



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΥ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ  
ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΠΗΝΙΟΥ (INDUCTION  
BRAZING)

**ΧΟΝΔΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Επιβλέπων: ΣΠ. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2017

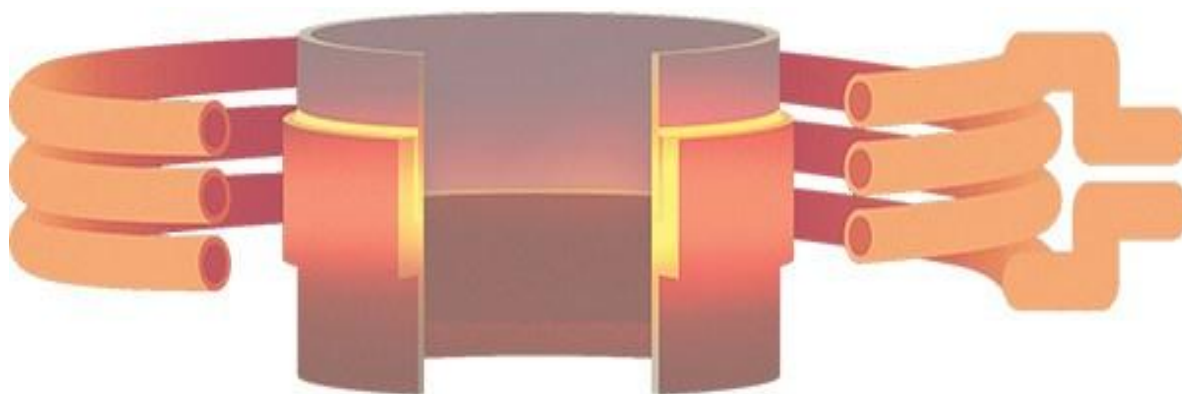




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΥ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ**  
**ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΠΗΝΙΟΥ (INDUCTION**  
**BRAZING)**



**ΧΟΝΔΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Επιβλέπων: ΣΠ. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη: Γ. ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Δ. ΠΑΝΙΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (ΕΑΒ) και στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του τμήματος Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η μελέτη της συγκόλλησης μέσων θερμοκρασιών με επαγωγικό πηνίο προσφέρει ενδιαφέρον πεδίο έρευνας, διότι η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον σε πλήθος εφαρμογών.

Η αεροπορική βιομηχανία και ιδιαίτερα η βιομηχανία αεροπορικών κινητήρων αναπτύσσει νέα υλικά και διαδικασίες τα οποία επιτρέπουν βέλτιστες επιδόσεις και χαμηλότερα κόστη. Στα πλαίσια αυτά έχουν εξελιχθεί μέθοδοι συγκόλλησης όπως οι συγκολλήσεις μεσαίων θερμοκρασιών με σκοπό την κατασκευή αλλά και επισκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων.

Οι συγκολλήσεις μεσαίων θερμοκρασιών επιτρέπουν την συγκόλληση των κραμάτων χωρίς την τήξη του βασικού υλικού πράγμα το οποίο οδηγεί σε πολλαπλούς συνδυασμούς υλικών και αντιμετώπιση τεχνικών προβλημάτων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας υπήρξε εκτός από προσωπική προσπάθεια και ιδιαίτερη συμβολή ορισμένων ανθρώπων που θα ήθελα να τους ευχαριστήσω. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Σπύρο Παπαευθυμίου ο οποίος με την εμπειρία και τις εξειδικευμένες γνώσεις του με καθοδήγησε. Επίσης, θα ήθελα να αναφερθώ στον Δρ. Βασίλειο Στεργίου και να τον ευχαριστήσω για το χρόνο, την υπομονή και την υποστήριξη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Οι τελευταίες ευχαριστίες ανήκουν στον Καθηγητή Γεώργιο Φούρλαρη και την εργαστηριακό βοηθό μου Αναστασία Αλεξανδράτου για την συμβολή στη διεκπεραίωση των πειραμάτων μου στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα μέλη της οικογένειάς μου και στους φίλους μου για τη στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν δύο δείγματα συγκολλήσεων ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα με την μέθοδο επαγωγικού πηνίου (induction brazing). Ο χάλυβας με την μορφή σωλήνων είναι τύπου AISI 321. Στα πειράματα που εκτελέστηκαν στην ΕΑΒ έγιναν δύο συγκολλήσεις, η κάθε μία με διαφορετικό κράμα συγκόλλησης. Το πρώτο κράμα συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε είναι το AMS 4770 (AWS BAG-1A) και το δεύτερο το AMS 4772 (AWS BAG-13).

Οι χάλυβες αυτοί βρίσκονται σε αεροκινητήρα M53-P2 αεροσκάφους Mirage 2000 και συγκεκριμένα στον περιβάλλοντα χώρο του καλύμματος του θαλάμου καύσης. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να γίνει μία εκτίμηση της ποιότητας των συγκολλήσεων και σύγκριση της συμπεριφοράς των κραμάτων συγκόλλησης σε αυτή.

Οι εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM), αφού τα τεμάχια πρώτα κόπηκαν και προετοιμάστηκαν για εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο όπου θα φανούν τυχόν ατέλειες αναλυτικά, και στοιχειομετρικές αναλύσεις (EDS) ώστε να βρεθούν περιεκτικότητες στοιχείων και διαφορισμοί μέσα στη συγκόλληση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν πως τα δείγματα έχουν σωστή, ομοιόμορφη κατανομή του κράματος συγκόλλησης, αλλά οι ατέλειες δεν λείπουν. Σε διάφορα σημεία εμφανίστηκαν μικροδιαφορισμοί, κενά και εγκλείσματα. Παρόλα αυτά, φαίνεται η συγκόλληση με το κράμα AMS 4770 να εμφανίζει καλύτερα χαρακτηριστικά και με προσεκτικότερο καθαρισμό των δοκιμίων πριν τη σύνδεση μπορεί να τελειοποιηθεί. Από την άλλη μεριά η συγκόλληση με AMS 4772 φαίνεται να αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα λόγω υψηλών θερμοκρασιών και αδυναμία του κράματος για πλήρωση των κενών (μικρότερη ευχυτότητα).

## **ABSTRACT**

This study deals with the induction brazing of austenite stainless steel AISI 321 tubes. The brazing experiments were carried out with two brazements each one with different brazing alloy. The first filler metal was AMS 4770 (AWS BAG-1A) and the second one AMS 4772 (AWS BAG-13).

These stainless steels are found on the Mirage 2000 engine (M53-P2) and especially on the outer space of combustion chamber case. The aim of this study is the estimation of the quality of these two different filler metals in brazing process.

A total of four representative samples were examined by SEM analysis for more detailed observation of the morphology and texture of selected shards. Before SEM examination the brazements were cut and suitably prepared for this procedure. Also, the chemical composition of brazed joints were examined by using an energy dispersive X-ray spectrometry (EDS).

The results of EDS proved suitable and homogeneous wetting of filler metals but there are also some defects. The few discontinuities in braze joints were lack of fill and voids of filler metal, base metal erosion and flux entrapments. Nevertheless, the brazement of AMS 4770 filler metal seems to present better quality and with better cleaning of surfaces before brazing, it can become satisfactory. On the other side, the brazement with AMS 4772 exhibits a lot of problems due to high brazing temperatures and lack of fill (lower viscosity).

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	10
1.1 Ανοξείδωτοι Χάλυβες.....	10
1.1.1 Γενικά περί ανοξείδωτων χαλύβων .....	10
1.1.2 Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-Cr .....	11
1.2 Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χαλύβες .....	13
1.3 Μέθοδοι συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών (Brazing).....	15
1.3.1 Γενικά περί brazing .....	15
1.3.2 Αρχές και προϋποθέσεις .....	16
1.3.3 Η συγκόλληση brazing .....	17
1.3.4 Τα κύρια στοιχεία της διαδικασίας brazing.....	19
1.4 Επιθεώρηση συνδέσμων brazing.....	29
1.4.1 Γενικά .....	29
1.4.2 Επιτρεπτά όρια .....	29
1.5. Ελαττώματα brazing .....	30
1.6 Συγκόλληση μεσαίων θερμοκρασιών με επαγωγική μέθοδο (induction brazing) ....	32
1.6.1 Γενικά περί induction brazing .....	32
1.6.2 Εφαρμογές induction brazing .....	34
1.6.3 Εξοπλισμός brazing με επαγωγή .....	35
1.6.4 Μέταλλα προσθήκης σε induction brazing .....	37
1.6.5 Συλλιπάσματα brazing.....	38
1.7 Συγκολλησιμότητα ανοξείδωτων χαλύβων με brazing .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	41
2.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	41
2.1.1 Εισαγωγή .....	41
2.1.2 Πειραματικός εξοπλισμός .....	42



2.1.3 Πειραματική διαδικασία .....	48
2.2 Κοπή-Εγκιβωτισμός-Λείανση-Στίλβωση .....	52
2.2.1 Κοπή .....	52
2.2.2 Εγκιβωτισμός.....	53
2.2.3 Λείανση .....	54
2.2.4 Στίλβωση .....	55
2.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) .....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	58
3.1 Συγκόλληση με κράμα AMS 4770 .....	58
3.2 Σφάλματα συγκόλλησης με κράμα AMS 4770 .....	61
3.3 Συγκόλληση με κράμα AMS 4772 .....	63
3.4 Σφάλματα συγκόλλησης με κράμα AMS 4772 .....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1.1 Ανοξειδωτοι Χάλυβες

### 1.1.1 Γενικά περί ανοξειδωτων χαλύβων

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι μία πολύ σημαντική κατηγορία χαλύβων με δύο βασικά γνωρίσματα:

- α) Είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση συγκριτικά με άλλους χάλυβες
- β) Περιέχουν χρώμιο σε αναλογία άνω του 10% ενώ μία σπουδαία κατηγορία από αυτούς περιέχει νικέλιο σε μεγάλα ποσοστά.

Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές EN 10088, οι χάλυβες κατηγοριοποιούνται ως ανοξειδωτοι όταν έχουν χημική σύνθεση με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5%. Παρόλα αυτά, όλοι οι τύποι ανοξειδωτων χαλύβων που κυκλοφορούν στην αγορά έχουν μεγαλύτερο ποσοστό σε χρώμιο με τιμές 13-18%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρακτικά χρειάζεται τουλάχιστον 12% Cr, ώστε να αποκτήσει επαρκή αντίσταση στη διάβρωση σε υδατικά διαλύματα. (Casaroli, 2014)

Τα γνωρίσματα των ανοξειδωτων χαλύβων που τους καθιστούν σπουδαίους είναι οι αντιδιαβρωτικές και αντιοξειδωτικές τους ιδιότητες σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ευρεία χρήση τους σε πλήθος βιομηχανικών και εμπορικών εφαρμογών.

Οι χάλυβες αυτού του τύπου παρουσιάζουν αντίσταση στην υγρή οξείδωση ή στην ηλεκτροχημική διάβρωση, μέσα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, βιομηχανικές περιοχές κ.α. Ένα εξαιρετικά δραστικό διαβρωτικό περιβάλλον είναι αυτό που δημιουργείται με την συνέργεια υψηλών θερμοκρασιών όπως συμβαίνει στα εξαρτήματα των καμίνων ή σε εξαρτήματα κινητήρων. Έτσι, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας χαλύβων είναι η αντίσταση σε οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε χημική διάβρωση, που συνήθως συναντάμε σε εξαγωγές θερμών αερίων, όπως σε ένα, αεροπορικό κινητήρα.

Όσον αφορά τη σύνθεση των ανοξειδωτων χαλύβων περιέχουν απαραίτητα σίδηρο, ως το κυριότερο συστατικό και χρώμιο ως βασικό κραματικό στοιχείο κατά της διάβρωσης. Το χρώμιο αντιδρώντας χημικά με το οξυγόνο του αέρα δημιουργεί ένα στρώμα παθητικού οξειδίου επιφανειακά  $Cr_2O_3$ , το οποίο προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο από την οξείδωση όταν αυτό εκτεθεί σε συνθήκες διαβρωτικού περιβάλλοντος. Σε ορισμένες κατηγορίες χαλύβων συμμετέχει και το νικέλιο (Ni) ως βασικό στοιχείο κατά της

διάβρωσης. Οι ανοξειδωτοί χάλυβες μπορούν να περιέχουν, σε μικρές περιεκτικότητες διάφορα στοιχεία όπως μολυβδαίνιο, βανάδιο, αλουμίνιο, νιόβιο και τιτάνιο, τα οποία βελτιώνουν ορισμένες ιδιότητες των χαλύβων αυτών. Τα στοιχεία μαγγάνιο και πυρίτιο προστίθενται σε χαμηλές αναλογίες ώστε να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Ο άνθρακας και το άζωτο παίζουν ανάλογο ρόλο όπως και στους κοινούς χάλυβες, ως στοιχεία παρεμβολής. Στους σπουδαιότερους ανοξειδωτούς χάλυβες ο άνθρακας αποτελεί ανεπιθύμητη ακαθαρσία. Οι πιο συνηθισμένες περιεκτικότητες σε άνθρακα είναι κάτω του 0,1% ή και 0,05%. Οι κραματικές προσμίξεις βρίσκονται σε υψηλές αναλογίες ώστε να τους χαρακτηρίζουν ως ισχυρά κραματωμένους χάλυβες.

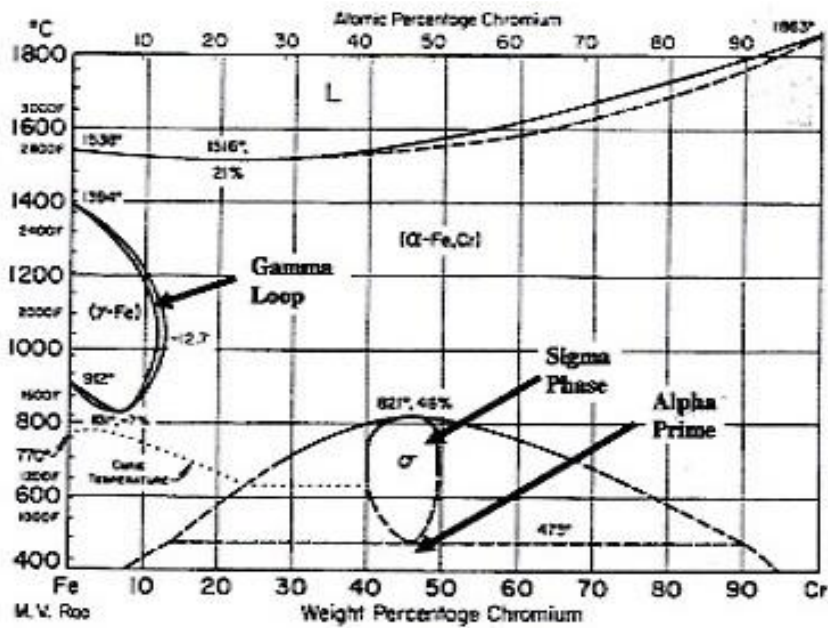
Οι τέσσερις κύριες "οικογένειες" ανοξειδωτών χαλύβων, βάσει της μικροδομής τους στην περιβάλλουσα θερμοκρασία είναι:

- Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες
- Φερριτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες
- Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες
- Ωστενιτικοί-φερριτικοί, duplex ανοξειδωτοί χάλυβες

Μία πέμπτη κατηγορία μπορεί να προστεθεί, αυτή των ανοξειδωτών χαλύβων σκληρώσεως δια κατακρημνίσεως. Αυτή η ομάδα χαλύβων δεν προσδιορίζεται βάσει μεταλλουργικής μικροδομής, αλλά περισσότερο από τις θερμικές κατεργασίες και τους μηχανισμούς σκληρώσεως για την παραγωγή τους. (Casaroli, 2014)

### **1.1.2 Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-Cr**

Οι περισσότεροι ανοξειδωτοί χάλυβες περιγράφονται από τα διαγράμματα ισορροπίας φάσεων των συστημάτων Fe-C, Fe-Cr-C και Fe-Cr-Ni. Τα διαγράμματα αυτά προσεγγίζουν την πραγματική μικροδομή που αναπτύσσεται στις συγκολλήσεις, η οποία μπορεί να είναι λίγο διαφορετική. Αυτό οφείλεται είτε στο πλήθος κραματικών στοιχείων που περιέχουν οι ανοξειδωτοί χάλυβες και το μέταλλο συγκόλλησης, είτε στην μεγάλη ταχύτητα που συμβαίνουν οι μετασχηματισμοί φάσεων σε πραγματικές συνθήκες. Το χρώμιο αποτελεί βασικό κραματικό στοιχείο των ανοξειδωτών χαλύβων και το διάγραμμα φάσεων σιδήρου-χρωμίου περιγράφει τις φάσεις ισορροπίας των χαλύβων αυτών. Το χρώμιο και ο σίδηρος έχουν αμοιβαία απεριόριστη διαλυτότητα τόσο στην υγρή, όσο και στη στερεά κατάσταση. Αυτό είναι αποτέλεσμα της όμοιας κρυσταλλικής δομής, του ίδιου σθένους και του παραπλήσιου ατομικού αριθμού.



Εικόνα 1: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-Cr

Στο διάγραμμα της Εικόνας 1 παρατηρούμε σε χαμηλές περιεκτικότητες χρωμίου και σε θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 910 και 1400 °C, υπάρχει ένας **βρόχος ωστενίτη**. Αυτός ο βρόχος παρουσιάζει σαν μέγιστη περιεκτικότητα σε Cr 12-13%, δηλαδή η ωστενιτική φάση δεν υπάρχει σε καμία θερμοκρασία για κράματα με Cr άνω της οριακής αυτής περιεκτικότητας. Το χρώμιο δεν εμφανίζει εδροκεντρωμένη αλλοτροπική μορφή, όπως ο σίδηρος, και περιορίζει την περιοχή γ του διαγράμματος σε βρόχο, ο οποίος περιβάλλεται από τη διφασική περιοχή α+γ. Στην υπόλοιπη έκταση του διαγράμματος επικρατεί η χωροκεντρωμένη κυβική δομή α.

Το διάγραμμα εμφανίζει τη **“φάση σ”** γύρω από την ισατομική αναλογία σιδήρου και χρωμίου, που αντιστοιχεί σε 45% κ.β. Cr. Η φάση αυτή παρατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτω των 820°C ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες διαλύεται. Επίσης, από το διάγραμμα είναι εμφανής η παρουσία διφασικής περιοχής α+σ, δεξιά και αριστερά από τη μονοφασική περιοχή. Έτσι, είναι δυνατή η εμφάνιση της φάσης σ ακόμη και σε κράματα με 20% Cr, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η παρουσία της φάσης αυτής στις συγκολλήσεις των ανοξείδωτων χαλύβων είναι τελείως απαγορευμένη καθώς είναι εξαιρετικά εύθραυστη και προκαλεί ραγδαία πτώση της δυσθραυστότητας.

## 1.2 Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες ανήκουν στο τετραμερές σύστημα Fe-Cr-Ni-C και για την περιγραφή τους χρησιμοποιούνται ψευδοδιμερή διαγράμματα. Εκπροσωπούν τη μεγαλύτερη κατηγορία ανοξειδωτών χάλυβων και παράγονται σε μεγαλύτερες ποσότητες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Έχουν αντοχή παρόμοια με εκείνη των μαλακών χάλυβων. Έχουν επίσης ικανοποιητικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε κρυογενικές εφαρμογές. Παρουσιάζουν μία μονοφασική δομή, που κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα και διατηρείται σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Αυτή η δομή είναι αποτέλεσμα από την ισορροπία των κραματικών στοιχείων που σταθεροποιούν την ωστενιτική φάση. Επειδή, όμως, τα κράματα αυτά είναι κυρίως μονοφασικά μπορούν να ενδυναμωθούν μόνο με στερεά διαλύματα ή με ψυχρή κατεργασία, με εξαίρεση τους σκληρωμένους δια κατακρημνίσεως ωστενιτικούς χάλυβες. Χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται καλές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες στην ατμόσφαιρα ή σε υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά οι ωστενιτικοί χάλυβες είναι συγκολλησιμοι, εάν ακολουθηθούν οι κατάλληλες προεργασίες. Τα στοιχεία που προωθούν το σχηματισμό του ωστενίτη, με πιο αξιοσημείωτο το χρώμιο, προστίθενται στους χάλυβες σε μεγάλες ποσότητες (γενικά πάνω από 8% κβ). Άλλα στοιχεία που ενισχύουν τον ωστενίτη είναι τα C, N και Cu. Ο άνθρακας προστίθεται για τη βελτίωση της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το N προστίθεται σε μερικά κράματα για την αύξηση της αντοχής κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα κράματα που αυξάνουν την αντοχή τους με προσθήκη N χαρακτηρίζονται με το πρόθεμα N που ακολουθεί την ονομασία της σειράς AISI 300. Η κατηγορία AISI 200, είναι επίσης ενδυναμωμένη με προσθήκη αζώτου και αναφέρεται με διάφορες ονομασίες, όπως για παράδειγμα Nitronic®. (Lippold, 2005)

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες γενικά έχουν καλή ολκιμότητα και σκληρότητα, ενώ προσφέρουν καλή διαμορφωσιμότητα σε φορτίσεις. Είναι πιο ακριβοί από μαρτενιτικά ή χαμηλής περιεκτικότητας χρωμίου φερριτικά κράματα, εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε κραματικές προσθήκες. Παρά το κόστος, προσφέρουν διακριτά μηχανικά πλεονεκτήματα, ειδικά όσον αφορά την διαμορφωσιμότητα και συγκολλησιμότητά τους.

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών όπως δομική ενίσχυση, αρχιτεκτονική χρήση, εξοπλισμός κουζίνας και ιατρικά εργαλεία. Η χρήση τους δεν δικαιολογείται μόνο για την αντίστασή τους στη διάβρωση, αλλά και

επειδή είναι μορφοποιήσιμοι, κατασκευάσιμοι και ανθεκτικοί. Πρέπει να σημειωθεί πως οι κοινοί ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες δεν είναι κατάλληλη επιλογή σε περιβάλλοντα όπως το θαλασσινό νερό, γλωριούχα και καυστικά περιβάλλοντα. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία τους στην εργοδιάβρωση, ένα φαινόμενο που προσβάλλει το μέταλλο βάσης, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη και το μέταλλο συγκόλλησης σε αυτή την κατηγορία χαλύβων. (Lippold, 2005)

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες περιλαμβάνουν τις σειρές κραμάτων 200 και 300, όπως προβλέπεται από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σιδήρου και Χάλυβα (AISI). Τα κράματα της σειράς 200 περιέχουν υψηλά επίπεδα άνθρακα, μαγγανίου και αζώτου και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Τα κράματα αυτά έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Ni από τα κράματα της σειράς 300. Τα κράματα της σειράς 300 είναι τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα σε διάφορες εφαρμογές. Στον Πίνακα 1 φαίνεται μια λίστα με τα περισσότερο κοινά κράματα της σειράς 300.

Τα πιο πολύ χρησιμοποιούμενα κράματα, όπως οι τύποι 304, 316, 321 και 347 και οι παραλλαγές τους, είναι τύπου "18-8". Οι **τύποι L** αντιπροσωπεύουν κράματα χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, μικρότερης από 0,03% κατά βάρος και έχουν βελτιωμένη αντοχή σε περικρυσταλλική διάβρωση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Οι **τύποι H** έχουν περιεκτικότητα σε C περίπου 0,1% κατά βάρος και χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες από τα υπόλοιπα ωστενιτικά κράματα. Οι **τύποι N** έχουν προσθήκη αζώτου 0,2% κατά βάρος στη σειρά κραμάτων 300 (304N, 316N) και ακόμη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κράματα με υψηλά ποσοστά Mn (το Mn αυξάνει τη διαλυτότητα του αζώτου στην ωστενιτική φάση). Το αυξημένο N βελτιώνει την αντοχή και την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς στους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες (Lippold, 2005).

**Πίνακας 1:** Σύσταση κοινών σφυρήλατων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων

Type	UNS No.	Composition (wt%)*									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other
<i>Part 1: Covered Electrodes from AWS A5.4</i>											
219	W32310	0.06	8.0–10.0	0.04	0.03	1.00	19.0–21.5	5.5–7.0	0.75	0.10–0.30	—
308	W30810	0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	—	—
308H	W30810	0.04–0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	—	—
308L	W30813	0.04	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	—	—
309	W30910	0.15	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	—	—
309L	W30917	0.04	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	—	—
310	W31010	0.08–0.20	1.0–2.5	0.03	0.03	0.75	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	—	—
316	W31610	0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	—	—
316H	W31610	0.04–0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	—	—
316L	W31613	0.04	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	—	—
317	W31710	0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	—	—
317L	W31713	0.04	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	—	—
330	W88331	0.18–0.25	1.0–2.5	0.04	0.03	0.90	14.0–17.0	33.0–37.0	0.75	—	—
347	W34710	0.08	0.5–2.5	0.04	0.03	1.0	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	—	Nb: 8 × C-1.00

Κράματα που περιέχουν τιτάνιο και νιόβιο, όπως οι τύποι 321 και 347, είναι γνωστά ως σταθεροποιητικοί τύποι, καθώς η προσθήκη των δύο αυτών στοιχείων σταθεροποιεί το κράμα έναντι του σχηματισμού καρβιδίων του χρωμίου  $M_{23}C_6$ . Επειδή το νιόβιο και το τιτάνιο σχηματίζουν και τα δύο καρβίδια τύπου MC σε υψηλές θερμοκρασίες, ο σχηματισμός καρβιδίων πλούσιων σε χρώμιο περιορίζεται. Η προσθήκη των δύο αυτών στοιχείων σε ποσοστά έως 1% κατά βάρος μειώνει το ποσοστό C της μήτρας και καθιστά την κατακρήμνιση καρβιδίων του χρωμίου δυσκολότερη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη μείωση της πιθανότητας για περικρυσταλλική διάβρωση στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

### 1.3 Μέθοδοι συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών (Brazing)

#### 1.3.1 Γενικά περί brazing

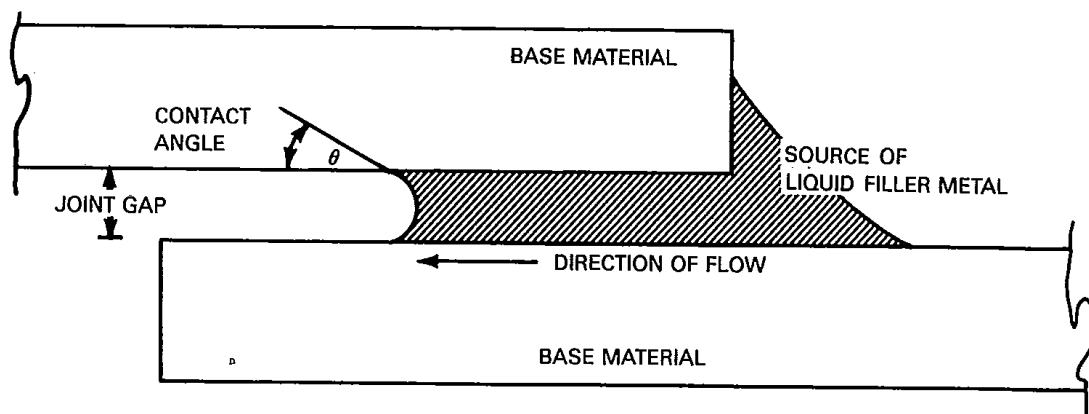
Η συγκόλληση brazing, βάσει της American Welding Society, είναι το σύνολο των μεθόδων συγκόλλησης, οι οποίες παράγουν ένωση υλικών μέσω θέρμανσής τους σε κατάλληλη θερμοκρασία χωρίς την τήξη του βασικού μετάλλου. Χρησιμοποιείται μέταλλο προσθήκης (filler metal) με θερμοκρασία τήξεως πάνω από τους 450°C και κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης των μετάλλων βάσης. Το κράμα του υλικού συγκόλλησης πρέπει να τηχθεί σε θερμοκρασία πάνω από τους 450°C ώστε να συνδέσει τα μέταλλα βάσης, τα οποία είναι τελείως στερεά στη θερμοκρασία συγκόλλησης. Το πρόσθετο μέταλλο ρέει μεταξύ του στενού περάσματος ανάμεσα στα δύο μέταλλα, μέσω της δράσης του τριχοειδούς φαινομένου. Οι διαφορετικές διαδικασίες brazing διαχωρίζονται σύμφωνα

με τη μέθοδο που εφαρμόζεται η θέρμανση. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές είναι με πυρσό (torch brazing, TB), σε φούρνο (furnace brazing, FB), με επαγωγή (induction brazing, IB), με αντίσταση (resistance brazing, RB), με εμβάπτιση (dip brazing, DB), με υπέρυθρες (infrared, IRB) και με διάχυση (diffusion brazing, DFB).

Για την επίτευξη μίας καλής σύνδεσης σε οποιαδήποτε παραλλαγή της διαδικασίας brazing τα μέρη που λαμβάνουν μέρος πρέπει να είναι κατάλληλα καθαρισμένα και προστατευμένα από εκτεταμένη οξείδωση μέσω χρήσης συλλιπάσματος (flux) ή προστατευτικής ατμόσφαιρας. Επιπλέον, τα μεταλλικά μέρη πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε όταν ευθυγραμμίζονται κατάλληλα να μπορεί να διαρρεύσει το υλικό συγκόλλησης ανάμεσά τους μέσω των τριχοειδών φαινομένων. Ακόμα πρέπει να επιλεγθεί θερμαντική μέθοδος η οποία να παράγει την κατάλληλη θερμοκρασία συγκόλλησης και διανομή της.

### 1.3.2 Αρχές και προϋποθέσεις

Στο brazing η θερμοκρασία του συστήματος αυξάνεται μέχρι το σημείο που το μέταλλο προσθήκης τήκεται και γεμίζει το κενό του συνδέσμου μεταξύ των μετάλλων. Αυτή η ροή του μετάλλου συγκόλλησης φαίνεται στην Εικόνα 2.



*Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση του συνδέσμου brazing*

Στις περισσότερες περιπτώσεις η αλληλεπίδραση μεταξύ του λιωμένου μετάλλου προσθήκης και των μετάλλων βάσης αποδίδει μεταλλουργικό δέσιμο όταν το filler στερεοποιείται. Στο χώρο της ένωσης και πάνω στις επιφάνειες των μετάλλων συγκόλλησης λαμβάνουν χώρα βασικές και περίπλοκες μεταλλουργικές και χημικές αντιδράσεις. Έτσι, πριν το brazing γίνεται εκτίμηση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας για το σχεδιασμό και παραγωγή των συγκολλήσεων με έλεγχο των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Το φαινόμενο της διαβροχής των μετάλλων βάσης από το filler απαιτεί στενή



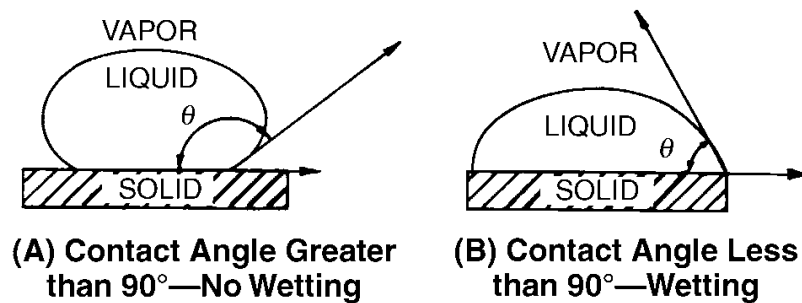
επαφή μεταξύ τους για την ανάπτυξη του δεσμού που προβλέπεται. Αφού εξασφαλιστούν οι συνθήκες αυτές, οι τριχοειδείς δυνάμεις προωθούν τη ροή του υγρού filler και δρουν ώστε να γεμίσει το κενό του συνδέσμου από το υγρό μέταλλο. Η διαβροχή και η ροή του filler επηρεάζονται έντονα από τις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στις διεπιφάνειες και μέσα στο μέταλλο προσθήκης, αλλά και από τη γεωμετρία της σύνδεσης.

### **1.3.3 Η συγκόλληση brazing**

Ένα βασικό πλεονέκτημα του brazing είναι ότι οι θερμοκρασίες συγκόλλησης είναι χαμηλότερες της θερμοκρασίας τήξης των μετάλλων βάσης. Έτσι, οι ιδιότητες των μετάλλων βάσης επηρεάζονται λιγότερο από τη διαδικασία και τις υπολειπόμενες τάσεις με συνέπεια τη χαμηλότερη διάσπαση. Παρόλα αυτά, διάφορα μειονεκτήματα σχετίζονται με το brazing, όπως η δυσκολία εφαρμογής μη καταστροφικού ελέγχου στο σύνδεσμο της συγκόλλησης. Επίσης, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των τεμαχίων μπορεί να χρειαστεί κατάλληλη συγκράτησή τους μέσα σε στενά όρια, ώστε να διεκπεραιωθεί η συγκόλληση. Οι μεταλλουργικές προϋποθέσεις που επηρεάζουν αυτές τις διαδικασίες ποικίλουν από τις ιδιότητες και τη στερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου μέχρι τις αντιδράσεις της διεπιφάνειας του μετάλλου βάσης, καθώς και οι φυσικές και περιβάλλουσες συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η συγκόλληση.

Στο brazing το πρόσθετο μέταλλο διανέμεται μεταξύ των επιφανειών της σύνδεσης μέσω του τριχοειδούς φαινομένου. Η ροή του υγρού μετάλλου στη συγκόλληση εξαρτάται από την επιφανειακή του τάση, τα χαρακτηριστικά υγροποίησης και τις φυσικές και μεταλλουργικές του αντιδράσεις με τα μέταλλα βάσης και τα οξείδια που περιέχονται σε αυτά. Επιπλέον, η τριχοειδής ροή επηρεάζεται και από την εμφάνιση υδροστατικής πίεσης ανάμεσα στη συγκόλληση.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται απλοποιημένο σχήμα της διαβροχής της συγκόλλησης, ως φαινόμενο στο οποίο το υγρό πρόσθετο μέταλλο διαρρέει ένα λεπτό στρώμα του στερεού μετάλλου βάσης. Εάν η γωνία επαφής ανάμεσα στο στερεό και το υγρό μέρος της συγκόλλησης είναι μικρότερη των  $90^\circ$ , αυτό υποδεικνύει καλή διαβροχή, ενώ αν είναι μεγαλύτερη των  $90^\circ$  δεν έχει γίνει καλή συγκόλληση.



*Εικόνα 3: Γωνία διαβροχής του πρόσθετου μετάλλου brazing*

Ορισμένες συγκολλήσεις brazing γίνονται σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ώστε να διασφαλίσουν καλή διαβροχή και διάδοση, με χρήση υδρογόνου και συστημάτων αναρρόφησης. Σε αυτή την κατηγορία, σημαντικό ρόλο στην ποιότητα παίζει η αλληλεπίδραση μεταξύ του υγρού μετάλλου και του μετάλλου βάσης. Σε άλλες περιπτώσεις brazing, η συγκόλληση υποβοηθείται από συλλίπασμα (flux), το οποίο διαμορφώνει συνθήκες παρόμοιες με της ελεγχόμενης ατμόσφαιρας καθιστώντας δεκτική την επιφάνεια σε διαβροχή. Επίσης, το συλλίπασμα απομακρύνει τα περισσότερα οξειδία, ενώ τα οξειδία του Cr, Al, Ti και Mn μπορεί να χρειαστούν ειδική αντιμετώπιση.

Ο κύκλος του brazing αποτελείται από θέρμανση μέχρι μία ανώτερη θερμοκρασία, διατήρηση της θερμοκρασίας για συγκεκριμένη διάρκεια και απόψυξη. Στην ανώτατη θερμοκρασία, που το υγρό μέταλλο βρίσκεται στο σύνδεσμο, λαμβάνουν χώρα διάφορες μεταλλουργικές αντιδράσεις με το μέταλλο βάσης. Αυτές οι αντιδράσεις αναφέρονται ως διάχυση ή διάβρωση και ο ρυθμός διάχυσης του μετάλλου βάσης εξαρτάται από τα αμοιβαία όρια διαλυτότητας, την ποσότητα του διαθέσιμου μετάλλου προσθήκης στη συγκόλληση, τον κύκλο του brazing και τη δυνατότητα σχηματισμού ευτηκτικών χαμηλών θερμοκρασιών. Σε ορισμένα σημαντικά μεταλλουργικά συστήματα ανάμεσα στο μέταλλο προσθήκης και το μέταλλο βάσης σχηματίζεται μία ενδιάμεση στρώση από διαμεταλλικές ενώσεις, κατά τη συγκόλληση. Ο βαθμός της διαμεταλλικής ανάπτυξης και ο τύπος των φάσεων που σχηματίζονται μπορούν να αλλάξουν ουσιαστικά τις ιδιότητες της συγκόλλησης και ο σχηματισμός τους προβλέπεται από τα διαγράμματα φάσεων.

Ακαθαρσίες και ρύποι λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά τη συγκόλληση, αφού μπορούν να επηρεάσουν το σχηματισμό της σύνδεσης και τις ιδιότητές της. Για παράδειγμα, το υπολειπόμενο θείο μπορεί να προκαλέσει πτωχή ροή ή θερμή ρωγμάτωση στη συγκόλληση. Οι ιδιότητες του συνδέσμου brazing εξαρτώνται από το επιτυχές μεταλλουργικό δέσιμο στις διεπιφάνειες και την τελική σύνθεση του μετάλλου συγκόλλησης. Όταν το τεμάχιο συγκόλλησης αναμένεται να επιχειρήσει σε υψηλές

θερμοκρασίες ή να εκτεθεί σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, τότε είναι σημαντικός ο έλεγχος των μεταλλουργικών ιδιοτήτων. Για αυτό το λόγο, γίνονται σκληρομετρήσεις στους συνδέσμους σε διάτμηση, όπως και μετρήσεις δυναμικών ιδιοτήτων υπό συνθήκες ερπυσμού, κόπωσης και εργοδιάβρωσης. Επιπλέον, δίνεται μεγάλη προσοχή στη διεύθυνση του υγρού μετάλλου προσθήκης μεταξύ των κόκκων του μετάλλου βάσης, διότι οδηγεί σε ψαθυρότητα. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του brazing πρέπει να ελέγχονται και να δίνεται μεγάλη προσοχή στη διάχυση και τις μεταλλουργικές αλλαγές.

### **1.3.4 Τα κύρια στοιχεία της διαδικασίας brazing**

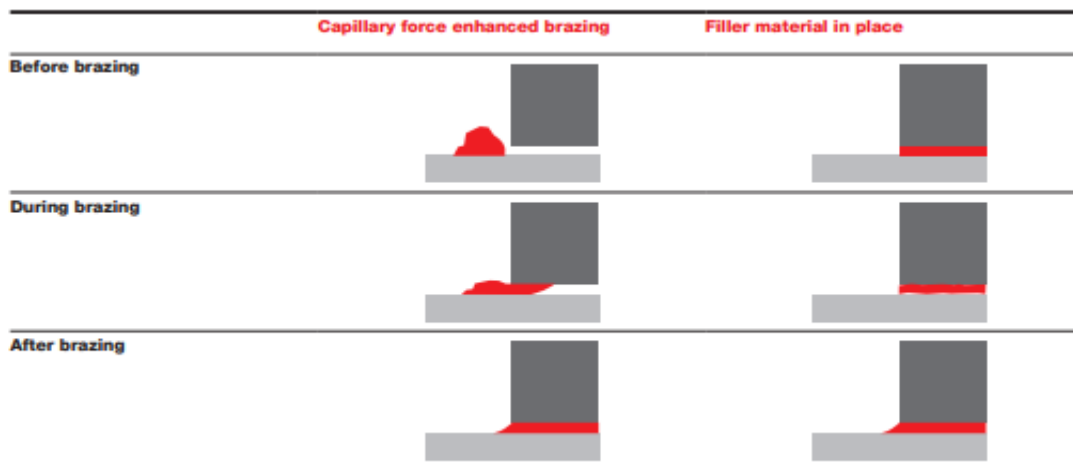
Ο μηχανικός συγκολλήσεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη του την αξιοπιστία και το κόστος κατά το σχεδιασμό της σύνδεσης με brazing. Η αντοχή της σύνδεσης, η αντίσταση σε κόπωση, η ευαισθησία σε διάβρωση και η σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του σχεδίου της συγκόλλησης, τα μέταλλα προσθήκης και τις παραμέτρους της διαδικασίας. Για την παραγωγή ικανοποιητικών συνδέσεων brazing απαιτείται προσεκτική και έξυπνη εκτίμηση των παρακάτω στοιχείων.

- Ροή μετάλλου προσθήκης
- Χαρακτηριστικά μετάλλου βάσης
- Χαρακτηριστικά μετάλλου προσθήκης
- Προετοιμασία επιφανειών
- Σχεδιασμός σύνδεσης και αποστάσεις
- Θερμοκρασία και χρόνος
- Ρυθμός και πηγή θερμότητας
- Προστατευτική ατμόσφαιρα ή συλλίπασμα

#### **1.3.4.1 Ροή μετάλλου προσθήκης**

Η διαβροχή είναι ένας σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας brazing. Η μικρή γωνία επαφής που συνεπάγεται καλή διαβροχή είναι επίσης απαραίτητη, αλλά όχι αρκετή από μόνη της για σωστή ροή. Το ιξώδες είναι επίσης σημαντικό, αφού μέταλλα προσθήκης με χαμηλά σημεία τήξεως και κοντά σε ευτηκτικές συνθέσεις γενικά έχουν χαμηλό ιξώδες σε σχέση με αντίστοιχα με υψηλά σημεία τήξεως. Ακόμα, η υψηλή επιφανειακή τάση του υγρού filler, η μικρή γωνία επαφής και το χαμηλό ιξώδες είναι όλα επιθυμητά. Η ρευστότητα είναι η ιδιότητα του μετάλλου προσθήκης που καθορίζει την απόσταση που αυτό θα διανύσει μακριά από την αρχική του θέση λόγω της δράσης του τριχοειδούς

φαινομένου. Το τριχοειδές φαινόμενο είναι η δύναμη η οποία προωθεί το υγρό μέταλλο να έρθει σε επαφή με τα στενά τοιχώματα του συνδέσμου brazing. Αυτή η ικανότητα του filler, να διαρρέει μεταξύ των δύο μετάλλων βάσης, επιτρέπει τις συνδέσεις brazing. Στην Εικόνα 4 δίνεται σχηματικά η ροή του filler κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (oerlikon, 2014).



*Εικόνα 4: Δράση τριχοειδούς δύναμης στο brazing*

Για σωστή ροή, το filler δεν πρέπει να αυξήσει τη θερμοκρασία τήξης του ακόμα και αν η σύνθεσή του αλλάξει από την προσθήκη μεταλλικών στοιχείων λόγω διάχυσης. Αυτό είναι σημαντικό διότι κατά το brazing η θερμοκρασία συγκόλλησης είναι λίγο ανώτερη της θερμοκρασίας τήξης του filler. Η χημική σύνθεση και η επιφανειακή ενέργεια των υγρών και στερεών αναμένονται να παραμείνουν σταθερά. Παρόλα αυτά, σε πραγματικές συνθήκες συμβαίνουν οι παρακάτω αντιδράσεις.

- Σχηματισμός κράματος μεταξύ υγρού και μετάλλου βάσης
- Διάχυση του μετάλλου βάσης στο μέταλλο προσθήκης
- Διάχυση μετάλλου προσθήκης μέσα στους κόκκους του μετάλλου βάσης
- Διείσδυση του μετάλλου προσθήκης στα όρια των κόκκων
- Σχηματισμός διαμεταλλικών ενώσεων

Πρακτικά οι παραπάνω αλληλεπιδράσεις συνήθως ελαχιστοποιούνται επιλέγοντας το κατάλληλο μέταλλο προσθήκης. Με αυτόν τον τρόπο, η θερμοκρασία συγκόλλησης διατηρείται όσο χαμηλά γίνεται, αλλά αρκετά ψηλά για την παραγωγή ροής. Επίσης, η διάρκεια της θέρμανσης είναι μικρή και η απόψυξη της συγκόλλησης γρήγορη, δίχως να

προκαλείται ρωγμάτωση ή παραμόρφωση. Όταν απαιτείται brazing με διάχυση, εφαρμόζουμε υψηλότερες θερμοκρασίες και με μεγαλύτερη διάρκεια θέρμανσης.

#### **1.3.4.2 Χαρακτηριστικά μετάλλου βάσης**

Το μέταλλο βάσης έχει πρωταρχικό ρόλο στην αντοχή της συγκόλλησης. Ένα μεγάλης αντοχής μέταλλο βάσης παράγει συνδέσμους υψηλότερης αντοχής από ένα αντίστοιχο μαλακότερο. Σε περιπτώσεις που διαφορετικά μέταλλα αποτελούν τη συγκόλληση και μπορεί να σχηματιστούν ή να καλυφθούν κενά καθώς η θερμότητα διαχέεται στην κόλληση, ο συντελεστής της θερμικής διαστολής γίνεται ζωτικής σημασίας. Αρκετά μεταλλουργικά φαινόμενα επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συνδέσμου brazing και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαίες ειδικές διαδικασίες. Η κραμάτωση από το μέταλλο προσθήκης του μετάλλου βάσης συμμετέχει στα φαινόμενα της κατακρήμνισης καρβιδίων, της ρωγμάτωσης και της ψαθυροποίησης υδρογόνου, θείου και φωσφόρου. Η έκταση της αλληλεπίδρασης αυτής ποικίλει ανάλογα με τις χημικές συνθέσεις των μετάλλων και το θερμικό κύκλο που συμβαίνει. Σχεδόν σε όλες τις συγκολλήσεις brazing συμβαίνει αυτή η αλληλεπίδραση εκτός από την περίπτωση της κοινής αδιαλυτότητας. Έτσι, αφού η αντοχή του μετάλλου βάσης επηρεάζει καίρια τη δύναμη της συγκόλλησης πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά κατά το σχεδιασμό ώστε ο τελικός σύνδεσμος να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

#### **1.3.4.3 Χαρακτηριστικά μετάλλου προσθήκης (filler metal)**

Το δεύτερο υλικό που συμμετέχει στη συγκόλληση brazing είναι το μέταλλο προσθήκης. Παρόλα αυτά, δεν επιλέγεται ώστε να προσδώσει συγκεκριμένη αντοχή στο σύνδεσμο, αφού σχεδόν όλα τα εμπορικά ποιοτικά filler μπορούν να αποδώσουν δυνατή συγκόλληση εάν χρησιμοποιηθούν οι σωστές μέθοδοι και υπάρξει κατάλληλος σχεδιασμός συνδέσμου. Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των brazing fillers είναι τα ακόλουθα:

- Κατάλληλη ρευστότητα στη θερμοκρασία συγκόλλησης για τη διασφάλιση της ροής με τριχοειδή δράση και για να παρέχει πλήρη κατανομή του κράματος
- Σταθερότητα ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη απελευθέρωση των εύτηκτων στοιχείων μέσα στο μέταλλο προσθήκης
- Ικανότητα διαβροχής της επιφάνειας επαφής του μετάλλου βάσης

- Χαμηλός εξαερισμός των κραματικών στοιχείων του μετάλλου προσθήκης στις θερμοκρασίες brazing
- Ικανότητα του κράματος ή σε συνδυασμό με το μέταλλο βάσης για σχηματισμό κράματος με υψηλότερο σημείο τήξης
- Έλεγχος διάβρωσης μεταξύ του μετάλλου προσθήκης και του μετάλλου βάσης, μέσα στα όρια που προβλέπει η διαδικασία brazing

Αξίζει να σημειωθεί πως η αντοχή του συνδέσμου brazing δεν συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο τήξης του μετάλλου προσθήκης. Παρόλα αυτά, εξαρτάται από το σχεδιασμό της συγκόλλησης, τη θερμοκρασία της, την ποσότητα του μετάλλου προσθήκης που εφαρμόζεται, το μέρος και τη μέθοδο της διαδικασίας, το ρυθμό θέρμανσης και πολλούς άλλους παράγοντες που συναποτελούν τη μέθοδο brazing.

Ο βαθμός που το μέταλλο προσθήκης αλληλεπιδρά και διεισδύει στο μέταλλο βάσης κατά τη συγκόλληση εξαρτάται από την ένταση των αμοιβαίων διαδικασιών διάχυσης που συμβαίνουν μεταξύ των δύο μετάλλων. Σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή αντοχή συνδέσμου σε μεγάλες θερμοκρασίες και συνθήκες λειτουργίας με υψηλές τάσεις, όπως σε συγκρότημα ρότορα τουρμπίνας και σε μέρη jet κινητήρα, είναι ορθή η επιλογή filler με πολύ καλές ιδιότητες διάχυσης και διάλυσης με το μέταλλο βάσης. Όταν τα μέταλλα συγκολλούνται με εξαιρετικά λεπτά μέταλλα βάσης, όπως σε κατασκευές σύνθετων στρωματοειδών υλικών ("σάντουιτς") ή σε εναλλάκτες θερμότητας, η διαδικασία απαιτεί μέταλλο προσθήκης που περιέχει στοιχεία με χαρακτηριστικά χαμηλής διαχυσιμότητας ανάλογα και με το μέταλλο βάσης που χρησιμοποιείται. Η διάχυση αποτελεί φυσικό μέρος της μεταλλουργικής διαδικασίας και μπορεί να συμβάλλει σε καλούς συνδέσμους brazing, όπως στην περίπτωση συγκόλλησης μετάλλων υψηλών θερμοκρασιών με χρήση νικελιούχων μετάλλων προσθήκης.

#### **1.3.4.4 Θερμοκρασία brazing**

Για την επιλογή κατάλληλου μετάλλου προσθήκης το πρώτο κριτήριο αποτελεί η θερμοκρασία συγκόλλησης. Ορισμένες θερμοκρασίες συγκολλήσεων brazing παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Θερμοκρασίες συγκόλλησης μετάλλων προσθήκης σε *brazing*

BRAZING FILLER-METAL GROUPS	JOINING TEMPERATURE	
	°C	°F
NI, CO, AND PD ALLOYS	[GES]1100	[GES]2012
CU, NI, AND AU ALLOYS	[GES]1100	[GES]2012
CU-ZN, CU-SN, NI-P, NI-CR-P, PD-AG-CU	[GES]900	[GES]1652
CU-P, CU-AG-P	600-800	1112-1472
AG-CU-ZN, AG-CU-ZN-CD	600-800	1112-1472
AL-SI	580-600	1076-1112
MG-AL-ZN	585-615	1085-1139

Όπως φαίνεται πολύ λίγα μέταλλα προσθήκης κατέχουν στενά όρια τήξεως. Στα μέταλλα προσθήκης που οι θερμοκρασίες στερεοποίησης και τήξης είναι κοντά, συνήθως δεν παρουσιάζουν τάση συνύπαρξης ως μείγματα υγρής και στερεάς φάσης ή μόνο υγρής. Στην περίπτωση όμως που οι θερμοκρασίες αυτές αποκλίνουν, η τάση για υγροποίηση αυξάνεται, απαιτώντας μεγαλύτερες προφυλάξεις του μετάλλου προσθήκης. Η μίξη στερεού και υγρού μετάλλου μπορεί να βοηθήσει στη συγκάλυψη κενών της συγκόλλησης.

Η ανάγκη ώστε το filler να λιώσει κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης (*solidus*) του μετάλλου βάσης είναι μόνο ένας από τους πολλούς παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του. Υπάρχει περίπτωση το filler να απαιτείται να τηχθεί κάτω από τη θερμοκρασία στην οποία τα μέταλλα που συγκολλούνται χάνουν την αντοχή τους ή πάνω από τη θερμοκρασία στην οποία τα οξείδια μειώνονται ή διασπώνται. Επίσης, η συγκόλληση μπορεί να απαιτείται να γίνει πάνω από τη θερμοκρασία ανόπτησης του μετάλλου βάσης ή κάτω από τη θερμοκρασία επανάτηξης του filler που έχει χρησιμοποιηθεί νωρίτερα σε συγκόλληση.

#### **1.3.4.5 Προετοιμασία επιφανειών**

Μία καθαρή απαλλαγμένη από οξείδια επιφάνεια είναι επιτακτική ανάγκη να διασφαλίσει ομοιόμορφη ποιότητα και υγιείς συνδέσμους *brazing*. Πριν την έναρξη της συγκόλλησης πρέπει όλα τα γράσα, τα λάδια και τα οξείδια προσεκτικά να απομακρυνθούν από τα μέταλλα βάσης και το μέταλλο προσθήκης, αφού μόνο τότε θα αποκτήσουμε ομοιόμορφη έλξη από τριχοειδές φαινόμενο. Αμέσως μετά πρέπει να πραγματοποιηθεί το *brazing* διότι υπάρχει συγκεκριμένη διάρκεια χρόνου για τον οποίο η προετοιμασία των επιφανειών

παραμένει αποτελεσματική. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το χρόνο αυτόν είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα μέταλλα που παίρνουν μέρος στη συγκόλληση και οι πρακτικές αποθήκευσης και διαχείρισής τους. Οι τεχνικές καθαρισμού κατηγοριοποιούνται σε χημικές και μηχανικές.

Ο χημικός καθαρισμός είναι ο πιο αποτελεσματικός σε ό,τι αφορά την απομάκρυνση όλων των ακαθαρσιών, ελαίων και γράσων. Τα πιο κοινά καθαριστικά είναι το τριχλωροαιθυλένιο και το φωσφορικό τρινάτριο. Η επιλογή των χημικών καθαριστικών εξαρτάται από τη φύση των ακαθαρσιών, το μέταλλο βάσης, την επιφανειακή κατάσταση και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ανεξάρτητα από τη φύση των καθαριστικών ή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται είναι σημαντικό όλα τα υπολείμματα να εκπλυθούν ικανοποιητικά ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη νέων ανεπιθύμητων βλαβερών στρωμάτων πάνω στις επιφάνειες.

Οι μη αποδεκτές επιφανειακές συνθήκες μπορούν να απομακρυνθούν με μηχανικά μέσα, όπως είναι το τρίψιμο, το βούρτσισμα με σύρμα ή άλλοι μηχανικοί τρόποι που δεν επηρεάζουν τις ανοχές της συγκόλλησης. Καθώς τρίβονται οι επιφάνειες των μετάλλων συγκόλλησης, δίνεται δέουσα προσοχή στην διασφάλιση ώστε το ψυκτικό μέσο να είναι καθαρό και ελεύθερο από ακαθαρσίες, οι οποίες πιθανόν να εισχωρήσουν στην τελική επιφάνεια.

Στην περίπτωση που οι επιφάνειες που θα συγκολληθούν ετοιμάζονται με εκρηκτικές τεχνικές θα απομακρυνθούν όλα τα επιφανειακά οξείδια. Αυτή η τεχνική επίσης σκληραίνει τις επιφάνειες με αποτέλεσμα να αυξάνει τη τριχοειδή δράση του μετάλλου προσθήκης. Το εκρηκτικό υλικό πρέπει να είναι καθαρό και να μην αφήνει αποθέματα υλικού πάνω στις επιφάνειες που θα συγκολληθούν αφού θα βλάψει το brazing ή θα μειώσει τη ροή του filler. Τα σωματίδια του εκρηκτικού υλικού πρέπει να είναι γωνιώδη και όχι σφαιρικά, έτσι ώστε τα μέταλλα που προσκρούουν να σκληρύνουν και όχι να οξύνουν τα άκρα τους. Η διαδικασία αυτή δεν πρέπει να παραμορφώσει ή να πληγώσει τα λεπτά μέρη της συγκόλλησης.

Μία άλλη τεχνική είναι η χρήση στερεών και υγρών συλλιπασμάτων brazing. Στη θερμοκρασία μέχρι και τους 1000°C το συλλίπασμα συνήθως παρέχει την ευκολότερη μέθοδο διατήρησης ή παραγωγής καθαρών επιφανειών. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο σχεδιασμός της συγκόλλησης δεν πρέπει μόνο να επιτρέπει την εύκολη είσοδο του συλλιπάσματος, αλλά και τη διαβροχή του συνδέσμου από το μέταλλο προσθήκης. Σε θερμοκρασίες πάνω από τους 1000°C, τα υπολείμματα του συλλιπάσματος δύσκολα απομακρύνονται και ο καθαρισμός της επιφάνειας συνοδεύεται από brazing σε φούρνο με



προστατευτική ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός πρέπει να επιτρέπει στο αέριο να εισχωρήσει στη συγκόλληση.

Επιπλέον, εκτός από την καθαριότητα και την απαλλαγή από οξειδία ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στην εύκολη και ομαλή ροή του filler είναι η τραχύτητα επιφανείας. Γενικά ένα υγρό που διαβρέχει μία ομαλή επιφάνεια θα την καλύψει καλύτερα από μία τραχιά. Η τραχιά επιφάνεια θα μετατρέψει τη ροή του filler από στρωτή σε τυρβώδη παρατείνοντας τη διάρκεια ροής και αυξάνοντας την πιθανότητα κραμάτωσης επιπλέον περιοχών. Οι περισσότερες επιφάνειες δεν είναι επίπεδες και σε ορισμένες περιπτώσεις η τραχύτητα βελτιώνει την ομοιομορφία της συγκόλλησης.

Αντίθετα, μπορεί να υπάρξει ανάγκη το filler να μην κυλήσει σε ορισμένες επιφάνειες. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν ειδικά υλικά που βοηθούν, αλλά ο σχεδιασμός πρέπει να παρέχει εύκολη εφαρμογή τους δίχως να μολύνουν τη συγκόλληση.

#### **1.3.4.6 Σχεδιασμός συνδέσμου και διάκενα**

Ένας σύνδεσμος brazing δεν είναι ένα ομοιογενές σώμα, αλλά μία ετερογενής περιοχή που αποτελείται από διαφορετικές φάσεις με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Στην απλούστερη περίπτωση το brazing αποτελείται από τα μέταλλα βάσης που ενώνονται και το μέταλλο προσθήκης. Συχνά χρησιμοποιούνται μικρά διάκενα λόγω μεγαλύτερης ευκολίας του filler, μέσω τριχοειδών δυνάμεων, να διανεμηθεί μέσα στη συγκόλληση και θα σχηματιστούν λιγότερα κενά και πορώδη κατά τη στερεοποίησή του. Οι βέλτιστες συγκολλήσεις είναι αυτές που ολόκληρη η περιοχή σύνδεσης διαβρέχεται και γεμίζει με το μέταλλο προσθήκης. Τυπικά, τα διάκενα στο brazing κυμαίνονται από 0,03 μέχρι 0,08 mm ώστε να καταλήξουμε σε δυνατές συγκολλήσεις και βέλτιστη δράση τριχοειδούς φαινομένου. Επειδή το brazing στηρίζεται στη δράση αυτή, ο σχεδιασμός πρέπει να παρέχει ανεμπόδιστη ροή ώστε να αποτραπεί το συλλίπασμα να εισχωρήσει στο filler. Σε περιπτώσεις που το filler προστίθεται χειρωνακτικά, με τη βοήθεια ράβδου ή σύρματος, η είσοδος της συγκόλλησης πρέπει να είναι ορατή και προσβάσιμη.

Ορισμένοι από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του συνδέσμου είναι η απαιτούμενη αντοχή και αντίσταση στη διάβρωση, η απαιτούμενη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, τα υλικά που συνενώνονται, ο τρόπος εφαρμογής του πρόσθετου μετάλλου και οι μετέπειτα ανάγκες επιθεώρησης. Επιπλέον, προσοχή πρέπει να δίνεται στην ελατότητα του μετάλλου βάσης, τη διανομή τάσεων μέσα στη συγκόλληση και τις σχετικές κινήσεις των δύο επιφανειών κατά την ένωση, τα οποία μπορούν να παραμορφώσουν τις διαστάσεις της συγκόλλησης.

Το μέταλλο προσθήκης δεν καθορίζεται μόνο από το ιξώδες του, αλλά και από την επιφανειακή του τάση και την ειδική του βαρύτητα, όσον αφορά την ικανότητα κάλυψης κενών στη συγκόλληση. Όσο μειώνεται η απόσταση της σύνδεσης στο ελάχιστο, τόσο αυξάνεται η αντοχή συνδέσμου. Στον Πίνακα 3 δίνονται οι ανοχές των αποστάσεων για διάφορα συστήματα μετάλλων προσθήκης.

**Πίνακας 3:** Ενδεικτικά κενά για επιλεγμένα μέταλλα προσθήκης

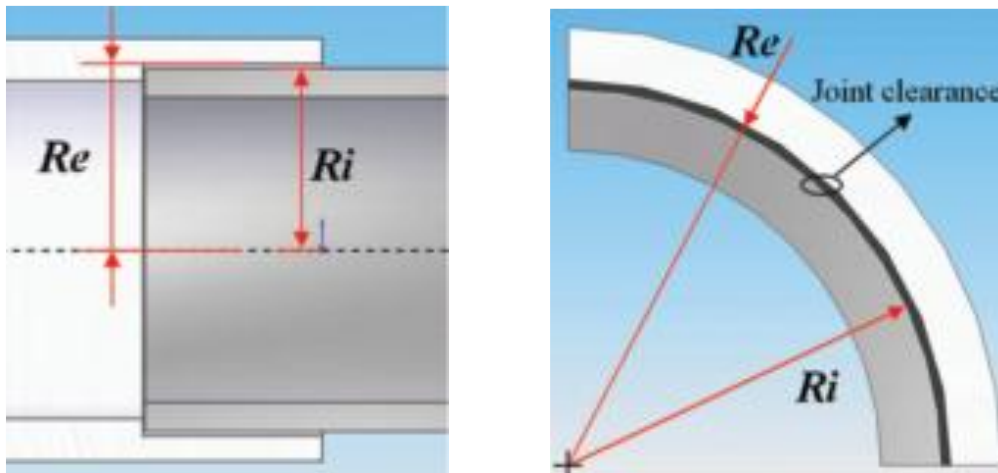
BRAZING FILLER-METAL SYSTEM	JOINT CLEARANCE	
	mm	in.
AL-SI ALLOYS <sup>(A)</sup>	0.15-0.61	0.006-0.024
MG ALLOYS	0.10-0.25	0.004-0.010
CU	0.00-0.05	0.000-0.002
CU-P	0.03-0.13	0.001-0.005
CU-ZN	0.05-0.13	0.002-0.005
AG ALLOYS	0.05-0.13	0.002-0.005
AU ALLOYS	0.03-0.13	0.001-0.005
NI-P ALLOYS	0.00-0.03	0.000-0.001
NI-CR ALLOYS <sup>(B)</sup>	0.03-0.61	0.001-0.024
PD ALLOYS	0.03-0.10	0.001-0.004

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως το σύστημα διαστέλλεται κατά τη θέρμανση και το κενό στη συγκόλληση μπορεί είτε να μεγαλώσει, είτε να κλείσει με το χρόνο, όσο το filler λιώνει και μετακινείται. Επιθυμητό είναι να σχεδιάζεται έτσι ο σύνδεσμος, ώστε να εκτίθεται το στερεοποιημένο filler σε θλιπτικές τάσεις και όχι σε εφελκυστικές. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στο brazing διότι οι θερμοκρασίες συγκόλλησης είναι υψηλές αυξάνοντας τη συνολική θερμική διαστολή.

Οι αποστάσεις στη συγκόλληση έχουν ιδιαίτερη σημασία όταν η σύνδεση σχεδιάζεται σε θερμοκρασία δωματίου. Στην πραγματικότητα η απόσταση συνδέσμου δεν παραμένει σταθερή σε όλες τις φάσεις της συγκόλλησης. Στην αρχή, πριν την έναρξη του brazing, θα έχει μία αρχική τιμή, κατά τη θερμοκρασία brazing μία άλλη και στο τέλος του μία διαφορετική, ειδικά εάν υπάρξει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ του filler και των μετάλλων βάσης.

Ένα παράδειγμα της εξέλιξης τιμών στην απόσταση συνδέσμου δίνεται στην παρακάτω μελέτη κατά την οποία έγινε brazing μεταξύ ενός ανοξείδωτου χάλυβα 304 (AISI) με εσωτερική διάμετρο  $R_{e0}$  ως εξωτερικός σωλήνας και ενός 1020 (AISI) χάλυβα με εξωτερική διάμετρο  $R_{i0}$  ως εσωτερικός σωλήνας. (D.G.STROPPIA, 2010) Έτσι η απόστασή τους βρίσκεται στα 35μm σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ σε θερμοκρασία

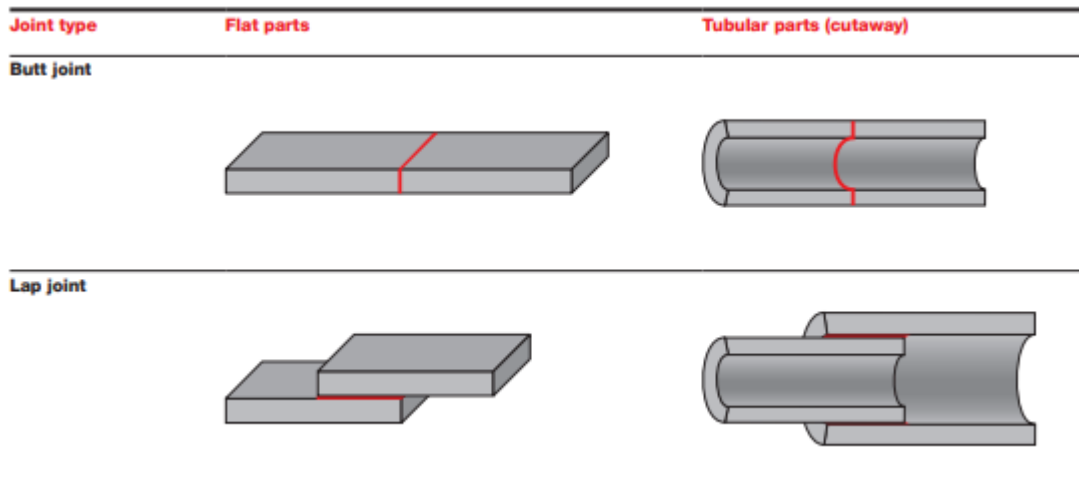
brazing αυτή αυξάνεται. Στην παρακάτω Εικόνα 5 φαίνεται σχηματικά η απόσταση συνδέσμου brazing από δύο όψεις.



*Εικόνα 5: Απόσταση συνδέσμου από πλαϊνή όψη και κάτοψη*

Οι προτεινόμενες τιμές αποστάσεων του Πίνακα 3 βασίζονται σε συνδέσεις των οποίων τα μέλη είναι παρόμοια μέταλλα με ίσες μάζες. Στην περίπτωση ανόμοιων μετάλλων ή μετάλλων με διαφορετικές μάζες που συνδέονται με brazing εμφανίζονται διάφορα προβλήματα. Η αντιμετώπισή τους απαιτεί προσεκτική επιλογή μετάλλου προσθήκης και αποστάσεων συνδέσμου.

Αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνδεσης στο brazing, η επιλογή του τύπου στηρίζεται πάνω σε δύο βασικές κατηγορίες, τη συγκόλληση συμβολής (butt joint) και τη συγκόλληση επικάλυψης (lap joint), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Η επιλογή συνδέσμου επηρεάζεται από την κατασκευή των μερών αλλά και την αντοχή του συνδέσμου και άλλες απαιτήσεις, όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα, στεγανότητα σε πίεση και εμφάνιση. Άλλοι παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι οι τεχνικές κατασκευής, η ποσότητα παραγωγής και οι μέθοδοι τροφοδοσίας filler. Η συγκόλληση με επικάλυψη προτιμάται στο brazing ειδικά όταν τίθεται θέμα αντοχής. Για μέγιστη αντοχή το μήκος της επικάλυψης πρέπει να ισούται με τρεις ή τέσσερις φορές το πάχος του λεπτότερου μετάλλου.



*Εικόνα 6: Σχέδια συνδέσεων brazing*

#### 1.3.4.7 Θερμοκρασία και Χρόνος

Η θερμοκρασία της συγκόλλησης brazing έχει μεγάλη επιρροή στη διαβροχή και την κραμάτωση, τα οποία αυξάνονται με αντίστοιχη αύξησή της. Τα όρια στα οποία πρέπει να κυμαίνεται είναι πάνω από το σημείο τήξης του filler και κάτω από το σημείο τήξης του μητρικού μετάλλου. Συνήθως προτιμώνται χαμηλές θερμοκρασίες brazing ώστε να εξοικονομηθεί η απαιτούμενη θερμική ενέργεια, να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της θερμότητας πάνω στο μέταλλο βάσης και οι αλληλεπιδράσεις μετάλλου βάσης με μέταλλο προσθήκης και τέλος να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και των εργαλείων.

Οι υψηλές θερμοκρασίες brazing προτιμώνται σε άλλες περιπτώσεις ώστε να γίνεται χρήση filler με υψηλότερο σημείο τήξης αλλά πιο οικονομικό. Επίσης, συνδυάζονται η ανόπτηση και η θερμική κατεργασία του μετάλλου βάσης κατά το brazing, αλλά και επιτρέπει τη μεταγενέστερη κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε μεγάλες θερμοκρασίες brazing προωθείται η αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με το filler ώστε να αλλάξει η σύνθεση του τελευταίου και να αυξηθεί η ελατότητα και η θερμοκρασία επανήτηξης. Τέλος, απομακρύνονται αποτελεσματικά ακαθαρσίες επιφανείας και οξείδια όταν το brazing γίνει μέσα σε προστατευτική ατμόσφαιρα και αποφεύγεται η εργοδιάβρωση.

Η θερμοκρασία brazing επηρεάζει επίσης και τη διαβρεξιμότητα του filler. Η κραματική δράση μεταξύ μετάλλου βάσης και filler είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, του χρόνου και της ποσότητας του τελευταίου.

## **1.4 Επιθεώρηση συνδέσμων brazing**

### **1.4.1 Γενικά**

Η επιθεώρηση του ολοκληρωμένου εξαρτήματος ή υπο-εξαρτήματος είναι το τελευταίο βήμα στη διαδικασία του brazing. Παράλληλα με άλλες επιθεωρήσεις σε άλλα στάδια της συγκόλλησης, είναι απαραίτητη ενέργεια ώστε να καταλήξουμε σε ικανοποιητική και ομοιόμορφη ποιότητα τελικού προϊόντος. Η τελική επιθεώρηση αποκαλύπτει επίσης πόσο σωστά εκτελέστηκαν οι προηγούμενες ενέργειες σε σχέση με την ολική ακεραιότητα των συνδέσμων. Η επιθεώρηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα από την αρχή της διαδικασίας, που η συγκόλληση σχεδιάζεται. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όχι μόνο στην ποιότητα της κατασκευής αλλά και στην τήρηση όλων των ποιοτικών προτύπων που είναι απαραίτητα.

Η μέθοδος επιθεώρησης που επιλέγεται να αξιολογήσει το τελικό δοκίμιο εξαρτάται από τις επιχειρησιακές απαιτήσεις. Σε πολλές περιπτώσεις η μέθοδος καθορίζεται από τον τελικό χρήστη ή από ρυθμιστικούς κανόνες. Όταν εφαρμόζονται αυτοί οι κανόνες για τις συγκολλήσεις, τότε πρέπει να τηρούνται ίδια πρότυπα και στις άλλες φάσεις της κατασκευής. Η διαδικασία του brazing πρέπει να επικυρωθεί με καταστρεπτικό έλεγχο ώστε να διασφαλιστεί η ικανότητα παραγωγής συγκολλήσεων στα απαιτούμενα πρότυπα.

### **1.4.2 Επιτρεπτά όρια**

Όταν ορίζονται τα επιτρεπτά όρια για κάθε τύπο σφάλματος στη συγκόλληση brazing πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν το σχήμα, ο προσανατολισμός, η θέση στη συγκόλληση (επιφάνεια ή υπόστρωμα) και η σχέση με τα υπόλοιπα σφάλματα. Τα όρια πάντα καθορίζονται ως ελάχιστα απαιτούμενα για αποδοχή. Η κρίση για αποδοχή των ορίων αυτών στηρίζεται σε ανθρώπους ικανούς στο κομμάτι των συγκολλήσεων brazing και στα ποιοτικά πρότυπα.

Οι συνδέσεις με συγκόλληση brazing κατηγοριοποιούνται βάσει προτύπων του AWS, σύμφωνα με δύο κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο είναι οι απαιτήσεις σχεδιασμού και το δεύτερο οι συνέπειες ενδεχόμενης αστοχίας. Αυτή η κατηγοριοποίηση καθορίζει ποιες μέθοδοι επιθεώρησης και ποια όρια απαιτούνται σε κάθε περίπτωση.

Οι εσωτερικές ασυνέχειες έχουν σαφή όρια που καθορίζονται από την Αμερικάνικη Ένωση Συγκολλήσεων. Με τις μεθόδους επιθεώρησης που διαθέτουμε πρέπει το συνολικά υπολογισμένο κενό συγκόλλησης ή μη συγκολλημένη περιοχή να μην ξεπερνά το 15% της συνολικής περιοχής σύνδεσης. Επίσης, το μέγεθος του μεγαλύτερου κενού μετρημένο

παράλληλα με το πλάτος της συγκόλλησης, δεν πρέπει να ξεπερνάει το 60% του συνολικού πλάτους της συγκόλλησης. Επιπλέον, οποιαδήποτε περιοχή μεγαλύτερη από το 40% του πλάτους συγκόλλησης, δεν πρέπει να εκτείνεται κοντύτερα των άκρων της σύνδεσης από το 20% του πλάτους συγκόλλησης.

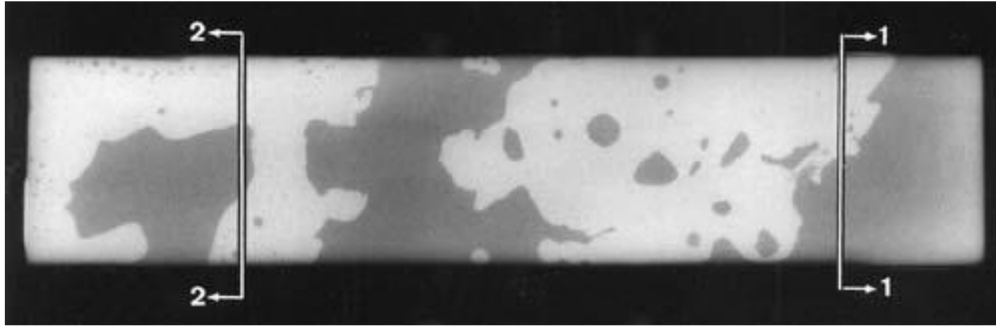
Όσον αφορά τις εξωτερικές ασυνέχειες, οι ατέλειες στη συγκόλληση brazing με μέγεθος μικρότερο των 0.38mm θεωρούνται ανεκτές. Το μέγιστο μέγεθος είναι τα 2.3mm με συνολικά υπολογισμένο μήκος μικρότερο από το 10% του μήκους του αντίτυπου. Οι ρωγμές δεν επιτρέπονται καθόλου στη συγκόλληση όπως και η αποτυχία τήξης του κράματος συγκόλλησης. Η διάβρωση του κράματος συγκόλλησης στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης είναι μη επιτρεπτή εάν ξεπερνάει το 5% του πάχους του λεπτότερου σημείου της συγκόλλησης. Επιπλέον, η ύπαρξη συλλιπάσματος ή υπολειμμάτων του είναι μη αποδεκτή, καθώς και τα κενά πλήρωσης κράματος στα άκρα της συγκόλλησης όταν είναι συνεχόμενα κατά μήκος των άκρων της σύνδεσης.

### **1.5. Ελαττώματα brazing**

Οι ασυνέχειες που εμφανίζονται στις συγκολλήσεις brazing αποδεικνύουν πως η διαδικασία δεν είχε επαρκή έλεγχο ή χρησιμοποιήθηκαν ακατάλληλες τεχνικές. Τα όρια σφάλματος της συγκόλλησης πρέπει να διευκρινίζονται, όταν γίνεται έλεγχος ασυνεχειών από εξειδικευμένο προσωπικό που κατανοεί τη λειτουργικότητα του αντικειμένου. Οι ασυνέχειες που βρίσκονται στις συγκολλήσεις αυτές καταγράφονται στη συνέχεια.

#### **Έλλειψη πλήρωσης**

Η έλλειψη πλήρωσης με τη μορφή των κενών και του πορώδους μειώνει την αντοχή της σύνδεσης μειώνοντας την ικανή περιοχή για φορτία. Αυτή η ασυνέχεια μπορεί να προκαλέσει διαρροή σε συγκολλήσεις που σχεδιάζονται για εφαρμογές με πίεση ή με υγρά. Η αιτία του φαινομένου προέρχεται από ατελές καθάρισμα των μετάλλων βάσης, υπερβολικό κενό ανάμεσα στα μέταλλα, ανεπαρκές μέταλλο προσθήκης, εγκλωβισμένα αέρια ή από κίνηση των τεμαχίων πριν τη στερεοποίηση του μετάλλου συγκόλλησης. Ένα μεγάλο κενό σε συγκόλληση brazing με lap joint φαίνεται στην Εικόνα 7, όπου οι ασυνέχειες οφείλονται είτε σε ατελή θέρμανση, είτε σε μη ορθή τοποθέτηση συλλιπάσματος. Η σωστή διευθέτηση αυτών των παραγόντων οδηγεί σε πλήρη ροή του υγρού μετάλλου μέσα στη συγκόλληση.



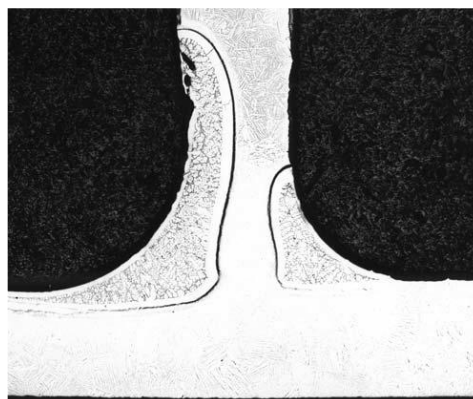
*Εικόνα 7:Ραδιογραφία συγκόλλησης που υποδεικνύει κενά*

### **Εγκλωβισμός συλλιπάσματος**

Το εγκλωβισμένο συλλίπασμα μπορεί να βρεθεί σε συνδέσεις στις οποίες το ίδιο χρησιμεύει για προστασία και απομάκρυνση οξειδώσεων κατά το θερμικό κύκλο. Όταν αυτό εγκλωβιστεί εμποδίζει τη ροή του υγρού μετάλλου στην περιοχή αυτή, μειώνοντας έτσι την περιοχή σύνδεσης. Στην περίπτωση που είναι διαβρωτικό μπορεί να μειώσει το χρόνο ζωής της συγκόλλησης. Υπό κανονικές συνθήκες όμως προστατεύει από ακανόνιστη ροή του μετάλλου συγκόλλησης μέσα στη σύνδεση.

### **Διάβρωση μετάλλου βάσης**

Η διάβρωση του μετάλλου βάσης μπορεί να προκαλέσει υποκοπή ή και εξαφάνιση των επιφανειών της σύνδεσης. Αλλοιώνει επίσης την αντοχή του συνδέσμου αλλάζοντας τη σύνθεση του μετάλλου προσθήκης και μειώνει τη διατομή του μετάλλου βάσης. Αυτή η ασυνέχεια οφείλεται στη κραμάτωση του μετάλλου προσθήκης με το μέταλλο βάσης κατά τη διάρκεια του brazing. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται περίπτωση σοβαρής διάβρωσης του μετάλλου βάσης λόγω υπερθέρμανσης της συγκόλλησης κατά το brazing. Αν και η διάβρωση μπορεί να μην είναι σοβαρή σε χοντρά τεμάχια, δεν μπορεί να είναι ανεκτή σε αντίστοιχα λεπτά.



## *Εικόνα 8: Διάβρωση μετάλλου βάσης σε συγκόλληση brazing*

### **Ρωγμάτωση**

Οι ρωγμές μειώνουν την αντοχή της συγκόλλησης όπως και την διάρκεια ζωής της. Ακόμα, επιδρούν ως ενισχυτές των τάσεων και μπορούν να προκαλέσουν πρόωμη αστοχία κάτω από κυκλική καταπόνηση, καθώς και να μειώσουν τη στατική αντοχή της συγκόλλησης. Τα αίτια των ρωγματώσεων είναι η λανθασμένη θέρμανση της συγκόλλησης, είτε χαμηλότερη είτε υψηλότερη από την προβλεπόμενη.

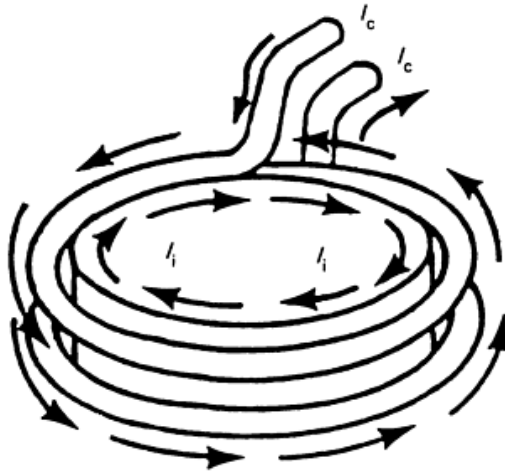
## **1.6 Συγκόλληση μεσαίων θερμοκρασιών με επαγωγική μέθοδο (induction brazing)**

### **1.6.1 Γενικά περί induction brazing**

Η συγκόλληση μέσης θερμοκρασίας με επαγωγή είναι μία διαδικασία που ενώνει τα μεταλλικά μέρη ώστε να σχηματιστεί μία συνδεσμολογία. Αυτό επιτυγχάνεται με επιλεκτική θέρμανση της περιοχής σύνδεσης σε θερμοκρασία συγκόλλησης, με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται από επαγωγό, ο οποίος ενεργοποιείται από θερμική γεννήτρια. Το είδος αυτό ανήκει στις συγκολλήσεις brazing διότι οι σύνδεσμοι κατασκευάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες των 540°C ή παραπάνω, χρησιμοποιώντας κράματα χαλκού που συχνά περιέχουν άργυρο.

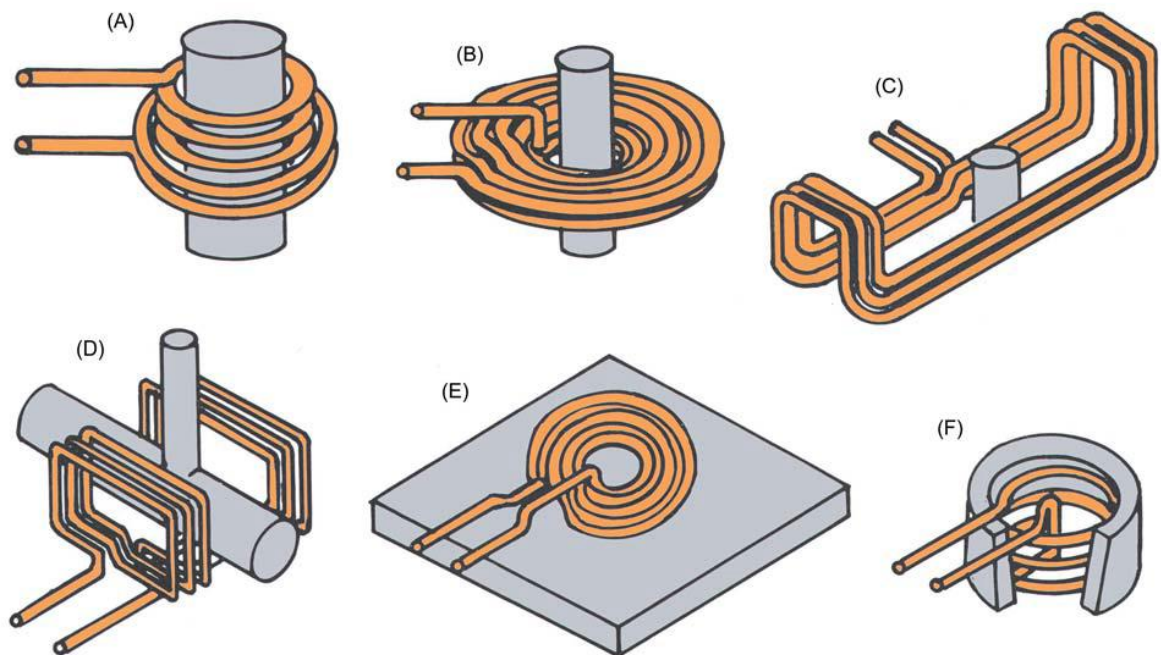
Η θέρμανση προέρχεται από αντίσταση στη ροή επαγόμενου ρεύματος στα μέρη της συνδεσμολογίας. Αυτό συμβαίνει όταν τα ηλεκτρικά αγωγά μέταλλα τοποθετούνται μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από ταχεία εναλλασσόμενο ρεύμα στον επαγωγό. Η διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 9. Με χρήση κατάλληλου πηνίου, η θέρμανση συμβαίνει γρήγορα στη συγκόλληση παρέχοντας τοπικές θερμοκρασίες brazing. Η ανταπόκριση της συνδεσμολογίας στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξαρτάται από τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος και τη φύση των υλικών που θερμαίνονται, όπως και από το σχήμα των τεμαχίων και το σχέδιο πηνίου. Τα μη μαγνητικά υλικά με χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση, όπως ο χαλκός και ο ορείχαλκος χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να θερμανθούν από τα μαγνητικά σιδηρούχα υλικά, όπως ο χάλυβας.





*Εικόνα 9: Η σχέση του ρεύματος πηνίου  $I_c$  με το επαγόμενο ρεύμα δοκιμίου  $I_i$*

Καθώς ένα δυνατό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και η υψηλή πυκνότητα ρεύματος μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες τοπικά θερμοκρασίες, οι περισσότερες εφαρμογές brazing χρησιμοποιούν σχετικά χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Έτσι, διασφαλίζουν πως η περιοχή συγκόλλησης θα θερμανθεί ομοιόμορφα. Αυτό επηρεάζεται βέβαια από τον επαγωγό και το σχέδιο του πηνίου. Η Εικόνα 10 παρουσιάζει έξι διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί ένα επαγωγικό πηνίο να κατασκευαστεί και να τοποθετηθεί, ανάλογα με τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθεί.



*Εικόνα 10: Σχέδια πηνίων για induction brazing*

### 1.6.2 Εφαρμογές induction brazing

Η συγκόλληση μέτριας θερμοκρασίας με επαγωγή χρησιμοποιείται όπου απαιτούνται υψηλής αντοχής συνδέσεις και με αντοχή σε θερμοκρασίες. Η αντοχή της συγκόλλησης εξαρτάται από το σχεδιασμό της σύνδεσης, το κράμα συγκόλλησης, την αντοχή των μετάλλων που συνδέονται και την απόσταση μεταξύ τους. Μία απόσταση των 0,038 με 0,050mm συνίσταται. Ο τύπος αυτός συγκόλλησης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην παραγωγή καταναλωτικών και βιομηχανικών προϊόντων, δομικών εξαρτημάτων, ηλεκτρονικών προϊόντων, εξοπλισμό γεώτρησης, χειρωνακτικά εργαλεία και εξαρτήματα αεροναυπηγικής.

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης αυτής είναι η γρήγορη θέρμανση που παράγει συνδέσεις σε δευτερόλεπτα, αφού κάθε περιοχή της σύνδεσης εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του πηνίου. Επίσης, σχηματίζονται ομοιόμορφες και αξιόπιστες συνδέσεις που μπορούν να κατασκευαστούν βήμα-βήμα με μαλακά μέταλλα, περιορίζοντας ανάγκη για τελική κατεργασία. Μεγάλος αριθμός συνδέσεων μπορούν να κατασκευαστούν σε ένα θερμικό κύκλο, αφού το πηνίο είναι ικανό να διαδώσει θερμότητα ταυτόχρονα, σε πολλά σημεία του συστήματος τεμαχίων. Η επαγωγική μέθοδος παρέχει έλεγχο της θερμότητας και ταχεία θέρμανση, τα οποία περιορίζουν τη θερμική ζώνη της συγκόλλησης, με αποτέλεσμα την προστασία από αλλοίωση των ιδιοτήτων των προηγουμένως θερμικά επεξεργασμένων ή ψυχρά κατεργασμένων υλικών.

Το brazing με επαγωγή κάνει χρήση προκαθορισμένης ποσότητας κράματος, με μορφή δαχτυλιδιού, λωρίδας ή κόνεως. Έτσι, η πιθανότητα να περισσέψει υλικό ελαχιστοποιείται και το κόστος του κράματος συγκόλλησης μειώνεται. Η ταχεία θέρμανση αποτρέπει την οξείδωση και τον αποχρωματισμό στις περισσότερες περιπτώσεις, ακόμα και χωρίς τη χρήση προστατευτικής ατμόσφαιρας.

Οι περιορισμοί του brazing με επαγωγή είναι αρχικά η δυσκολία της θέρμανσης περίπλοκων εξαρτημάτων, όπως και η ανάγκη για σχετικά ομοιόμορφες αποστάσεις μεταξύ των μετάλλων. Επιπλέον, το κόστος του αρχικού εξοπλισμού είναι μεγάλο και υπάρχει ανάγκη για εξειδικευμένη γνώση πάνω στο σχεδιασμό του συστήματος. Τέλος, για περίπλοκα εξαρτήματα με πολλά σημεία συγκόλλησης και περίπλοκη γεωμετρία η επαγωγική μέθοδος μπορεί να αποδειχτεί δύσκολη, ενώ η μέθοδος του φούρνου πιο αποτελεσματική.

### **1.6.3 Εξοπλισμός brazing με επαγωγή**

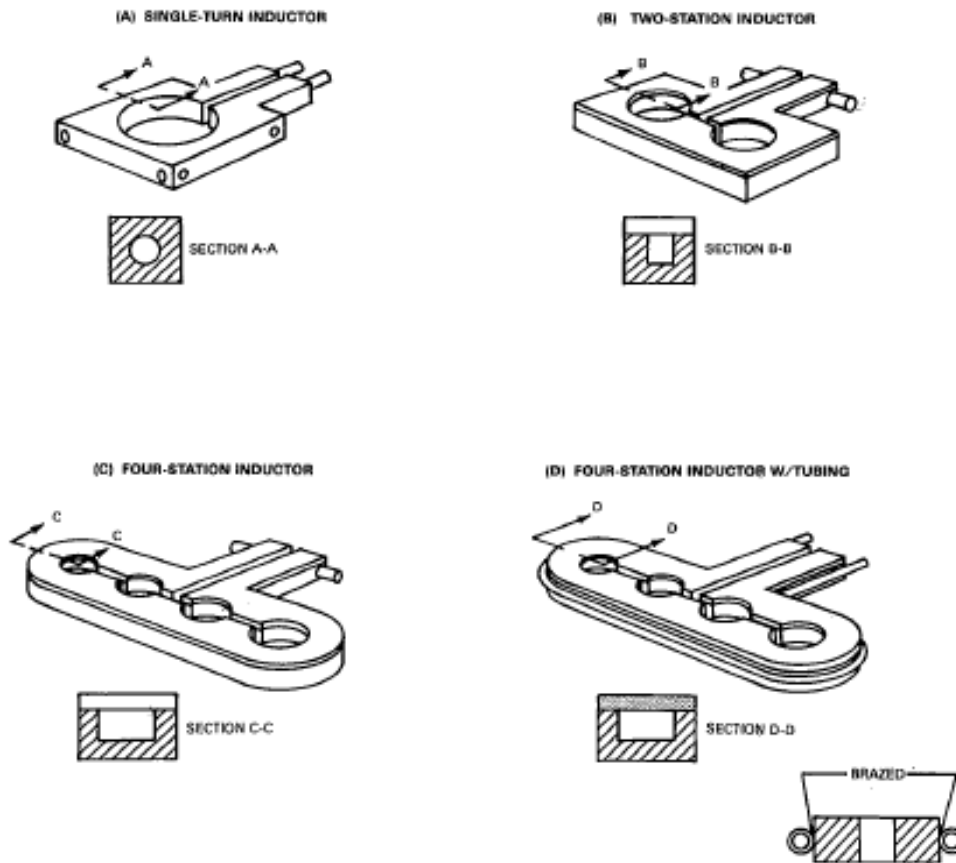
Η επιτυχής συγκόλληση brazing με επαγωγή απαιτεί κατάλληλη διανομή θερμοκρασίας σε όλα τα στελέχη της σύνδεσης. Αυτό εξαρτάται από το σχέδιο του πηνίου, το ρυθμό θέρμανσης, την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των υλικών που συγκολλώνται και τις μάζες τους. Ακόμα, ένα επιτυχές brazing εξαρτάται από την επιλογή κατάλληλου μετάλλου προσθήκης και συλλιπάσματος, εάν χρειάζεται.

#### **Πηνίο επαγωγής**

Για την εφαρμογή κατάλληλης θερμότητας σε συγκεκριμένο σύνδεσμο brazing από το επαγωγικό πηνίο, σημαντικό ρόλο παίζει η εμπειρία και ο πειραματισμός. Τα πηνία κατασκευάζονται από χάλκινα κυλινδρικά τεμάχια, με διάμετρο 3/16 μέχρι 3/8 in σε διάμετρο. Μπορούν επίσης να έχουν τετράγωνη διατομή ανάλογα και με τη διαμόρφωση των μετάλλων που συγκολλούνται, την ηλεκτρική ροή στο πηνίο και τις απαιτήσεις σε ψύξη με νερό. Τα σχέδια των πηνίων ποικίλουν από ένα αποτελεσματικό εξωτερικό σωληνοειδές σχήμα μέχρι ένα εσωτερικό πηνίο. Υπάρχουν βέβαια πολλές παραλλαγές σε σχήματα, μεγέθη, περιγράμματα, αριθμό σπειρών, απόσταση σπειρών και σε υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Πρακτικά τα πηνία σχεδιάζονται για κάθε διαφορετική περίπτωση.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται εκτός από μονές βάσεις στήριξης και πολλαπλές βάσεις επαγωγών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.

Όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας, εξαρτάται αποκλειστικά από την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που σχηματίζεται από κυκλοφορόντα ρεύματα μέσα στο πηνίο. Ο αριθμός σπειρών του πηνίου ανά μονάδα μήκους, η απόσταση μεταξύ τους και η απόσταση πηνίου και μετάλλου καθορίζουν τη δύναμη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι, μικρές ρυθμίσεις μπορούν να αλλάξουν το θερμικό ίχνος, όπως είναι οι αλλαγές στις αποστάσεις μεταξύ των σπειρών και στο εξάρτημα.



*Εικόνα 11: Επαγωγοί από χαλκό: (Α) Μονός, (Β) Διπλός, (Γ) Τεσσάρων θέσεων με εσωτερική ψύξη, (Δ) Τεσσάρων θέσεων με εξωτερική ψύξη*

### Ηλεκτρική γεννήτρια

Η θερμοκρασία στην περιοχή συγκόλλησης επηρεάζεται αρκετά από το ρυθμό θέρμανσης. Ο ρυθμός εξαρτάται από το μέγεθος της γεννήτριας και την ικανότητα ελέγχου του εναλλασσόμενου ρεύματος στο πηνίο. Γενικά, χαμηλή ισχύς μειώνει το ρυθμό θέρμανσης και παρέχει χρόνο μέσω θερμικής αγωγής να εξισορροπήσουν οι θερμοκρασίες της περιοχής συγκόλλησης. Οι πιο κοινές πυκνότητες ρεύματος είναι από 0.5 μέχρι 1.5 kW/in<sup>2</sup>. Οι χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες περιπτώσεις αλλά με περιορισμένη παραγωγή. Το μέγεθος της γεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος και τη μάζα των μετάλλων που θα συγκολληθούν.

Υπάρχουν τρεις τύποι γεννητριών, η γεννήτρια με μοτέρ, η στερεού τύπου και με ταλαντωτή. Οι στερεού τύπου δουλεύουν σε συχνότητες μέχρι 10kHz και διαθέτουν εξωτερικές συχνότητες μέχρι 50kHz. Οι γεννήτριες με ταλαντωτή λειτουργούν σε συχνότητες από 150 μέχρι 450kHz και είναι χρήσιμες σε συγκολλήσεις τεμαχίων με μικρή διατομή.

#### 1.6.4 Μέταλλα προσθήκης σε induction brazing

Το μέταλλο προσθήκης στη συγκόλληση brazing τήκεται μεταξύ των δύο επιφανειών που ενώνονται. Στην αγορά είναι διαθέσιμα πολλά filler με δυνατότητα να συνδέσουν ποικίλα υλικά και να προσδώσουν ειδικά χαρακτηριστικά. Οι βασικές απαιτήσεις για ένα μέταλλο προσθήκης είναι:

- Η ικανότητα να διαβρέχεται και να κραματώνεται με τις επιφάνειες που συνδέεται
- Να τήκεται σε θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία τήξης των μετάλλων
- Να φέρει κατάλληλη ρευστότητα ώστε να ρέει μέσα στο σύνδεσμο με τριχοειδή δράση
- Κατάλληλη αντοχή, ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντίσταση σε διάβρωση μέσα στη συγκόλληση ώστε να ικανοποιεί μηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες της εφαρμογής

Με την επαγωγική μέθοδο μπορούν να συνδεθούν πολλά διαφορετικά μέταλλα, όπως ανθρακοχάλυβες, ανοξείδωτοι χάλυβες, χυτοχάλυβες και πολλά άλλα. Τα αργυρούχα κράματα προσθήκης χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για τη συγκόλληση με επαγωγή σιδηρούχων και μη σιδηρούχων κραμάτων. Τα πιο κοινά filler στο brazing φαίνονται στον Πίνακα 4.

**Πίνακας 4:** Αργυρούχα μέταλλα προσθήκης σε συγκόλληση brazing με επαγωγή

AWS Classification	Composition, %					Temperature, F		
	Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Solidus	Liquidus	Brazing
BAg-1....	44-46	14-16	14-18	23-25	...	1125	1145	1145-1400
BAg-2....	34-36	25-27	19-23	17-19	...	1125	1295	1295-1550
BAg-3....	49-51	14.5-16.5	13.5-17.5	15-17	2.5-3.5	1170	1270	1270-150
BAg-5....	44-46	29-11	24-26	...	...	1225	1370	1370-155

Το εύρος θερμοκρασιών συγκόλλησης brazing με επαγωγή είναι από 621 μέχρι 843°C. Στις θερμοκρασίες στερεοποίησης και τήξης των μετάλλων προσθήκης υπάρχει μεγάλη διαβάθμιση και αυτό μπορεί να επηρεάσει τη ρευστότητά τους. Υπάρχουν και άλλα μέταλλα προσθήκης με άργυρο ή χαλκό που δεν παρουσιάζονται αλλά χρησιμοποιούνται περιστασιακά.

Το BAg-1 filler επιτρέπει τη συγκόλληση σε χαμηλή θερμοκρασία, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και περιορίζοντας τις μεταλλουργικές διεργασίες. Το BAg-2 filler

παρουσιάζει μεγάλο εύρος τήξης, από 542 μέχρι 702°C, και χρησιμεύει στην πλήρωση πτωχών συνδέσεων.

### **1.6.5 Συλλιπάσματα brazing**

Ο καθαρισμός των μετάλλων βάσης πριν τη συγκόλληση είναι απαραίτητος για το σχηματισμό ομοιόμορφων συνδέσεων με υψηλή ακεραιότητα. Οι επιφάνειες πρέπει να καθαριστούν χημικά πριν τη θέρμανσή τους, ώστε να απομακρυνθούν οξείδια και γράσα. Στο προκαθορισμένο τεμάχιο πρέπει να τοποθετηθεί συλλίπασμα (flux) αμέσως μετά, για να αποφευχθεί μόλυνση από χέρια ή οξείδωση στη συγκόλληση σε ατμοσφαιρικό αέρα.

Τα συλλιπάσματα περιέχουν φθοριούχα και αλκαλικά άλατα, κυρίως καλιούχα και χρησιμοποιούνται σε brazing με επαγωγή, ειδικά με αργυρούχα μέταλλα προσθήκης. Η μορφή τους είναι σε πάστα και απλώνονται με βούρτσα ή με ψεκάσμο. Η υγροποίησή τους και η δράση τους λαμβάνουν χώρα στους 593°C, στους οποίους διαλύουν υπολειπόμενα οξείδια και προστατεύουν τις μεταλλικές επιφάνειες που συνδέονται. Το συλλίπασμα επίσης διευκολύνει τη διαβροχή και τη ρευστότητα του κράματος συγκόλλησης, όταν υγροποιηθούν. Τέλος, πολλά από τα εμπορικά συλλιπάσματα στο brazing είναι ιδιόκτητα σκευάσματα.

### **1.7 Συγκολλησιμότητα ανοξειδωτων χαλύβων με brazing**

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες δεν είναι πιο δύσκολοι στη συγκόλληση brazing από ότι άλλοι χάλυβες. Οι μεγάλες ποσότητες χρωμίου που εμφανίζουν, σχηματίζουν στρώματα οξειδίων χρωμίου στις επιφάνειες όλων των ανοξειδωτων χαλύβων, αλλά και στρώματα οξειδίων τιτανίου που σχηματίζονται σε ανοξειδωτους χάλυβες σταθεροποιημένους με τιτάνιο, όπως ο τύπος 321 (AISI). Εάν αυτά τα οξείδια, που είναι και τα δύο πυρίμαχα, δεν αποσπαστούν επαρκώς τότε θα εμποδίσουν το μέταλλο προσθήκης να διαβρέξει το μέταλλο βάσης στη συγκόλληση. Ο σχηματισμός οξειδίων χρωμίου επιταχύνεται όταν οι ανοξειδωτοι χάλυβες θερμαίνονται σε αέρα περιβάλλοντος. Αν και το οξείδιο μπορεί να απομακρυνθεί με χημικό καθαρισμό, ένα νέο στρώμα που διακόπτει τη διαβροχή του filler θα σχηματιστεί σε συγκόλληση brazing σε αέρα. Η αρνητική επίδραση των οξειδίων στη διαβρεξιμότητα μπορεί να ανακουφιστεί με:

- Χημικό καθαρισμό των επιφανειακών οξειδίων από το χάλυβα στη θερμοκρασία δωματίου και γρήγορη θέρμανση σε θερμοκρασία brazing μέσα σε αδρανές αέριο, όπως το αργό
- Θέρμανση του χάλυβα απευθείας σε θερμοκρασία brazing μέσα σε αποξειδωτική ατμόσφαιρα, όπως σε υδρογόνο, μετά από έντονο καθαρισμό, ο οποίος χημικά ελαττώνει τα οξείδια και έτσι προωθεί τη διαβροχή
- Επικάλυψη της περιοχής σύνδεσης με χημικά ενεργό συλλίπασμα, το οποίο διαλυτοποιεί τα οξείδια, κατά τη θέρμανση στη θερμοκρασία brazing
- Θέρμανση σε κενό (μετά τον καθαρισμό), το οποίο μειώνει πολλά οξείδια, όπως το οξείδιο του χρωμίου, και προστατεύει από σχηματισμό νέων
- Απολίπανση με κατάλληλο συλλίπασμα ή ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, πριν το brazing του ανοξειδωτού χάλυβα
- Επιλογή μετάλλου προσθήκης με χαμηλό σημείο τήξης, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα οξείδωσης

### **Εγκλείσματα και επιφανειακοί ρύποι**

Στην συγκόλληση με brazing ανοξειδωτού χάλυβα, τα εγκλείσματα των μετάλλων βάσης και οι επιφανειακοί ρύποι είναι πολύ πιο επιβλαβή από την περίπτωση συγκόλλησης κοινών χαλύβων. Τα εγκλείσματα μετάλλου βάσης όπως είναι τα οξείδια, τα θειούχα και τα νιτρίδια παρεμβάλλονται στη ροή του filler. Η ροή εμποδίζεται και από τους επιφανειακούς ρύπους, οι οποίοι εμπεριέχουν λιπαντικά, όπως έλαια, γραφίτες, μολυβδένιο, δισουλφίδια και μόλυβδο, τα οποία εμφανίζονται στη διάρκεια μηχανικών κατεργασιών, τεχνικών διαμόρφωσης και εκτριβής. Άλλα υπολείμματα είναι οξείδια αλουμινίου που παράγονται είτε από αμμοβολή είτε από εκτριβή με αλουμινένιους τροχούς.

Τα χαρακτηριστικά των ανοξειδωτών χαλύβων στο brazing μπορούν επίσης να επηρεαστούν από ακατάλληλη σύνδεση των μετάλλων, όπως είναι ο γραφίτης ή από προστατευτική ατμόσφαιρα που περιέχει άζωτο. Ο άνθρακας σε μορφή γραφίτη συνδέεται με υδρογόνο προς σχηματισμό μεθανίου, το οποίο προσδίδει άνθρακα στον χάλυβα και χειροτερεύει την αντίσταση σε διάβρωση.

Στα συστήματα brazing που η αντοχή σε διάβρωση είναι σημαντική πρέπει να παίρνονται μέτρα προστασίας από ευαισθητοποίηση σε περικρυσταλλική διάβρωση. Αυτό το πρόβλημα συμβαίνει όταν μη σταθεροποιημένες φάσεις ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα διατηρούνται σε θερμοκρασίες στο εύρος των 427-815°C και αποψύχονται αργά. Ο περίσσιος άνθρακας συνδέεται με το χρώμιο και κατακρημνίζεται στους κόκκους ωστενίτη. Έτσι, η περιβάλλουσα περιοχή στερείται του χρωμίου και γίνεται ευαίσθητη σε διάβρωση.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προστασίας ή ελαχιστοποίησης των βλαπτικών αποτελεσμάτων της κατακρήμνισης καρβιδίων. Αρχικά, η αντίδραση εξαρτάται από το χρόνο, άρα μπορεί να αποφευχθεί διατηρώντας σύντομο θερμικό κύκλο συγκόλλησης. Με μικρό χρονικό κύκλο brazing, όπως με πυρσό ή επαγωγική μέθοδο σε μικρά στελέχη, ακόμα και ασταθείς φάσεις συγκολλώνται δίχως να διαβρώνονται. Δεύτερον, η ευαισθησία σε κατακρήμνιση αυξάνεται με την αύξηση περιεκτικότητας σε άνθρακα. Έτσι, ο τύπος 304 είναι βελτιωμένος σε σχέση με τον 302 και με χαμηλό άνθρακα, όπως ο 304L είναι ανθεκτικότερος στην κατακρήμνιση.

Όσον αφορά τον τύπο 321 είναι σταθεροποιημένος χάλυβας αλλά έχει ελαφρώς χαμηλή αντίσταση σε διάβρωση, σε σχέση με τον τύπο 347 και είναι δυσκολότερος σε brazing λόγω του τιτανίου Ti που χρησιμοποιείται ως σταθεροποιητικό καρβιδίων. Όταν χρησιμοποιούνται filler με υψηλό σημείο τήξης, τα κατακρημνισμένα καρβίδια μπορούν να διαλυθούν με θερμική κατεργασία μετά το brazing. Διαφορετικά, η αντοχή σε διάβρωση ανακτάται με διάχυση χρωμίου στην ευαισθητοποιημένη περιοχή. Η ενδεικτική θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας σταθεροποίησης είναι 954-1177°C.

Όλοι οι χρωμονικελιούχοι χάλυβες είναι ευαίσθητοι σε εργοδιάβρωση όταν εκτίθενται σε τήγματα μετάλλων προσθήκης σε τεταμένες καταστάσεις. Το υγρό filler εισχωρεί στο μέταλλο βάσης ανάμεσα στους κόκκους στα σημεία των τάσεων, παράγοντας αδύναμη δομή. Οι τάσεις μπορεί να είναι παραμένουσες από ψυχρή κατεργασία ή από φορτία που ασκήθηκαν κατά τη διάρκεια του brazing. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, τα τεμάχια πρέπει να απαλλαγθούν από τις τάσεις, είτε πριν είτε κατά τον θερμικό κύκλο της συγκόλλησης. Τέλος, τα μέταλλα πρέπει να συγκρατούνται με τρόπο που να μην αναπτύσσονται θερμικές ή μηχανικές τάσεις κατά τη συγκόλληση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη της συγκόλλησης με επαγωγικό πηνίο (induction brazing) ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα Z10CNT18-10 (τύπου 321, κατά AISI). Οι συγκολλήσεις έγιναν με τη χρήση δύο διαφορετικών κραμάτων Ag, τύπου AMS 4770 (AWS BAg-1A) και AMS 4772 (AWS BAg-13). Στο πρώτο κράμα συγκόλλησης η θερμοκρασία συγκόλλησης έφτασε τους 635°C και στο δεύτερο κράμα τους 900°C.

Ο ανοξειδωτός χάλυβας Z10CNT18-10 είναι ωστενιτικός ανοξειδωτός χάλυβας ο οποίος χρησιμοποιείται στον κινητήρα M53-P2 του Mirage 2000. Συγκεκριμένα, γίνεται συγκόλληση brazing με επαγωγή μεταξύ ενός ίσιου κυλινδρικού δοκιμίου που αποτελεί την εισαγωγή αέρα και δύο άλλων κυλινδρικών ανομοιομορφων τεμαχίων που αποτελούν την έξοδο του θερμού αέρα από τον χώρο του θαλάμου καύσης. Η διαμόρφωση γίνεται καλύτερα κατανοητή στην Εικόνα 12 που φαίνεται το περίβλημα του θαλάμου καύσης, όπου εδράζεται η εξαγωγή του αέρα.

Η συγκόλληση brazing έγινε στην EAB, ενώ οι μετέπειτα έλεγχοι μικροδομής και οι στοιχειομετρικές αναλύσεις στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, της σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τρόπος συγκόλλησης λόγω της γεωμετρικής ακεραιότητας που προσδίδει και των λιγοστών παραμενουσών τάσεων. Αφού πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις στα δύο δοκίμια αεροπορικού χάλυβα, στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας έγιναν εργασίες κοπής δοκιμίων, λείανσης και στίλβωσης με σκοπό την ανάλυσή τους στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).



*Εικόνα 12: Άποψη του εξαρτήματος και του ακροφυσίου (βέλος)*

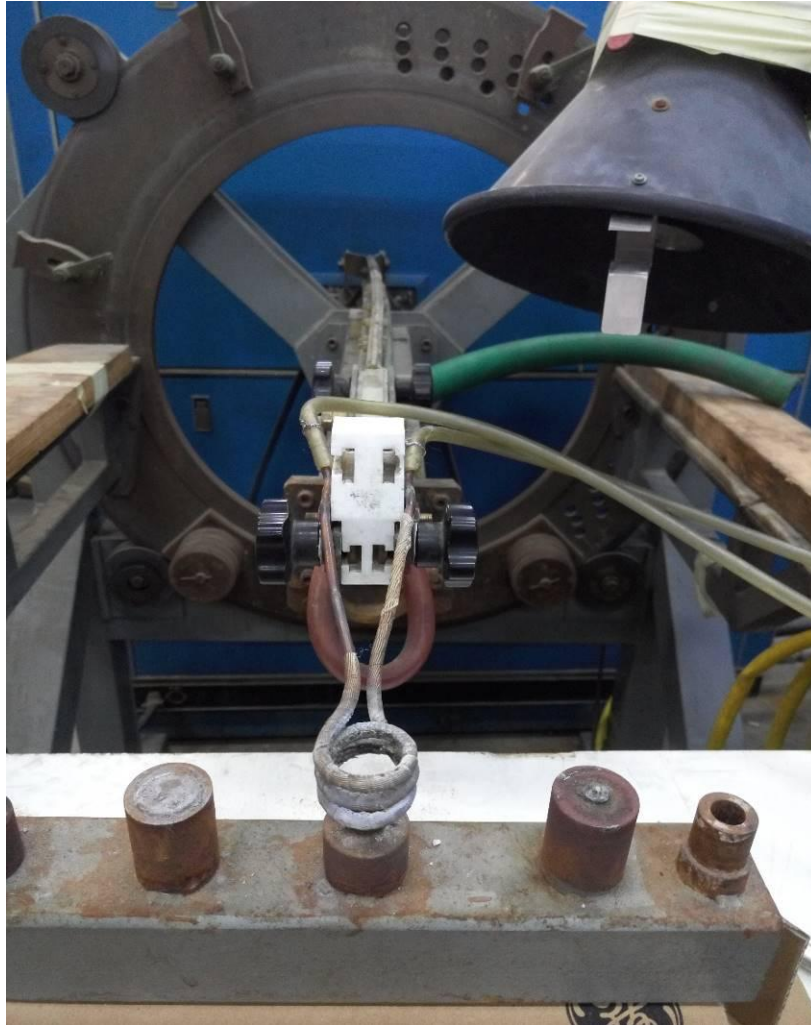
### **2.1.2 Πειραματικός εξοπλισμός**

Η επιτυχής συγκόλληση brazing με επαγωγή απαιτεί κατάλληλη διανομή της θερμότητας σε όλα τα μέρη της συγκόλλησης. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το σχέδιο του πηνίου, το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων που συνδέονται και τις μάζες τους. Επιπλέον, ένα καλό brazing εξαρτάται και από την επιλογή του κατάλληλου μετάλλου προσθήκης (filler) και συλλιπάσματος (flux).

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες δεν είναι δύσκολοι συγκολλησιμοί, αλλά στην περίπτωσή μας που περιέχει Τι απαιτούνται περαιτέρω προφυλάξεις ώστε να προστατευθεί από οξειδώσεις κατά τον κύκλο συγκόλλησης. Η ποιότητα των συνδέσμων εξαρτάται από την επιλογή τύπου brazing, τη θερμοκρασία της συγκόλλησης, το filler μέταλλο και τον τύπο συλλιπάσματος. Οι επιλογές αυτές πρέπει να είναι συμβατές με το σκοπό χρήσης του τεμαχίου που συγκολλάται.

### **Πηνίο brazing**

Από πολλές απόψεις, το σχέδιο του πηνίου επαγωγής για να παρέχει κατάλληλη θέρμανση στο σημείο της συγκόλλησης είναι θέμα εμπειρίας και πειραμάτων. Στο brazing του πειράματος χρησιμοποιήθηκε πηνίο από χαλκοσωλήνα όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.



*Εικόνα 13: Πηνίο induction brazing*

Η διάταξη έχει τη μορφή ενός πολύ αποτελεσματικού εξωτερικού σωληνοειδούς πηνίου. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξωτερικά του πηνίου είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό στο εσωτερικό του. Η επαγωγική βάση όπως φαίνεται είναι πολλαπλών θέσεων, κατασκευασμένη από χαλκό και περιέχει οπές για την κυκλοφορία του νερού ως ψυκτικό. Η συναρμογή αυτή βασίστηκε για τη μορφολογία της στη δύναμη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται μέσα στο πηνίο. Η δύναμη αυτή υπαγορεύεται από τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους, την απόσταση μεταξύ τους και την απόσταση μεταξύ πηνίου και τεμαχίου.

### **Μηχανή συγκόλλησης**

Η θερμοκρασία της συγκόλλησης μπορεί να επηρεαστεί αρκετά από τον ρυθμό θέρμανσης. Ο ρυθμός εξαρτάται από το μέγεθος της γεννήτριας και την ικανότητα ελέγχου του εναλλασσόμενου ρεύματος στο πηνίο. Η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε είναι η

LEPEL high frequency, με τάση ρεύματος μέχρι 380V, ένταση 88A και τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Η χαμηλή ισχύς γενικά μειώνει το ρυθμό θέρμανσης και παρέχει χρόνο ώστε με θερμική αγωγή να εξισορροπήσουν οι θερμοκρασίες στην περιοχή της συγκόλλησης. Η λανθασμένη επιλογή του επιπέδου ισχύος της γεννήτριας προκαλεί πρόβλημα στο brazing, με πιο συνηθισμένο την ταχύτατη θέρμανση του τεμαχίου. Θεωρώντας πως βασικός στόχος είναι οι θερμοκρασίες των επιφανειών των μετάλλων συγκόλλησης και του filler να είναι ομοιόμορφες, εφαρμόστηκαν χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης στις συγκολλήσεις μας. Η ποσότητα της ισχύος (kW) που απαιτείται στη συγκόλλησή μας εξαρτάται πάντα από τη συμμετρία των δοκιμίων και το υλικό τους. Στην περίπτωση μας που λεπτός σωλήνας συγκολλάται με επικάλυψη σε άλλον κυλινδρικό σωλήνα, η χαμηλή θέρμανση παρέχει τον απαραίτητο χρόνο ώστε η θερμότητα να διαμορφωθεί ομοιόμορφα στη συγκόλληση. Η βέλτιστη μεταφορά επιτυγχάνεται όταν η αντίσταση εξόδου της πηγής ισούται με την αντίσταση εισόδου στο πηνίο. Παρόλα αυτά, το brazing δεν πρέπει να εκτελεστεί βιαστικά, διότι οι χάλυβες μας έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή αντίσταση.



*Εικόνα 14: Lepel high frequency*

### **Μέταλλο προσθήκης**

Στο brazing λαμβάνει μέρος τήξη του μετάλλου προσθήκης (filler) μεταξύ των επιφανειών των μετάλλων συγκόλλησης. Η λειτουργία του είναι να προσφέρει μεταλλουργικό δέσιμο στις επιφάνειες των μετάλλων. Τα fillers μπορούν να βρίσκονται σε μεγάλη ποικιλία

σχημάτων, μεγεθών και κραμάτων ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους (Detty, 2014). Η επιλογή χρήσης συγκεκριμένου κράματος και σχήματος εξαρτάται κυρίως από τα μέταλλα βάσης που συγκολλούνται και το περιβάλλον που αυτά θα εκτεθούν.

Τα fillers που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα έχουν ως βασικό μέταλλο κράματος τον Ag και είναι τύπου AMS 4770 (Bag-1A) και AMS 4772 (Bag-13). Οι στοιχειομετρικές τους αναλύσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 5:**Filler metals

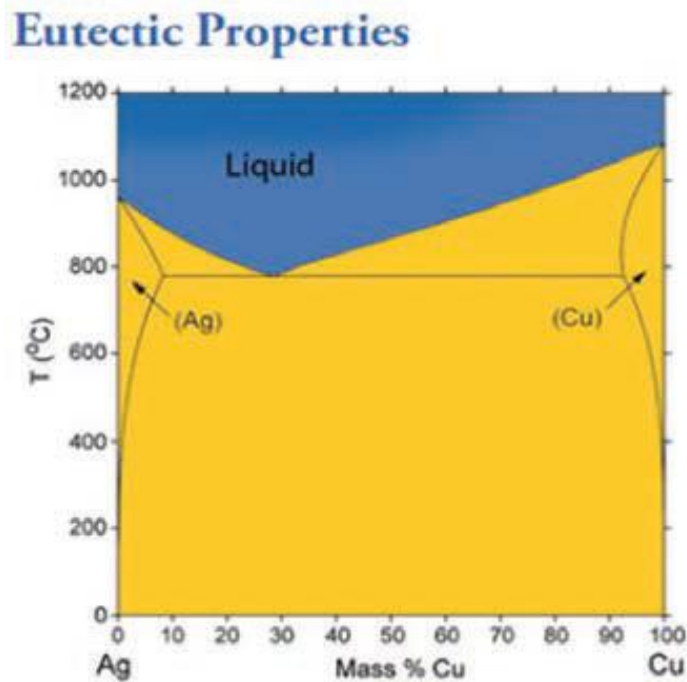
<b>FILLER</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Ni</b>	<b>Άλλα στοιχεία</b>
AMS 4770	50	15,5	16,5	18	-	0,15
AMS 4772	54	40	5	-	1	0,15

<b>FILLER</b>	<b>Solidus Temperature °C</b>	<b>Liquidus Temperature °C</b>	<b>Brazing temperature °C</b>
AMS 4770	630	635	635-760
AMS 4772	720	860	860-970

Η ομάδα των BAg fillers είναι η πιο διαδεδομένη στο brazing ανοξειδωτων χαλύβων. Τα filler που χρησιμοποιήσαμε περιέχουν μεγάλες ποσότητες Ag και Cu, με αποτέλεσμα να έχουν ευτηκτικές ιδιότητες. Αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 15, στην οποία για περιεκτικότητες 15,5% και 40% σε Cu η θερμοκρασία τήξεως του κράματος μειώνεται αισθητά. Οι συνδέσεις που γίνονται με brazing και χρήση αργυρούχων fillers δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Η προτεινόμενη ανώτατη θερμοκρασία είναι 370°C και οι ανοχές στο σύνδεσμο είναι μεγάλες, με διαμετρική απόσταση των μετάλλων να κυμαίνεται μεταξύ 0,038 και 0,050 mm.

Το filler AMS 4770 παρατηρούμε ότι έχει χαμηλή θερμοκρασία συγκόλλησης, πράγμα που ελαχιστοποιεί την καταναλισκόμενη ενέργεια και περιορίζει τις μεταλλουργικές αλλαγές στα μέταλλα βάσης. Επιπλέον, θα μειωθεί το φαινόμενο της οξειδωσης στο σύνδεσμο και θα σχηματιστούν υπολείμματα συλλιπάσματος που είναι πιο επιρρεπή στην απομάκρυνσή τους. Το ίδιο filler παρουσιάζει στενά όρια θερμοκρασίας τήξης, δηλαδή 630-635°C, πράγμα το οποίο βοηθάει στη καλή ροή του. Στο μέταλλο προσθήκης AMS 4772 η προσθήκη νικελίου (Ni) βοηθάει στη σωστή διαβροχή και βελτιώνει τη σύνδεση όταν συγκολλάται ανοξειδωτος χάλυβας με άλλον ανοξειδωτο.

Επειδή η συγκόλλησή μας γίνεται μεταξύ δύο ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων το κράμα AMS 4770 κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης θα βρεθεί μέσα στην θερμοκρασιακή περιοχή ευαισθητοποίησης των 540 με 870°C. Παρόλα αυτά, το άλλο κράμα συγκόλλησης AMS 4772 με θερμοκρασιακό εύρος brazing 860-970°C δεν πέφτει στη περιοχή ευαισθητοποίησης. Το δεύτερο κράμα έχει liquidus στη θερμοκρασία των 860°C, σε αντίθεση με το 4770 με αντίστοιχη θερμοκρασία στους 635°C. Στην περιοχή αυτή συμβαίνουν φαινόμενα κατακρήμνισης καρβιδίων του Cr στο μέταλλο βάσης, που επηρεάζουν αρνητικά την αντίσταση σε διάβρωση του μετάλλου. Η κατακρήμνιση όμως εξαρτάται από τη διάρκεια της θέρμανσης και τη θερμοκρασία, αφού λίγα λεπτά παραμονής δεν θα εντείνουν το φαινόμενο. Επίσης, ο χάλυβας του πειράματος είναι σταθεροποιημένος με Ti οπότε διασφαλίζεται η αυξημένη αντοχή στη διάβρωση.

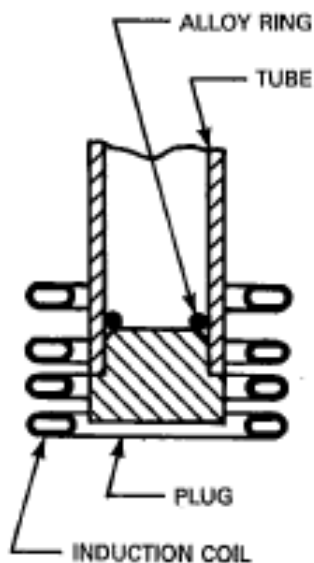


*Εικόνα 15:Ευτηκτικές ιδιότητες Ag και Cu (Daly, 2013)*

Τα fillers παρατηρούμε πως περιέχουν Zn και Cu με αποτέλεσμα σε περίπτωση υπερθέρμανσης ή θέρμανσης με μεγάλη διάρκεια να προκληθεί εκτεταμένη διείσδυση των στοιχείων αυτών στους κόκκους, οδηγώντας σε ψαθυροποίηση της συγκόλλησης. Το κάδμιο Cd προστίθεται στο filler για να μειώσει τη θερμοκρασία τήξεως και να βελτιώσει τη διαβροχή. Το Cd και Zn δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε προστατευμένες ατμόσφαιρες και το Cd δημιουργεί τοξικά αέρια από την εξάτμισή του. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία αυτά αυξάνουν την συγκολλησιμότητα του χάλυβά μας.



Τα μέταλλα προσθήκης προ-τοποθετήθηκαν μέσα στην συγκόλληση με τρόπο που παρουσιάζεται στις Εικόνες 16 και 17. Το μέταλλο προσθήκης δεν σχημάτισε κλειστό κύκλο στην τοποθέτησή του για καλύτερα αποτελέσματα με την επαγωγική μέθοδο. Στις συγκολλήσεις που εκτελέστηκαν, τα μέταλλα προσθήκης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν και τα δύο με βάση τον άργυρο (Ag). Αυτό το δεδομένο περιορίζει τις συνθήκες λειτουργίας του τελικού προϊόντος σε μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 370°C.



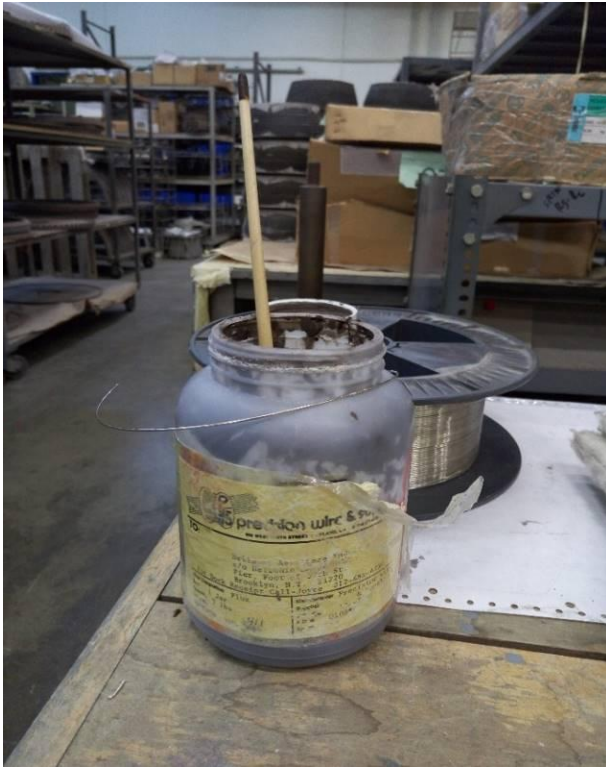
*Εικόνα 16: Σχέδιο συνδεσμολογίας brazing με επαγωγή, με προτοποθέτηση filler*



*Εικόνα 17: Τοποθέτηση filler πριν το brazing*

### **Το συλλίπασμα (flux)**

Η πρωταρχική λειτουργία του συλλιπάσματος είναι να προστατέψει τις μεταλλικές επιφάνειες των δοκιμίων που συγκολλούνται και το μέταλλο συγκόλλησης από την οξείδωση κατά τη θέρμανση. Στη συγκόλληση brazing που εκτελούμε δίχως προστατευτική ατμόσφαιρα είναι απαραίτητη η χρήση του. Ο τύπος flux που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην ομάδα των FB3-A,-F,-G σύμφωνα με την τυποποίηση του AWS (American Welding Society) και περιείχε βόρακα και φθόριο. Το θερμοκρασιακό του εύρος είναι 570-870°C και είναι κατάλληλο για συγκολλήσεις brazing με αργυρούχα fillers. Παρακάτω παρατίθεται η Εικόνα 18 του συλλιπάσματος που πήρε μέρος στο brazing, καθώς και στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η τοποθέτησή του με βούρτσα.



*Εικόνα 18: Συλλιπάσμα brazing*



*Εικόνα 19: Τοποθέτηση συλλιπάσματος πριν την έναρξη brazing*

### **2.1.3 Πειραματική διαδικασία**

Η πειραματική διαδικασία περιγράφεται σε έξι βήματα, τα οποία είναι:

1. Κατάλληλος σχεδιασμός της σύνδεσης αφήνοντας απόσταση μεταξύ των δύο μετάλλων μεταξύ 38 και 50μm, για ομαλή ροή του κράματος συγκόλλησης μέσω τριχοειδούς δύναμης
2. Καθαρισμός των επιφανειών των υλικών σύνδεσης, δηλαδή των ανοξειδωτων χαλύβων με μηχανικά μέσα και συγκεκριμένα με υαλοβολή
3. Εφαρμογή συλλιπάσματος και στις δύο επιφάνειες
4. Προσαρμογή των μετάλλων βάσης με το μέταλλο προσθήκης και τοποθέτησή τους εσωτερικά του πηνίου
5. Θέρμανση των μετάλλων μέχρι να επιτευχθεί ροή του μετάλλου συγκόλλησης
6. Καθαρισμός του συνδέσμου συγκόλλησης για απομάκρυνση όλων των υπολειμμάτων συλλιπάσματος



Τα δύο ζευγάρια δοκιμίων από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα τύπου Z10CNT18-10 προετοιμάστηκαν για τη συγκόλληση brazing, αφού πρώτα λειάνθηκαν στις άκρες με υαλοβολή και καθαρίστηκαν από ακαθαρσίες και οξείδια. Τα δοκίμια φαίνονται στην Εικόνα 20.



*Εικόνα 20: Δοκίμια προς συγκόλληση*

Η σύνδεση των ελασμάτων έγινε με επικάλυψη του τεμαχίου εξόδου αέρα στο τεμάχιο εισόδου. Αυτό φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 21.



*Εικόνα 21: Μορφολογία δοκιμίων συγκόλλησης με επικάλυψη του σωλήνα εισαγωγής από ακροφύσιο εξαγωγής*

Η διαδικασία συγκόλλησης σε μέση θερμοκρασία με επαγωγικό πηνίο εφαρμόστηκε δύο φορές με διαφορετικό κράμα συγκόλλησης η κάθε μία. Το εξειδικευμένο προσωπικό αφού πήρε όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας ξεκίνησε τη διαδικασία συγκόλλησης. Τα Μέσα Ατομικής Προστασίας ήταν γάντια ασφαλείας, προστατευτική μάσκα αναπνοής και ειδικά προστατευτικά γυαλιά, λόγω των συχνοτήτων λειτουργίας της γεννήτρια ρεύματος και της εφαρμογής της συγκόλλησης σε εξωτερικό περιβάλλον. Αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 22.



*Εικόνα 22: Προστατευτική μάσκα, γάντια ασφαλείας και προστατευτικά γυαλιά*

Η γεννήτρια μετέδωσε εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο και με επαγωγή το ρεύμα μεταδόθηκε στη συγκόλληση. Η θερμοκρασία της συγκόλλησης έφτασε τους 635°C στην περίπτωση του AMS-4770, ενώ για το AMS-4772 τους 900°C, με αποτέλεσμα να γίνει τήξη του filler και όχι του χάλυβα. Η θερμοκρασία των 900°C είναι αρκετά υψηλή για να μην λάβει μέρος ευαισθητοποίηση του οστενιτικού χάλυβα, αλλά αρκετά χαμηλή ώστε να μην προκαλέσει διάσπαση καρβιδίων του τιτανίου. Στις παρακάτω φωτογραφίες απεικονίζεται η τήξη του filler και η άνοδος θερμοκρασίας της γύρω περιοχής.



*Εικόνα 23: Έναρξη brazing*

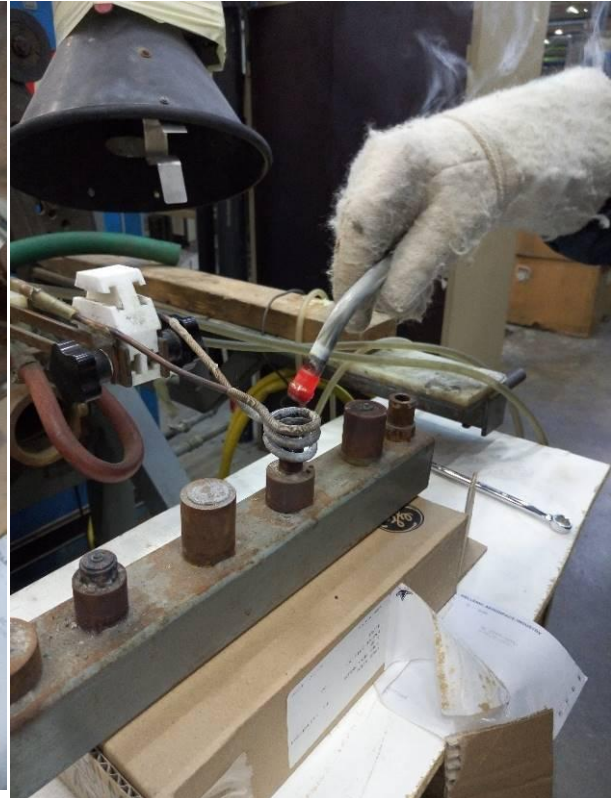


*Εικόνα 24: Στα 3sec της συγκόλλησης*

Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης είχε διάρκεια 10sec. Κατά τη διάρκεια του brazing λειτουργούσε απαγωγός αέρα κωνικού σχήματος πάνω από το δοκίμιο, λόγω των εξατμίσεων επικίνδυνων καυσαερίων όπως του καδμίου (Cd) και του ψευδαργύρου (Zn). Κατά την έναρξη της διαδικασίας το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στην περιοχή του πηνίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23, σε ίσες αποστάσεις από αυτό. Στα 3 sec παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας και εμφάνιση έντονου ερυθρού χρώματος στο σημείο της συγκόλλησης (Εικόνα 24). Στο χρονικό σημείο των 6 sec η θερμοκρασία φτάνει στο μέγιστο σημείο της και συνοδεύεται με εξάτμιση όλης της ποσότητας συλλιπάσματος. Στα 10 sec της συγκόλλησης έχουμε το τέλος της διεργασίας, κατά το οποίο η γεννήτρια δεν δημιουργεί πλέον επαγωγικό ρεύμα. Το δοκίμιο μας απομακρύνεται από την περιοχή του πηνίου και αφήνεται σε θερμοκρασία δωματίου για απόψυξη (Εικόνα 26). Μετά το brazing το εξάρτημα υπέστη απόψυξη για τη στερεοποίηση του filler και έκπλυση με νερό για απομάκρυνση των υπολειμμάτων συλλιπάσματος και οξειδίων.



*Εικόνα 25: Στα 6sec της συγκόλλησης  
brazing*



*Εικόνα 26: Στο τέλος της συγκόλλησης*

## **2.2 Κοπή-Εγκιβωτισμός-Λείανση-Στίλβωση**

Για τη δυνατή εξέταση των συγκολλήσεων με τεχνικές ηλεκτρονικής μικροσκοπίας θα πρέπει να προηγηθεί διαδικασία η οποία θα φέρει την επιφάνεια του υλικού σε μία κατάσταση που να επιτρέπεται η παρατήρησή του. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την κοπή των δοκιμίων σε δύο ίσα τεμάχια, τον εγκιβωτισμό τους, τη λείανση και τη στίλβωσή τους.

### **2.2.1 Κοπή**

Για την κοπή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ειδικό μηχάνημα κοπής μετάλλων με δίσκο κοπής που είναι κατάλληλος για σκληρά μέταλλα. Κατά τη διάρκεια της κοπής λάμβανε χώρα ταυτόχρονα πλύση των δοκιμίων με νερό, με σκοπό την ψύξη καθώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εμφανίζονται σπινθήρες και αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Τα τελικά κομμένα δοκίμια φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 27.





*Εικόνα 27: Τελικά δοκίμια μετά την κοπή*

### 2.2.2 Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή των δειγμάτων με δίσκο, τα δοκίμια που προέκυψαν ήταν αρκετά μικρού μεγέθους ώστε ο χειρισμός να καθίσταται δύσκολος. Έτσι, τα δοκίμια εγκιβωτίζονται για καλύτερη διατήρηση των άκρων τους και για να εμποδιστεί η αποκόλληση επιφανειακών επιστρωμάτων. Ο εγκιβωτισμός έγινε με ρητίνη ψυχρού εγκιβωτισμού. Πριν τον εγκιβωτισμό σε ρητίνη η επιφάνεια του δοκιμίου καθαρίστηκε από ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες ώστε να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση μεταξύ μεταλλικού δοκιμίου και ρητίνης. Η εποξική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε χρειάζεται και σκληρυντή, σε αναλογία 6 σταγόνες σκληρυντή ανά 10ml ρητίνης.



*Εικόνα 28: Εγκιβωτισμός τεσσάρων δοκιμίων*

### 2.2.3 Λείανση

Η λείανση όπως και η στίλβωση αποσκοπούν στη μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του δοκιμίου, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της δομής του. Στο στάδιο της λείανσης απομακρύνεται το επιφανειακό στρώμα του υλικού που υπέστη ζημιές κατά την κοπή. Η απομάκρυνση του υλικού γίνεται μηχανικά, με εκτριβή του τεμαχίου πάνω σε σκληρό μέσο. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται κάθετη άσκηση δύναμης με την πίεση των δαχτύλων σε συγκεκριμένο ανοικτό επίπεδο χώρο μηχανήματος Strauers Labo Pool-5, πάνω σε ειδικά χαρτιά λείανσης από καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Τα χαρτιά λείανσης χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό ο οποίος αντιστοιχεί σε διάφορες πυκνότητες (αριθμός κόκκων/in<sup>2</sup>) και έχουν τη βοήθεια του νερού, που ρίχνεται στο επίπεδό τους για διευκόλυνση της λείανσης και συνεχή καθαρισμό των χαρτιών.

Στη διαδικασία λείανσης τα ειδικά χαρτιά τοποθετούνται διαδοχικά σε περιστρεφόμενο δίσκο και λόγω φθοράς από τη χρήση πρέπει να αντικαθίστανται. Ο δίσκος περιστρέφεται στο επίπεδό του με 250 στροφές/λεπτό. Πρώτα τοποθετείται το πιο χονδρόκοκκο χαρτί και συγκεκριμένα το 220 mesh και η λείανση διαρκεί μέχρι να εξαφανιστούν όλες οι προηγούμενες κακώσεις από την επιφάνεια και να μείνουν μόνο οι γραμμές που προκαλεί το χαρτί. Στη συνέχεια τοποθετείται το επόμενο χαρτί με 400 mesh και το δοκίμιο λειαίνεται έτσι ώστε οι γραμμές λείανσης να είναι κάθετες με τις προηγούμενες. Τα χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

220→400→800→1200→2000 mesh

Όσο πιο αραιό το χαρτί από κόκκους, δηλαδή μεγαλύτερους κόκκους, τόσο βαθύτερες χαραγές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η λείανση του εκάστοτε δοκιμίου για κάθε χαρτί, πρέπει η λειασμένη επιφάνεια να καθαρίζεται με νερό, βαμβάκι και αιθανόλη, ενώ αμέσως στεγνώνεται η επιφάνεια με κατάλληλο στεγνωτήρα.



*Εικόνα 29: Λείανση δοκιμίου*

#### **2.2.4 Στίλβωση**

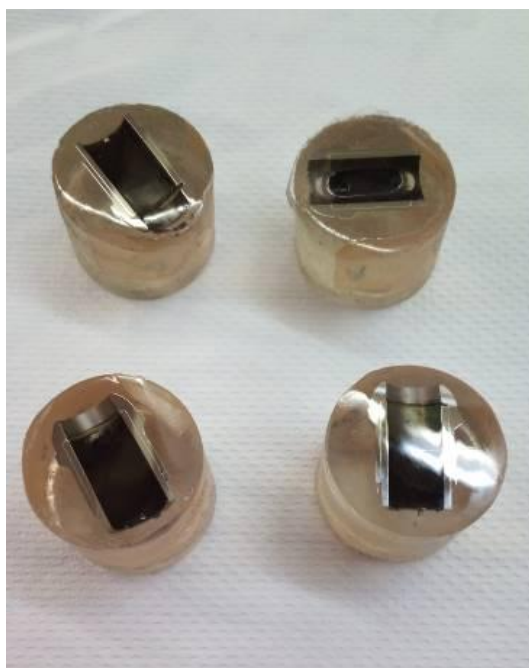
Μετά τη λείανση ακολουθεί το στάδιο της στίλβωσης για τα δοκίμια. Σκοπός της στίλβωσης είναι να λειανθεί πλήρως η επιφάνεια των δοκιμίων και να εξαφανιστούν πλήρως οι γραμμές λείανσης από το προηγούμενο βήμα. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη λείανση αλλά τώρα αντί για χαρτιά λείανσης χρησιμοποιούνται δίσκοι με ειδικό πανί, πάνω στο οποίο τοποθετούνται ειδικά αιωρήματα αποξεστικών σωματιδίων αλλά και λιπαντικό προς διευκόλυνση της στίλβωσης. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό MetaDi Fluid της εταιρείας Buehler και πάστα διαμαντιού (Buehler) μεγέθους 6μm, ενώ στη συνέχεια για πιο λεπτομερή στίλβωση χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό και πάστα διαμαντιού μεγέθους 1μm. Στην Εικόνα 30 φαίνονται οι πάστες διαμαντιού και στην Εικόνα 31 η διαδικασία στίλβωσης με το λιπαντικό. Τα δοκίμια μετά καθαρίζονται και στεγνώνονται με τον ίδιο τρόπο όπως στη λείανση και η επιφάνειά τους πρέπει να είναι σαν καθρέπτης. Στο τέλος της διαδικασίας γίνεται έλεγχος της επιφάνειας στο οπτικό μικροσκόπιο, ώστε να διαπιστωθεί ότι η επιφάνεια είναι πλήρως απαλλαγμένη από γραμμές λείανσης. Τα τελικά δοκίμια φαίνονται στην Εικόνα 32, ύστερα από το τέλος της διαδικασίας.



*Εικόνα 30: Πάστες διαμαντιού*



*Εικόνα 31: Διαδικασία στίλβωσης*



*Εικόνα 32: Τελικά δοκίμια μετά από στίλβωση*



### **2.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)**

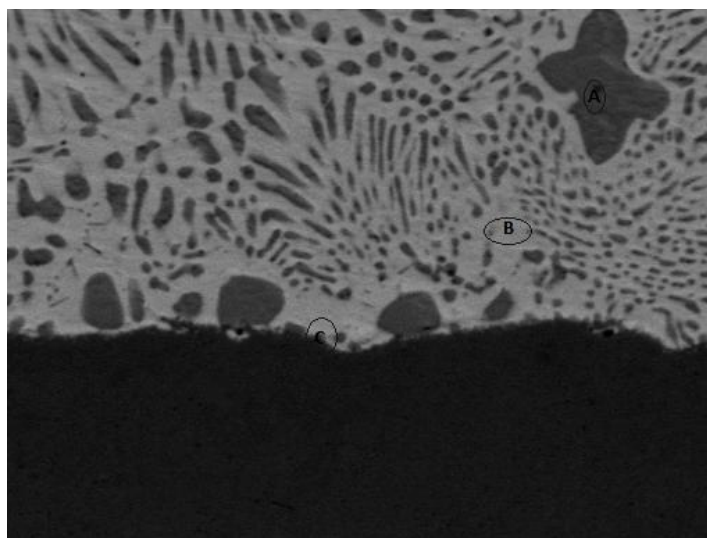
Τα τέσσερα (4) δοκίμια του πειράματος εξετάστηκαν στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, το οποίο είναι τύπου Jeol 6100 EM. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών. Η μεγάλη της χρησιμότητα αποτελεί η παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλο σύστημα μικροανάλυσης η στοιχειομετρική ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό.

Από τα αποτελέσματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου καταλήγουμε στο συμπέρασμα εάν οι συγκολλήσεις είχαν τα απαραίτητα αποτελέσματα και προδιαγραφές για να βρεθούν σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Τα όρια και οι ανοχές για τα ελαττώματα των συγκολλήσεών μας δίνονται από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (AWS) και είναι σαφή ανάλογα την περίπτωση. Ο τύπος συγκόλλησης brazing που εκτελέσαμε ανήκει στην κατηγορία A κατά την οποία οι σύνδεσμοι υπόκεινται σε υψηλές τάσεις, κυκλικές φορτίσεις και η αστοχία θα επιφέρει υψηλό κίνδυνο σε προσωπικό ή περιουσία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1 Συγκόλληση με κράμα AMS 4770

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν τέσσερα και περιλάμβαναν δύο από κάθε συγκόλληση που έγινε με διαφορετικό μέταλλο προσθήκης. Ύστερα από ανάλυση στο SEM συμπεραίνεται ότι η μικροδομή του μετάλλου προσθήκης AMS 4770 αποτελείται από τρεις φάσεις. Αυτές φαίνονται στη φωτογραφία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και καταγράφονται ως Α, Β και Γ φάση.



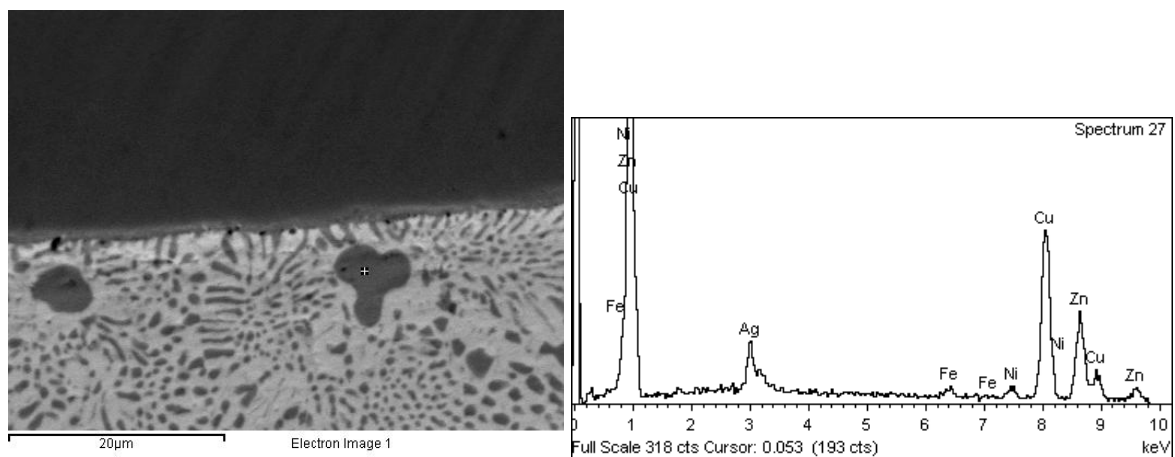
*Εικόνα 33: SEM μικρογραφία του AMS 4770 κράματος*

Στον Πίνακα 6 καταγράφεται η χημική σύσταση των τριών φάσεων, ύστερα από αναλύσεις EDS που έγιναν στα συγκεκριμένα σημεία. Οι χημικές αναλύσεις δεν γίνονται σημειακά από το μικροσκόπιο αλλά τοπικά γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος. Τα στοιχεία που αναγνωρίζονται υπάρχει πιθανότητα αθροιστικά να μην σχηματίζουν 100% κατά βάρος, λόγω ύπαρξης και άλλων στοιχείων αλλά σε αμελητέες ποσότητες που δεν υπάρχει λόγος καταγραφής.

*Πίνακας 6: Χημική σύνθεση διαφορετικών φάσεων Εικόνας 32*

Ζώνη	Φάση	Ag	Cu	Zn	Cd	Cr	Fe	Ti
A	Cu-βάση	10.5	45.3	42	1.5	-	-	-
B	Ag-βάση	62	3	8.5	25.3	-	-	-
Γ	Fe-βάση	22.5	4.7	5.1	8.5	10.8	47.7	0.5

Όπως φαίνεται στην παραπάνω μικρογραφία ο σύνδεσμος του μετάλλου συγκόλλησης AMS-4770, αποτελείται από σκούρες και ανοικτές περιοχές. Η μαύρη περιοχή που βρίσκεται στο κάτω μέρος της εικόνας αποτελεί το μέταλλο βάσης, δηλαδή τον ανοξειδωτο χάλυβα. Στην περιοχή του filler οι σκούρες περιοχές απεικονίζουν φάση πλούσια σε χαλκό, ο οποίος εντοπίζεται στο μέταλλο προσθήκης σε ποσοστό 15.5%. Στην Εικόνα 34 φαίνεται μία μικρογραφία από SEM στην περιοχή του brazing και ένα διάγραμμα χημικής ανάλυσης EDS στη πλούσια σε χαλκό περιοχή. Στο διάγραμμα EDS παρατηρείται μέγιστη περιεκτικότητα για τον χαλκό και τον ψευδάργυρο, τα οποία βρίσκονται μαζί σε υψηλά ποσοστά στην περιοχή του brazing.



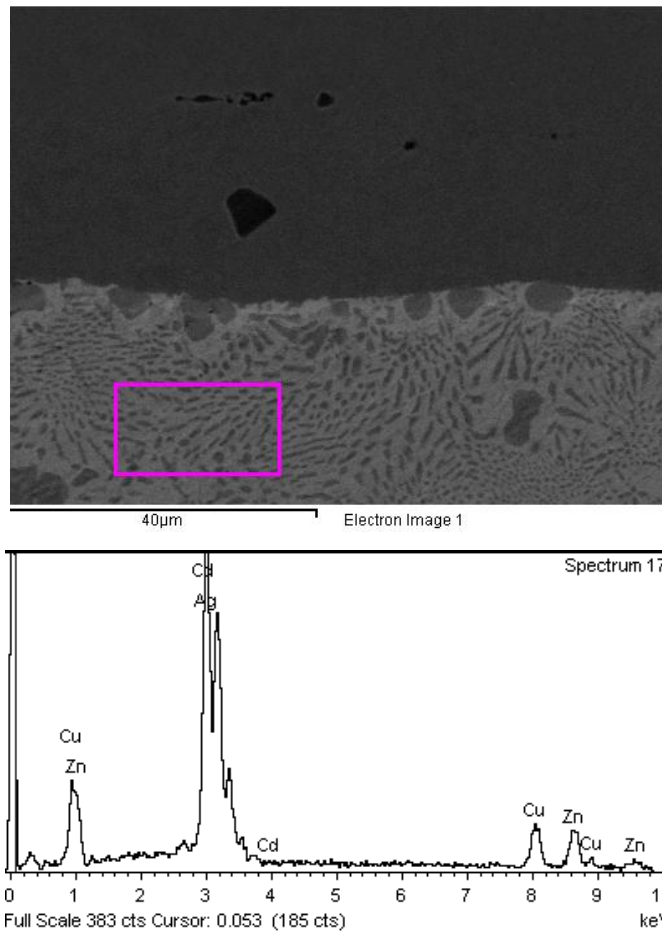
**Εικόνα 34:** SEM και EDS ανάλυση της πλούσιας σε Cu περιοχής brazing

**Πίνακας 7:** Η στοιχειομετρική ανάλυση από το διάγραμμα EDS

Στοιχείο	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag
Περιεκτικότητα%	1.16	2.05	57.82	32.33	6.63

Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές στη συγκόλληση με induction brazing υποδηλώνουν έντονη παρουσία αργύρου (Ag), ο οποίος και υπερिशύει ποσοτικά στη περιοχή του brazing. Σε μία γενική μικρογραφία SEM και μία χημική ανάλυση EDS μίας ευρύτερης περιοχής του κράματος συγκόλλησης είναι φανερή η υπερίσχυση του αργύρου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35.

Συγκεκριμένα στο διάγραμμα στοιχειομετρίας φαίνονται οι μέγιστες περιεκτικότητες να ισχύουν για τον άργυρο και το κάδμιο, τα οποία βρίσκονται μαζί στα μέγιστα στις ανοιχτόχρωμες περιοχές του brazing.



*Εικόνα 35: SEM και EDS ανάλυση ευρείας περιοχής κράματος συγκόλλησης*

Παρατηρούμε επίσης πως δεν έχουμε εκτεταμένη διάχυση των κραματικών στοιχείων του filler μέσα στο μέταλλο βάσης, αφού μόνο στα όρια της διεπιφάνειάς τους παρατηρείται το φαινόμενο αυτό. Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, η φάση Γ είναι πλούσια σε σίδηρο (Fe) και έχουμε υψηλή διάχυση του Ag από το κράμα συγκόλλησης μέσα στον χάλυβα, σε ποσοστό του 22,5%. Ενώ τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία Zn, Cu και Cd διαλύονται σε χαμηλότερο βαθμό στον ωστενιτικό χάλυβα. Παρόλα αυτά, το filler διαβρέχει σε περιορισμένη έκταση το μέταλλο βάσης και εμφανίζει στοιχειομετρική ανάλυση στα άκρα με την συγκόλληση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.

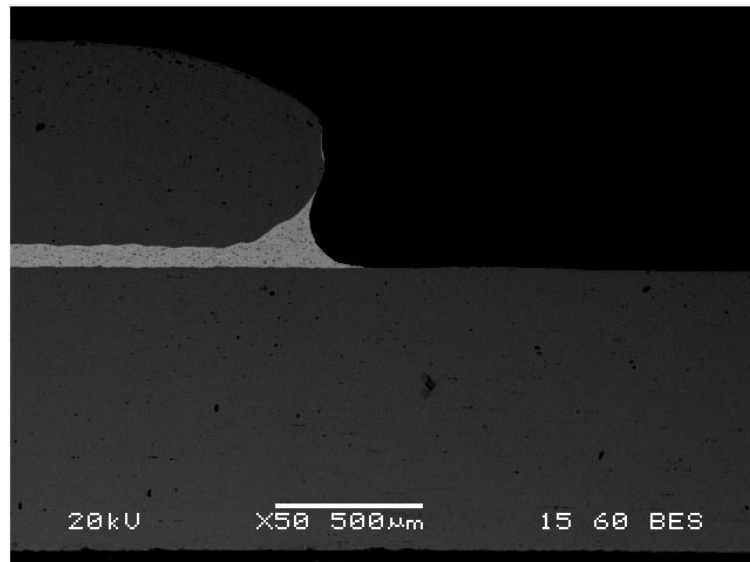
*Πίνακας 8: Στοιχειομετρία χάλυβα στην περιοχή διεπιφάνειας*

Στοιχείο	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Ag	Cd
Περιεκτικότητα%	0.5	10.8	47.7	5	5	22.5	8.5

Έτσι, διασφαλίζεται καλή ποιότητα του brazing, με χαμηλή διάχυση και διάλυση των μετάλλων μεταξύ τους. Επίσης, η θερμοκρασία φαίνεται να είναι ικανοποιητική αφού δεν εμφανίζεται οξείδωση στα άκρα της συγκόλλησης ή περικρυσταλλική διάβρωση του οστενιτικού χάλυβα.

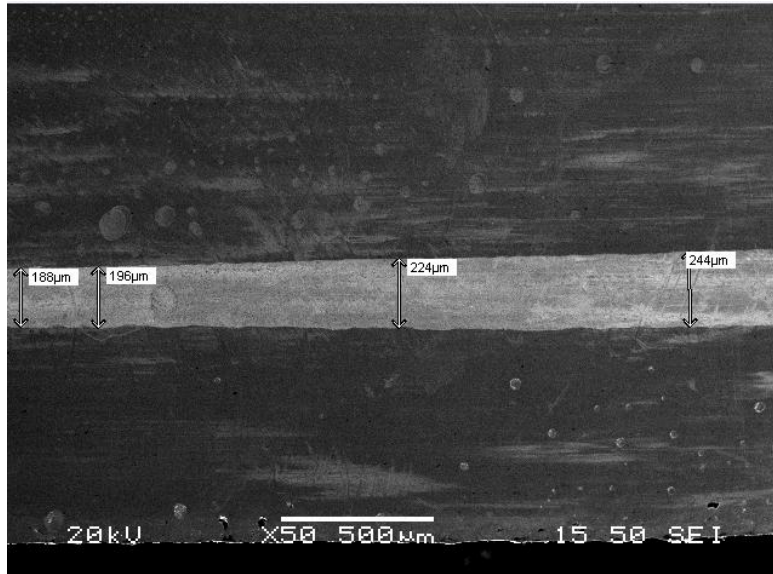
### 3.2 Σφάλματα συγκόλλησης με κράμα AMS 4770

Η συγκόλληση του κράματος AMS 4770 φαίνεται ικανοποιητική στην περιοχή αρχής της συγκόλλησης, χωρίς να παρουσιάζονται ελαττώματα. Στην Εικόνα 36 διακρίνονται δύο σαφείς περιοχές, η ανοιχτόχρωμη του μετάλλου προσθήκης και η σκουρόχρωμη του ανοξείδωτου χάλυβα. Παρόλα αυτά, δεν έχουμε εμφάνιση περικρυσταλλικής διάβρωσης στην διεπιφάνεια του χάλυβα με το filler, λόγω εκτεταμένης καρβιδίωσης του χρωμίου.



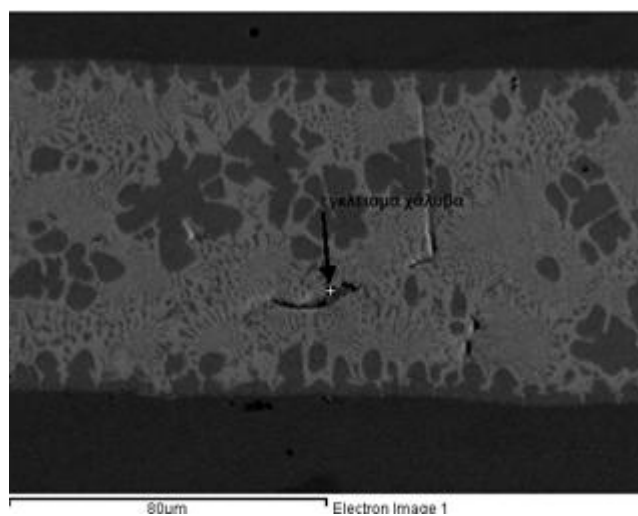
*Εικόνα 36: Μικρογραφία συγκόλλησης σε μεγέθυνση x50*

Στην παρακάτω μικρογραφία διακρίνουμε τέσσερις μετρήσεις πάχους της περιοχής του brazing. Οι μετρήσεις είναι 244µm, 224µm, 196µm και 188µm από το μεγαλύτερο πάχος προς το μικρότερο. Παρατηρείται μία σταδιακή ελάττωση πάχους, η οποία όμως δεν παρουσιάζει διάκενα ή οξειδώσεις.



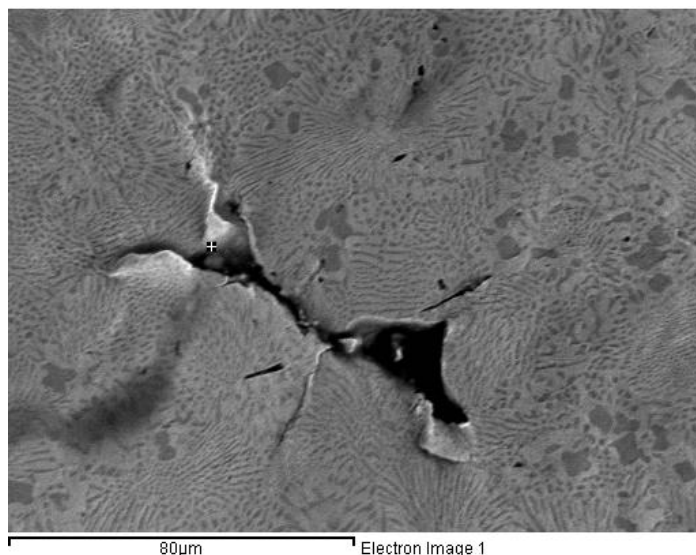
**Εικόνα 37:** Μετρήσεις πάχους κράματος συγκόλλησης

Η πρώτη ασυνέχεια της συγκόλλησης βρέθηκε μέσα στην περιοχή του κράματος συγκόλλησης και επρόκειτο για οξειδωμένο έγκλεισμα χάλυβα. Η σύσταση της περιοχής εγκλείσματος περιέχει κυρίως χημικά στοιχεία του κράματος AMS 4770 αλλά και Fe, Cr και Ni του χάλυβα. Το μέγεθος εντοπίστηκε περίπου στα 20µm και η ύπαρξη εγκλεισμάτων μέσα στο κράμα συγκόλλησης από ακαθαρσίες δεν είναι αποδεκτό φαινόμενο στην συγκόλληση. Η ακαθαρσία αυτή προέρχεται από μη επαρκή καθαρισμό των δοκιμίων συγκόλλησης, που είχε ως αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό στελέχους χάλυβα μέσα στη συγκόλληση.



**Εικόνα 38:** Έγκλεισμα χάλυβα στο κράμα συγκόλλησης

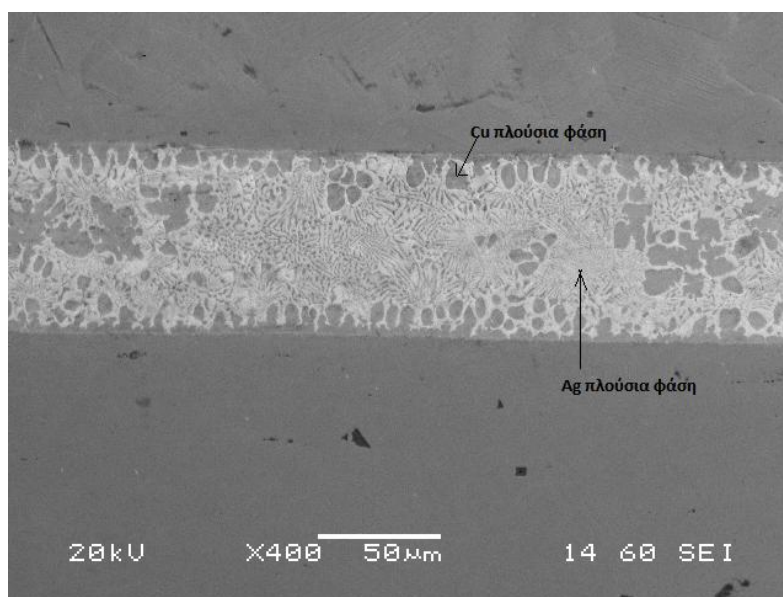
Στην παρακάτω παραμόρφωση της συγκόλλησης παρατηρήθηκαν εκτός από τα στοιχεία του filler, οξυγόνο και φθόριο. Όπως φαίνεται υπάρχει ελλιπής πλήρωση με το κράμα συγκόλλησης, αλλά και μη ικανοποιητική επιφανειακή κατάσταση της περιοχής συγκόλλησης. Επιπλέον, η στοιχειομετρική ανάλυση της περιοχής του σημείου που φαίνεται στην Εικόνα 39 αποδεικνύει παρουσία φθορίου (F) σε ποσοστό 12.5% και κάλιο (K) σε ποσοστό 1.7%, πράγμα που πιθανόν να σημαίνει εγκλωβισμό συλλιπάσματος. Ο εγκλωβισμός αυτός εμποδίζει τη ροή του filler μέσα στην περιοχή συγκόλλησης και αποδεικνύεται έντονα οξειδωτικός με παρουσία οξυγόνου 11.5%, πράγμα που μειώνει τη λειτουργική ζωή του τελικού εξαρτήματος. Τέλος, η ατέλεια αυτή είναι απαγορευτική για την ποιότητα της συγκόλλησης που επιθυμούμε.



*Εικόνα 39: Παραμόρφωση στην περιοχή του κράματος συγκόλλησης*

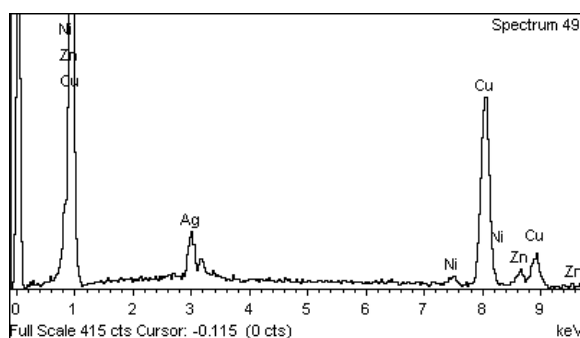
### **3.3 Συγκόλληση με κράμα AMS 4772**

Η δεύτερη συγκόλληση μέσης θερμοκρασίας με επαγωγή έγινε με χρήση κράματος AMS 4772, το οποίο δεν περιέχει κάδμιο όπως το AMS 4770, αλλά νικέλιο που βοηθάει τη διαβροχή των χαλύβων. Αρχικά παρατηρείται ίδια διαμόρφωση του κράματος συγκόλλησης με ανοιχτόχρωμες, δηλαδή πλούσιες σε Ag περιοχές και σκουρόχρωμες πλούσιες σε Cu περιοχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Το στερεοποιημένο κράμα συγκόλλησης αποτελείται από περιοχή πλούσια σε Ag και πλούσια σε Cu. Επίσης, το κράμα συγκόλλησης δεν εμφανίζει μεγάλες ή ιδιαίτερες δυσμορφίες και ακολουθεί ίδια μορφολογία στερεοποίησης με την προηγούμενη συγκόλληση, πράγμα που υποδηλώνει ομοιόμορφη θέρμανση του δοκιμίου και σωστή θερμοκρασία.

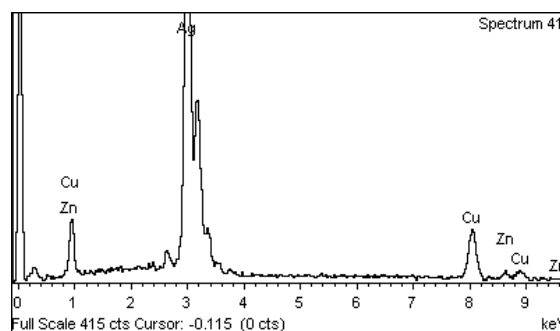


**Εικόνα 40:** Μικρογραφία SEM στη συγκόλληση του AMS 4772

Οι στοιχειομετρικές αναλύσεις με EDS των σημείων της παραπάνω Εικόνας 40 έδειξαν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Στοιχείο	Cu	Ag	Ni	Zn
Περ/τα %	81.5	9.2	2.8	6.4



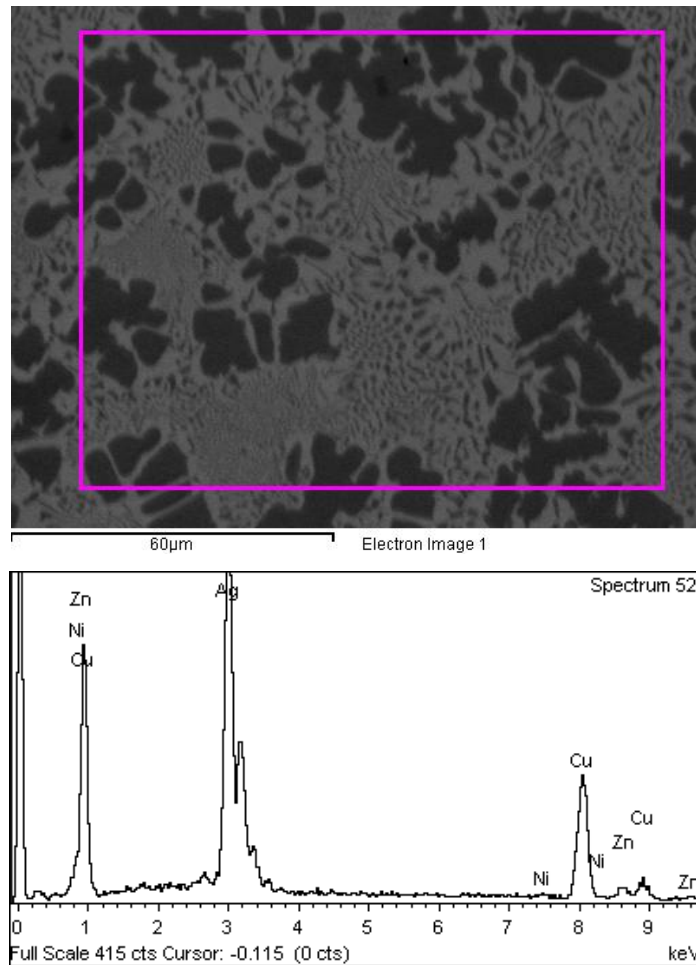
Στοιχείο	Ag	Cu	Zn
Περ/τα %	76	21	3

**Εικόνα 41:** Χημικές αναλύσεις περιοχών συγκόλλησης

Επίσης, παρατηρείται από το στοιχειομετρικό διάγραμμα της ευρύτερης περιοχής του brazing πως ο άργυρος υπερिशύει ποσοτικά του χαλκού. Συγκεκριμένα στη μικρογραφία της Εικόνας 42 φαίνεται το περίγραμμα της περιοχής που επιλέξαμε δειγματοληπτικά και δίπλα το διάγραμμα με τις περιεκτικότητες των στοιχείων. Ο άργυρος, που εμφανίζει και



μέγιστο στο διάγραμμα, βρίσκεται με ποσοστό 53.3%, ενώ ο χαλκός με 41% και ακολουθεί ο ψευδάργυρος με 4.6% και τελευταίο σε περιεκτικότητα το νικέλιο με 1%. Ακόμα, στα όρια της διεπιφάνειας πραγματοποιείται αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με το κράμα συγκόλλησης με τη διαδικασία της διάχυσης. Οι περιοχές γύρω από τις διεπιφάνειες αποτελούνται από χημικά στοιχεία και των δύο μετάλλων, αλλά δεν έχει γίνει επέκταση του φαινομένου προς το εσωτερικό της συγκόλλησης.



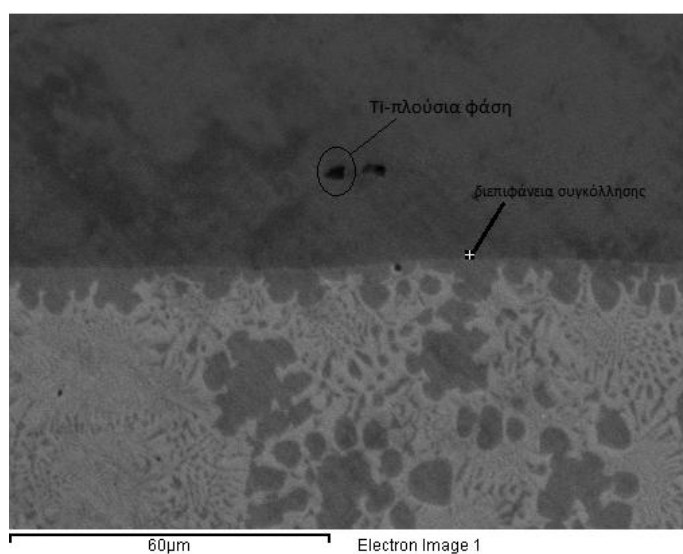
**Εικόνα 42:** Μικρογραφία SEM και ανάλυση EDS ευρύτερης περιοχής συγκόλλησης

Στην Εικόνα 42 φαίνεται η άριστη πλήρωση του κράματος συγκόλλησης στο διάκενο των μετάλλων που συνδέονται. Στην Εικόνα 43, στο σημείο της διεπιφάνειας εμφανίζονται κραματικά στοιχεία και του οστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα αλλά και του filler AMS 4772, όπως είδαμε και στην άλλη συγκόλληση. Οι φάσεις της περιοχής brazing είναι διακριτές χωρίς ελαττώματα. Αλλά στην περιοχή του χάλυβα εμφανίζεται μία έντονη σκούρα μικρή περιοχή. Ύστερα από στοιχειομετρική ανάλυση της περιοχής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9, ανιχνεύτηκαν μεγάλες ποσότητες τιτανίου, το οποίο είναι

σταθεροποιητικό στοιχείο του χάλυβα. Το τιτάνιο βλέπουμε να συνυπάρχει με το άζωτο (N), το οποίο βρίσκεται σε μεγάλη συγκέντρωση και αυτό. Είναι γνωστή η μεγάλη χημική συγγένεια των δύο χημικών στοιχείων και οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι έχουν σχηματιστεί νιτρίδια TiN.

**Πίνακας 9:** Περιεκτικότητες στην περιοχή του χάλυβα

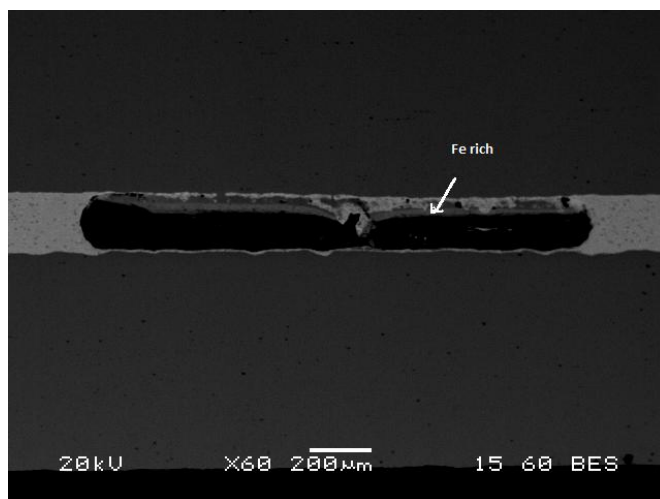
Στοιχείο	N	Ti	Cr	Fe
Περ/τα %	16.4	70.4	3.2	9.9



**Εικόνα 43:** Μικρογραφία SEM διεπιφάνειας συγκόλλησης

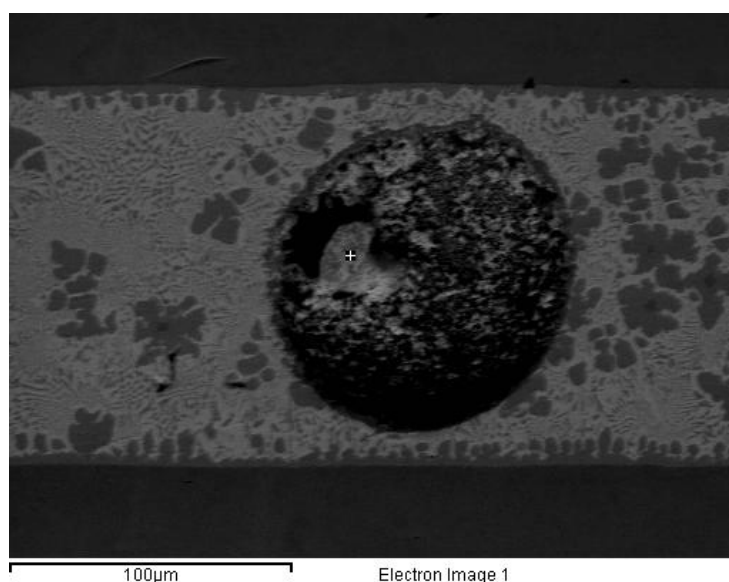
### 3.4 Σφάλματα συγκόλλησης με κράμα AMS 4772

Κατά την μεταλλογραφική ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρατηρήθηκε ατελής διείσδυση του filler (Εικόνα 44). Το διάκενο έχει μήκος εννιαπλάσιο της διατομής της συγκόλλησης, δηλαδή 1.7mm, όταν η διατομή είναι 188μm, ενώ το πλάτος της ξεπερνάει το 60% του πλάτους της συγκόλλησης. Η έκταση του σφάλματος είναι εκτός ορίων για τη συγκόλληση και παρατηρείται έντονη διάχυση του χάλυβα στην περιοχή, όπως και οξείδωση. Σε ανάλυση EDS που εφαρμόστηκε σε γειτονικό σημείο της οξείδωσης βρέθηκαν μεγάλες ποσότητες σιδήρου, καθώς και χρωμίου. Η απουσία ποσότητας κράματος συγκόλλησης μπορεί να είναι αποτέλεσμα εγκλωβισμού αέρα μέσα στο διάκενο, μη σωστού καθαρισμού ή μετακίνησης των τεμαχίων κατά τη υγρή φάση του filler.



*Εικόνα 44: Μικρογραφία SEM σε σημείο οξείδωσης*

Στη συνέχεια εμφανίζεται μεγάλου μεγέθους πορώδες που επεκτείνεται σχεδόν σε όλο το πλάτος της συγκόλλησης (Εικόνα 45). Πρόκειται για φυσαλίδα αερίων που εγκλωβίστηκαν στη λίμνη συγκόλλησης κατά τη διάρκεια στερεοποίησης. Οι πόροι αποτελούν πολύ σημαντικό πρόβλημα γενικότερα στις συγκολλήσεις και δεν είναι επιτρεπτοί αφού μπορούν να δράσουν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων ή ως θέσεις σχηματισμού ρωγμής κόπωσης.



*Εικόνα 45: Πορώδες στο κράμα συγκόλλησης*

Ένα άλλο σφάλμα που εντοπίστηκε στη συνέχεια της παρακολούθησης στο SEM βρίσκεται στην Εικόνα 46, στην οποία έχουμε ατελή διείσδυση του κράματος

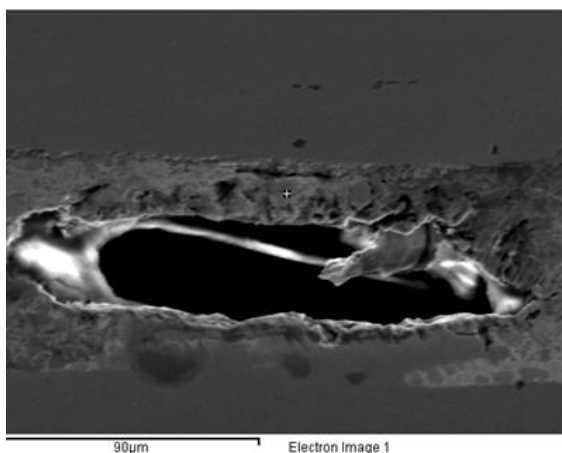
συγκόλλησης. Επίσης, σε χημική ανάλυση που έγινε στο σημείο που φαίνεται, βρέθηκαν τα κάτωθι.

**Πίνακας 10:** Χημική ανάλυση Εικόνας 45

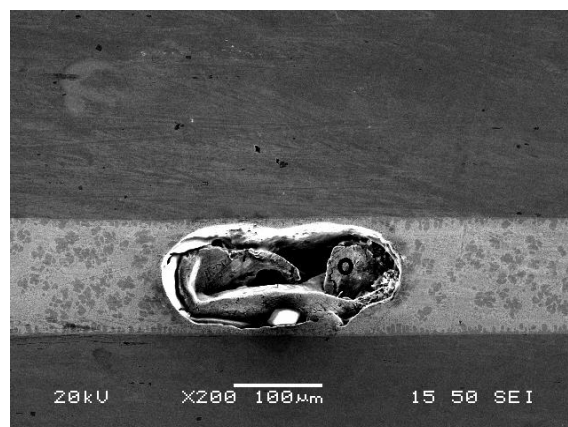
Στοιχείο	O	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag
Περ/τα %	4.4	4	6	1.9	55.9	5.75	21.94

Τα αποτελέσματα αποτελούν δείγμα μικροδιαφορισμού στην περιοχή αυτή του κράματος συγκόλλησης με κίνδυνο του τελευταίου να είναι επιρρεπές σε διάβρωση. Ο μικροδιαφορισμός της περιβάλλουσας περιοχής συνοδεύεται και από ατελή διείσδυση του κράματος. Η ατέλεια αυτή εκτείνεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 60% του πλάτους συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να είναι εκτός ορίων.

Παρόμοιο σφάλμα εντοπίζεται και στην Εικόνα 47, με ανεπαρκή σχηματισμό του μετάλλου συγκόλλησης σε όλο το πλάτος της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά, δεν εμφανίζεται διαφορισμός των μετάλλων όπως στην προηγούμενη περίπτωση, αλλά ποσοστό οξυγόνου στο 10%, πράγμα που υποδεικνύει εγκλωβισμό αερίων κατά τη στερεοποίηση. Το μέγεθος και αυτής της ατέλειας είναι αρκετά μεγάλο αφού εκτείνεται σε όλο το πλάτος σχεδόν της συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να είναι μη ανεκτό.

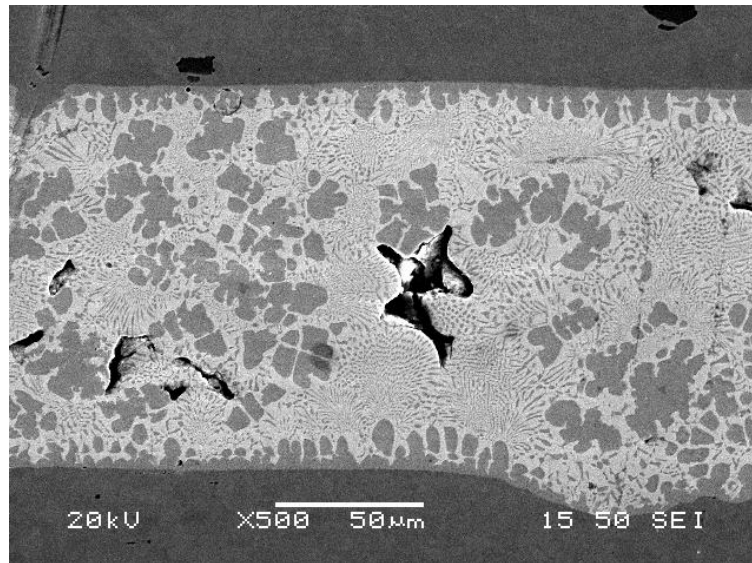


**Εικόνα 46:** Διάκενο και ελλiptής πλήρωση κράματος συγκόλλησης

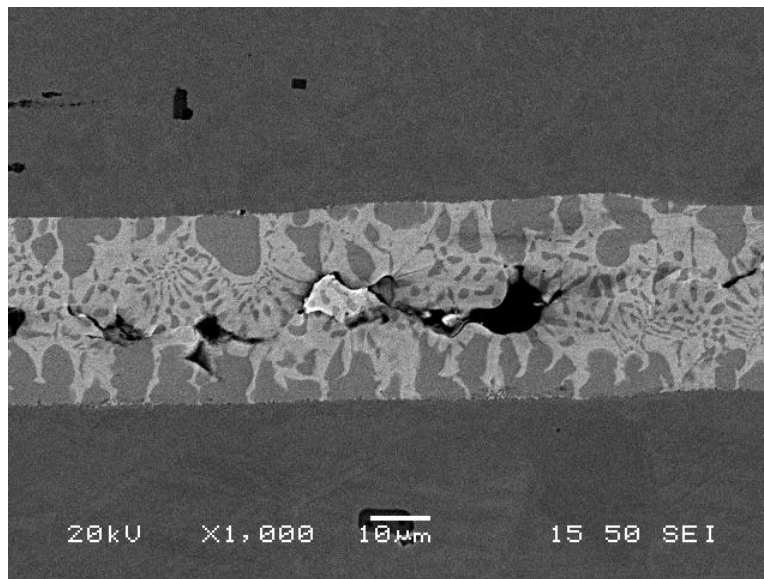


**Εικόνα 47:** Ατελής διείσδυση στο κράμα συγκόλλησης

Η συγκόλληση με το κράμα συγκόλλησης AMS 4772 παρουσίασε αρκετά επιπλέον σφάλματα στο εσωτερικό της, μερικά από τα οποία φαίνονται στις Εικόνες 48 και 49.



*Εικόνα 48: Διάκενα στο κράμα συγκόλλησης*



*Εικόνα 49: Εκτεταμένη ατελής πλήρωση κράματος συγκόλλησης*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία εκτελέστηκε συγκόλληση μέσω θερμοκρασιών με επαγωγικό πηνίο (induction brazing) ανάμεσα σε δύο κυλινδρικά τεμάχια ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα. Η πρώτη συγκόλληση επιχειρήθηκε με κράμα συγκόλλησης AMS 4770 και η δεύτερη με AMS 4772. Τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε βάσει θεωρίας βιβλιογραφίας και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

1. Εφαρμόστηκε επιτυχώς διαβροχή του μετάλλου βάσης, δηλαδή του χάλυβα στην περίπτωση του AMS 4770 κράματος συγκόλλησης. Το κάδμιο βοήθησε στη μείωση του σημείου τήξης του κράματος, όπως και στη σωστή διαβροχή του συνδέσμου.

Παρατηρείται πως η χαμηλή θερμοκρασία συγκόλλησης του AMS 4770 (635°C) συντέλεσε στην απουσία οξειδώσεων και στην ικανοποιητική πλήρωση του κράματος συγκόλλησης.

2. Στην συγκόλληση brazing του κράματος AMS 4772 παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα ατελούς τήξης του μετάλλου προσθήκης, οξειδώσεων και σχηματισμός πορώδους. Οι οξειδώσεις σε συνδυασμό με τον σχηματισμό διάκενων μέσα στη συγκόλληση οφείλεται στις μεγάλες θερμοκρασίες του brazing, οι οποίες έφτασαν και τους 900°C.
3. Τα σφάλματα της συγκόλλησης του κράματος AMS 4770 οφείλονται κυρίως σε μη επαρκή καθαρισμό των τεμαχίων πριν την εφαρμογή της σύνδεσης.
4. Η συγκόλληση κράματος AMS 4770 είναι αρκετά καλύτερη από τη συγκόλληση κράματος AMS 4772, όσον αφορά τον αριθμό των σφαλμάτων και την δυνατότητα αντιμετώπισής τους.
5. Κατά τη συγκόλληση λαμβάνει χώρα η διαβροχή κραματικών στοιχείων του κράματος συγκόλλησης μέσα στο μέταλλο βάσης, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία συγκόλλησης και τη χρονική διάρκεια.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <http://www.m3.tuc.gr/>
- (AWS), A. W. (2001). *Welding Handbook, Ninth edition, Volume 1*. United States of America.
- (FAA), F. a. (2008). *Aviation maintenance technician handbook*. Oklahoma City.
- S. H. (1963). *Metallographische Untersuchungen zur Ermittlung des Temperaturbereiches Arch. Eisenhtittenwes.*
- ASM, A. I. (1993). *WELDING, BRAZING, AND SOLDERING*. UNITED STATES OF AMERICA.
- AWS. (1991). *Brazing Handbook*. USA: American Welding Society.
- Casaroli, M. B. (2014). *Stainless steels*. Italy: Lucefin S.p.A.
- Cihal, V. (1968). *Protection of Metals (USSR)*.
- D.G.STROPPIA, T. (2010). Calculating Joint Clearance at Brazing Temperature. *Welding Journal*.
- Dahl, W. M. (1973). *Stahl und Eisen*.
- Daly, B. (2013). Basics of Brazing with Induction Heating. *Welding Journal*, 52-54.
- detty, K. k. (2014). Controlled atmosphere induction brazing brightens surface finish. *welding journal*, 58-61.
- Folkhard, E. (1988). *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. Kapfenberg, Austria: Springer-Verlag/Wien.
- H.M., S. (2017). Failure investigation of 321 stainless steel pipe to flange weld joint. *Welding Journal*.
- Hauser, D. a. (1982). Effects of ferrite content in austenitic stainless steel welds. *Welding Journal*.
- Kotecki, D. S. (1992). WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals.
- Lake, F. (1990). *Effect of Cu on stainless steel weld metal ferrite content*. AWS Annual Convention.

- Lippold, J. C. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Oerlikon. (2014). *An Introduction to Brazing*.
- Robert W.Messler, J. (2004). *Principles of Welding*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Siewert, T. O. (1988). Ferrite Number prediction to 100FN in stainless steel weld metal.
- Society, A. W. (1999). Specification for Induction Brazing. Στο AWS.
- Thomas, R. (1978). The effect of delta ferrite on the creep rupture properties of austenitic weld metals. *Welding Journal*.
- Γ.Δ.Παπαδημητρίου. (1990). *Εισαγωγή στην μεταλλουργία, την τεχνολογία και τον έλεγχο των συγκολλήσεων*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Γ.Δ.Παπαδημητρίου. (2000). *Φυσική μεταλλουργία σιδήρου και χάλυβα*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Γ.Ν.Χαιδεμενόπουλος. (2010). *Εισαγωγή στις συγκολλήσεις*. Αθήνα.