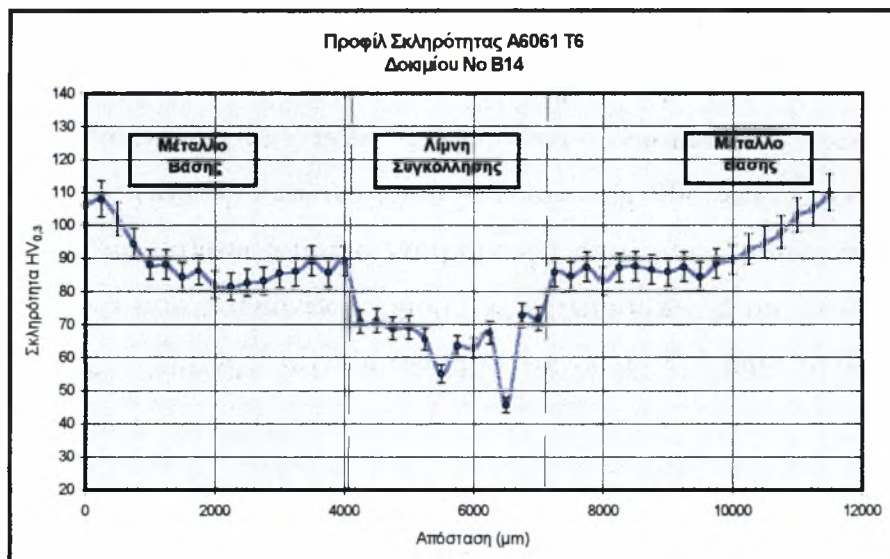


Σχήμα 3.19 : Φωτογραφία του δοκιμίου B19.

Κατά τη Δ' σειρά των πειραμάτων, σε όλα τα δοκίμια επετεύχθηκε πλήρης διείσδυση. Ο έλεγχος της μικροσκληρότητας έλαβε χώρα σε ορισμένα από τα δοκίμια αυτής της σειράς πειραμάτων. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε στη μηχανή μικροσκληρομέτρησης ήταν 300 gr. ενώ ο χρόνος εντύπωσης ήταν 10 sec. Οι μετρήσεις έγιναν σε βάθος περίπου 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου, με βήμα 250 έως 300 μm ανάλογα με την περιοχική μικροσκληρομέτρησης, ξεκινώντας από το μέταλλο βάσης και καταλήγοντας πάλι σε αυτό. Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένα προφίλ σκληρότητας αυτής της σειράς.



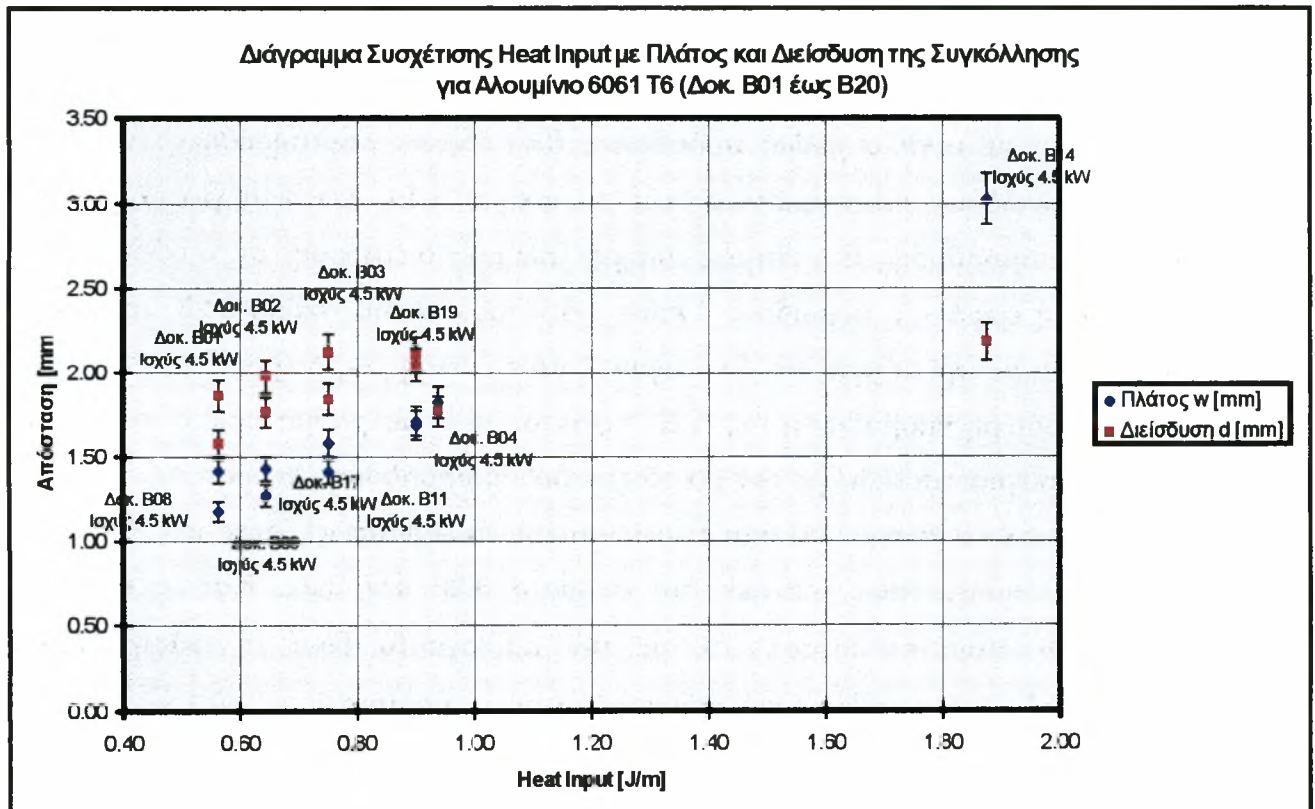
Σχήμα 3.20 : Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων B04 και B09.



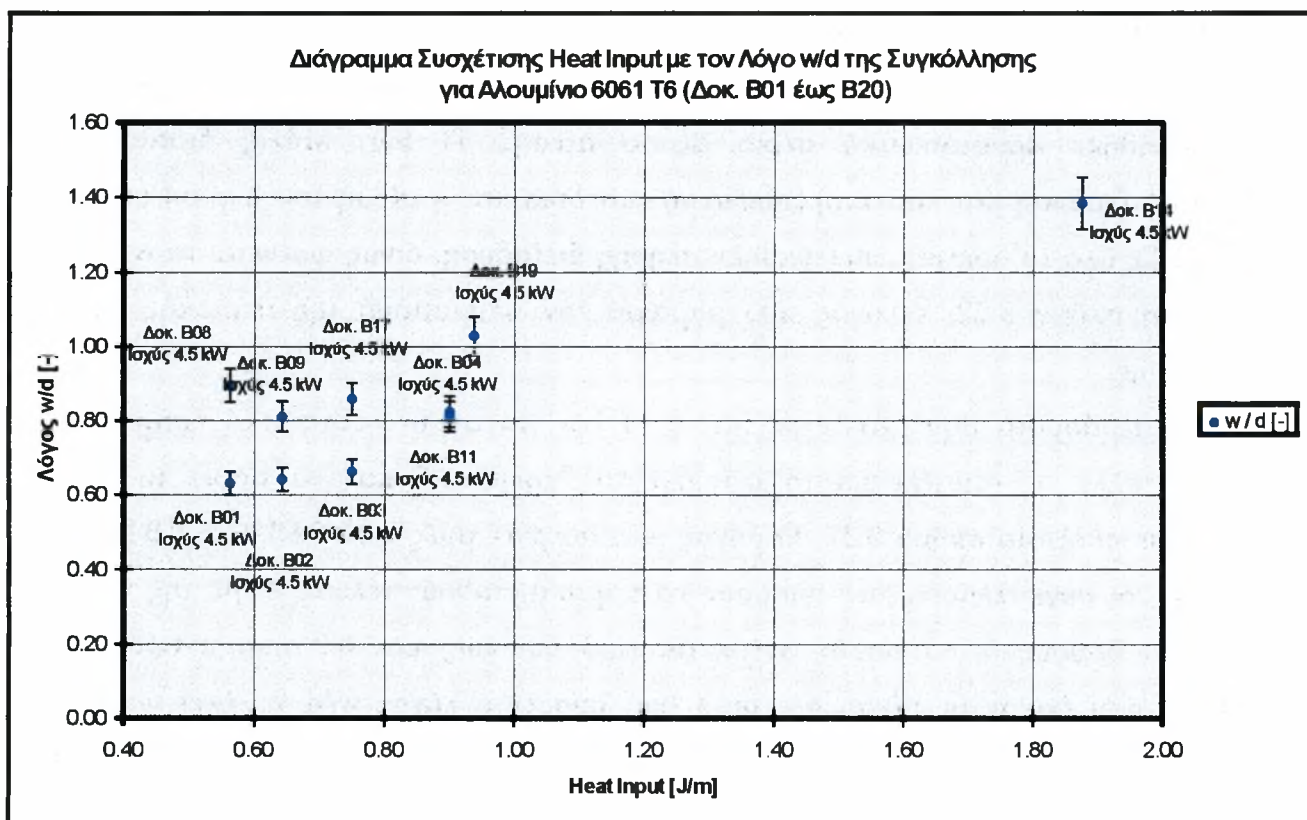
Σχήμα 3.21 : Προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων B14, B17 και B19.

Η συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε με μονάδα laser CO₂ μέγιστης ισχύος 5 kW και με κατανομή δέσμης TEM₀₁. Στα δοκίμια B01 έως B07 χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο άζωτο πίεσης 14 bar. Μόλις διαπιστώθηκε υπέρμετρη διείσδυση και υποκοπή (*undercut*) στα δοκίμια, η πίεση του αερίου μειώθηκε στα 4 bar. Σε όλα τα δοκίμια επετεύχθηκε πλήρης διείσδυση, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.8 και στο σχήμα 3.22, γεγονός που μαρτυρά τον σχηματισμό της περιοχής υψηλής απορρόφησης.

Στα περάσματα που έγιναν με πίεση 14 bar, το αέριο ουσιαστικά έσπρωχνε το τηγμένο μέταλλο με αποτέλεσμα το μέταλλο να "κρεμάσει" και να πάρει τη μορφή, παρόμοια με αυτή στο σχήμα 3.17. Ο λόγος w/d παίρνει τιμές από 0.63 έως 0.81 (σχήμα 3.23), όμως οι συγκολλήσεις δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν τέλειες λόγω της ύπαρξης του ειδικού βάθους h , το οποίο ανέρχεται από 0.3 έως και 0.9 mm. Αντίθετα στα περάσματα που έγιναν με πίεση αερίου 4 bar, μπορεί ο λόγος w/d να έχει μεγαλώσει ελαφρά και να κυμαίνεται από 0.81 έως 1.39, αλλά ουσιαστικά δεν υπάρχει το ειδικό βάθος h .



Σχήμα 3.22 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με πλάτος και διείσδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-T6 (Δοκ. B01 έως B20).



Σχήμα 3.23 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τον λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6061-T6 (Δοκ. B01 έως B20).

Στα δοκίμια με μεγάλο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας, παρατηρήθηκε έντονο το φαινόμενο του πορώδους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.19. Αντίθετα για μικρότερες τιμές του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας, υπήρξε πλήρης διείσδυση, σε συνδυασμό με σχεδόν ανύπαρκτη εμφάνιση πορώδους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.23, το πλάτος της Λ.Σ., αυξάνεται με την αύξηση του *heat input*. Οπότε επειδή μικρότερο πλάτος της Λ.Σ. σημαίνει και μικρότερη υποβάθμιση της Λ.Σ., εξάγεται το συμπέρασμα πως η πιο σωστή συγκόλληση θα πραγματοποιηθεί με τον μικρότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και η μείωση της σκληρότητας όλων των δοκιμίων στη λίμνη συγκόλλησης, όπως φάνηκε στα σχήματα 3.20 και 3.21. Καθώς το υλικό αρχικά βρισκόταν στην κατάσταση T6, με την κατεργασία laser, η φάση Mg_2Si διευρύνθηκε ή θα διαλυτοποιήθηκε, μειώνοντας έτσι τη σκληρότητα.

3.5 Ε' Σειρά πειραμάτων

Στα 18 περάσματα, η ισχύς του laser διατηρήθηκε σταθερή στα 1450 W, ενώ το σημείο εστίασης της δέσμης του laser, ήταν ακριβώς επάνω στην επιφάνεια του υλικού, αλλά και - 1 mm από την επιφάνεια. Η επιφάνεια των δοκιμών Γ01 έως και Γ06, είχε υποστεί αμμοβολή. Η επιφάνεια των δοκιμών Γ07 έως και Γ12, είχε υποστεί επικάλυψη με γραφίτη, ενώ τα δοκίμια Γ13 έως και Γ18, είχαν υποστεί χρωμική ανοδίωση 5 μm . Σε όλα τα περάσματα, χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό αέριο άζωτο, και η πίεσή του ήταν 4 bar. Στον πίνακα 3.9, παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθήκες της Ε' σειράς των περασμάτων *bead on plate*, καθώς και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας.

Πίνακας 3.9 : Συνθήκες Ε' σειράς πειραμάτων *bead on plate*.

A / A	Ισχύς Q [W]	Ταχύτητα u [m/min]	Αέριο	Πίεση [bar]	Σ.Εστίασης [mm]	P.Π.Θ. [J/mm]
Γ01	1450	1.5	Άζωτο	4	0	0.97
Γ02	1450	1	Άζωτο	4	0	1.45
Γ03	1450	0.5	Άζωτο	4	0	2.90
Γ04	1450	1.5	Άζωτο	4	-1	0.97
Γ05	1450	1	Άζωτο	4	-1	1.45
Γ06	1450	0.5	Άζωτο	4	-1	2.90
Γ07	1450	1.5	Άζωτο	4	0	0.97
Γ08	1450	1	Άζωτο	4	0	1.45
Γ09	1450	0.5	Άζωτο	4	0	2.90
Γ10	1450	1.5	Άζωτο	4	-1	0.97
Γ11	1450	1	Άζωτο	4	-1	1.45
Γ12	1450	0.5	Άζωτο	4	-1	2.90
Γ13	1450	1.5	Άζωτο	4	0	0.97
Γ14	1450	1	Άζωτο	4	0	1.45
Γ15	1450	0.5	Άζωτο	4	0	2.90
Γ16	1450	1.5	Άζωτο	4	-1	0.97
Γ17	1450	1	Άζωτο	4	-1	1.45
Γ18	1450	0.5	Άζωτο	4	-1	2.90

Στον πίνακα 3.10, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής ανάλυσης της Ε' σειράς των περασμάτων *bead on plate*.

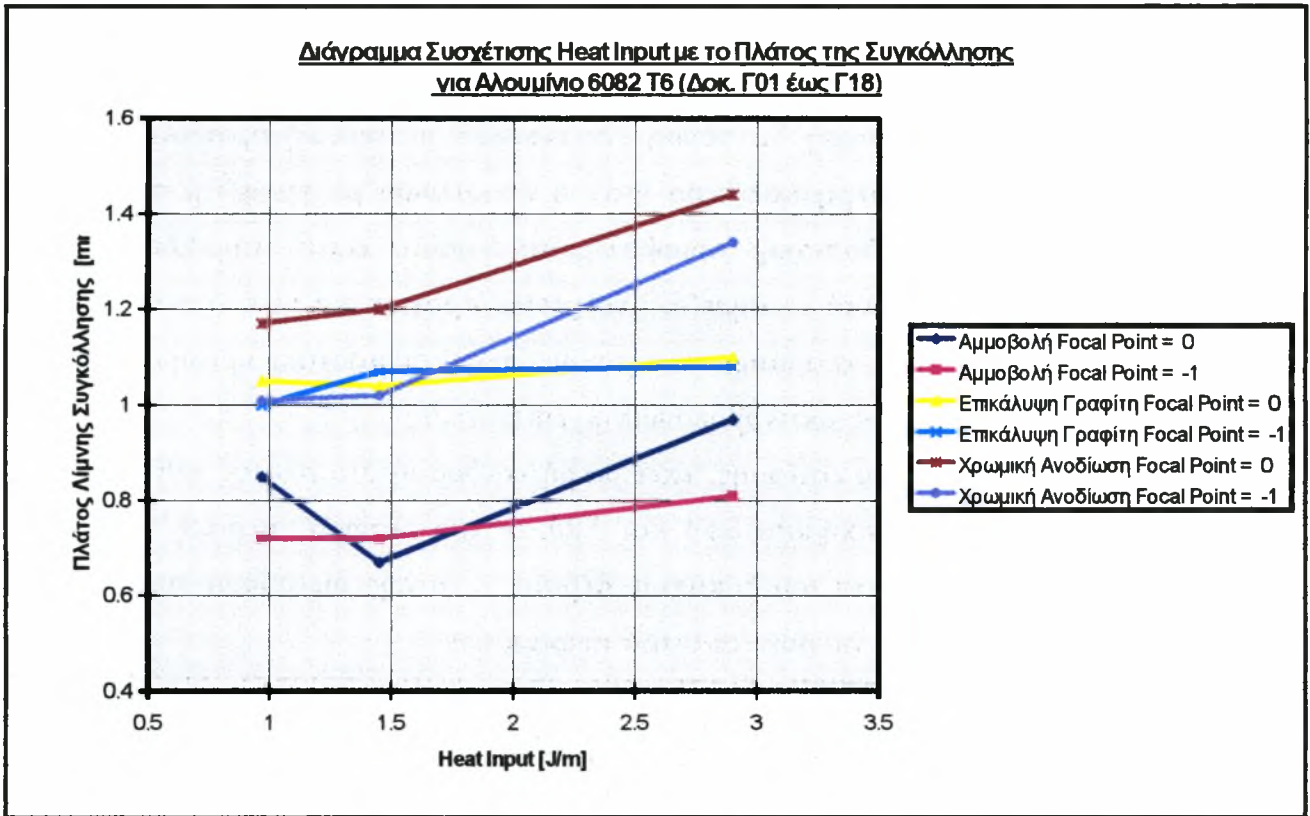
Πίνακας 3.10 : Πίνακας συσχέτισης Ε' σειράς *heat input*, πλάτους και βάθους της Λ.Σ.

A / A	Heat Input <i>n</i> [J/mm]	Πλάτος <i>w</i> [mm]	Βάθος <i>d</i> [mm]	<i>w / d</i> [-]
Γ01	0.97	0.85	0.22	3.86
Γ02	1.45	0.67	0.18	3.72
Γ03	2.90	0.97	0.30	3.23
Γ04	0.97	0.72	0.21	3.43
Γ05	1.45	0.72	0.20	3.60
Γ06	2.90	0.81	0.22	3.68
Γ07	0.97	1.05	0.35	3.00
Γ08	1.45	1.04	0.33	3.15
Γ09	2.90	1.10	0.36	3.06
Γ10	0.97	1.00	0.35	2.86
Γ11	1.45	1.07	0.34	3.15
Γ12	2.90	1.08	0.35	3.09
Γ13	0.97	1.17	0.38	3.08
Γ14	1.45	1.20	0.43	2.79
Γ15	2.90	1.44	0.50	2.88
Γ16	0.97	1.01	0.34	2.97
Γ17	1.45	1.02	0.41	2.49
Γ18	2.90	1.34	0.49	2.73

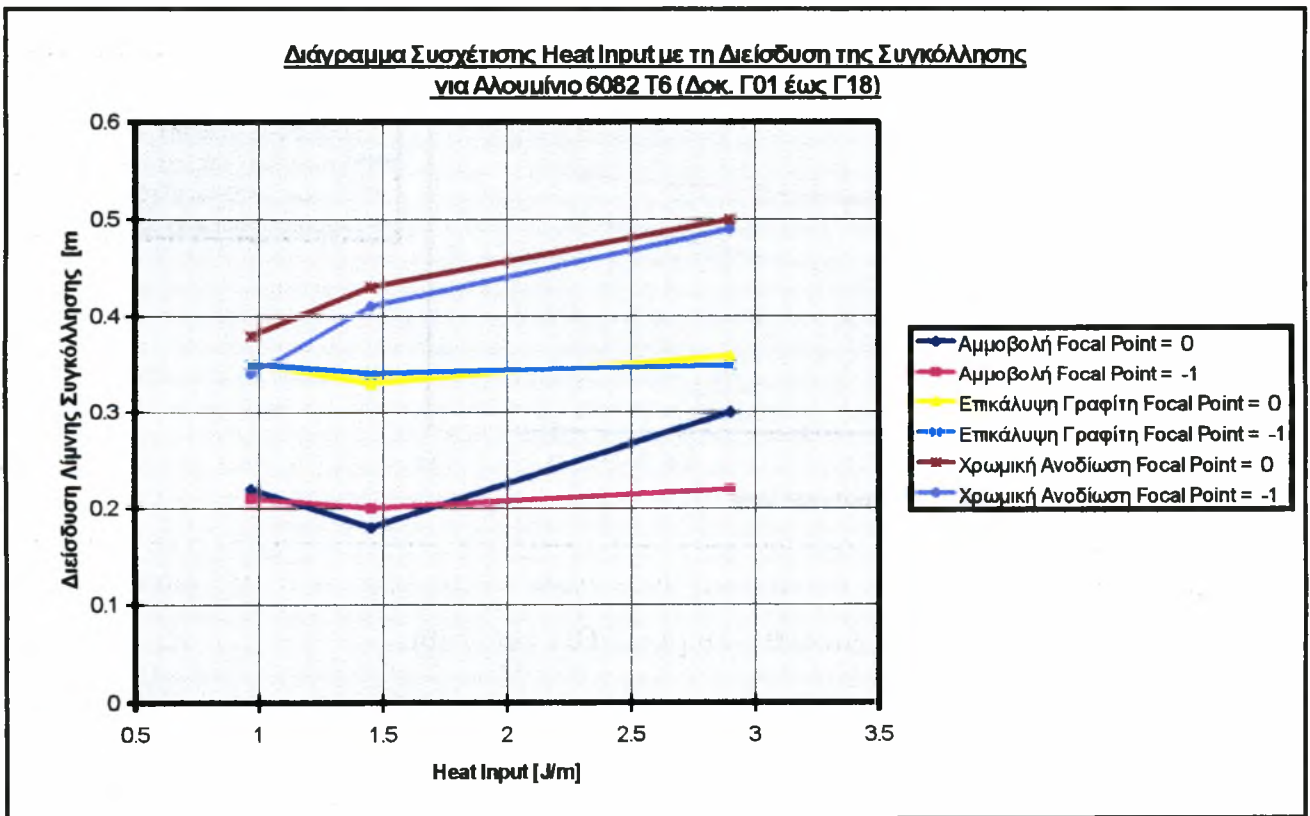
Κατά την Ε' σειρά των πειραμάτων, η ζώνη τήξης του υλικού, ήταν μικρή, γεγονός που αποδεικνύει την μη-ύπαρξη του φαινομένου της περιοχής υψηλής απορροφητικότητας. Επομένως υπήρξε απλή θέρμανση του δοκιμίου, που και πάλι λόγω του μεγέθους της ζώνης τήξης δεν ήταν δυνατή η μικροσκοπιομέτρηση των ενλόγω δοκιμίων.

Όλα τα περάσματα έγιναν στο CO₂ laser της EBETAM, μέγιστης ισχύος 1.5 kW και με κατανομή δέσμης TEM₀₀. Κύριος σκοπός αυτής της σειράς πειραμάτων, ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς της δέσμης, πάνω στην ακτινοβολούμενη επιφάνεια, η οποία είχε υποστεί κάθε φορά διαφορετική προετοιμασία. Σύμφωνα με δημοσιεύσεις [7], μεγαλύτερη απορρόφηση της δέσμης, είχαν τα δοκίμια που είχαν υποστεί χρωμική ανοδίσωση και επικάλυψη με γραφίτη, και για τον λόγο αυτό εξετάσθηκαν παράλληλα με αμμοβολημένα δοκίμια, για να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης.

Άλλη μία παράμετρος η οποία εξετάσθηκε σε αυτή τη σειρά πειραμάτων ήταν και το σημείο εστίασης της δέσμης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δύο σημεία εστίασης, το ένα στην επιφάνεια του υλικού και το άλλο σε βάθος 1 mm από την ακτινοβολούμενη επιφάνεια.



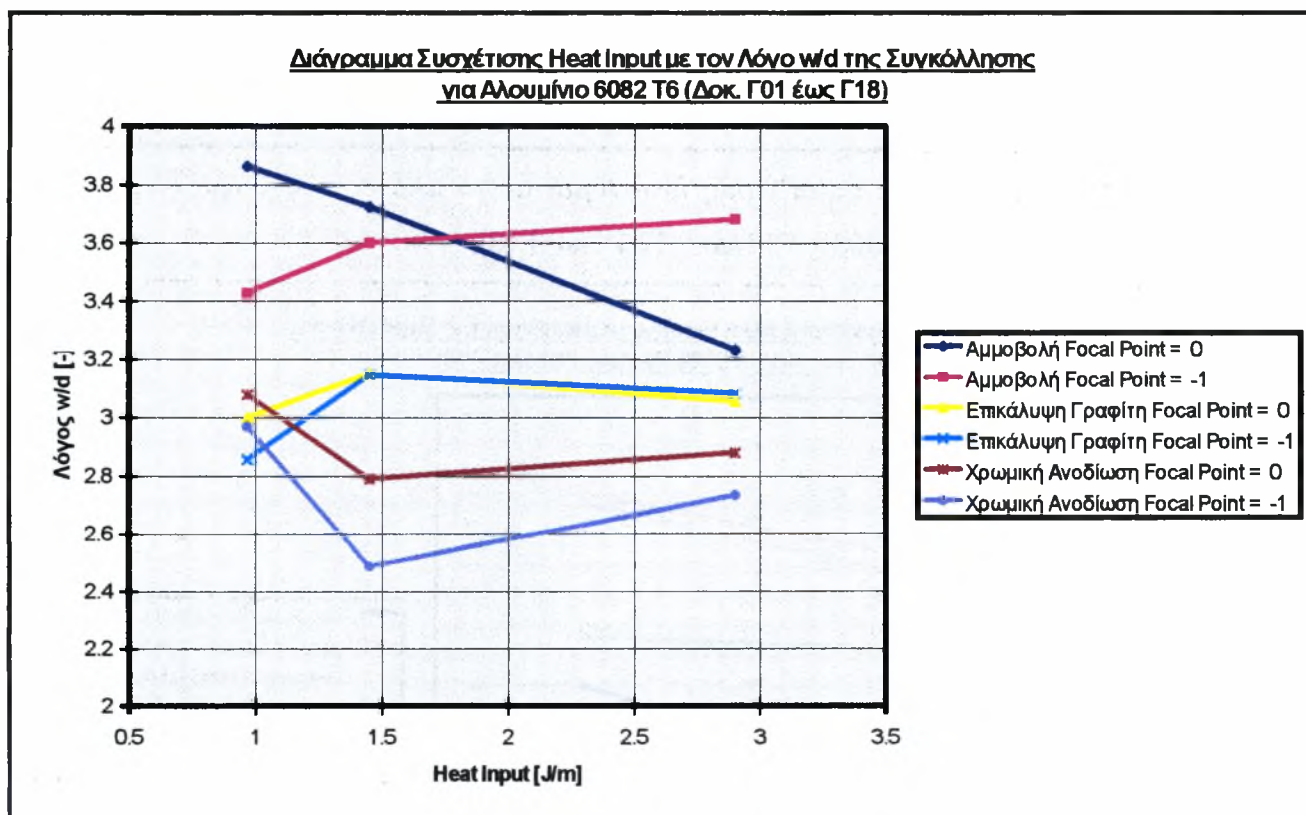
Σχήμα 3.24 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με το πλάτος της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).



Σχήμα 3.25 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με τη διείσδυση της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.10 και στο σχήμα 3.25, δεν επετεύχθηκε πλήρης διείσδυση. Ωστόσο, η μεγαλύτερη διείσδυση επετεύχθηκε με αρχική προετοιμασία την χρωμική ανοδίωση, ενώ δεύτερη καλύτερη ήταν η επικάλυψη με γραφίτη, αφήνοντας τρίτη σε επίδοση την "παραδοσιακή" αμμοβολή, στην οποία είχαν στηριχθεί όλα τα προηγούμενα πειράματα. Σε αυτό το σημείο, ανοίγονται πραγματικά νέοι δρόμοι για την επιτυχή συγκόλληση laser των κραμάτων αλουμινίου, αφού ουσιαστικά κρίσιμο στοιχείο είναι η σωστή προετοιμασία της ακτινοβολούμενης επιφάνειας.

Η μεταβολή του σημείου εστίασης, έχει μικρή επίδραση στο πλάτος και το βάθος της Λ.Σ., όπως φαίνεται στα σχήματα 3.24 και 3.25, με μια ελαφρά υπεροχή να έχει το σημείο εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου. Βέβαια, η ατελής διείσδυση, πιστοποίησε την συγκόλληση τύπου αγωγής σε αυτή τη σειρά πειραμάτων.



Σχήμα 3.26 : Διάγραμμα συσχέτισης *heat input* με το λόγο w/d της συγκόλλησης για αλουμίνιο 6082-T6 (Δοκ. Γ01 έως Γ18).

Στο σχήμα 3.26, φαίνονται οι τιμές του λόγου w/d των συγκολλήσεων. Οι μεγάλες τιμές του λόγου, εξηγούνται με την ύπαρξη ατελούς διείσδυσης. Ωστόσο, φαίνεται πως μικρότερη τιμή του λόγου αυτού, έχουν τα δοκίμια που ήταν κατεργασμένα με χρωμική ανοδίωση.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως εξαιτίας του μικρού μεγέθους της Λ.Σ., δεν κατέστη δυνατή η μικροσκοπηρομέτρησή της, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την καιόαση της συγκόλλησης.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ✉ Στο κράμα 6063 έχουν προσδιοριστεί οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης (ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας 0.33 J/m). Τόσο στο 6061, όσο και στο 6082, χρειάζονται νέες πειραματικές προσπάθειες, για να προσδιοριστούν οι ανάλογες βέλτιστες συνθήκες.
- ✉ Δεν παρατηρήθηκε διαφορά στην διείδυση της λίμνης συγκόλλησης, όταν χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό προστατευτικό αέριο (ήλιο - άζωτο) στην *conduction* συγκόλληση του 6063-T6, σε αντίθεση με βιβλιογραφικά δεδομένα.
- ✉ Οι συγκολλήσεις που είχαν χαρακτηριστικά την πλήρη διείδυση και το μικρότερο πλάτος της ζώνης τήξης (A21, A23), πραγματοποιήθηκαν με τον μικρότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας (0.33 J/m).
- ✉ Οι ατέλειες που εντοπίστηκαν στα δοκίμια, όπως πορώδες και ρηγματώσεις, σχετίζονται με τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας, και είναι δυνατό να αποφευχθούν επιλεγμένες τιμές του (μικρότερη του 0.8 J/m για το 6063-T6).
- ✉ Επετεύχθηκε η περιοχική υψηλής απορρόφησης *keyhole*, μόνο μετά από την επιφανειακή κατεργασία του υλικού.
- ✉ Κρίνεται απαραίτητη η επιφανειακή κατεργασία του υλικού, καθώς με σειρά κατάταξης η χρωμική ανοδίσωση, η επικάλυψη με γραφίτη και η αμμοβολή, βοηθούν στην αύξηση της απορροφητικότητας της ακτινοβολούμενης δέσμης σε *conduction* συγκόλληση του 6082-T6.

- Οι τελικές ιδιότητες της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ του δοκιμίου, βρίσκονται σε άμεση συνάρτηση με την αρχική θερμική κατεργασία του κράματος. Λόγω της ακτινοβολίας της δέσμης laser, η αρχική μικροδομή του κράματος μεταβάλλεται (σε τοπική κλίμακα), αυξάνοντας την σκληρότητα στο κράμα 6061-O, που δεν έχει υποστεί θερμική κατεργασία, λόγω κατακρήμνισης της φάσης **Mg₂Si**. Αντίθετα, στο κράμα 6061-T6, που έχει ήδη υποστεί θερμική κατεργασία, παρατηρείται μείωση της σκληρότητας στη Λ.Σ., λόγω της διαλυτοποίησης της φάσης **Mg₂Si**.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- ☛ Πραγματοποίηση μετωπικής συγκόλλησης, βασισμένη στις βέλτιστες συνθήκες που προσδιορίστηκαν από τα πειράματα *bead on plate*, ακολουθούμενη από μακροσκοπική και μικροσκοπική αξιολόγηση των συγκολλήσεων.
- ☛ Εφαρμογή διαφορετικής επιφανειακής κατεργασίας, και πλήρης μελέτη της επίδρασης στην απορρόφηση της δέσμης του laser.
- ☛ Εστίαση της εργασίας σε ένα συγκεκριμένο κράμα, και προσπάθεια κατανόησης της έναρξης του φαινομένου *keyhole*.
- ☛ Υπολογισμός θερμοκρασιακών κατανομών χρησιμοποιώντας τόσο αναλυτικό μοντέλο, όσο και πεπερασμένα στοιχεία.
- ☛ Ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM και TEM, ώστε να μελετηθούν οι μεταβολές της μικροδομής στη ΘΕΖ και στο μέταλλο συγκόλλησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. M. Steen, "Laser Material Processing", Springer - Verlag, 1991, p.p. 108 - 144.
- [2] P. J. Oakley, "Economics", Hanbook of the EuroLaser Academy, edited by D. Schuocker, Chapman & Hall, Volume 2, 1998, p.p. 551 - 577.
- [3] G. Sayegh, "Welding", Hanbook of the EuroLaser Academy, edited by D. Schuocker, Chapman & Hall, Volume 2, 1998, p.p. 257 - 312.
- [4] J. G. Young, "Defects in Fusion Welds" , p. 27 - 32.
- [5] J. E. Hatch, "Aluminum : Properties and Physical Metallurgy", ASM, 1993, p.p. 134 - 199, 351 - 378.
- [6] I. J. Polmear, "Light Alloys : Metallurgy of the Light Alloys", Arnold, 1995, p.p. 24 - 167.
- [7] M. Kutsuma et al., "CO₂ Laser Welding of A2219, A5083 and A6063 Aluminium Alloys ", Welding in the World, Vol. 31, No 2, 1993, p.p. 126 - 135.
- [8] B. Thorstensen, J. Mazumder, "Laser Welding of the Aluminium Alloy AA6082" Proceeding of the 4th International Conference Lasers in Manufacturing, May 1987, p.p. 203 - 210.
- [9] A. G. Grigor'yants et al, "Special Features of Laser Welding AMg6 Alloy", Welding Production, September 1983, p.p. 24 - 26.
- [10] J. Mazumder "Laser Beam Welding" ASM Hanbook Vol. 6, 9th edition, p.p. 262 - 269.
- [11] P. B. Dickerson "Welding of Aluminum Alloys" ASM Hanbook Vol. 4, 9th edition, p.p. 723 - 739.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων Δ' σειράς
2. Προδιαγραφή ISO 5817 για συγκολλήσεις.



ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ Α.Ε.
METALLURGICAL INDUSTRIAL RESEARCH & TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT CENTRE S.A.

ΚΩΔ. ΠΕΛ./ΕΡΓΟΥ CUST./PROJ.	ΔΕΛΤΙΟ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ X-RAY TEST REPORT	ΑΡ. ΔΕΛΤΙΟΥ REPORT No. 0022
--	--	---

ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΑ ΕΡΓΟΥ/PLANT ID. : LASER MAT-ΕΠΕΤ II 170	
ΤΜΗΜΑ ΕΡΓΟΥ/PLANT COMPONENT : ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ALα	
ΤΥΠΟΣ ΠΗΓΗΣ : X-RAY	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ :
SOURCE TYPE : ANDREX SMART 225	TEST PARAMETERS : 75Kv 1,3mA 95sec
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΗΣ :	ΕΙΔΟΣ ΦΙΛΜ : CODAK M
FOCAL DISTANCE : 740 mm	FILM TYPE :
ΥΛΙΚΟ :	ΕΙΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ : BUTT WELD
MATERIAL : AL	WELDING PROCEDURE :

RADIOGRAPHIC RESULTS ACCORDING TO ISO 5817 : 1992 (E)

WELD No.	WELD ZONE OR POSITION	DEFECTS DESCRIPTION	EVALUATION		
			MODERATE D	INTERMEDIATE C	STRINGENT B
1	--	POROSITY			
2	--	POROSITY			
3	--	POROSITY			
4	--	POROSITY			
5	--	POROSITY			
6	--	POROSITY BURN TROUGH			
7	--	POROSITY BURN TROUGH			
8	--	POROSITY CRATER CRACK			
9	--	POROSITY ROOT CONCAVITY			
10	--	POROSITY- CRATER CRACK- ROOT CONCAVITY			
11	--	POROSITY ROOT CONCAVITY			
12	--	POROSITY			
13	--	POROSITY			
14	--	BURN THROUGH SOLID INCLUSION			
15	--	POROSITY			
16	--	POROSITY			

Κεντρικά : Α' Βιομηχανική Περιοχή Βόλου, 385 00 Βόλος / Head offices : A' Industrial Area, 385 00 Volos, GREECE

Tel.: (0421) 95340 - 2, Fax : (0421) 95364 / E-MAIL: MIRTEC@ebetam.infonet.com

Παράρτημα Θεσ/νίκης : Βιομηχανική Περιοχή, 570 22 Σίνδος, Τηλ. - Fax: (031) - 797887 / Thessaloniki Branch : Industrial Area, 570 22 Sindos, GR. Tel. - Fax: (031) 797887



WELD No.	WELD ZONE OR POSITION	DEFECTS DESCRIPTION	EVALUATION		
			MODERATE D	INTERMEDIATE C	STRINGENT B
17	--	POROSITY			
18	--	POROSITY			
19	--	POROSITY-EXCESIVE PENETRATION			
20	--	POROSITY			
21	--	CRACK-POROSITY			
22	--	POROSITY			
23	--	POROSITY			
24	--	POROSITY			
25	--	POROSITY			

ΗΜ/ΝΙΑ-DATE

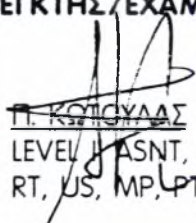
ΤΟΠΟΣ/PLACE

ΕΛΕΓΚΤΗΣ/EXAMINER

ΤΟΜΕΑΡΧΗΣ/SUPERVISOR

02.04.97

ΒΟΛΟΣ


Π. ΚΩΤΣΥΛΑΣ
 LEVEL II ASNT,
 RT, US, MP, PT

Ν. ΠΑΝΤΕΛΙΑΔΗΣ
 LEVEL II ASNT,
 RT, US, PT

U0462W

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

3.2 Weld thickness

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

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

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

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

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

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

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

4 Symbols

The following symbols are used in table 1.

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

5 Evaluation of welds

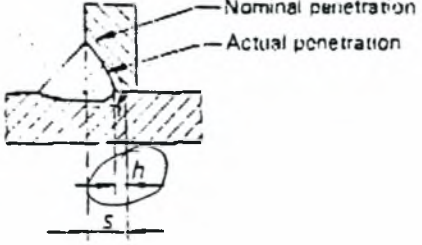
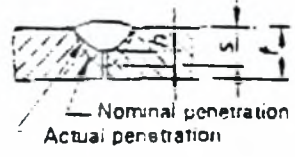
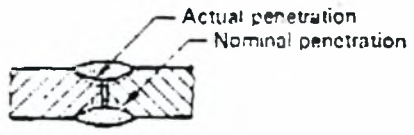
Limits for imperfections are given in table 1.

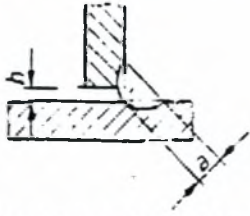
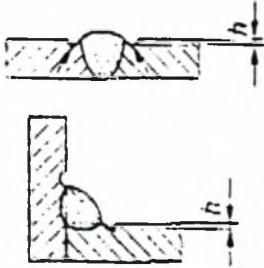
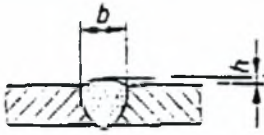
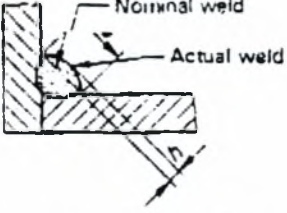
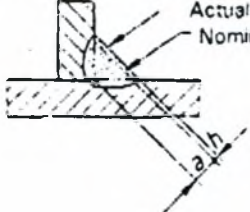
A welded joint should normally be evaluated separately for each individual type of imperfection (Nos. 1 to 25).

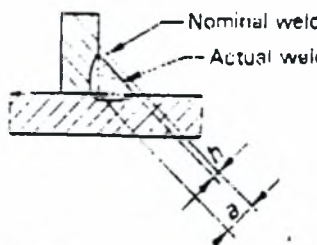
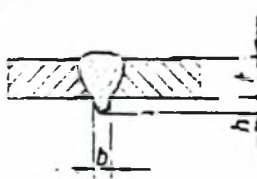
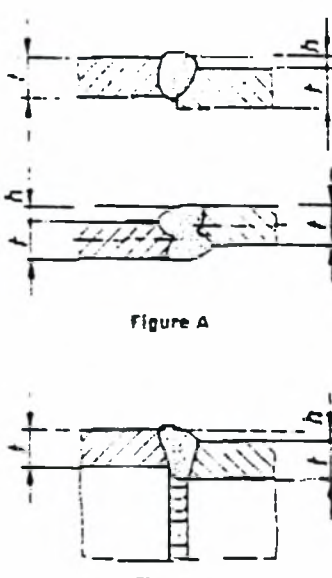
Different types of imperfection occurring at any cross-section of the joint may need special consideration (see No. 26).

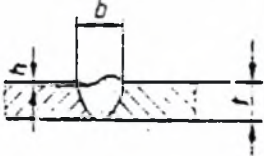
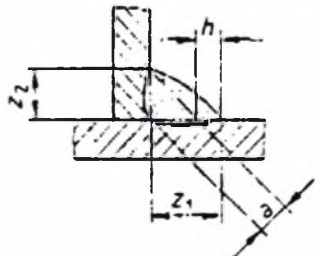
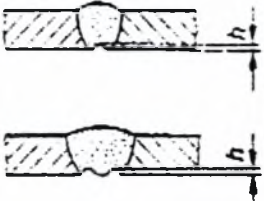

Table 1 — Limits for imperfections

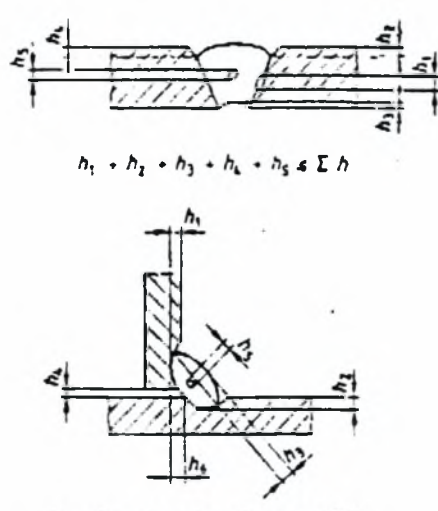
No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for Imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
1	Cracks	100	All types of cracks except micro cracks ($h < 1 \text{ mm}^2$), crater cracks, see No 2	Not permitted		
				Permitted	Not permitted	
3	Porosity 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 — butt welds — fillet welds</p> <p>c) Maximum dimension for a single pore</p>	<p>4 %</p> <p>$d \leq 0,5 s$ $d \leq 0,5 a$</p> <p>5 mm</p>	<p>2 %</p> <p>$d \leq 0,4 s$ $d \leq 0,4 a$</p> <p>4 mm</p>	<p>1 %</p> <p>$d \leq 0,3 s$ $d \leq 0,3 a$</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 — butt welds — fillet welds</p> <p>c) Maximum dimension for localized clustered porosity</p>	<p>16 %</p> <p>$d \leq 0,5 s$ $d \leq 0,5 a$</p> <p>4 mm</p>	<p>8 %</p> <p>$d \leq 0,4 s$ $d \leq 0,4 a$</p> <p>3 mm</p>	<p>4 %</p> <p>$d \leq 0,3 s$ $d \leq 0,3 a$</p> <p>2 mm</p>
5	Elongated cavities, wormholes	2015 2016	<p>Long imperfections for — butt welds — fillet welds</p> <p>In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes</p>	<p>$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$</p> <p>2 mm</p>	Not permitted	Not permitted
			<p>Short imperfections for — butt welds — fillet welds</p> <p>In any case, maximum dimension for elongated cavities, wormholes</p>	<p>$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$</p> <p>4 mm or Not Larger Than Thickness (NLTT)</p>	<p>$h \leq 0,4 s$ $h \leq 0,4 a$</p> <p>3 mm or NLTT</p>	<p>$h \leq 0,3 s$ $h \leq 0,3 a$</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 inclusions	$a \leq 0.5 s$ $a \leq 0.5 a$ 2 mm	Not permitted	Not permitted
			Short imperfections for - butt welds - fillet welds In any case, maximum dimension for solid inclusions	$a \leq 0.5 s$ $a \leq 0.5 a$ 4 mm or Not Larger Than Thickness (NLTT)	$a \leq 0.4 s$ $a \leq 0.4 a$ 3 mm or NLTT	$a \leq 0.3 s$ $a \leq 0.3 a$ 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 $a \leq 0.2 s$, max. 2 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	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,16 b$ max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$ max. 5 mm
13	Excessive convexity	503	<p>Normal weld</p> <p>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> <p>Actual weld</p> <p>Nominal weld</p> 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 a$ max. 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 a$ max. 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$ max. 3 mm

No.	Imperfection designation	ISO 8520 reference	Remarks	Limits for Imperfections for quality levels			
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B	
15	Fillet weld having a throat thickness smaller than the nominal value	-	<p>A fillet weld with an apparent throat thickness smaller than that prescribed should not be regarded as being imperfect if the actual throat thickness with a compensating greater depth of penetration complies with the nominal value</p> 	<p>Long imperfections: Not permitted</p>	Not permitted		
				<p>Short imperfections: $h \leq 0.3 \text{ mm} + 0.1 a$ max 2 mm</p>	<p>max 1 mm</p>		
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 mis-alignment	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>r</i> refers to the smaller thickness</p> 	<p>Figure A — Plates and longitudinal welds</p> $h \leq 0.25 r$ max 5 mm	$h \leq 0.15 r$ max 4 mm	$h \leq 0.1 r$ max 3 mm	
					<p>Figure B — Circumferential welds</p> $h \leq 0.5 r$ max 4 mm	<p>max 3 mm</p>	<p>max 2 mm</p>

No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
19	Incompletely filled groove	511	Smooth transition is required 	Long Imperfections: Not permitted		
	Sagging	509		$h \leq 0,2 l$, max. 2 mm	Short Imperfections: $h \leq 0,1 l$ max. 1 mm	$h \leq 0,05 l$, max. 0,5 mm
20	Excessive asymmetry fillet weld	512	It is assumed that an asymmetric fillet weld has not been expressly prescribed 	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,2 a$	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,15 a$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$
21	Root concavity Shrinkage groove	515	Smooth transition is required 	$h \leq 1,5 \text{ mm}$	$h \leq 1 \text{ mm}$	$h \leq 0,5 \text{ mm}$
		5013				
22	Overlap	508		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.		

Imperfection designation	ISO 8520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
			Moderate D	Intermediate C	Stringent B
Multiple imperfections in any cross-section ¹⁾	—	<p>For thicknesses $s \leq 10$ mm or $a \leq 10$ 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 λ , 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.

UDC 621.791.75(083.1):669.14:620.1

Descriptors: Welding, arc welding, steels, procedure, qualification, tests, description, specifications, setting conditions

English version

Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Part 3: Welding procedure tests for the arc welding of steels

Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Partie 3: Epreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage à l'arc sur acier

Anforderung und Anerkennung v Schweißverfahren für metallische Werkstoffe Teil 3: Schweißverfahrensprüfungen für Lichtbogenschweißen von Stählen

This European Standard was approved by CEN on 1992-02-21. CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration.

Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

CEN

European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

Central Secretariat: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels

Contents list

Page

Introduction	4
Scope	4
Normative references	4
Definitions	5
Preliminary welding procedure specification (pWPS)	5
Welding procedure test	5
Test piece	5
General	5
Shape and dimensions of test pieces	5
Welding of test pieces	6
Examination and testing	10
Extent of testing	10
Location and cutting of test specimens	11
Non-destructive examination	15
Destructive tests	15
Re-testing	18
Range of approval	18
General	18
Related to the manufacturer	18
Related to the material	18
Common to all welding procedures	21
Specific to processes	23
Welding Procedure Approval Record (WPAR)	24
Annexes	
Annex A) - Welding Procedure Approval Record form (WPAR)	25
Annex B) - Types of steel according to the grouping system of table 3	28

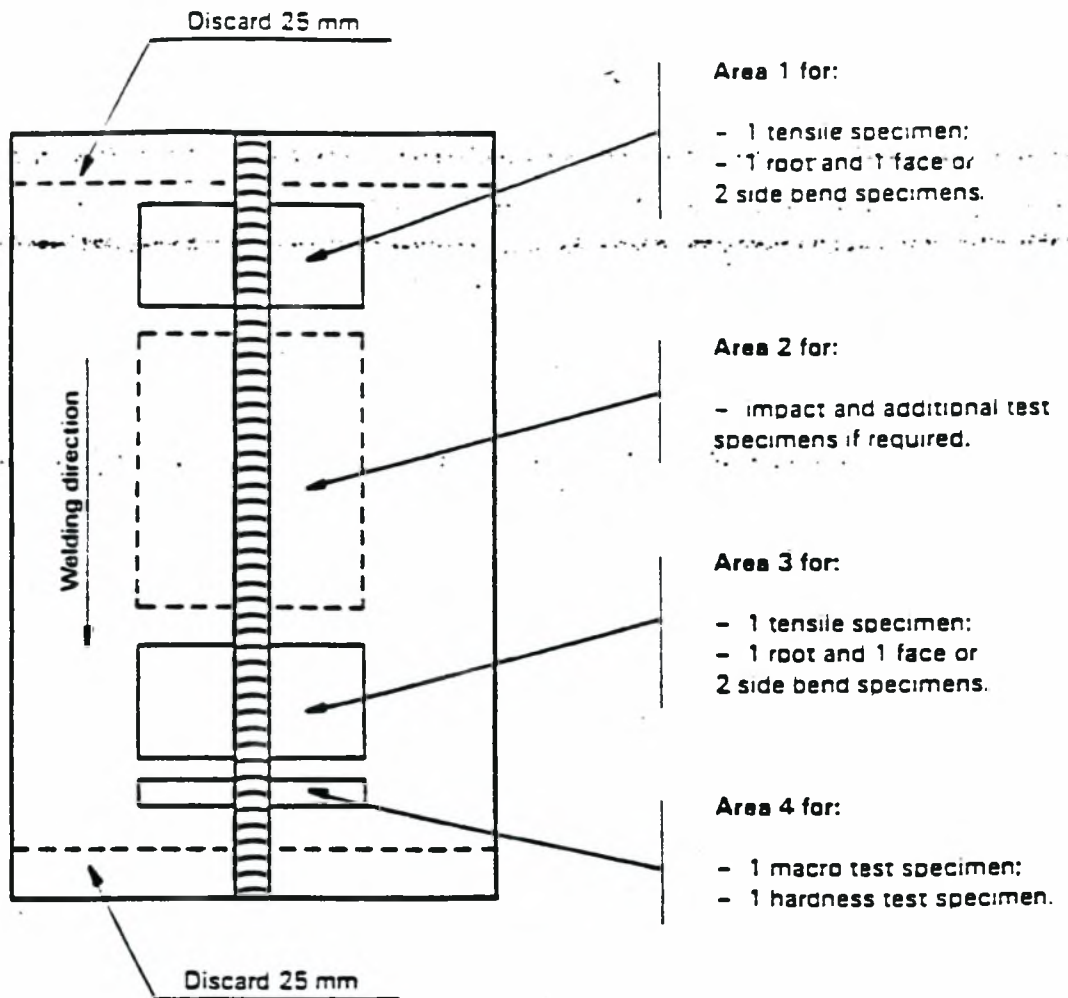


Figure 6: Location of test specimens for a butt weld in plate

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
Λ Η Ξ Η	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
26-2-02	ΛΕΙΚΑΚΗΖ
19/11/09	1673
20/9/04	

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ**

Τηλ.: ~~74.760-61~~

74233-3



ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΕΣ ΑΛ ΜΕ CO₂ LASER

ΜΟΥΔΟΣ

ΠΤ - Μ
1998
ΑΛΕ