

ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΚΤΙΝΑΣ LASER**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:
ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΡΗΤΙΚΟΣ, ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΜΑΝΑΝΑΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2008

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....σελ.	3
2. Διεργασίες Συγκόλλησης.....σελ.	5
2.1. Μέθοδοι συγκόλλησης.....σελ.	5
2.2. Είδη συγκολλήσεων.....σελ.	6
3. Διεργασίες Συγκόλλησης με Laser.....σελ.	18
3.1. Περιγραφή Μηχανισμού Διεργασίας.....σελ.	18
3.2. Σύγκολληση με αγωγή (conduction welding).....σελ.	21
3.3 . Συγκόλληση με διείσδυση (penetration welding).....σελ.	22
3.4. Πηγές Laser.....σελ.	23
3.5. Βασικές παράμετροι Διεργασίας.....σελ.	30
4. Συγκολλησιμότητα Υλικών.....σελ.	33
4.1. Κράματα σιδήρου – άνθρακα.....σελ.	33
4.2. Συγκόλληση ανόμοιων υλικών.....σελ.	34
4.3.Βασικές αρχές της συγκόλλησης λειτουργ ανόμοιων υλικών.....σελ.	36
5. Έλεγχος ποιότητας συγκολλήσεων.....σελ.	62
5.1. Μη καταστροφικές μέθοδοι.....σελ.	62
5.2. Καταστροφικές δοκιμές.....σελ.	63
6. Συμπεράσματα.....σελ.	65
7. Βιβλιογραφία.....σελ.	69

1. Εισαγωγή

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η περιγραφή και ανασκόπηση της διεθνούς κατάστασης (state of the art) της διαδικασίας συγκόλλησης με laser μεταξύ ανόμοιων υλικών καθώς και ο διαχωρισμός των ειδών της συγκόλλησης, ανάλογα με τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε κάθε είδος. Η περιγραφή και άλλων διεργασιών συγκόλλησης περιληπτικά δίνει μια γενική εικόνα της μέχρι τώρα εξέλιξης στην συγκόλληση και παραθέτει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την συγκόλληση με laser. Η αναφορά στον ορισμό και τα είδη της συγκόλλησης παραθέτονται στην συνέχεια (μέρος 2ο). Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μέσο αναλύονται στα επί μέρους είδη στο διάγραμμα του σχ. 3. Αναφέρονται οι διαφορές ανάμεσα στις αυτογενείς και τις ετερογενείς συγκολλήσεις με περιγραφή της καθεμίας στην κατηγορία της συγκόλλησης τήξης. Στην κατηγορία της συγκόλλησης πίεσης παραθέτονται οι υποκατηγορίες με σύντομη επεξήγηση της διαδικασίας σε καθεμία από αυτές.

Το τρίτο μέρος της πτυχιακής εργασίας ασχολείται αποκλειστικά με την κατεργασία της συγκόλλησης με laser που ανήκει στην κατηγορία των ειδικών συγκολλήσεων. Περιγράφεται ο μηχανισμός της διεργασίας σχηματικά και αναλύεται λεπτομερώς. Στις παραγράφους 3.2 και 3.3 αναφέρονται οι κατηγορίες α) με αγωγή και β) με διείσδυση. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι διαφορετικές πηγές laser και συγκρίνονται ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιούνται (παρ.3.4).

Το κεφάλαιο 4 αναφέρεται στην συγκολλησιμότητα των υλικών. Στην παράγραφο 4.2 γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές της συγκόλλησης laser των ανόμοιων μετάλλων και συγκρίνεται η συγκολλησιμότητα ανόμοιων υλικών. Οι κατηγορίες που θα εξετάσουμε είναι οι εξής:

- Ανοξειδωτο και άνθρακας ή χαμηλός χάλυβας κραμάτων
- Χάλυβας και χαλκός
- Χάλυβας και αλουμίνιο
- Χάλυβας και νικέλιο
- Αλουμίνιο 4047 και χαλκός
- Αλουμίνιο και μόλυβδος
- Κράμα αλουμινίου και κράμα μαγνησίου
- Αλουμίνιο με ντυμένο τον ψευδάργυρος χάλυβα
- Αργίλιο με τιτάνιο

Στο 5ο μέρος της εργασίας παραθέτουμε την διαδικασία του ελέγχου.

2. Διεργασίες Συγκόλλησης

2.1 Μέθοδοι συγκόλλησης

Οι μέθοδοι της συγκόλλησης και τα συγκολλητικά υλικά έχουν αναπτυχθεί τόσο, ώστε να πραγματοποιούνται κατασκευές με ποιότητα, αξιοπιστία και αντοχή, που η παλαιότερη τεχνολογία δεν το επέτρεπε. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα της συγκόλλησης ήταν πάντα ο έλεγχος της ποιότητάς της, ειδικότερα, όταν επρόκειτο για συνδέσεις με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας.



Σχήμα 1: Σύγχρονη διαδικασία συγκόλλησης με CNC

Όμως οι σύγχρονες ηλεκτρονικές μέθοδοι ελέγχου (χρήση ακτίνων X ή Γ, υπέρηχοι κτλ.), έχουν τη δυνατότητα πλήρους, συνεχούς και, κυρίως, γρήγορου και άκρως αξιόπιστου ελέγχου της ποιότητας των συγκολλήσεων. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος αλλά και των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η χρήση όλο και

περισσότερο της συγκόλλησης, ως μεθόδου σύνδεσης με-ταλλικών κομματιών στις κατασκευές αλλά και στις επισκευές.

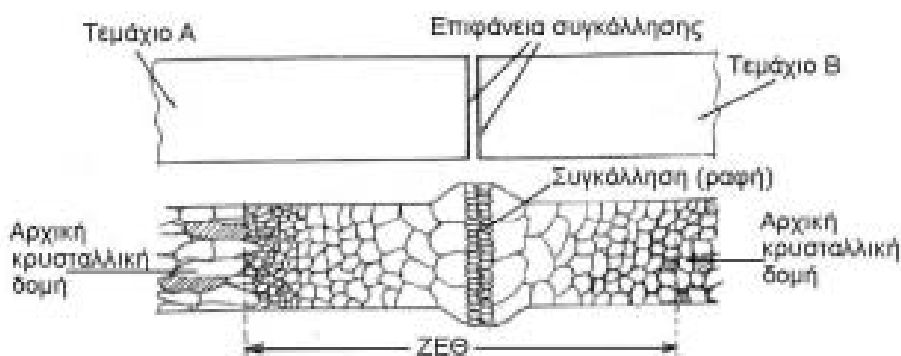
Ακόμη και το μικρότερο **συνεργείο επισκευής αυτοκινήτων** και, ειδικά, τα συνεργεία επισκευής αμαξωμάτων (φανοποιεία), διαθέτουν συσκευές συγκόλλησης διαφόρων ειδών για την επισκευή ή την αντικατάσταση μεταλλικών τμημάτων του αυτοκινήτου.

2.2 Είδη συγκολλήσεων

Με τον τεχνικό όρο **συγκόλληση** εννοούμε «την ένωση δύο ή περισσότερων μεταλλικών κομματιών με τη βοήθεια της θέρμανσης ή της πίεσης ή, ακόμη, και με ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο» [5]. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης δημιουργείται ανάμεσα στα μεταλλικά κομμάτια που θέλουμε να συγκολλήσουμε μία κρυσταλλική σύνδεση. Στο σχήμα 2. φαίνεται η έννοια της κρυσταλλικής σύνδεσης δύο μεταλλικών κομματιών κατά τη συγκόλληση καθώς και η λεγόμενη ζώνη συγκόλλησης ή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη που συμβολίζεται ως ZΕΘ. Ο ορισμός της είναι [7]:

Ζώνη συγκόλλησης ZΕΘ : ονομάζεται το τμήμα που περιλαμβάνει τη συγκόλληση (ραφή) μαζί με τις γειτονικές περιοχές των συνδεομένων κομματιών, οι οποίες δέχονται την επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση.

Η κρυσταλλική δομή των δυο κομματιών στη ΖΕΘ, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, έχει αλλάξει. Το είδος και η έκταση της αλλαγής στην εσωτερική δομή των μετάλλων, στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης, εξαρτάται από το είδος των μετάλλων και από τη θερμοκρασία συγκόλλησης.



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση της κρυσταλλικής δομής στη ζώνη συγκόλλησης δυο μεταλλι-κών τεμαχίων (ΖΕΘ)

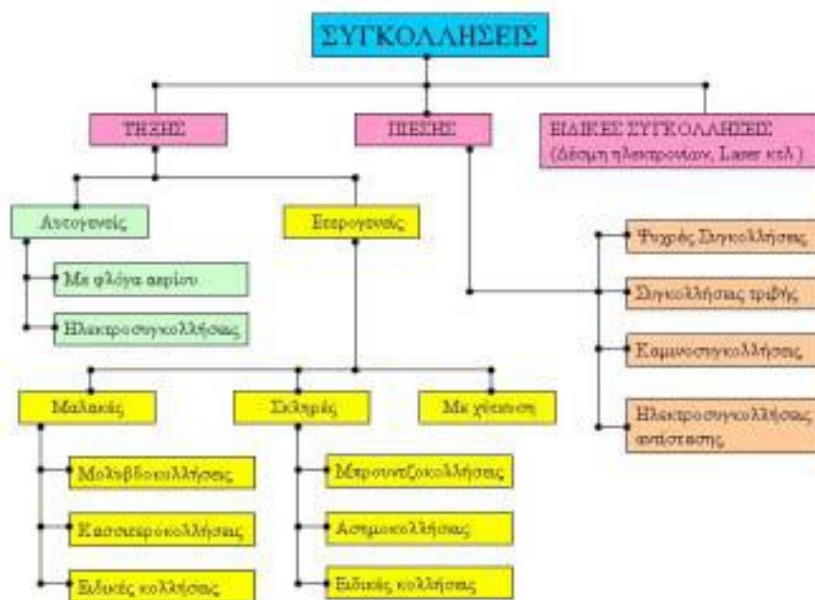
Οι συγκολλήσεις κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μέσο. Έτσι έχουμε:

- Τις συγκολλήσεις τήξης
- Τις συγκολλήσεις πίεσης
- Τις ειδικές συγκολλήσεις

Συγκολλήσεις τήξης

Οι συγκολλήσεις τήξης συνοδεύονται από το φαινόμενο της τήξης των μετάλλων στο σημείο συγκόλλησής τους. Η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι του σημείου τήξης των μετάλλων στα σημεία συγκόλλησής τους,

με συνέπεια τα μόρια του ενός μετάλλου να εισχωρούν στα μόρια του άλλου και έτσι να πραγματοποιείται η σύνδεσή τους, μετά την επαναφορά τους στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



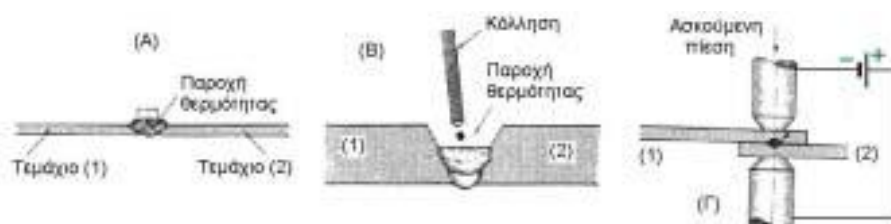
Σχήμα 3: Διάγραμμα παρουσίασης των διαφόρων ειδών συγκόλλησης

Η συγκόλληση τήξης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής τρόπους:

Με την τήξη και των δύο μεταλλικών κομματιών στη θέση της συγκόλλησης. Σε αυτήν την περίπτωση τα προς συγκόλληση μεταλλικά τεμάχια θα πρέπει να είναι από το ίδιο μέταλλο ή από κράμα της ίδιας ή παρόμοιας χημικής σύστασης.

Με την τήξη των δύο μεταλλικών κομματιών στη θέση συγκόλλησης και την ταυτόχρονη τήξη ενός τρίτου υλικού που το ονομάζουμε συγκολλητικό ή κόλληση. Η κόλληση έχει την ίδια χημική σύσταση με τα κομμάτια που θέλουμε να συγκολλήσουμε ή παρόμοια.

Με τήξη μόνο της κόλλησης. Η κόλληση είναι από υλικό εντελώς διαφορετικό από τα υλικά των μεταλλικών κομματιών που θα συγκολληθούν και έχει πάντα θερμοκρασία τήξης μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης των συγκολλούμενων κομματιών. Τα κομμάτια που θα συγκολληθούν με αυτή τη μέθοδο, μπορεί να είναι από το ίδιο είδος μετάλλου ή από διαφορετικό μέταλλο.



Σχημα 4: Τρόποι συγκόλλησης μεταλλικών κομματιών: (Α) Με τήξη των σημείων συγκόλλησης των μεταλλικών τεμαχίων (Β) Με πρόσθετο συγκολλητικό υλικό (Γ) Με θέρμανση και πίεση

Σκοπός του συγκολλητικού υλικού (κόλλησης) είναι να γεμίσει το διάκενο μεταξύ των δύο μεταλλικών κομματιών που θα συγκολληθούν, ώστε, όταν κρυώσει, να αποτελέσει τη συνδετική τους γέφυρα.

Οι συγκολλήσεις τήξης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κόλλησης που χρησιμοποιείται. Έτσι έχουμε:

- Τις αυτογενείς κολλήσεις
- Τις ετερογενείς κολλήσεις

Κάθε είδος από τις αναφερόμενες πιο πάνω συγκολλήσεις έχει τα δικά της τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία προσδιορίζουν και τις περιπτώσεις χρήσης τους.

Αυτογενείς ονομάζονται οι συγκολλήσεις τήξης στις οποίες τα προς συγκόλληση μεταλλικά τεμάχια είναι από το ίδιο ή από παρόμοιο υλικό. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις περιλαμβάνονται και οι συγκολλήσεις τήξης χωρίς τη χρήση κόλλησης, εφόσον τα συγκολλούμενα τεμάχια είναι από το ίδιο υλικό ή από κράμα της ίδιας χημικής σύστασης. Για παράδειγμα, η συγκόλληση δύο τεμαχίων από μαλακό χάλυβα είναι μία αυτογενής συγκόλληση, γιατί τα προς συγκόλληση τεμάχια και η κόλληση είναι της ίδιας χημικής σύστασης.

Στις αυτογενείς συγκολλήσεις, όταν στερεοποιηθούν τα τηχθέντα σημεία των μετάλλων (κομματιών και κόλλησης), πραγματοποιείται η εσωτερική κρυσταλλική σύνδεσή τους και, έτσι, η κόλληση και τα προς συγκόλληση τεμάχια αποτελούν πλέον μία ισχυρή σύνδεση. Γίνονται δηλαδή «ένα σώμα». Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τις αυτογενείς συγκολλήσεις είναι συνήθως υψηλές και εξαρτώνται από το είδος των μετάλλων που θα συγκολληθούν. Ενδεικτικά δίνονται πιο κάτω οι θερμοκρασίες τήξης μερικών γνωστών μας μετάλλων:

- Χάλυβας: 1450-1530°C

- Χυτοσίδηρος: 1150-1250°C
- Χαλκός: 1083°C
- Μπρούντζος: 900°C
- Ορείχαλκος: 900-1000°C
- Άργυρος (ασήμι): 960°C
- Κασσίτερος: 230°C

Για να επιτύχουμε τόσο υψηλές θερμοκρασίες τήξης, θα πρέπει να διαθέτουμε ισχυρές πηγές θερμότητας. Τέτοιες πηγές θερμότητας μπορούμε να έχουμε είτε με καύση αερίου, είτε με ηλεκτρική ενέργεια. Η συνηθέστερη πηγή θερμότητας στις αυτογενείς συγκολλήσεις είναι η καύση ασετιλίνης. Στην περίπτωση αυτή η καύση της ασετιλίνης συντελείται με τη βοήθεια καθαρού οξυγόνου. Γι. αυτό και η συσκευή συγκόλλησης ονομάζεται και συσκευή οξυγονοασετιλίνης και το είδος της συγκόλλησης «οξυγονοσυγκόλληση».

Στις περιπτώσεις που οι απαιτούμενες θερμοκρασίες συγκόλλησης εξασφαλίζονται από ηλεκτρική πηγή, οι συγκολλήσεις ονομάζονται «**ηλεκτροσυγκολλήσεις**» και οι συσκευές με τις οποίες πραγματοποιούνται ονομάζονται **συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης**.

Ετερογενείς ονομάζονται οι συγκολλήσεις στις οποίες τα προς συγκόλληση μεταλλικά κομμάτια είναι διαφορετικής χημικής σύστασης από τη χημική σύσταση τη κόλλησης. Η θερμοκρασία τήξης της

κόλλησης που χρησιμοποιείται είναι πάντα μικρότερη από εκείνη των προς συγκόλληση κομματιών. Όταν η θερμοκρασία φθάσει στο σημείο τήξης της κόλλησης, η κόλληση λειώνει και απλώνεται στις επιφάνειες που θα συγκολληθούν. Έτσι, στην περιοχή της συγκόλλησης δημιουργείται ένα κράμα από στοιχεία της κόλλησης και των μεταλλικών κομματιών. Όταν το κράμα αυτό στερεοποιηθεί, πραγματοποιείται κρυσταλλική σύνδεση των κομματιών, με αποτέλεσμα τη συγκόλλησή τους.

Η σύνδεση των κομματιών στις ετερογενείς κολλήσεις ενισχύεται και από τη διείσδυση της ρευστής κόλλησης μέσα στους πόρους των επιφανειών συγκόλλησης, δημιουργώντας, έτσι, ένα είδος αγκίστρωσης στην επιφάνεια των μεταλλικών κομματιών. Γι. αυτό στις ετερογενείς συγκολλήσεις οι επιφάνειες που πρόκειται να συγκολληθούν πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά με ειδικά υλικά καθαρισμού, πράγμα που δεν είναι απαραίτητο στις αυτογενείς συγκολλήσεις. Στην κατηγορία των ετερογενών συγκολλήσεων ανήκουν οι ασημοκολλήσεις, οι μπруντζοκολλήσεις, οι κασσιτεροκολλήσεις κτλ.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αναφερόμενα για τις ετερογενείς συγκολλήσεις, θα πρέπει να έχουμε υπ' όψη μας τα ακόλουθα:

- Η κόλληση είναι πάντα διαφορετικής χημικής σύστασης από το υλικό των κομματιών που θα συγκολληθούν.
- Η θερμοκρασία τήξης της κόλλησης είναι αρκετά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού των μεταλλικών κομματιών.

- Οι προς συγκόλληση επιφάνειες θα πρέπει να είναι σχολαστικά καθαρές.
- Τα υλικά καθαρισμού των προς συγκόλληση επιφανειών θα πρέπει να είναι κατάλληλα για κάθε περίπτωση ετερογενούς συγκόλλησης.

Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την απαιτούμενη θερμοκρασία τήξης της κόλλησης που χρησιμοποιείται. Έτσι έχουμε:

- Τις μαλακές ετερογενείς συγκολλήσεις
- Τις σκληρές
- Τις συγκολλήσεις με χύτευση

Οι κολλήσεις που χρησιμοποιούνται στις **μαλακές** συγκολλήσεις έχουν θερμοκρασία τήξης μικρότερη των **500°C**, ενώ οι **σκληρές** κολλήσεις έχουν θερμοκρασία τήξης **άνω των 500°C**.

Συγκολλήσεις πίεσης

Οι συγκολλήσεις πίεσης πραγματοποιούνται με ταυτόχρονη θέρμανση της θέσης συγκόλλησης των δύο κομματιών σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης τους και με εφαρμογή ισχυρής πίεσης στη θέση της συγκόλλησης.

Οι συγκολλήσεις πίεσης διακρίνονται σε:

- Ψυχρές συγκολλήσεις
- Συγκολλήσεις τριβής
- Καμινοσυγκολλήσεις
- Ηλεκτροσυγκολλήσεις αντίστασης

Η θερμοκρασία και η πίεση που απαιτεί μία συγκόλληση πίεσης εξαρτάται από το είδος των μετάλλων που θα συγκολληθούν. Στις συγκολλήσεις πίεσης δεν απαιτείται συγκολλητικό υλικό (κόλληση). Με τη θέρμανση των μετάλλων που θα συγκολληθούν και την εξάσκηση ισχυρής πίεσης, τα μέταλλα έρχονται σε πολύ στενή επαφή μεταξύ τους και τα μόρια του ενός εισχωρούν στα μόρια του άλλου, δημιουργώντας, έτσι, την κρυσταλλική σύνδεση των κομματιών.

Οι συγκολλήσεις πίεσης διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται, για να εξασφαλιστεί η θέρμανση και η πίεση που απαιτείται στη θέση της συγκόλλησης. Έτσι έχουμε:

(1) Τις Ηλεκτροσυγκολλήσεις αντίστασης

Κατά σημεία. Οι μηχανές που εκτελούν αυτού του είδους τη συγκόλληση ονομάζονται ηλεκτροπόντες και είναι από τα πλέον διαδεδομένα μηχανήματα στην τεχνολογία των συγκολλήσεων.

Ραφής Η αρχή λειτουργίας των μηχανών ηλεκτροσυγκόλλησης αντίστασης ραφής (ραουλόποντας) είναι ίδια με εκείνη της μηχανής συγκόλλησης κατά σημεία. Όμως στις μηχανές συγκόλλησης ραφής τα ηλεκτρόδια έχουν τη μορφή δίσκων που περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα. Τα προς συγκόλληση ελάσματα τοποθετούνται με τα άκρα τους σε επικάλυψη (το ένα πάνω στο άλλο) και κινούνται ανάμεσα στους δύο δίσκους - ηλεκτρόδια.

Οι δίσκοι - ηλεκτρόδια, όταν έλθουν σ' επαφή με τα ελάσματα, διοχετεύουν ηλεκτρικό ρεύμα στα σημεία ραφής των προς συγκόλληση ελασμάτων και ταυτόχρονα ασκούν δύναμη (πίεση). Η απαιτούμενη **ένταση** του ηλεκτρικού ρεύματος, η **πίεση**, η **ταχύτητα ραφής** (πρόωση) κτλ. στοιχεία της συγκόλλησης, εξαρτώνται από το πάχος των ελασμάτων που θα συγκολληθούν και από το είδος της ραφής (στεγανή, αντοχής ή συγκράτησης).

Η ηλεκτροσυγκόλληση αντίστασης ραφής **εφαρμόζεται** κυρίως στις περιπτώσεις που απαιτείται **στεγανότητα** στις συνδέσεις ελασμάτων και **μεγάλος ρυθμός παραγωγής**. Όμως, όταν δεν απαιτείται στεγανότητα στη ραφή, αλλά απλή συγκράτηση των ελασμάτων, η μηχανή συγκόλλησης ραφής μπορεί να ρυθμιστεί έτσι, ώστε να συγκολλάει **κατά σημεία**. Σ' αυτή την περίπτωση η μηχανή συγκόλλησης ρυθμίζεται έτσι, ώστε να τροφοδοτεί τα ηλεκτρόδια (δίσκους) με ρεύμα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, αφήνοντας τμήματα των προς συγκόλληση ελασμάτων χωρίς ραφή. Μ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο χρόνος της

συγκόλλησης των ελασμάτων και περιορίζεται το κόστος. Το είδος αυτό της συγκόλλησης βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε κατασκευές που η σύνδεση των ελασμάτων γίνεται με επικάλυψη.

Κατά άκρα: Το είδος αυτό της συγκόλλησης αντίστασης χρησιμοποιείται σε μονάδες παραγωγής, για τη σύνδεση άκρων σωλήνων, μορφοδοκών ή άκρων ράβδων από χάλυβα ή μη σιδηρούχων μετάλλων. **Η συγκόλληση κατά άκρα** πραγματοποιείται σε ειδικές μηχανές οι οποίες φέρουν **σια-γόνες συγκράτησης** των δύο τεμαχίων που θα συγκολληθούν. Η μια σιαγόνα είναι σταθερή, ενώ η άλλη είναι κινητή. Τα άκρα των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται στις σιαγόνες της μηχανής συγκόλλησης αντικριστά. Όταν δοθεί η εντολή να αρχίσει η διαδικασία συγκόλλησης των άκρων (π.χ. σωλήνων ή ράβδων από χάλυβα), η κινητή σιαγόνα αρχίζει να κινείται προς τη σταθερή, μέχρι να συναντηθούν τα δύο άκρα που θα συγκολληθούν. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται **ισχυρή πίεση** στα δύο άκρα, πριν ακόμη αρχίσει η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος. Κατόπιν διοχετεύεται μέσω των συμπιεσμένων άκρων **ηλεκτρικό ρεύμα μεγάλης έντασης**, το οποίο πυρακτώνει τα δύο άκρα και τα αναγκάζει να συγκολληθούν. Για να έχουμε άριστα αποτελέσματα συγκόλλησης, οι επιφάνειες των άκρων που θα συγκολληθούν θα πρέπει να είναι **καθαρές και καλά κεντραρισμένες**.

Ψυχρές συγκολλήσεις: Όταν 2 τεμάχια αλουμινίου σε επαφή πιεσθούν πέρα από το όριο πλαστικής παραμόρφωσης, τότε συμβαίνει εντοπισμένη πλαστική ροή των μετάλλων στην διεπιφάνεια επαφής, σπάει το επιφανειακό οξειδίο του αργιλίου και επέρχεται συγκόλληση στη

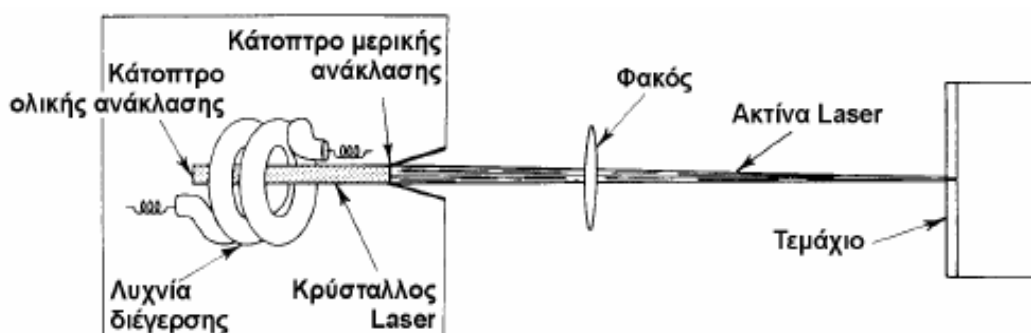
θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με τη μέθοδο αυτή συγκολλούνται σήμερα κυρίως προφίλ διέλασης μεταξύ τους (σε ειδικές διαμορφωτικές πρέσες μήκους μέχρι και 6 μέτρων). Παράγονται έτσι διατομές για ειδικές χρήσεις που κανονικά θα απαιτούσαν υπερβολικά μεγάλα μεγέθη πρεσών διέλασης για την τυπική παραγωγή τους.

Η τρίτη κατηγορία συγκολλήσεων είναι οι **ειδικές συγκολλήσεις** όπου και ανήκει η συγκόλληση με laser και θα αναλυθεί παρακάτω.

3. Διεργασίες Συγκόλλησης με Laser

3.1 Περιγραφή Μηχανισμού Διεργασίας

Η συγκόλληση λέιζερ χρησιμοποιεί την επίδραση θέρμανσης μιας συγκεντρωμένης συνεχούς μονοχρωματικής ακτίνας λέιζερ για να παράγει ζώνη τήξης ανάμεσα στα δύο υλικά. Για έναν δεδομένο κοινό και υλικό συνδυασμό, οι κύριες μεταβλητές επεξεργασίας είναι η ισχύς της ακτίνας, το μέγεθος του σημείου εστίασης και η ταχύτητα συγκόλλησης. Ένα αδρανές αέριο, όπως το ήλιο ή το αργό, χρησιμοποιείται για να προστατεύσει τη συγκόλληση από τη μόλυνση, και για να μειώσει το σχηματισμό του πλάσματος.



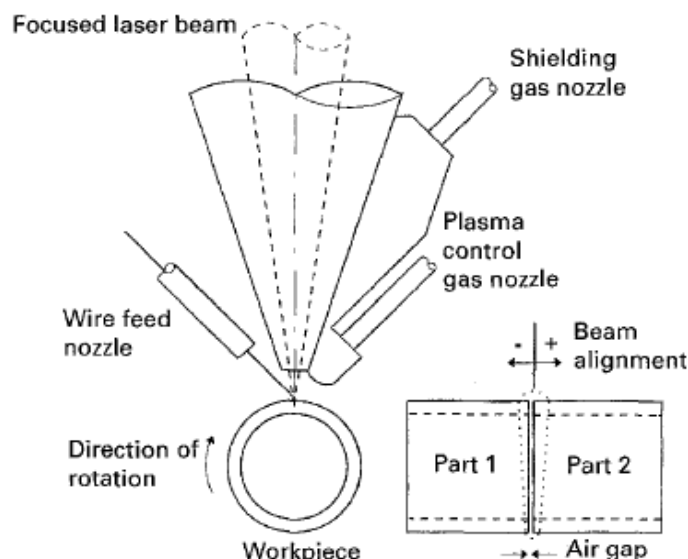
Σχήμα 5: Μηχανισμός διεργασίας

Η πυκνότητα ισχύος που είναι διαθέσιμη από μια βιομηχανική ακτίνα laser είναι έως περίπου 10^8 W cm^{-2} . Για να εκτελεσθεί **συγκόλληση μέσω αγωγής** χρειάζεται πυκνότητα ισχύος κάτω από 10^6 W cm^{-2} . Η ενέργεια της ακτίνας προσβάλλει το υλικό διαμορφώνοντας έτσι μια ημισφαιρική ζώνη τήξης (*ρίζα συγκόλλησης*) κατά παρόμοιο τρόπο με τις συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης. Αντίθετα, μια πυκνότητα ισχύος της τάξης των 10^7 W cm^{-2} είναι επαρκής για να αρχίσει η τοπική εξάχνωση, και διαμορφώνεται μια στενή, διαπεραστή βαθιά κοιλότητα

ατμού, ή μια μικρή τρύπα, από την πολλαπλάσια εσωτερική αντανάκλαση της ακτίνας. Η τρύπα περιβάλλεται από ένα λεπτό στρώμα λειωμένου υλικού, και διατηρείται από μια ισορροπία μεταξύ της πίεσης ατμού, της επιφανειακής τάσης και της υδροστατικής πίεσης. Όταν το κομμάτι προς κατεργασία κινείται σχετικά με την ακτίνα, το υλικό στην αιχμή λειώνει και ρέει γύρω από την τρύπα, που σταθεροποιείται για να διαμορφωθεί ένα βαθύ, στενό κρατήρα στην επιφάνεια. Η θερμότητα που εξάγεται στο περιβάλλον υλικό καθορίζει την κρυσταλλική δομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (ΖΑΘ).

Πολλά από τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της συγκόλλησης λέιζερ, σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης τήξης, προέρχονται από τις ιδιότητες της ακτίνας που προσπίπτει καθώς και της κλειδαρότρυπας (keyhole) που δημιουργείται. Η υψηλή πυκνότητα ενέργειας διατηρείται σε μια έντονα διαπεραστή λίμνη συγκόλλησης, επιτρέποντας συγκολλήσεις μεγάλου σχετικά πάχους να γίνουν γρήγορα σε ένα ενιαίο πέρασμα. Η προκύπτουσα χαμηλή ενεργειακή εισαγωγή παράγει μικρή ΖΑΘ που ελαχιστοποιεί την ανάγκη για πρόσθετες κατεργασίες. Η γρήγορη ψύξη οδηγεί στο σχηματισμό όχι μόνο των ευεργετικών λεπτών μικροδομών στερεοποίησης, και την περιορισμένη αύξηση κοκκοποίησης ΖΑΘ, αλλά και τις φάσεις μη ισορροπίας, μερικές από τις οποίες μπορούν να είναι καταστρεπτικές στις μηχανικές ιδιότητες.

Επειδή η ακτίνα μπορεί να εστιαστεί σε ένα μικρό σημείο, και καθοδηγείται μέσω αριθμητικού ελέγχου, είναι εφικτός ο ακριβής έλεγχος της θέσης της συγκόλλησης, αν και απαιτούνται στενές άνω ανοχές. Οι συγκολλήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ατμοσφαιρική πίεση, σε αντίθεση με τη συγκόλληση με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων (Electron beam-EBM welding) που απαιτούν την χρήση κενού. Το κόστος της διαδικασίας αυτής είναι αρκετά υψηλότερο από τις συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης τόξων, αλλά αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από την αυξημένη παραγωγικότητας, την ποιότητα της ίδιας της συγκόλλησης καθώς και των συγκολλημένων προϊόντων και την ευελιξία παραγωγής. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της συγκόλλησης με λέιζερ είναι η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί υλικό γεμίσματος, που μπορεί να εισαχθεί πριν από ή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας υπό μορφή σκόνης [1 - 3]. Έτσι οι ανοχές στην ποιότητα των ακρών στις οποίες καταλήγουμε μπορούν να διευρυνθούν, και να ελεγχθεί η χημεία του μετάλλου συγκόλλησης, με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι μη επιθυμητές φυσικές και χημικές προσμίξεις μεταξύ των υλικών που συγκολλούνται. Το σχήμα 5 παρουσιάζει την χαρακτηριστική ρύθμιση του αερίου προστασίας, του αερίου ελέγχου και καταστολής του και της παροχής του καλωδίου γόμωσης της συγκόλλησης. Η χρήση του καλωδίου γόμωσης στη συγκόλληση λέιζερ δεν είναι αυτήν την περίοδο διαδεδομένη, κυρίως λόγω του υψηλού βαθμού του ελέγχου που απαιτείται πέρα από τις παραμέτρους διαδικασίας, και της έλλειψης γνώσης σχετικά με τις ιδιότητες της παραχθείσας συγκόλλησης.



Σχήμα 6: Χαρακτηριστική γεωμετρία επεξεργασίας για την ανόμοια συγκόλληση laser μετάλλων από έναν σωλήνα που χρησιμοποιεί το καλώδιο υλικών πληρώσεως

Η πλειοψηφία των βιομηχανικών εφαρμογών της συγκόλλησης λέιζερ περιλαμβάνει τα δομικά και ανοξείδωτα μέταλλα. Εντούτοις, καθώς η κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας βελτιώνεται στην ποιότητα συγκόλλησης, η κατεργασία με μη σιδηρούχα κράματα θα γίνει περισσότερο κοινή.

3.2. Συγκόλληση με αγωγή (conduction welding)

Σε χαμηλά επίπεδα ενεργειακής πυκνότητας, η ακτίνα λέιζερ αλληλεπιδρά μόνο με την επιφάνεια της ένωσης των κομματιών υπό συγκόλληση. Καθώς η ενέργεια μεταφέρεται στα άτομα της επιφάνειας, θερμαίνονται πρώτα τα άτομα της επάνω επιφάνειας και στη συνέχεια μεταφέρει τη θερμότητα στα άτομα κάτω από την επιφάνεια. Αυτός ο τρόπος συγκόλλησης όπου η θερμότητα μεταφέρεται στο εσωτερικό λόγω αγωγής καλείται συγκόλληση με αγωγή (conduction). Η διατομή της συγκόλλησης αυτού του τύπου, παρουσιάζει γεωμετρία παρόμοια με

μορφή νιπτήρα. Το μέγεθος και η μορφή της διατομής εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και την ποσότητα της ενέργειας που εισάγεται σε αυτό.

3.3. Συγκόλληση με διείσδυση (penetration welding)

Δεδομένου ότι το ποσοστό ενέργειας το οποίο απορροφάται από το υπό κατεργασία κομμάτι αυξάνεται με την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, η ζώνη τήξης θερμαίνεται γρήγορα μέχρι ένα σημείο όπου το λειωμένο μέταλλο αρχίζει να ατμοποιείται στο κέντρο του σημείου ακτινών συγκόλλησης και να ανοίγει μια τυφλή τρύπα (κλειδαρότρυπα - keyhole) στο λειωμένο μέταλλο. Η πίεση του ατμού από το καυτό μέταλλο κρατά την τρύπα ανοικτή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η παρουσία της «κλειδαρότρυπας» επιτρέπει στην ενέργεια λέιζερ να φθάσει σε μεγαλύτερο βάθος στη ζώνη τήξης και είναι σε θέση συνεπώς να παράγει έναν μεγαλύτερο λόγο συγκόλλησης (βάθος συγκόλλησης προς ακτίνα αυτής). Ο τύπος «κλειδαρότρυπας» είναι κοινός κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης υψηλής ενέργειας λέιζερ CW (συνεχούς κύματος) αλλά μπορεί επίσης να βρεθεί με συγκόλληση με παλμικές ακτίνες Laser υψηλής ενέργειας. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η παγίδευση ενός πορώδους που παρουσιάζετε στο κατώτατο σημείο της συγκόλλησης, καθώς επίσης και το μεγάλο ύψος της διάστασης του τμήματος συγκόλλησης, αποτελούν και τα δύο ενδείξεις για τον σχηματισμό κλειδαρότρυπας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

3.4. Πηγές Laser

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχουν προκύψει πολλές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση με laser. Οι δύο πιο κοινές πηγές δημιουργίας ακτίνας laser είναι το Nd:YAG και το CO₂ που είναι τα πιο αξιόπιστα laser συγκόλλησης. Το Nd:YAG είναι ένα στερεάς κατάστασης laser όπου η lasing δράση είναι περιορισμένη σε μια ράβδο YAG που αντλείται με ιόντα ND⁺³. Τα laser Nd:YAG χρησιμοποιούνται τόσο για συνεχείς όσο και για παλμικές ακτίνες. Τα laser τύπου CO₂ είναι ένα laser αερίου και χρησιμοποιείται πρώτιστα για παραγωγή συνεχούς ροής (CW) ακτίνας. Οι πιο πρόσφατες προόδους περιλαμβάνουν τα laser ινών που είναι στερεάς κατάστασης αλλά παράγουν τη ακτίνα laser στα όρια μιας οπτικής ίνας. Τα laser ινών παράγουν ακτίνες πολύ υψηλής ποιότητας και μπορούν έτσι να στραφούν σε ένα πολύ μικρό μέγεθος σημείων. Μια άλλη πρόσφατη ανακάλυψη είναι το άμεσο laser διόδων όπου το φως χρησιμοποιείται άμεσα για τη συγκόλληση από μια τράπεζα διόδων laser. Υπάρχουν επίσης τα laser δίσκων που διαθέτουν υψηλή ποιότητα ακτίνων και λειτουργία CW.

Laser Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂ Laser)

Η δυνατότητα παραγωγής πολύ υψηλής ενέργειας συνεχούς (continuous wave laser beam) ακτίνας έγινε αρχικά εμφανής το 1964 με την ανάπτυξη των λέιζερ CO₂, N₂, He. Μέσα σε μερικά έτη ισχύς της παραγόμενης ακτίνας αυτών των λέιζερ πέταξε στα ύψη από μερικά milliwatts στις εκατοντάδες των Watt[3]. Επιπλέον, αυτά τα λέιζερ είναι αποδοτικότερα από οποιοδήποτε άλλο τύπο. Οι χαρακτηριστικές αποδόσεις κυμαίνονται

μεταξύ 15 και 20% ενώ το μήκος κύματος της ακτίνας που παράγεται είναι 10.6 μm .

Τα αέρια, που αποτελούνται περίπου από 0.5 Torr από CO_2 , 1.5 Torr από N_2 , και 8.0 Torr από He, αναμειγνύονται και στην συνέχεια καθοδηγούνται στο τμήμα δημιουργίας (άντλησης) του λέιζερ. Αυτό αποτρέπει τη συσσώρευση και την παρεμπόδιση της δράσης λέιζερ από τα προϊόντα αποσύνθεσης στο μίγμα αερίου.

Το laser του διοξειδίου του άνθρακα ανήκει στην κατηγορία των δονητικών περιστροφικών lasers με υψηλή απόδοση (~20%). Η μεταβολή της απόδοσης του laser γίνεται μέσω των διαδοχικών βαθμίδων δόνησης, που όμως έχουν ίδια ηλεκτρονιακή κατάσταση και η ακτινοβλία που εκπέμπεται είναι μεταξύ των μηκών κύματος 9.6 μm και 10.6 μm . Τέλος η παρουσία N_2 και He βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της δράσης laser [24].

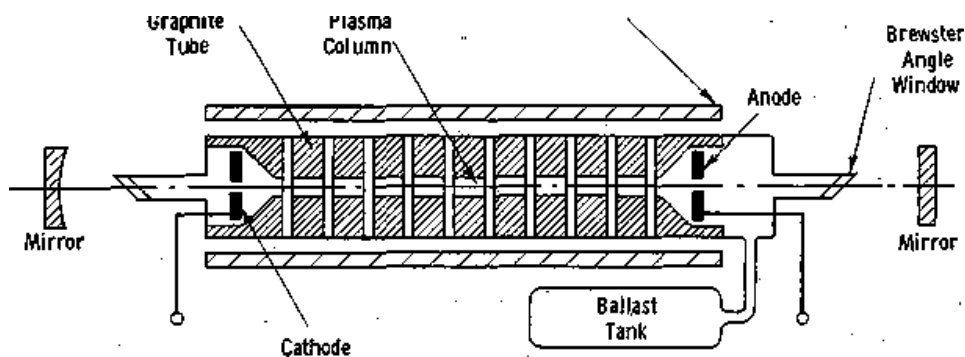
Όπως προαναφέρθηκε το laser του CO_2 περιέχει επίσης N_2 και He. Το He βοηθά την αποδιέγερση του laser με κρούσεις. Λόγω της μικρής μάζας των ατόμων του He οι κρούσεις αυτές είναι πολύ αποδοτικές. Το laser του CO_2 παρουσιάζει τόσο μη ομογενή φασματική διεύρυνση (~50 MHz) που οφείλεται στο φαινόμενο Doppler, όσο και ομογενή διεύρυνση που οφείλεται στις συγκρούσεις (~50 MHz για πίεση <100 Torr). Η ισορροπία μεταξύ των δύο μηχανισμών εξαρτάται από το αέριο μίγμα και την ολική πίεση [25].

Από πλευράς σχεδιασμού υπάρχουν δύο κατασκευαστικοί περιορισμοί:

- Η ανάγκη να απομακρυνθεί η συγκέντρωση θερμότητας και
- Η ανάγκη να απομακρυνθούν τα ανεπιθύμητα προϊόντα διάσπασης όπως π.χ. το CO.

Ιονικό Laser Αργού

Η οικογένεια των αέριων ιονικών laser είναι διαδεδομένη εξαιτίας της ποικιλίας των ορατών και υπεριώδων laser και της δυνατότητάς που έχουν τα αέρια ιονικά laser να παράγουν σε συνεχή βάση σημαντική ποσότητα της ορατής δύναμης laser. Το ιονικό laser αργού που ανακαλύφθηκε το 1964 (Bridges, Bennett) [26], είναι το πιο σημαντικό αυτής της ομάδας. Τα τελευταία χρόνια, μπόρεσε να παραχθεί ισχύς όπου φτάνει μέχρι και τα 120 W από εργαστηριακές συσκευές κρυπού και νέου ιόντος λειτουργώντας σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, αλλά επεκτείνονται μακρύτερα στην υπεριώδη σειρά του φάσματος.



Σχήμα 7: Ιονικό laser αργού

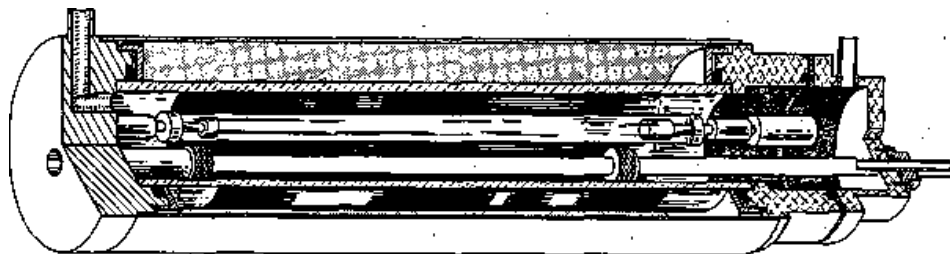
Το σχήμα 7 επεξηγεί σχηματικά την λειτουργία του ιονικού laser αργού. Ο σωλήνας απαλλαγής πρέπει να κατασκευαστεί ειδικά για να αντισταθεί σε υψηλής τάσης συνεχή απαλλαγή πυκνότητας που απαιτείται για τη διέγερση ArII. Η σωλήνωση χαλαζία υιοθετείται συχνά, αλλά οι περισσότερες εμπορικές μονάδες χρησιμοποιούν τμήματα γραφίτη ή BeO

με σκοπό να αντισταθούν στις υψηλές φορτώσεις θερμότητας και να αντέξουν τη διάβρωση. Ο σωλήνας εξόδου είναι υδρόψυκτος, και λαμβάνονται μέτρα για την κυκλοφορία αερίου μέσα στον σωλήνα για να αποτραπεί η συσσώρευση του ουδέτερου αργού κοντά στην άνοδο λόγω των ηλεκτροφορητικών αποτελεσμάτων. Από ένα συνεχές δυναμικό μεταξύ της βαρέων καθηκόντων ανόδου και της καθόδου διατηρείται μια απαλλαγή πυκνότητας υψηλής τάσης. Δεδομένου ότι απαιτείται ρεύμα περίπου 5 A, εφαρμόζεται ένα αξονικό μαγνητικό πεδίο στο σωλήνα για να σταθεροποιήσει την απαλλαγή και για να την κρατήσει μακριά από τους τοίχους των σωλήνων. Τα παράθυρα χαλαζία, γωνίας Brewster χρησιμεύουν ως αεροστεγές σφράγισμα, και οι διηλεκτρικά επενδυμένοι καθρέφτες, η ανακλαστικότητα των οποίων είναι έντονη κοντά στα μήκη κύματος λειτουργίας, τοποθετούνται σε κάθε άκρη του σωλήνα. Εάν επιδιώκεται η λειτουργία σε ένα ενιαίο μήκος κύματος τότε μπορεί να τοποθετηθεί ένα πρίσμα διασποράς μέσα στην οπτική κοιλότητα και να διακρίνει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις laser.

Ruby Laser

Το ρουμπίνι ήταν το πρώτο υλικό στο οποίο η δράση laser καταδείχθηκε, και έχει συνεχίσει να είναι μια σημαντική πηγή εκπομπής laser υψηλής δύναμης. Το υλικό είναι κρυστάλλινος σάπφειρος (Al_2O_3) που εμπλουτίζεται με 0.05% Cr^{3+} , και μπορεί να αυξηθεί σε μήκος μέχρι 12 ίντσες. με υψηλή οπτική ποιότητα. Είναι ένα εξαιρετικά σκληρό και ανθεκτικό υλικό με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, που επιτρέπει τη αποτελεσματική ψύξη της ράβδου laser. Τα χαρακτηριστικά των laser εξαρτώνται αρκετά από τη θερμοκρασία ράβδων, έτσι ώστε να είναι απαραίτητη η αποδοτική ψύξη για να ασφαλιστεί η καλή λειτουργία του

laser. Τα κατώτατα όρια άντλησης είναι συνήθως αρκετά μεγάλα, δεδομένου ότι το ιόν χρωμίου αποτελεί ένα σύστημα laser τριών επιπέδων.



Σχήμα 8. Παλόμενη ράβδος laser και λαμπτήρας αντλιών μέσα σε μια κυλινδρική περίφραξη απεικόνισης.

Το σχήμα 8 παρουσιάζει γεωμετρική ρύθμιση της κόκκινης ράβδου laser και του λαμπτήρα άντλησης. Η ράβδος και ο λαμπτήρας είναι τοποθετημένοι παράλληλα μεταξύ τους μέσα σε έναν κύλινδρο απεικόνισης που συγκεντρώνει την ακτινοβολία λαμπτήρων επάνω στη ράβδο laser. Παρουσιάζεται εδώ μια κυκλικά κυλινδρική περίφραξη απεικόνισης, αλλά συχνά χρησιμοποιούνται και ελλειπτικοί ή διπλά-ελλειπτικοί κύλινδροι (Nelson και Boyle, 1962 Evtuhon και Neeland, 1965) [29] . Ο λαμπτήρας λάμψης, εμπλουτισμένος με 150 Torr αερίου Ξένου, είναι καλυμμένος με χαλαζία και η κατασκευή του είναι ιδιαίτερα τραχιά. Η ράβδος και ο λαμπτήρας ψύχονται από ένα συνεχούς ροής εξιοντισμένο νερό. Η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται μέσα σε τράπεζες πυκνωτών απαλλάσσεται μέσω του λαμπτήρα λάμψης, και το φως που απορροφάται στο εξωτερικό του από τη κόκκινη ράβδο δημιουργεί την απαραίτητη αντιστροφή πληθυσμών. Συνήθως οι άκρες της ράβδου είναι γυαλισμένες και κατασκευασμένες ιδιαίτερα ώστε να απεικονίσουν τα διηλεκτρικά στρώματα.

Laser ΓΥΑΛΙΟΥ

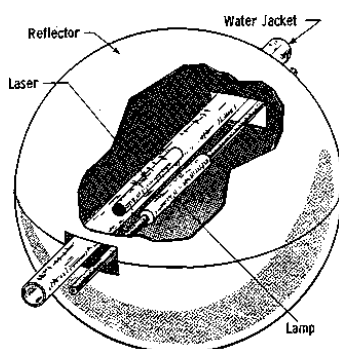
Οι ράβδοι γυαλιού που εμπλουτίστηκαν με Nd^{+3} αναπτύχθηκαν ως υλικά laser το 1961 και έχουν παράγει την υψηλότερη μέγιστη ισχύς οποιουδήποτε laser μέχρι σήμερα (Gobeli, 1969) [27]. Τα υψηλά γυαλιά πυριτικών αλάτων συνήθως χρησιμοποιούνται όπως και τα laser ράβδων γυαλιού με μήκος άνω των 72 ιντσών έχοντας κατασκευαστεί με άριστη οπτική ποιότητα. Επιπλέον, τα laser γυαλιού είναι σχετικά ανέξοδα να παραχθούν. Το βασικότερο μειονέκτημα των υλικών laser γυαλιού είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα τους η οποία αποτρέπει κατά ένα μεγάλο μέρος τη χρήση τους για τις υψηλές μέσες εφαρμογές δύναμης. Κατά συνέπεια το laser γυαλιού Nd^{+3} χρησιμοποιείται συνήθως στα χαμηλά επαναληπτικά ποσοστά σε παλόμενο ή Q-switched mode. Τα διηλεκτρικά επιστρώματα στις άκρες της ράβδου γυαλιού χρησιμεύουν ως κάτοπτρα. Τα συστήματα laser γυαλιού είναι ικανά να παράγουν παλμούς πολύ υψηλής ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα.

YAG LASER

Ένα από τα πιο αναπτυσσόμενα είδη για Nd^{3+} laser ιόντος είναι το YAG (yttrium aluminium garnet). Αυτό το κρυσταλλικό υλικό που εμπλουτίζεται με Nd^{3+} κατέχει πολλά ευνοϊκά φυσικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν μοναδικό μεταξύ των υλικών στερεάς κατάστασης laser. Το YAG έχει καλή θερμική αγωγιμότητα και χαρακτηρίζεται από την άριστη οπτική ποιότητα, καθώς επίσης και ότι είναι σκληρό και ανθεκτικό. Δυστυχώς δεν μπορεί να κατασκευαστεί σε μήκη μεγαλύτερα από 5 ιντσες, και είναι αρκετά ακριβό. Αυτό περιορίζει το YAG σε πολύ

χαμηλότερη ενεργειακή λειτουργία από το γυαλί. Δεδομένου ότι περιέχει ένα ιόν laser τεσσάρων επιπέδων το κατώτατο όριο άντλησης του είναι χαμηλό. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων το YAG: Nd³⁺ είναι το μόνο υλικό στερεάς κατάστασης laser που μπορεί να παραγάγει ισχύς, πάνω από 1100 W σε μήκος κύματος 1.06 μ.

Η απορρόφηση ακτίνων φωτός και η εκπομπή της ενέργειας laser σε YAG: Nd³⁺ εμφανίζεται σύμφωνα με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφεται και για το γυαλί: Nd³⁺. Για τη συνεχή λειτουργία η ακτινοβόλος εκπομπή από έναν λαμπτήρα υψηλής δύναμης χρησιμοποιείται για να διεγείρει τα ιόντα laser στο κρύσταλλο YAG. Το σχήμα 9 επεξηγεί την αρχή αυτή, υιοθετώντας μια σφαιρική αντανακλώμενη επιφάνεια για να συνδέσει την ακτινοβολία λαμπτήρων στη ράβδο.



Σχήμα 9 : Συνεχόμενη ράβδος YAG:Nd³⁺ laser κεφαλής και διάταξη laser CW μέσα σε μια σφαιρική αντανακλώμενη επιφάνεια (Church and Liberman, 1967)

Τρεις διαφορετικοί τύποι λαμπτήρων έχουν χρησιμοποιηθεί στην αντλία YAG: ο λαμπτήρας ιών, ένας λαμπτήρας K-Hg, και η υψηλή πίεση Xe ή τα τόξα KR. Η ευρυζωνική εκπομπή από το βολφράμιο αντιστοιχεί στη μαύρη σωμάτικη ακτινοβολία σε περίπου 3200°K, αλλά το Nd³⁺ ιόν σε YAG έχει μια στενή λεπτή ζώνη απορρόφησης που συνεπώς μετατρέπει πολύ λίγη αυτής της ενέργειας στη ακτίνα laser [28].

3.5 Βασικές παράμετροι διεργασιών

Η δυνατότητα ενός λέιζερ να παραχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα εξαρτάται πολύ από διάφορες παραμέτρους της διεργασίας και συχνά από την αλληλεξάρτησή τους. Είναι σημαντική η κατανόηση πλήρως αυτών των σχέσεων πριν από την επιλογή ενός ιδιαίτερου μήκους κύματος ή ενός συστήματος λέιζερ:

Ενέργεια παλμού (pulse)

Η ενέργεια που παραδίδεται σε έναν ενιαίο παλμό χρησιμοποιείται ως αφετηρία για τους περισσότερους υπολογισμούς. Με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις των συστημάτων ελέγχου, η ενέργεια σε κάθε σφυγμό μπορεί να προγραμματιστεί για να παραδοθεί μέσα σε ένα επιθυμητό χρονικό διάστημα με ταυτόχρονο έλεγχο που επιτρέπει την κλιμακωτή αύξηση στην αρχή και ψύξη στο τέλος του παλμού. Η διαμόρφωση του παλμού βοηθά στη βελτίωση του ελέγχου διεργασίας.

Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος είναι ουσιαστικά ένα μέτρο του αριθμού φωτονίων laser που προσκρούουν στο υλικό. Η πυκνότητα ισχύος μετριέται σε Watts/cm^2 και υπολογίζεται ως η ενέργεια παλμού προς την επιφάνεια απορρόφησης. Ακόμη και σε ένα ενιαίο σημείο, η πυκνότητα ισχύος

μπορεί να ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την ποιότητα ακτίνων του laser, και συζητείται κατωτέρω.

M^2

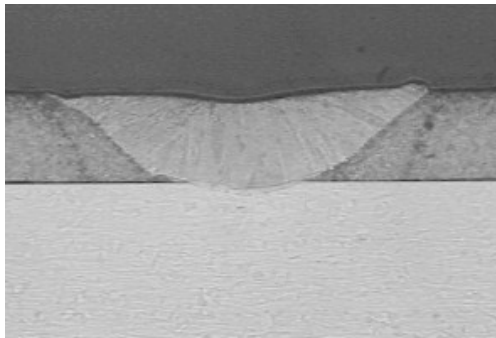
Το M^2 -είναι μια ενεργειακή κατανομή μέτρου στην ακτίνα. Μια τέλεια ακτίνα με το M^2 -στο 1 ουσιαστικά έχει μια αιχμηρή αιχμή στο κέντρο με μια γκαουσιανή κατανομή μακριά από το κέντρο και προς την άκρη. Ένα χαμηλό M^2 , κοντά στο 1, προτιμάται για την μικροϋπολογιστική κατεργασία ενώ ένα υψηλό M^2 προτιμάται για τη συγκόλληση και την επεξεργασία με θερμότητα.

Ποσοστό διάρκειας και επανάληψης παλμού

Η πλειοψηφία των εφαρμογών επεξεργασίας laser χρησιμοποιεί τον παλόμενο τρόπο, όπου το laser εκπέμπει την ενέργεια σε παλμούς προκαθορισμένης διάρκειας. Υπάρχουν εφαρμογές όπου το laser είναι ανοικτό συνεχώς, αναφερόμενο ως CW, και χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση και τις εφαρμογές επεξεργασίας με θερμότητα.

Μέγιστη ισχύς

Ακόμα κι αν ένα laser έχει μια αρκετά χαμηλή μέση ισχύος, η μέγιστη ισχύς σε κάθε σφυγμό μπορεί να είναι πολύ υψηλή. Παραδείγματος χάριν ένα χαρακτηριστικό 10W laser μπορεί να έχει τη μέγιστη ισχύς της τάξης των 5 KW. Αυτό είναι δυνατό επειδή η ενέργεια laser παραδίδεται σε έναν πολύ σύντομο σφυγμό. Η μέγιστη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί ως ενέργεια σφυγμού που διαιρείται με το πλάτος σφυγμού. Ένας παλμός που παραδίδει 1j της ενέργειας σε 1 msec, θα έχει μια μέγιστη ισχύς 1 KW. Η υπολογισμένη τιμή είναι ο μέσος όρος κατά τη διάρκεια σφυγμού και η πραγματική μέγιστη ισχύς θα μπορούσε να είναι ακόμα μεγαλύτερη δεδομένου ότι η ενέργεια δεν παραδίδεται ομοιόμορφα πέρα από τη διάρκεια του σφυγμού.



Σχήμα 10. Παραδείγματα συγκολλήσεων

4. Συγκολλησιμότητα Υλικών

Η συγκολλησιμότητα των υλικών εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση και την κρυσταλλική τους δομή.

4.1 Κράματα σιδήρου - άνθρακα

Η συγκολλησιμότητα των χαλύβων εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C). Όσο λιγότερο άνθρακα έχει ένας χάλυβας, τόσο πιο μεγάλη συγκολλητικότητα έχει, δηλαδή συγκολλάται πιο εύκολα. Ανώτερο όριο περιεκτικότητας σε άνθρακα για εύκολη συγκόλληση είναι το 0.25%. Αν ένας χάλυβας έχει περιεκτικότητα πάνω από αυτή την τιμή, τότε η συγκόλληση δεν μπορεί να είναι επιτυχής παρά μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, περιοχές της ραφής της συγκόλλησης υφίστανται βαφή, χάνουν τη μηχανική αντοχή τους και ψαθυροποιούνται. Οι χάλυβες αυτοί, με όριο άνθρακα πάνω από το 0,25%, μπορούν να συγκολληθούν, αν προθερμανθούν. Η προθέρμανση αυτή εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και φθάνει μέχρι τους 425°C για χάλυβες με περιεκτικότητα 0,8% σε άνθρακα. Αντίστοιχα με τους ανθρακούχους χάλυβες, οι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Si, Mn, S και P, δεν μπορούν να συγκολληθούν εύκολα. Αντίθετα, οι χάλυβες με προσμείξεις Cu, Ni, Cr, Mo και V, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα συγκόλλησης, εκτός αν όλες οι προσμείξεις ξεπερνάνε το 10%. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται κοινά κράματα σιδήρου – άνθρακα και η δυνατότητα συγκόλλησής τους.

Κατηγορία υλικού	Εύκολη συγκόλληση	Συγκόλληση σε ειδικές συνθήκες
Κοινοί χάλυβες κατασκευών	St33, St34, St37, St42, St46, St52	St50, St60, St70
Χάλυβες επιβελτιώσεως	C22, Ck22, 25CrMo4	-
Χάλυβες ενανθράκωσης	C10, Ck10, C15, Ck15	Αυτοί που περιλαμβάνουν προσθήκες σε Cr, Ni, Mo
Χυτοχάλυβες	πρέπει %C <0.25% και άθροισμα προσθηκών < 10%	Ανοξείδωτοι χυτοχάλυβες
Χυτοσίδηροι	Λευκοί μαλακτικοποιημένοι	Όλοι οι υπόλοιποι χυτοσίδηροι

Πίνακας 1: κοινά κράματα σιδήρου – άνθρακα και η δυνατότητα συγκόλλησής τους

4.2 Συγκόλληση ανόμοιων υλικών

Οι ενώσεις μεταξύ των ανόμοιων υλικών είναι συχνά χρησιμοποιούμενες σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. στην αυτοκινητοβιομηχανία). Η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά μέταλλα και κράματα σε ένα προϊόν παρέχει στο σχεδιαστή και το μηχανικό παραγωγής τη μεγαλύτερη ευελιξία, και συχνά έχουν θετικά αποτελέσματα στα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με συναρμολογήσεις συγκολλούμενες από το ίδιο υλικό. Τα ακριβά υλικά με τις συγκεκριμένες ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κρίσιμες περιοχές της κατασκευής (π.χ. θέσεις στις οποίες παρατηρούνται οι υψηλότερες τάσεις), με τα λιγότερο ακριβά κράματα που χρησιμοποιούνται στην υποστήριξη ή τη σύνδεση των ρόλων.

Η συγκόλληση laser παρέχει πλεονεκτήματα πέρα από τις συμβατικές μεθόδους ένωσης τήξης σε συγκεκριμένες εφαρμογές από την άποψη της παραγωγικότητας, της ποιότητας συγκόλλησης και της ευελιξίας παραγωγής. Οι παράμετροι διαδικασίας του (πυκνότητα υψηλής ισχύος

και χαμηλή ενεργειακή εισαγωγή) είναι ιδιαίτερα ευεργετικά για μια σειρά ανόμοιων συνδυασμών μετάλλων, αλλά απαιτούν τη πρόσθετη εκτίμηση για την επιτυχή εφαρμογή. Στην συνέχεια περιγράφονται οι αρχές της συγκόλλησης laser των ανόμοιων μετάλλων, αναλύει την πρόσφατη έρευνα και συγκρίνεται η δυνατότητα και οι περιορισμοί της διαδικασίας με τις συμβατικές τεχνικές ένωσης.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον των αυτοκίνητων και αεροναυτικών βιομηχανιών για τα κράματα μαγνήσιου οφείλεται κυρίως στην πολύ χαμηλότερη πυκνότητά τους όσον αφορά τα παραδοσιακά υλικά όπως τα κράματα χάλυβα και αργιλίου.

Η ευρύτερη χρήση των κραμάτων μαγνήσιου στις βιομηχανικές εφαρμογές μπορεί να έρθει με τις αξιόπιστες μεθόδους συστατικής ένωσης. Αν και τέτοιες τεχνικές συγκόλλησης όπως TIG και MIG είναι σε λειτουργία για πολλά έτη, τα μειονεκτήματά τους (η μεγάλη τήξη και η θερμότητα είχαν επιπτώσεις στις ζώνες, την υψηλή διακένωση και τις παραμορφώσεις, τις ατέλειες όπως οι ρωγμές και το πορώδες) έδωσαν αφορμή για το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μέθοδο συγκόλλησης laser. Αποτελέσματα από ερευνητικές εργασίες δημοσιεύονται τα τελευταία χρόνια που επιτυγχάνονται με τα διαφορα laser: CO², ND: YAG και λειζερ διόδων. Μερικές έρευνες αποκάλυψαν δυσκολίες ενδιαφερόμενες για τις μετασυγκολλητικές ατέλειες όπως το πορώδες, οι ρωγμές, και η εξάτμιση μαγνήσιου και οι ανεπιθύμητες αλλαγές στις μηχανικές και άλλες ιδιότητες.

4.3 Βασικές αρχές της συγκόλλησης laser των ανόμοιων μετάλλων

Οι ενώσεις ανόμοιων μετάλλων χαρακτηρίζονται από τις διαφορές που παρουσιάζονται στην σύνθεση τους και τις μικροδομικές αλλαγές που παράγουν οι μεγάλες παραλλαγές στις φυσικές και χημικές ιδιότητες μετά από την ένωση. Τα πιθανά προβλήματα περιλαμβάνουν εκείνα που συνδέονται με το να ενώθούν τα συστατικά υλικά χωριστά, και εκείνα συγκεκριμένα για τις διαφορετικές συνθέσεις και τις ιδιότητες των υλικών βάσεων στις διάφορες αναλογίες. Η ποιότητα συγκόλλησης εξαρτάται από τις παραμέτρους της διεργασίας, οι οποίες περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά της ακτίνας laser, των ιδιαίτερων παραμέτρων επεξεργασίας, και των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των μετάλλων βάσεων. Η κατάσταση περιπλέκεται από την προσθήκη του υλικού πληρώσεως, η οποία εισάγει τις πρόσθετες παραμέτρους όπως οι παράμετροι τροφοδοσίας.

Οι κύριες ιδιότητες των υλικών βάσεων που επηρεάζουν την συγκόλληση laser είναι:

- η θερμική αγωγιμότητα
- η απορροφητικότητα
- η πυκνότητα
- η συγκεκριμένη ικανότητα θερμότητας
- ο συντελεστής θερμικής διαστολής
- η θερμοκρασία τήξης

Οι μηχανικές ιδιότητες για κάποια κοινά μεταλλικά υλικά δίνονται στον πίνακα 2. Αν και οι τιμές αναφέρονται στα καθαρά μέταλλα, και μερικές ιδιότητες είναι εξαρτώμενες της θερμοκρασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη προσέγγιση για την αξιολόγηση της ιδιότητας συγκόλλησης των ανόμοιων συνδυασμών κραμάτων. Τα μέταλλα με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός, απελευθερώνουν την ενέργεια γρήγορα, που τα καθιστά δύσκολα να διατηρήσουν μια τηγμένη περιοχή συγκόλλησης. Ο ανώμαλος διασκεδασμός θερμότητας σε μια ένωση που περιλαμβάνει δύο μέταλλα με την ευρέως διαφορετική θερμική αγωγιμότητα μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό μιας ασύμμετρης περιοχής συγκόλλησης. Η συγκόλληση laser παρέχει μια υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και έναν ακριβέστερο έλεγχο της ενεργειακής εισαγωγής από τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης τήξης, που παρέχουν τις πιθανές λύσεις και στα δύο ανωτέρω προβλήματα. Εντούτοις, τα μέταλλα της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας κατέχουν γενικά χαμηλή απορροφητικότητα, ιδιαίτερα για την ακτινοβολία laser του CO₂ μήκους κύματος 10.6 μm, και οι πρόσθετοι παράγοντες όπως η προθέρμανση μπορεί να πρέπει να εξεταστούν. Από αυτή την άποψη, μια δέσμη ηλεκτρονίων απορροφάται ευκολότερα, αν και επηρεάζεται από τις διαφορές μαγνητικές ιδιότητες των κοινών συστατικών .

Metal	Melting temperature (K)	Boiling temperature (K)	Density (kg m^{-3})	Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Specific heat capacity ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient (10^6K^{-1})
Fe	1809	3133	7870	78	456	12.1
Al	933	2793	2700	238	917	23.5
Cu	1356	2833	8930	397	386	17.0
Ni	1728	3188	8900	89	452	13.3
Ti	1940	3558	4500	22	528	8.9
Zn	693	1184	7140	120	394	31.0
Mo	2888	4883	10220	137	251	5.1
W	3673	5828	19300	174	138	4.5
Zr	2125	4673	6490	23	289	5.9
Nb	2740	5013	8600	54	268	7.2

Πίνακας 2. Ιδιότητες θερμοκρασίας δωματίου των κοινών υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής

Οι μεγάλες διαφορές στη θερμική διαστολή μεταξύ των υλικών οδηγούν στην ανάπτυξη μεγάλων παραμενουσών τάσεων, με επιπτώσεις στις κοινές μηχανικές ιδιότητες. Η χαμηλή ενεργειακή εισαγωγή της συγκόλλησης λέιζερ μειώνει το μέγεθος της ΖΕΘ, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης τήξης, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση των παραμενουσών τάσεων. Ένα υλικό πληρώσεως με συντελεστή θερμικής διαστολής ανάμεσα στους αντίστοιχους συντελεστές των υλικών, προσαρμόζει σε κάποιο βαθμό την θερμική επίδραση της ακτίνας λέιζερ, και είναι συχνά μια πρακτική λύση για τη συγκόλληση λέιζερ. Η υψηλής ενέργειας πυκνότητα μιας ακτίνας λέιζερ είναι επαρκής για να λειώσει όλα τα μεταλλικά υλικά που εφαρμόζονται στην κοινή πρακτική. Εντούτοις, οι μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία τήξης και στη θερμοκρασία βρασμού του κάθε συστατικού, μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα. Ο ακριβής έλεγχος της θέσης και του μεγέθους της ενεργειακής εισαγωγής της συγκόλλησης λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει την τήξη του σε χαμηλή θερμοκρασία, επιτρέποντας έτσι μια συγκολλημένη ένωση να παραχθεί, κατά συνέπεια μειώνοντας τα επιβλαβή αποτελέσματα. Οι χημικοί κακοί συνδυασμοί μεταξύ των κοινών συστατικών μπορούν να ενισχύσουν τη

διάχυση των στοιχείων, έχοντας ως αποτέλεσμα στο σχηματισμό ανεπιθύμητων φάσεων, που επιδεινώνουν τις μηχανικές ιδιότητες της ένωσης. Οι μετασχηματισμοί φάσης καθορίζονται από τη δυνατότητα ανάμιξης στις υγρές και στερεές καταστάσεις, οι οποίες εξαρτώνται από το σχετικό ατομικό μέγεθος, τη δομή κρυστάλλου, τη χημική συγγένεια και το σχετικό σθένος. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τη σχετική ιδιότητα συγκόλλησης των διάφορων συνδυασμών μετάλλων, βασισμένων κυρίως στα δυαδικά διαγράμματα φάσης τους, αλλά και να λαμβάνοντας υπόψη την πρακτική εμπειρία. Ο χαλκός και το νικέλιο, παραδείγματος χάριν, που έχουν παρόμοιες ατομικές διαμέτρους, ίδια δομή κρυστάλλου της FCC, είναι και ηλεκτροθετικοί, έχουν και ένα ηλεκτρόνιο σθένους το κάθε ένα, διαμορφώνοντας μια εναλλακτική λύση πέρα από την πλήρη σειρά σύνθεσης.

Μια λύση μπορεί έτσι να παραχθεί, με καλές μεταλλουργικές και μηχανικές ιδιότητες. Εάν οι πρακτικοί όροι συγκόλλησης ευνοούνται, πρέπει να οδηγήθουμε στην άριστη ιδιότητα συγκόλλησης. Τέτοιοι συνδυασμοί δείχνονται στον πίνακα 3 από την κατηγορία (E) μετάλλων που είναι διαλυτά στην υγρή κατάσταση, αλλά απολύτως αδιάλυτα σε στερεά κατάσταση διαμορφώνοντας ένα εύτηκτο σύστημα. Ο συνδυασμός ασημιού-χαλκού, κασσίτερου-μολύβδου και οι συνδυασμοί αλουμινίου-πυριτίου είναι χαρακτηριστικοί αυτού του τύπου συστήματος. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3 από την κατηγορία F είναι κανονικά σκληρότερος και πιο εύθραυστος από τις αρχικές φάσεις, και ο σχηματισμός τους οδηγεί συχνά σε μια μείωση της ολκιμότητας. Τα χαμηλά εύτηκτα σημεία τήξης είναι ιδιαίτερα προβληματικά, επειδή συμβάλλουν στο μηχανισμό του ραγίσματος στερεοποίησης. Το υψηλό

ποσοστό θέρμανσης λόγω της συγκόλλησης laser περιορίζει το διαθέσιμο χρόνο για το διαχωρισμό, και το υψηλό ποσοστό συχνότητας ψύξης στο σχηματισμό των λεπτών μικροδομών στερεοποίησης, και οι δύο αυτές παράμετροι μειώνουν τη δυνατότητα του ραγίσματος στερεοποίησης.

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Ta	E																		
Mo	E	E																	
Cr	E	P	E																
Co	F	P	F	G															
Ti	F	E	E	G	F														
Be	P	P	P	P	F	P													
Fe	F	F	G	E	E	F	F												
Pt	G	F	G	G	E	F	P	G											
Ni	F	G	F	G	E	F	F	G	E										
Pd	F	G	G	G	E	F	F	G	E	E									
Cu	P	P	P	P	F	F	F	F	E	E	E								
Au	*	*	P	F	P	F	F	F	E	E	E	E							
Ag	P	P	P	P	P	F	P	P	F	P	E	F	E						
Mg	P	*	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	F	F					
Al	P	P	P	P	F	F	P	F	P	F	P	F	F	F	F				
Zn	P	*	P	P	F	P	P	F	P	F	F	G	F	G	P	F			
Cd	*	*	*	P	P	P	*	P	F	F	F	P	F	G	E	P	P		
Pb	P	*	P	P	P	P	*	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Sn	P	P	P	P	P	P	P	P	F	P	F	P	F	F	P	P	P	P	F

Πίνακας 3. Ιδιότητα συγκόλλησης laser των δυαδικών συνδυασμών μετάλλων

Σε ένα σύστημα μερικής στερεάς διαλυτότητας, τα δύο στοιχεία είναι εντελώς αναμίξιμα στην υγρή κατάσταση, αλλά η δυνατότητα ανάμιξης στη στερεά κατάσταση είναι περιορισμένη. Αυτοί οι συνδυασμοί δείχνονται στον πίνακα 3 από τις κατηγορίες G και F. Μια αποδεκτή συγκόλληση μπορεί κανονικά να παραχθεί, υπό τον όρο ότι ορισμένα μέτρα λαμβάνονται, όπως η χρήση του κατάλληλου υλικού πληρώσεως, η προθέρμανση, ή οι κατάλληλες ενδιάμεσες φάσεις ευθυγράμμισης ακτίνων μπορούν επίσης να υπάρξουν υπό μορφή μεσομεταλλικής ένωσης. Οι δομές κρυστάλλου της πλειοψηφίας τέτοιων ενώσεων είναι σύνθετες, και είναι συχνά σκληρές και εύθραυστες. Η τήξη κατά την οποία ενώνονται στενά αυτές οι φάσεις διαμορφώνει κανονικά τη χαμηλή

ολκιμότητα εκθεμάτων και την υψηλή ευαισθησία ρωγμών. Οι συνδυασμοί μόλυβδος-μαγνήσιου είναι χαρακτηριστικοί αυτού του τύπου συστήματος, ο οποίος δείχνεται στον πίνακα 3.

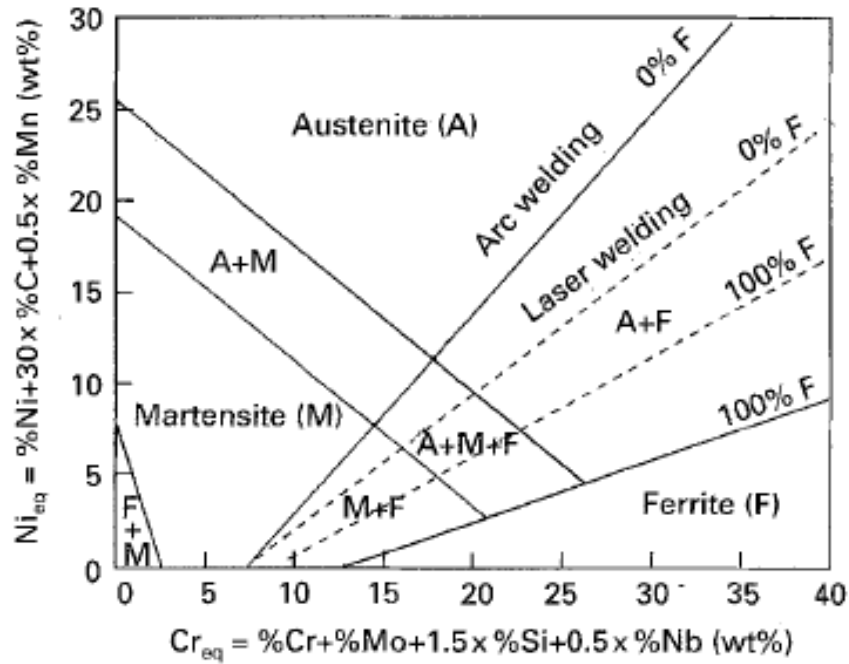
Ανοξειδωτος χάλυβας και άνθρακας ή χαμηλός χάλυβας κραμάτων

Η ένωση μεταξύ του ανοξειδωτου χάλυβα και του άνθρακα ή του χαμηλού φερριτικού χάλυβα κραμάτων απαιτείται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, για να ικανοποιήσει την απόδοση αλλά και τα οικονομικά κριτήρια της κάθε βιομηχανίας. Υπάρχουν δύο σημαντικές ανησυχίες σε αυτούς τους τύπους ενώσεων:]

- Ο σχηματισμός μαρτενσίτη στη περιοχή συγκόλλησης
- ή το χαμηλό κράμα ZΕΘ συγκόλλησης που μπορούν να προωθήσουν το κρύο ράγισμα και το καυτό ράγισμα στο πλήρως ωστενιτικό μέταλλο συγκόλλησης.

Στην πρώτη περίπτωση, μπορούν να υιοθετηθούν ως κανονικές προφυλάξεις, ο έλεγχος σύνθεσης και η προθέρμανση. Στη δεύτερη ο στόχος είναι να παραχθεί μια ωστενιτική συγκόλληση με φερρίτη μικρής ποσότητας, ο οποίος εμποδίζει το σχηματισμό ρωγμών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου σύνθεσης μετάλλων συγκόλλησης από τον προσεκτικό κανονισμό της διάλυσης μετάλλων βάσεων ή της προσθήκης του υλικού πληρώσεως. Τα διαγράμματα πρόβλεψης μικροδομής είναι χρήσιμα εργαλεία από αυτή την άποψη.

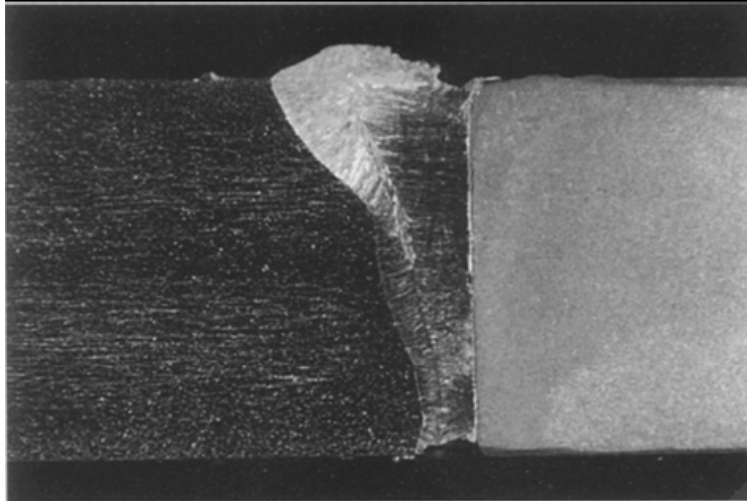
Τα συνεχή διαγράμματα μετασχηματισμού ψύξης (ΚΔ) χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το ποσοστό ψύξης που καταλαμβάνεται μέσα στη ΖΕΘ από τις απώλειες του CMn. Εμπειρικοί τύποι είναι διαθέσιμοι για την πρόβλεψη της μέγιστης ΖΕΘ, την σκληρότητα, τις μηχανικές ιδιότητες, προθερμαίνουν τη θερμοκρασία και την πιθανότητα του κρύου ραγίσματος, από την άποψη των παραμέτρων της διεργασίας. Για τον ανοξείδωτο χάλυβα, το διάγραμμα Schaeffer [4] χρησιμοποιεί τους άξονες χρωμίου και νικελίου συνθετικών περιοχών επίδειξης ισοδύναμων των παραπάνω στις οποίες οι ιδιαίτερες μικροδομές στερεοποίησης χαντρών συγκόλλησης μπορούν να αναμένονται. Το αρχικό διάγραμμα έχει αναπτυχθεί για να συμπεριλάβει τα αποτελέσματα του αζώτου [5] και του χαλκού [6] στη μικροδομή του. Εντούτοις τέτοια διαγράμματα πρέπει να χρησιμοποιηθούν με προσοχή κατά την συγκόλληση με laser επειδή οι μελέτες [7] έχουν καταδείξει ένα σημαντικό στένεμα της διπλής περιοχής φερριτοοστενίτη με τα χαρακτηριστικά ποσοστά ψύξης που προκαλούνται από τη συγκόλληση laser που διευκρινίζεται σχηματικά μέσα στο Σχ 11. Επιπλέον η γρήγορη στερεοποίηση μπορεί να εμποδίσει την ομοιόμορφη μίξη, με συνέπεια τις ανομοιογενείς περιοχές στο μέταλλο συγκόλλησης. Η επίδραση των διακυμάνσεων στη διάλυση του μετάλλου συγκόλλησης από τα μέταλλα βάσεων, και η προσθήκη του υλικού πληρώσεως στη μικροδομή συγκόλλησης μπορούν να υπολογιστούν με την κατασκευή των γραμμών στο διάγραμμα μεταξύ των συντεταγμένων σύνθεσης στα ιδρυτικά κράματα.



Σχήμα 11. Διάγραμμα Schaeffter που παρουσιάζει σχηματικά τη μείωση της έκτασης της περιοχής ferrite/οστενίτη για τις υψηλές διαδικασίες ποσοστού ψύξης

Χάλυβας και χαλκός

Οι ενώσεις μεταξύ του χάλυβα και των κραμάτων χαλκού απαιτούνται συχνά στο θαλάσσιο περιβάλλον (ναυπηγική), και απαιτούνται επίσης στη βιομηχανία εξαγωγής μετάλλων. Οι διαφορές στις θερμοκρασίες τήξης τους, στην θερμική αγωγιμότητα, καθώς επίσης και τα στοιχειοθετημένα αποτελέσματα, είναι οι κύριες πηγές δυσκολιών στην ένωση. Η συγκόλληση που ραγίζει είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα, ως αποτέλεσμα των συνδυασμένων αποτελεσμάτων της μετατόπισης του χαλκού στα όρια κόκκου στο χάλυβα και της παρουσίας μεγάλης παραμένουσας τάσης.



Σχήμα 12. Συγκόλληση laser μεταξύ του χαλκού (δεξιά) και του ανοξείδωτου AISI 304. οξαλικό οξύ 10% etchant, MAG X 10.

Το σχήμα 12 παρουσιάζει αυτογενή συγκόλληση laser μεταξύ του χαλκού και του ανοξείδωτου AISI 304. Στην πρακτική εφαρμογή, ο χαλκός απαιτείται για την ηλεκτρική αγωγιμότητα και ο ανοξείδωτος χάλυβας για την αντίσταση και την αντίσταση του στην διάβρωση. Η συγκόλληση παράγεται με τη διαμόρφωση της περιοχής συγκόλλησης στο ανοξείδωτο, επιτρέποντας με την μεταφορά θερμότητας να λιωθεί ένα περιορισμένο ποσό χαλκού. Οι ιδανικές μηχανικές ιδιότητες (καλή αντοχή του φλοιού και μια έλλειψη μεταλλουργικών προβλημάτων), έχουν αποδοθεί στη υψηλή ενέργεια της ακτίνας laser και της ακρίβειας με τις οποίες μπορεί να εντοπιστεί [8]. Οι αεροστεγής ενώσεις έχουν παραχθεί από τη συγκόλληση laser μεταξύ της επάνω επιφάνειας του χαλκού και του υποστρώματος χάλυβα των καθρεφτών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των ακτίνων laser [9]. Μια ροδέλα νικελίου και μια σκόνη bAu-4 συγκολλούν το κράμα έχοντας χρησιμοποιηθεί ως υλικά πληρώσεως σε δύσκολους συνδυασμούς κραμάτων χάλυβα-χαλκού. Επειδή το νικέλιο και ο χαλκός είναι

αμοιβαία διαλυτοί και στις υγρές και στερεές καταστάσεις ,οι ενδεχομένως κακές επιπτώσεις του καθαρού χαλκού μειώνονται.

Χάλυβας και αλουμίνιο

Οι ενώσεις μεταξύ του αλουμινίου και των διάφορων τύπων χαλύβων είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις κρυογενείς εφαρμογές. Η προσεκτική ευθυγράμμιση της ακτίνας laser προκειμένου να λειωθεί το αλουμίνιο και να παραχθεί μια συγκολλημένη ένωση θα περιόριζε το μεσομεταλλικό σχηματισμό. Εναλλακτικά, η προσθήκη ενός ορθωγόνιου κομματιού σε σχήμα πλήκτρου φτιαγμένο από ασήμι, νικέλιο, χαλκό ή αλουμίνιο, όπως χρησιμοποιείται στη συγκόλληση τόξων τήξης [10] έχει αποδειχθεί ότι έχει την ίδια επίδραση. Σε τέτοιες εφαρμογές, η μηχανική στερέωση χρησιμοποιείται συχνά αν και οι ερμητικές ενώσεις είναι δύσκολο να επιτευχθούν και η τεχνική μπορεί να οδηγήσει σε μια αύξηση στο γενικό βάρος που μπορεί να είναι ανεπιθύμητο σε μερικές εφαρμογές.

Χάλυβας και νικέλιο

Οι ενώσεις μεταξύ των κραμάτων χάλυβα και νικελίου απαιτούνται στις εγκαταστάσεις και τις ηλεκτρικές εφαρμογές. Η αντίσταση στη θερμότητα του τμήματος νικελίου είναι συχνά ο καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή της. Οι συγκολλήσεις laser μεταξύ του μαρτενσιτικά ανοξειδωτού AISI 403 και Inconel 600 έχουν γίνει επιτυχώς χρησιμοποιώντας το EN στο 82 βασισμένο σε νικέλιο καλώδιο υλικών πληρώσεως [21]. Τα πιθανά προβλήματα κατά τον ένωση αυτών των υλικών περιλαμβάνουν το κρύο ράγισμα και τη μειωμένη

ανθεκτικότητα στο μαρτενσιτικό ZεΘ και τις μερικώς λειωμένες ή αμιγείς ζώνες ανοξείδωτου, και το καυτό ράγισμα του ωστενιτικού ή ημι ωστενιτικού μετάλλου συγκόλλησης και των μερικώς λειωμένων ή αμιγών ζωνών νικέλιου-βάσεων.

Οι ικανοποιητικές ενώσεις μεταξύ του ανοξείδωτου AISI 316 και Monel μπορούν να παραχθούν με τη χρησιμοποίηση του μετάλλου υλικών πληρώσεως 82 επειδή ανέχεται τη διάλυση και από τα δύο υλικά βάσεων [19]. Η επιτυχής αυτογενής συγκόλληση laser του ανοξείδωτου AISI 304 σε Invar, σε μια τριμεταλλική λουρίδα που χρησιμοποιείται σε μια ηλεκτρονική εφαρμογή του s έχει αναφερθεί επίσης [11].

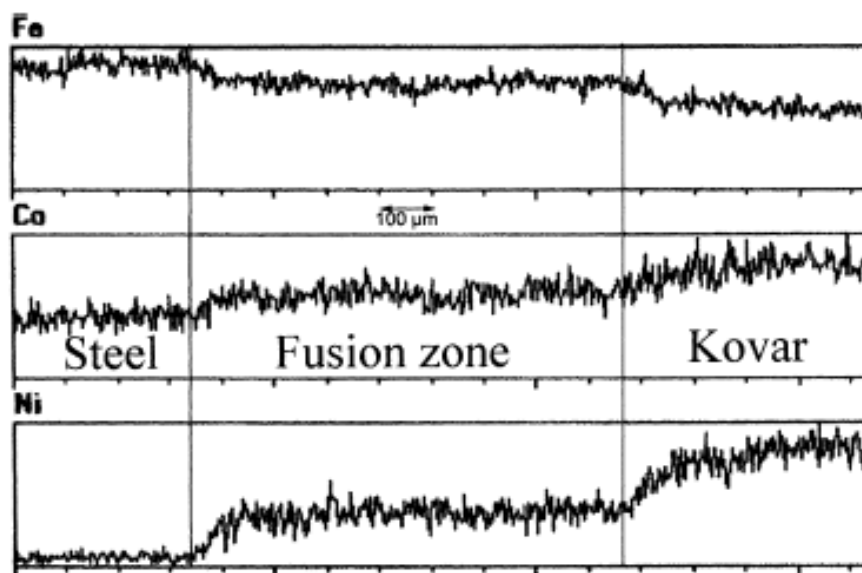
Μια εκτενής μελέτη του ND: YAG των διάφορων ανοξείδωτων και των κραμάτων νικελίου-βάσεων [12] αποκάλυψαν την παρουσία ενός μεγαλύτερου αριθμού ρωγμών στις ανόμοιες ενώσεις από ότι στις συγκολλήσεις καθενός συστατικού υλικού μόνο. Οι ανόμοιες συγκολλήσεις που περιλαμβάνουν Inconel 82 παρουσίασαν περισσότερες ρωγμές από εκείνες με Inconel 600, το οποίο αποδόθηκε στην υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο στα τελευταία (0.003 και 0.01 βάρη %).

Η ανάλυση των επιφανειών θραύσης έδειξε το διαχωρισμό θείου στις επιφάνειες ρωγμών. Η συγκόλληση laser του χάλυβα και Kover οδήγησε σε σημαντική ανάμιξη και των δύο υλικών μέσα στη ζώνη τήξης [13]. Το ποσοστό διαλύσεων συγκόλλησης ήταν περίπου 50%. Τα line-scan EDX αποτελέσματα έδειξαν ότι εμφανίστηκε εκείνη η ομοιογενής μίξη. Η ανάλυση EDX παρουσίασε διάλυση του Ni, του κοβαλτίου και του MN

στη περιοχή συγκόλλησης και δεν έδειξε σχεδόν καμία παραλλαγή σύνθεσης που να δείχνει μια πλήρη μίξη.

Material	Element (at.%)				
	Fe	Ni	Co	Mn	Si
Tool steel	96.9	–	–	1.6	1.5
Kovar	53.6	28.5	16.2	0.3	1.4
Fusion zone	76.4	13.5	7.8	0.7	1.6

Πίνακας 4 ποσοτική ανάλυση στοιχείων EDX

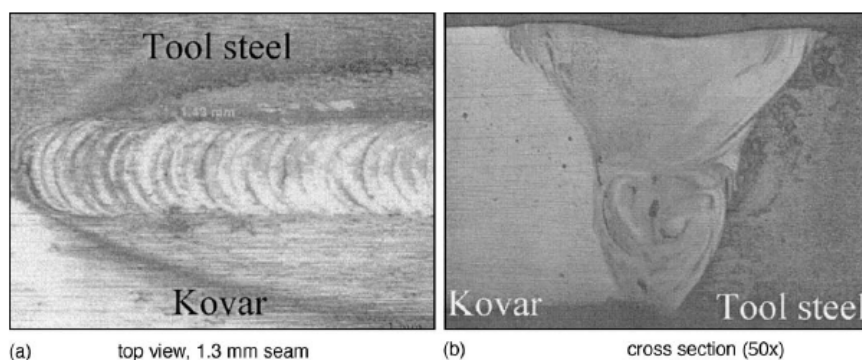


Σχήμα 13 ποσοτική στοιχειώδης διανομή

Κανένα ράγισμα της ένωσης δεν παρατηρήθηκε, ενδεχομένως λόγω της θετικής επιρροής από τη διάλυση Mn και Si στη συγκόλληση. Οι διατομές της ραφής συγκόλλησης σταμάτησαν τα ισχυρά ρεύματα μεταφοράς, τα οποία διαμορφώθηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης τήξης και πάγωσαν λόγω της γρήγορης στερεοποίησης στο σχήμα 13. Οι

μεγάλοι πόροι παγιδεύτηκαν στο κατώτατο σημείο της συγκόλλησης στους σύντομους παλμούς laser (<7 κα) ή με τις υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης (>500 mm/min).

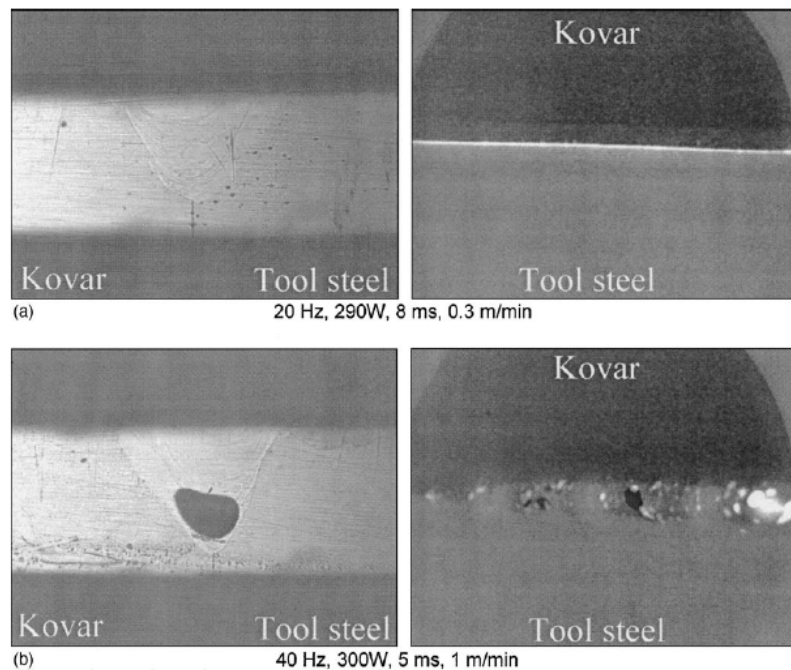
Το πορώδες της ένωσης ερευνήθηκε χρησιμοποιώντας την απεικόνιση ακτίνας X. Το σχ 14a παρουσιάζει τη σαφή γραμμή συγκόλλησης στη διεπαφή δύο υλικών. Η φωτεινή γραμμή στη διεπαφή οφειλόταν σε ένα χάσμα στο κατώτατο σημείο των δύο μεταλλικών πιάτων. Μεταξύ των δύο μετάλλων, η περιοχή συγκόλλησης θα μπορούσε να διακριθεί σαφώς στην εικόνα ακτίνας X. Η ελαφρύτερη αντίθεση μέσα στη περιοχή συγκόλλησης έναντι των μετάλλων βάσεων δείχνει ότι το υλικό ήταν λεπτότερο από το φύλλο χάλυβα βάσεων. Η στενή επιθεώρηση της παραλλαγής αντίθεσης παρουσιάζει ομοιόμορφο πάχος με πολύ λίγο πορώδες.



Σχήμα 14: δείγμα συγκόλλησης (30 Hz, 320 W, 5 κα και 150 mm/s)

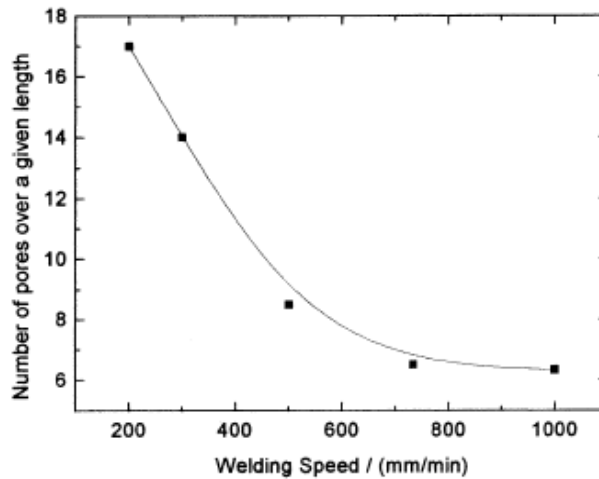
Η συγκόλληση στο σχ. 14b παρουσιάζει ελλειπτικούς διαμορφωμένους πόρους ενός μεγάλου ποσού. Οι πόροι ακολούθησαν τη μορφή του μετώπου συγκόλλησης που διαμορφώθηκε κατά τη διάρκεια της παλόμενης διαδικασίας συγκόλλησης laser. Το πλάτος της περιοχής

συγκόλλησης αυξήθηκε από το αριστερό στο δεξί τμήμα λόγω της παροδικής ανάπτυξης της θερμοκρασίας στην αρχή της ραφής συγκόλλησης.



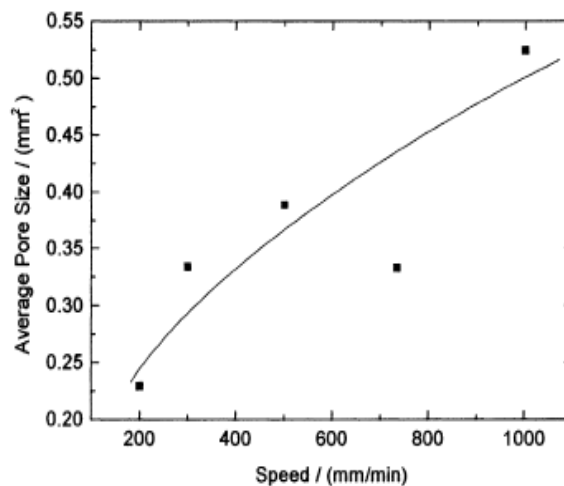
Σχήμα 15 διατομές και φωτογραφίες ακτίνας X

Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης εμφανίστηκε να μειώνει τον αριθμό πόρων, αυξάνοντας το μέσο μέγεθός τους (Σχ.16 και 17). Η αύξηση οδήγησε σε μια μείωση του βάθους τήξης. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος, σε έναν μέσο όρο, που απαιτείται για έναν πόρο που κινείται να φθάσει την επιφάνεια, εάν η λειωμένη περιοχή είναι ρηχή, τόσο ο αριθμός πόρωσης μειώνεται. Η αύξηση στο μέγεθος πόρων με τα είδη συγκόλλησης πιθανών να συνδεθεί με τη μεγαλύτερη αστάθεια στη περιοχή λόγω της υψηλότερης μέγιστης δύναμης του laser με τις γρηγορότερες ταχύτητες συγκόλλησης.



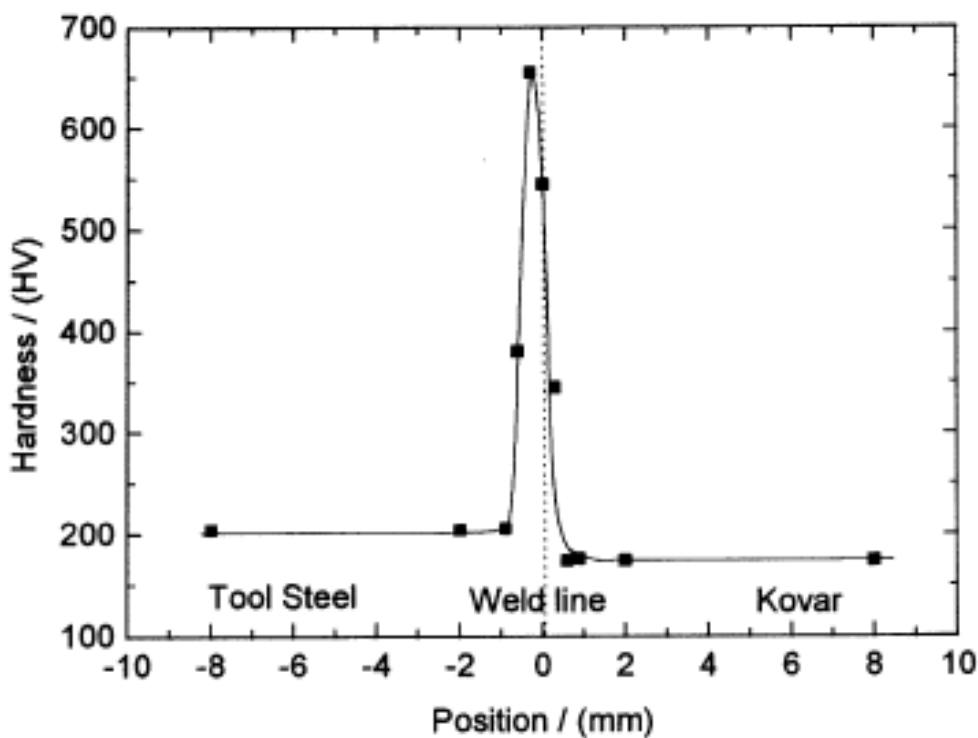
Σχήμα 16 . Η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στο πορώδες συγκόλλησης και αριθμός πόρων (κα 300 Hz, 290 W και 5)

Η μορφολογία της μικροδομής Kovar παρουσιάζει λεπτό ευθηκτικό διανεμημένο κόκκο, ενώ παρατηρήθηκε μια διασπορά των λεπτών μορίων των καρβιδίων κραμάτων σε μια μήτρα φερρίτη στο χάλυβα εργαλείων. Λεπτές δομές κόκκου περλίτη και μαρτενσιτη παρατηρήθηκαν στη περιοχή συγκόλλησης ως αποτέλεσμα των υψηλών ποσοστών ψύξης.



Σχήμα 17 . Η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στο πορώδες συγκόλλησης και το μέγεθος πόρων (κα 300 Hz, 290 W και 5)

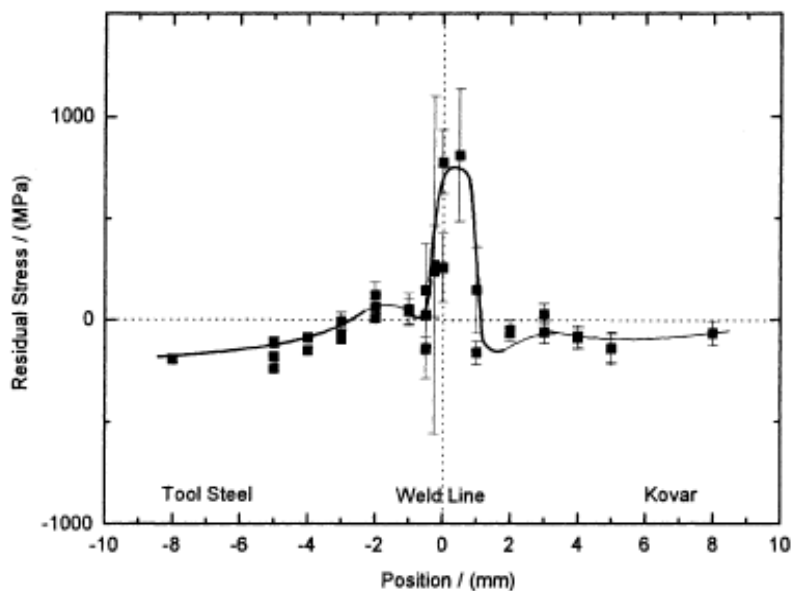
Μια απότομη αύξηση στη σκληρότητα παρατηρήθηκε στη περιοχή συγκόλλησης σε σύγκριση με τα υλικά βάσεων (σχ. 18). Οι τιμές σκληρότητας και στις δύο πλευρές των γραφικών παραστάσεων μειώθηκαν αισθητά σε απόσταση λιγότερο από 1mm από το κέντρο της συγκόλλησης. Θα μπορούσε επίσης να δει κανείς ότι η σκληρότητα των πυρήνων των εργαλείων του χάλυβα είναι ελαφρώς υψηλότερη από του Kovar. Είναι απαραίτητο λοιπόν να μειώσουμε την υψηλή σκληρότητα μέσα στη περιοχή συγκόλλησης που επρόκειτο να προθερμάνει και τα δύο ελάσματα πριν από τη συγκόλληση.



Σχήμα 18 .Η διανομή σκληρότητας (9ms, 20Hz, 230 W και 0.2m/min)

Η παραμένουσα τάση αυξήθηκε μέσα στα ελάσματα του χάλυβα καθώς προσεγγίστηκε η στενά ενωμένη περιοχή, (σχ 19). Στην είσοδο της περιοχής συγκόλλησης παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση στην

παραμένουσα τάση. Μέσα στη περιοχή συγκόλλησης η παραμένουσα τάση αυξήθηκε γρήγορα.



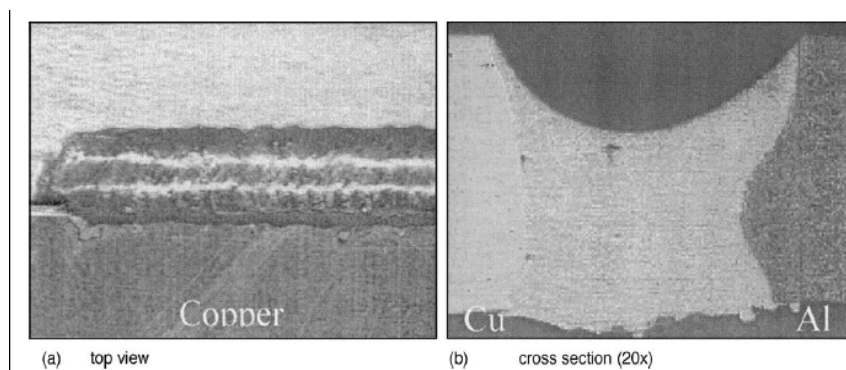
Σχήμα 19. Η μέση υπόλοιπη παραλλαγή πίεσης των συγκολλήσεων

Η παραμένουσα τάση στο κέντρο της συγκόλλησης είναι στενή σε αυτή της ισχύ, (που υπολογίζεται από τις μετρήσεις σκληρότητας) του μετάλλου συγκόλλησης. Στην άκρη της κοιλότητας συγκόλλησης η υπόλοιπη πίεση φθάνει γρήγορα στην κανονική αξία μέσα στο έλασμα Kovar.

Αλουμίνιο 4047 και χαλκός

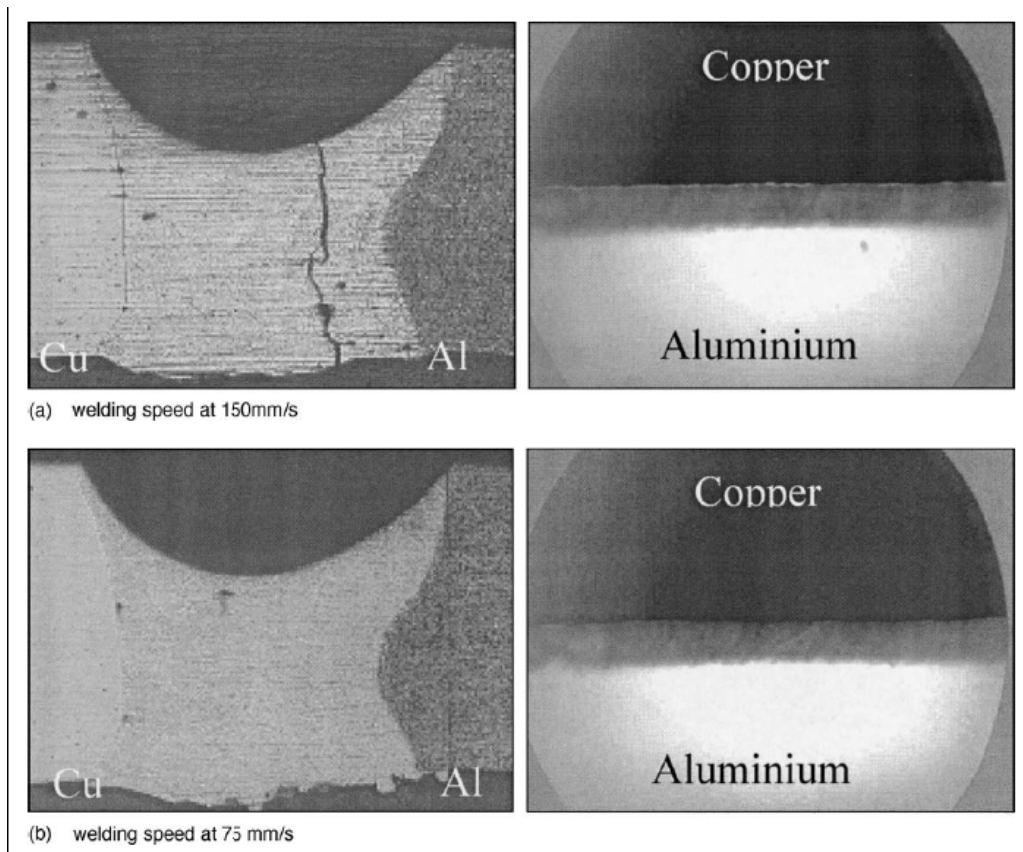
Οι ενώσεις μεταξύ του αλουμινίου και του χαλκού απαιτούνται συχνά στα ηλεκτρικά συστατικά ή τους ηλιακούς συσσωρευτές. Η μέγιστη στερεά διαλυτότητα του χαλκού στο αλουμίνιο είναι 5.65 wt.% [14].Στις

χαμηλότερες θερμοκρασίες, το ποσό του χαλκού που μπορεί να παραμείνει σε στερεά κατάσταση αλουμινίου, μειώνεται δραστικά



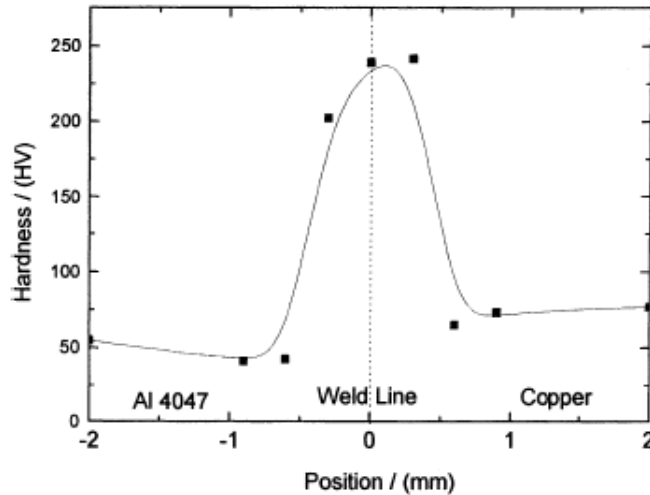
Σχήμα 20 .ενωμένο στενά laser δείγμα (ραφή 1.3 χιλ., κα 15 Hz, 275 W, 8, διαμόρφωση σφυγμού και 75 mm/min

Η δυνατότητα συγκόλλησης του χαλκού στο αλουμίνιο θεωρείται σχετικά καλή. Το διάγραμμα φάσης Al παρουσιάζει ευρύ φάσμα των φάσεων Al που μπορεί να διαμορφωθεί. Κάτω από τις βέλτιστες παραμέτρους επεξεργασίας, λήφθηκαν οι ελεύθερες από ρωγμές συγκολλήσεις του χαλκού και του Al 4047. Οι προσπάθειες να ενωθεί στενά ο χαλκός με το κράμα αλουμινίου 6061, το οποίο είναι ένα κράμα Al-MG-Si-S_{cu} που έχει κατεργαστεί θερμικά και έχει υψηλή μηχανική δύναμη, δεν ήταν επιτυχείς



Σχήμα 21 φωτογραφίες διατομής και ακτίνας X (κα 15 Hz, 275 W, 8 και παλμός που διαμορφώνουν)

Δεδομένου ότι η ακτίνα εστιάστηκε 0.2mm στο αλουμίνιο (από την κοινή διεπαφή) και η απορροφητικότητα του χαλκού ήταν χαμηλότερη από το κράμα αλουμινίου, η τήξη πραγματοποιήθηκε περισσότερο από την πλευρά αλουμινίου. Η ζώνη τήξης αλουμινίου εμπλουτίστηκε περίπου με 27% του χαλκού και 24% του πυριτίου. Το πυρίτιο διανεμήθηκε ομοιογενώς πέρα από τη συγκόλληση (σχ21). Εντούτοις, μπορούμε να δούμε κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης 1mm, τη σύνθεση του Al αυξανόμενη και το cu που μειώνεται από το σημείο που είναι 0.7mm από την πλευρά χαλκού. Υπήρξε επίσης μια διακύμανση αυτών των δύο στοιχείων σε μια απόσταση 0.35mm από την πλευρά χαλκού.



Σχήμα 22 διανομή σκληρότητας ως λειτουργία της απόστασης

Η εικόνα ακτίνας X στο σχήμα 14a παρουσιάζει σχετικά ομοιόμορφη συγκόλληση με microcracks που τρέχουν σε περίπου 45. στην κατεύθυνση συγκόλλησης. Οι μικρές απομονωμένες περιοχές χαλκού κατατέθηκαν επάνω στην επιφάνεια αλουμινίου. Η εικόνα ακτίνας X της συγκόλλησης στο σχήμα 14b παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Κανένα σημαντικό πορώδες δεν θα μπορούσε να ανιχνευθεί μέσα στον όγκο της συγκόλλησης, (εκτός από στην αρχή της διαδικασίας συγκόλλησης).

Αλουμίνιο και μόλυβδος

Η δυνατότητα ανάμιξης του αλουμινίου και του μολύβδου σε στερεά κατάσταση είναι πολύ περιορισμένη και η αυτογενής συγκόλληση laser δεν θα αναμενόταν κανονικά να παραγάγει τις ενώσεις με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Εντούτοις έχει αναφερθεί η επιτυχής συγκόλληση laser των κραμάτων αλουμινίου μέσω της χρήσης ενός ενδιάμεσου στρώματος [14]. Το ενδιάμεσο στρώμα επιτρέπει στις σχεδόν εύηκτες

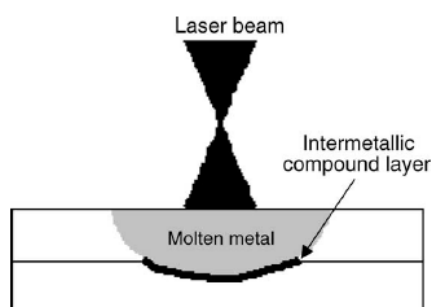
ενώσεις μετάλλων συγκόλλησης να σχηματιστούν αποφεύγοντας το σχηματισμό των μεσομεταλλικών ενώσεων που δίνουν μια σκληρότητα μεταξύ εκείνων των υλικών βάσεων. Ένας πρόσθετος παράγοντας είναι ότι το ενδιάμεσο στρώμα κατέχει τις θερμοφυσικές ιδιότητες παρόμοιες με τα μέταλλα βάσεων.

Κράμα αλουμινίου και κράμα μαγνήσιου

Τα κράματα μαγνήσιου και αργιλίου είναι κατάλληλα στην εφαρμογή δομών οχημάτων για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, η οποία συμβάλλει επίσης στη μείωση της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου. Προκειμένου να εφαρμοστούν αυτά τα κράματα στις δομές οχημάτων, απαιτείται η ανόμοια ένωση μεταξύ του μαγνήσιου και τα κράματα αλουμινίου. Οι μεσομεταλλικές ενώσεις βρίσκονται στο διάγραμμα φάσης μεταξύ του Mg και του $AlAl_3Mg_2$, $Al_{12}Mg_{17}$ και $Al_{30}Mg_{23}$ [15].

Λόγω της εφθραυστότητας της μεσομεταλλικής ένωσης, ο μεσομεταλλικός σύνθετος σχηματισμός πρέπει να ελεγχθεί όσο το δυνατόν λιγότερο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ένωσης. Σύμφωνα με Rathod και Kutsuna [16] και Miyashita και λοιποί [17], σε περίπτωση ανόμοιων ενώσεων όπως τα κράματα χάλυβα/αργιλίου και το τιτάνιο/τα κράματα αργιλίου, είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί η στερεάς/υγρής κατάστασης αντίδραση μόνο ενώνοντας διεπαφή μεταξύ δύο μετάλλων, όπου μόνο το μέταλλο με τη χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης λειώνει. Εντούτοις, είναι δύσκολο να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος στην ένωση κραμάτων μαγνήσιου/αργιλίου λόγω της μικρής διαφοράς του σημείου

τήξης μεταξύ των δύο μετάλλων. Επομένως, μια άλλη προσέγγιση στο μεσομεταλλικό σύνθετο σχηματισμό ελέγχου πρέπει να αναπτυχθεί για τα ενώσιμα κράματα μαγνήσιου και αργιλίου. Το ελεγχόμενο βάθος διείσδυσης του λειωμένου μετάλλου στην κοινή διαμόρφωση περιτυλίξεων όπως φαίνεται στο σχήμα 23 να είναι μια πιθανή προσέγγιση για τη μείωση του μεσομεταλλικού σύνθετου σχηματισμού.



Σχήμα 23 συγκόλληση laser της ένωσης περιτυλίξεων

Διαπιστώθηκε ότι η συγκόλληση ήταν δυνατή μόνο για την περίπτωση της ανώτερης επιφάνειας AZ31B. Το στρώμα οξείδωσης βρέθηκε στη facing επιφάνεια AZ31B σε περίπτωση ανώτερης επιφάνειας a5052-o, όπως φαίνεται στο σχήμα 23. Η ελεύθερη ενέργεια της αντίδρασης μεταξύ του στρώματος επιφάνειας Al και των λειωμένων μετάλλων MG, έχει υπολογιστεί για να είναι αρνητική στη σειρά θερμοκρασίας μεταξύ 923 και 1380 K [18,19] .

Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χάλυβα-αργιλίου έχουν πραγματοποιηθεί από το laser συγκόλλησης. Οι αποκτηθείσες ενώσεις είναι το αποτέλεσμα της συγκόλλησης στο αργίλιο βάσεων και της συγκόλλησης στο φύλλο χάλυβα.[20] Το υλικό πληρώσεως είναι ένα κράμα ZN-βάσεων που επιλέγεται για τη συμβατότητά του με τα κράματα αργιλίου και τη χαμηλή θερμοκρασία τήξης του.

Μια πολύ σημαντική πτυχή της διαδικασίας είναι ότι όλα τα πειράματα εφαρμόζονται χωρίς τη χρήση χημικής ουσίας που να διαρέεται στη συγκόλλησης. Η διαδικασία συγκόλλησης με χρήση τη laser παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών διαδικασιών συγκέντρωσης όπως το κάρφωμα ή το σημείο-ένωση. Ειδικότερα, η ταχύτητα εργασίας αυξάνεται και η διαδικασία laser μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να ελεγχθεί [21] .

Με τη βοήθεια ενός σχεδίου ``του Experiment' που εμπνέεται από ``Taguchi Methods', είναι δυνατό να βρεθεί το καλύτερο παράθυρο λειτουργουσών παραμέτρων. Υπό τους βέλτιστους όρους, οι μηχανικές αποδόσεις των συνελύσεων χάλυβα/αργιλίου φθάνουν στον ανώτερο σημείο τάσεων θραύσης σε 200 N/mm. Σε ορισμένο σημείο, η ρήξη εμφανίζεται στη θερμικά επηρεασθείσα ζώνη (HAZ) του αργιλίου ή το ίδιο στο φύλλο χάλυβα. Οι μηχανικές τιμές δύναμης είναι συμβατές με τις προδιαγραφές σχετικά με αυτές τις συνελύσεις στην αυτοκίνητη βιομηχανία.

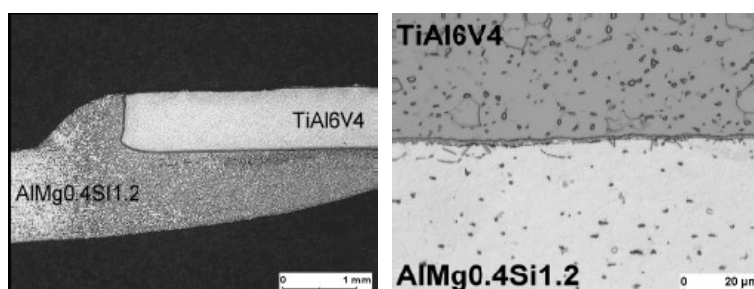
Έχουν ερευνηθεί οι αιτίες των αποτυχιών των πραγματοποιημένων ενώσεων. Φαίνεται ότι ο σχηματισμός των μεσομεταλλικών φάσεων που χαρακτηρίζονται από τις υψηλές τιμές σκληρότητάς τους στη διεπαφή χάλυβα/ραφών δεν είναι η μόνη αιτία της κοινής εφθραυστότητας Al/St, ειδικά όταν είναι το πάχος τους κάτω από 10 χιλ. Επίσης φαίνεται ότι η σφαιρική γεωμετρία των ενώσεων (concavity, βρέξιμο, κ.λπ.), είναι ένας σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη. Αυτή η γεωμετρία, καθώς επίσης και ο σχηματισμός του μεσομεταλλικού σύνθετου στρώματος, εξαρτάται από την διαδικασία επιρροής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης. Επομένως, η θερμική διαμόρφωση και ο έλεγχος θερμοκρασίας είναι απαραίτητα βήματα για έναν βέλτιστο έλεγχο της διαδικασίας. Οι έρευνες στον έλεγχο θερμοκρασίας που χρησιμοποιεί ένα υπέρυθρο σύστημα απεικόνισης είναι υπό εξέλιξη. Μέχρι τώρα, η θερμική λήψη εικόνων επέτρεψε την επικύρωση των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν από τη θερμική προσομοίωση FEM [22].

Επομένως, το λειωμένο μέταλλο μαγνήσιου μπορεί να μειώσει το Al_2O_3 αλλά το λειωμένο μέταλλο αργιλίου δεν μπορεί να μειώσει το MgO . Στο MgO το στρώμα οξειδίων μπορεί να παραμένει σε επιρροή

Αργίλιο με τιτάνιο

Οι πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι σχετικά με τη συμπεριφορά ένωσης του συστήματος Ti/Al τα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν [23]. Κάτω από την ελεγχόμενη αδρανή προστασία αερίου, η ομαλή ατέλεια και οι ελεύθερες ενώσεις του Ti και του Al μπορούν να

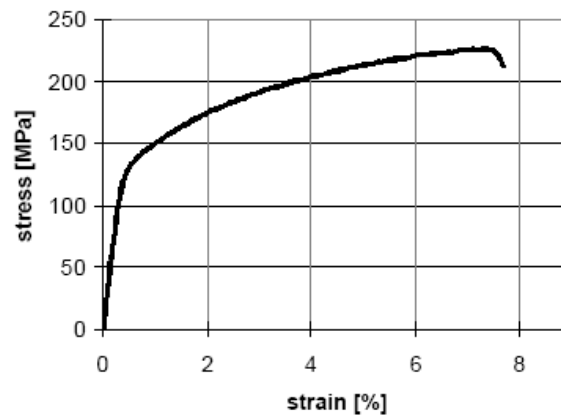
πραγματοποιηθούν. Σε αντίθεση με το Fe/Al-σύστημα καμία εκροή δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό βασίζεται στην υψηλή ικανότητα αμέσου αντιδράσεως του τιτανίου που οδηγεί πιθανώς σε μια μείωση των στρωμάτων οξειδίων του υλικού αργιλίου και στη συνέχεια σε μια αντιδραστική διαδικασία ψεκασμού. Στη διατομή που παρουσιάζεται στο σχήμα 24 αποδεικνύεται στο ψεκασμένο υλικό η συμπεριφορά του αργιλίου και των φύλλων τιτανίου. Μέσα στη ζώνη ένωσης μπορεί να ανιχνευθεί ένα λεπτό ενδιάμεσο στρώμα (σχήμα 24). Αυτή η πρόσφατα σχηματισμένη φάση υποτίθεται ότι ήταν μια μεσομεταλλική TiAl_3 -φάση /W ΦH95/. Δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι αυτή η φάση είναι πολύ σταθερή, μια μείωση της σχετικής με τη διάχυση αύξησης φάσης είναι εμφανής.



Σχήμα 24 διατομή μιας Ti/Al-ένωσης. Υλικός συνδυασμός TiAl6V4 και AlMg0.4Si1.2

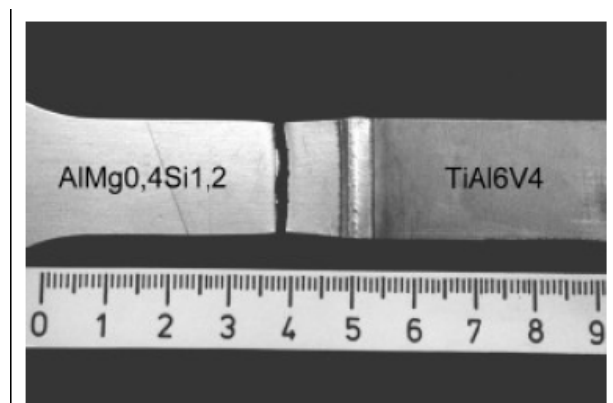
Κατά την διάρκεια δοκιμών που ασκούνται μεγάλες δυνάμεις, το σπάσιμο του MPA 220 που τονίζεται μετρίεται σε σχέση με μια σχετικά μεγάλη πλαστική παραμόρφωση. Μετά από εξέταση το δείγμα παρουσιάζει γενική πίεση περίπου 6% σχετική με το μήκος άξονων του δείγματος. Γίνεται προφανές στο σχήμα 25 ότι η επιμήκυνση βρίσκεται κυρίως από την πλευρά αργιλίου του δείγματος και είναι πρόσθετα περιορισμένη σε μια σχετικά μικρή περιοχή. Εντούτοις, μπορεί να

συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι τοπικές παραμορφώσεις του αργιλίου είναι πολύ υψηλότερες.



Σχήμα 24 πίεσης-καμπύλης μιας ti/Al-ένωσης. Υλικά: Ti6Al4V, AlMg0.4Si1.2

Η αποτυχία των δειγμάτων εμφανίζεται από την πλευρά αργιλίου της ένωσης έξω από την πληγείσα από τη θερμότητα ζώνη του υλικού. Αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι το υλικό βάσεων αργιλίου είναι περιορισμένης δύναμης. Συγκριτικά, οι λεπτές ραφές φάσης στις ti/Al-ενώσεις έχουν δευτερεύουσα επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες της ένωσης. Μια λεπτομερής προσομοίωση της διανομής πίεσης μέσα στο δείγμα υπό τους περιορισμένους όρους λόγω του συντελεστή των διαφορετικών νεολαιών του Ti και το Al δεν έχουν εκτελεσθεί.



Σχήμα 25 σπασμένο δείγμα ενός ti/Al-εκτατού δείγματος δοκιμής.

5. Έλεγχος Ποιότητας Συγκολλήσεων

Ο έλεγχος των συγκολλήσεων είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αν η συγκόλληση έχει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, όπου εξετάζεται το δοκίμιο ή η ραφή χωρίς όμως να καταστραφεί, και με μεθόδους, όπου υποβάλλονται έτοιμα προϊόντα σε ανάλογες φορτίσεις, με αποτέλεσμα την καταστροφή τους μετά τον έλεγχο.

5.1 Μη καταστροφικές μέθοδοι

Οι δοκιμές αυτές δεν καταστρέφουν το υπό εξέταση αντικείμενο και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες, ιδιαίτερα ο έλεγχος με ακτίνες X και γ. Αναλυτικά παρακάτω φαίνονται οι μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου των συγκολλήσεων :

- Μηχανικός έλεγχος: Τα δοκίμια υποβάλλονται σε καταπονήσεις μεγαλύτερες από τις συνθήκες λειτουργίας τους και ελέγχεται η αντοχή τους.
- Οπτικός Έλεγχος: Ελέγχονται με το μάτι ή με όργανα το πάχος της ραφής μίας συγκόλλησης, τυχόν ρωγμές κ.λπ..
- Έλεγχος μέσω ηλεκτρική αγωγιμότητα: Βασίζεται στη διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας λόγω σφαλμάτων στη συγκόλληση. Είναι σχετικά αναξιόπιστη μεθοδολογία.
- Έλεγχος με φθορισμό: Αλείφεται η ραφή της συγκόλλησης με θειούχο ψευδάργυρο, που είναι φθορίζον υλικό, και στη συνέχεια, αφού

σκουπιστεί η επιφάνεια, φωτίζεται και έτσι μπορεί να παρατηρηθούν ρωγμές, πόροι κ.λπ, στα οποία ο θειούχος ψευδάργυρος παραμένει και λάμπει.

- Μαγνητικός έλεγχος: Τοποθετούνται χαλύβδινα κομμάτια σε μαγνητικό πεδίο και από τη συνέχεια των μαγνητικών γραμμών φαίνεται αν υπάρχει ή όχι ανωμαλία στη συγκόλληση.
- Έλεγχος με υπερήχους: Μία δέσμη υπερήχων προσπίπτει στην ραφή της συγκόλλησης και ανακλάται. Σε περίπτωση που υπάρχει εσωτερικά στη ραφή κάποιο ελάττωμα, αυτό εντοπίζεται, επειδή η ανάκλαση του υπερήχου διακόπτεται και δεν είναι συνεχής. Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο αξιόπιστες αλλά απαιτεί ειδική προετοιμασία.
- Έλεγχος με ακτίνες X: Τα ελαττώματα της συγκόλλησης μεταφράζονται σε σκιές πάνω σε φιλμ μετά από προσβολή από ακτίνες X.
- Έλεγχος με ακτίνες γ: Οι ακτίνες γ έχουν πολύ μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από τις αντίστοιχες ακτίνες X. Σε αυτή την περίπτωση επίσης τα ελαττώματα της συγκόλλησης μεταφράζονται σε σκιές πάνω σε φιλμ μετά από προσβολή από ακτίνες γ.

5.2 Καταστροφικές δοκιμές

Οι καταστροφικές δοκιμές έχουν αποτέλεσμα την καταστροφή του συγκολλητού αντικειμένου. Έτσι, για παράδειγμα, ο έλεγχος της αντοχής ενός συγκολλητού δοχείου πίεσης γίνεται με υδραυλική πίεση μέχρι την καταστροφή του δοχείου. Αν η καταστροφή προέλθει από θραύση των

τοιχωμάτων του, εκτός της περιοχής της συγκόλλησης, τότε η συγκόλληση είναι ικανοποιητική. Αντίστοιχες δοκιμές γίνονται και σε τμήματα ενός συγκολλητού αντικειμένου. Οι κυριότερες δοκιμές που μπορεί να γίνουν σε δοκίμια συγκολλητού αντικειμένου είναι η δοκιμή εφελκυσμού, κρούσης, λυγισμού και σκληρότητας. Οι δοκιμές αυτές δε διαφέρουν από τις αντίστοιχες κλασικές δοκιμές μηχανικής αντοχής.

6. Συμπεράσματα

- a) Με τον τεχνικό όρο **συγκόλληση** εννοούμε «την ένωση δύο ή περισσότερων μεταλλικών κομματιών με τη βοήθεια της θέρμανσης ή της πίεσης ή, ακόμη, και με ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο»
- b) **Ζώνη συγκόλλησης ΖΕΘ**: ονομάζεται το τμήμα που περιλαμβάνει τη συγκόλληση (ραφή) μαζί με τις γειτονικές περιοχές των συνδεομένων κομματιών, οι οποίες δέχονται την επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση.
- c) Οι συγκολλήσεις τήξης συνοδεύονται από το φαινόμενο της τήξης των μετάλλων στο σημείο συγκόλλησής τους.
- d) **Οι συγκολλήσεις τήξης** διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κόλλησης που χρησιμοποιείται. Τις αυτογενείς και τις ετερογενείς
- e) Οι συγκολλήσεις πίεσης πραγματοποιούνται με ταυτόχρονη θέρμανση της θέσης συγκόλλησης των δύο κομματιών σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης τους και με εφαρμογή ισχυρής πίεσης στη θέση της συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις πίεσης διακρίνονται σε: Ψυχρές συγκολλήσεις, Συγκολλήσεις τριβής, Καμινοσυγκολλήσεις.
- f) Οι ηλεκτροσυγκολλήσεις χωρίζονται σε συγκολλήσεις: κατά σημεία, κατά άκρα, ραφής, ψυχρές συγκολλήσεις, ειδικές συγκολλήσεις
- g) Η συγκόλληση laser χρησιμοποιεί την επίδραση θέρμανσης μιας συγκεντρωμένης συνεχούς μονοχρωματικής ακτίνας laser για να παράγει μια λωμένη ρίζα συγκόλλησης.

- h) Πολλά από τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της συγκόλλησης laser, σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης τήξης, προέρχονται από τις ιδιότητες της ακτίνας και της κλειδαρότρυπας (keyhole).
- i) Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της συγκόλλησης laser είναι η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το υλικό γεμίματος, που μπορεί να εισαχθεί πριν από ή κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, υπό μορφή σκόνης. Έτσι οι ανοχές στην ποιότητα των ακρών στις οποίες καταλήγουμε μπορούν να διευρυνθούν, και να ελεγχθεί η χημεία του μετάλλου συγκόλλησης, με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι κακοί φυσικοί και χημικοί συνδυασμοί μεταξύ των συγγενών υλικών.
- j) Η πλειοψηφία των βιομηχανικών εφαρμογών της συγκόλλησης laser περιλαμβάνει τα δομικά και ανοξείδωτα μέταλλα. Εντούτοις, καθώς η κατανόηση των αποτελεσμάτων των μεταβλητών διαδικασίας στην ποιότητα συγκόλλησης βελτιώνεται, η κατεργασία με μη σιδηρούχα κράματα θα γίνει περισσότερο κοινή.
- k) Οι δύο πιο κοινές πηγές δημιουργίας ακτίνας laser είναι το Nd:YAG και το CO₂ που είναι τα πιο αξιόπιστα laser συγκόλλησης.
- l) Το ρουμπίνι ήταν το πρώτο υλικό στο οποίο η δράση laser καταδείχθηκε, και έχει συνεχίσει να είναι μια σημαντική πηγή εκπομπής laser υψηλής δύναμης.
- m) Τα συστήματα laser γυαλιού είναι ικανά να παράγουν παλμούς πολύ υψηλής ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα.
- n) Το YAG έχει καλή θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να αναπτυχθεί με την άριστη οπτική ποιότητα και είναι σκληρό και ανθεκτικό.

Δυστυχώς δεν μπορεί να κατασκευαστεί σε μήκη μεγαλύτερα από 5 ιντσες, και είναι αρκετά ακριβό.

ο) Οι βασικές παράμετροι της συγκόλλησης με laser είναι:

1. Η **ενέργεια** που παραδίδεται σε έναν ενιαίο παλμό χρησιμοποιείται ως αφετηρία για τους περισσότερους υπολογισμούς.
2. Η **πυκνότητα ισχύος** είναι ουσιαστικά ένα μέτρο του αριθμού φωτονίων laser που προσκρούουν στο υλικό.
3. Το **M^2** είναι μια ενεργειακή κατανομή μέτρου στην ακτίνα.
4. Το **ποσοστό διάρκειας και η επαναλωση παλμού** όπου η πλειοψηφία των εφαρμογών επεξεργασίας laser χρησιμοποιεί τον παλόμενο τρόπο, όπου το laser εκπέμπει την ενέργεια σε παλμούς προκαθορισμένης διάρκειας.
5. η **μέγιστη ισχύς** σε κάθε σφυγμό μπορεί να είναι πολύ υψηλή.

p) Η συγκολλησιμότητα των χαλύβων εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C). Όσο λιγότερο άνθρακα έχει ένας χάλυβας, τόσο πιο μεγάλη συγκολλητικότητα έχει, δηλαδή συγκολλάται πιο εύκολα.

q) Η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τα διαφορετικά μέταλλα και τα κράματα σε ένα προϊόν παρέχει στο σχεδιαστή και το μηχανικό παραγωγής τη μεγαλύτερη ευελιξία, και συχνά τα αποτελέσματα στα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα πέρα από τα συστατικά που κατασκευάζονται από ένα ενιαίο υλικό.

- r) Οι ενώσεις ανόμοιων μετάλλων χαρακτηρίζονται από τις συνθετικές διαφορές και τις μικροδομικές αλλαγές που παράγουν οι μεγάλες παραλλαγές στις φυσικές και χημικές ιδιότητες πέρα από την ένωση.
- s) Οι μεγάλες διαφορές στη θερμική διαστολή μεταξύ των κοινών συστατικών οδηγούν στο σχηματισμό μεγάλων συνεχόμενων πιέσεων, με τις επιπτώσεις στις κοινές ιδιότητες δύναμης και καταπόνησης.
- t) Οι ενώσεις μεταξύ του αλουμινίου και του χαλκού απαιτούνται συχνά στα ηλεκτρικά συστατικά ή τους ηλιακούς συσσωρευτές.
- u) Η ένωση μεταξύ του ανοξείδωτου χάλυβα και του άνθρακα ή του χαμηλού φερριτικού χάλυβα κραμάτων απαιτείται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, για να ικανοποιήσει την απόδοση και τα οικονομικά κριτήρια.
- v) Οι ενώσεις μεταξύ του αλουμινίου και των διάφορων τύπων χαλύβων είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις κρυογενείς εφαρμογές.
- w) Οι ενώσεις μεταξύ των κραμάτων χάλυβα και νικελίου απαιτούνται στις εγκαταστάσεις και τις ηλεκτρικές εφαρμογές.
- x) Η δυνατότητα ανάμιξης του αλουμινίου και του μολύβδου σε στερεά κατάσταση είναι πολύ περιορισμένη και η αυτογενής συγκόλληση laser δεν θα αναμενόταν κανονικά για να παραγάγει τις ενώσεις με τις ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες.
- y) Ο έλεγχος των συγκολλήσεων είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αν η συγκόλληση έχει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή.

7. Βιβλιογραφία

- [1] K. NILSSON and I. S. RADY, in "Proceedings of the 4th International Conference on Lasers in Manufacturing", Birmingham, UK, edited by W. M. Steen (IFS Conferences, Bedford, UK, 1987) p. 183
- [2] V. P. KUJANPA, and T. J. I. MOISIO, in "Proceedings of the Conference on Recent Trends in Welding Science and Technology", Gatlinburg, May 1989, edited by S. A. David and J. M. Vitek (ASM International, Materials Park, Ohio, 1990) p. 333
- [3] D.W. MOON and E. A. METZBOWER, in "Proceedings of the 2nd International Conference on Application of Lasers in Materials Processing", edited by E. A. Metzbower (ASM, Materials Park, Ohio, 1983) p. 248. Z. SUN and T. J. I. MOISIO, *Mater. Sci. Technol.* 9 (7) (1993) 603
- [4] A.L. SCHAEFFLER, *Metal Prog.* 56 (1949) 680
- [5] T. DELONG, *Weld. J.* 53 (7) (1974) 273s
- [6] D.J. KOTECKI and Y. A. SIEWERT, *ibid.* 71 (1992) 171s
- [7] S.A. DAVID, J. M. VITEK and T. L. HEBBLE, *ibid.* 68 (10) (1987) 289s., Y. NAKAO, *Weld. Int.* 3 (1989) 619
- [8] M. DELL'ERBA, P. SFORZA, G. CHITA and L. CENTO, in "Proceedings of the Conference on The Changing Frontiers of Laser Materials Processing", Arlington, November 1986, edited by C. M. Banas and G. L. Whitney, (IFS, Bedford, 1987) p. 57
- [9] G.F. ANTONOVA, V. P. SAYAPIN, F. K. KOSYREV and V. A. BARSUK, *Avtom. Svarka* 4 (1989) 41 (in Russian).
- [10] R. ANDREWS, *Br. Weld. J.* 9 (1962) 650.36
- [11] HAN, J. SUH and Y. H. HYUN, in "Proceedings of the 2nd European Conference 2", Florence, May 1994 (Istituto Italiano della Saldatura Genova 1994) p. 337
- [12] J.P. REYNOLDS, H. W. KERR, P. J. FEHRENBACH, L. BOURQUE and R. D. DAVIDSON, in "Proceedings of the Conference on Advances in Welding Science and Technology", Gatlinburg, May 1986, edited by S. A. David (ASM International, Materials Park, OH, 1986) p. 325
- [13] T.A. Mai, A.C. Spowage, "Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel–kovar, copper–steel and copper–aluminium" *Materials Science and Engineering A* 374 (2004) 224–233
- [14] A. G. GRIGORYANTS, I. N. SHIGANOV, A. V. KUDRYAVTSEV and O.A. PARFENOVSKAYA, *Weld. Prod.* 33 (8) (1986)
- [15] D.T. Hawkins, R. Hultgren, *Metals Handbook*, eighth ed., ASM, USA, 1973
- [16] M.J. Rathod, M. Kutsuna, Joining of aluminum alloys 5052 and low carbon steel by laser roll welding, *Weld. J.* 83 (2004) 16s–26s
- [17] M. Yukio, N. Ikutaro, X. Jin-Quan, M. Yoshiharu, A. Masatoshi, O. Hayato, Laser welding of dissimilar metals joint aided by unsteady thermal convection boundary element method analysis, *Q. J. Weld. Soc.* 23–1 (2005) 16–24 (in Japanese)

- [18] D.R. Gaskell, Introduction to Metallurgical Thermodynamics, Scripta Pub. Co, Washington, 1973
- [19] O. Kubaschewski, E.L.I. Evans, Metallurgical Thermochemistry, second ed., Pergamon, Oxford, 1955.
- [20] Mathieu Alexandre Mathieua,_, Rajashekar Shabadib, Alexis Deschampsb, Michel Sueryc, Simone Matter^a, Dominique Greveya, Eugen Cicala “Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)”, Optics & Laser Technology 39 (2007) 652–661
- [21] Walle^e O, Contribution a^l l^e tude du soudage d^{al}liages d^{al}uminumpar faisceau laser avec fil d^{ap}port. Ph.D. thesis, Universite^l Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2000
- [22] Mathieu A, Matter^s S, Rodriguez L, Deschamps A, Sue^{ry} M, Viala JC, et al. Laser brazing of steel/aluminum assembly. In: Proceedings of the ICALEO⁰⁴ (CD-ROM), San Francisco, USA, 2004
- [23] F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer, T. Seefeld, G. Sepold, “Characterization and Properties of Dissimilar Metal Combinations of Fe/Al and Ti/Al-Sheet Materials”
- [24] Pawel Kolodziejczak, Wojciech Kalita (2007), Properties of CO₂ laser - welded butt joints of dissimilar magnesium alloys,
- [25] C. Esposito, G. Daurelio (1982), “on the conduction welding process Of steels with the CO₂ laser”,
- [26] Bridges, Bennett (1964), “Ion Laser”
- [27] Gobeli (1969), “Glass Laser”
- [28] Church and Liberman (1967), “YAG Laser”
- [29] Nelson και Boyle, (1962) Evtuhov και Neeland, (1965), “Ruby Laser

Διαδουκτιακοί τόποι:

- <http://www.welding-consultant.com>,
- <http://www.sciencedirect.com>