

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061  
ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TIG**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΤΑΥΡΙΑΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

Επιβλέπων: Μαρκόπουλος Άγγελος , Αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2023

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σταυριανάκης Ιωάννης

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία περατώθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών, Δρ. Άγγελο Μαρκόπουλο, καθώς και το συνεργάτη του από τη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Δρ. Σπύρο Παπαευθυμίου για την ανάθεση της εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις τους κατά την εκπόνησή της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Βόλου, Δρ. Γεώργιο Στρατάκη για τη βοήθεια στο κατασκευαστικό μέρος της εργασίας, και συγκεκριμένα στη κατασκευή των συγκολλημένων δοκιμών που απαιτούνταν για την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Ιωάννη Παπαντωνίου για τη καθοδήγηση και βοήθεια στη περάτωση των μηχανικών δοκιμών, που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Όλοι οι παραπάνω άνθρωποι με τους οποίους ήρθα σε επαφή και μου μετέδωσαν τη τεχνογνωσία τους, συντέλεσαν τα μέγιστα, ώστε να κατανοήσω βαθύτερα το αντικείμενο της εν λόγω εργασίας, και τελικά στην ολοκλήρωση της.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη των συγκολλήσεων σε δεξαμενές καυσίμου μαχητικών αεροσκαφών. Στα σύγχρονα μαχητικά αεροσκάφη χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον εξωτερικές δεξαμενές καυσίμου, οι οποίες κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας πιο συγκεκριμένα είναι η μελέτη των αντοχών, μέσω μηχανικών δοκιμών σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου. Συγκολλήθηκαν για το λόγο αυτό δοκίμια αλουμινίου σειράς 6061 με τη μέθοδο TIG. Εν συνεχεία διενεργήθηκαν στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής δοκιμές εφελκυσμού στα εν λόγω δοκίμια από τις οποίες προέκυψαν και τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Γίνεται σύγκριση της αντοχής του base material με τα συγκολλημένα τέλεια δοκίμια και με τα συγκολλημένα ατελώς. Από τα παραπάνω προκύπτουν συμπεράσματα για το τρόπο με τον οποίο οι ατέλειες στις συγκολλήσεις επηρεάζουν την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό.

## ABSTRACT

The subject of the thesis is the study of welds in fighter aircraft fuel tanks. Modern fighter aircrafts mostly use external fuel tanks, which are made of aluminium alloys.

The purpose of this thesis, more specifically, is to study the strengths, through mechanical tests on aluminium alloy welds. For this reason, 6061 series aluminium samples were welded with the TIG method. Furthermore, tensile tests were carried out on the samples in question in the laboratory of the School's Manufacturing Technology sector, from which the corresponding stress-strain diagrams were obtained. A comparison is made of the strength of the base material with the welded perfect samples and with the imperfectly welded ones. From the above, conclusions can be drawn about the way in which the defects in the welds affect the tensile strength of the material.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ.....	12
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	12
1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	12
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	13
1.3.1 ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ .....	13
1.3.2 ΓΩΝΙΑΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ .....	14
1.3.3 ΑΥΧΕΝΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.....	14
1.3.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ .....	15
1.3.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΤΑ ΑΚΜΗ .....	15
1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ .....	15
1.4.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΗΞΗΣ.....	15
1.4.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	17
1.5 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ .....	17
1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ T.I.G. ....	19
1.6.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	19
1.6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ .....	19
1.6.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	21
1.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	21
1.6.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ.....	23
2.1 ΠΟΡΟΙ – ΣΠΗΛΛΙΩΣΕΙΣ.....	24
2.2 ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΞΕΝΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ.....	25
2.3 ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΣΚΟΥΡΙΑΣ.....	26
2.4 ΡΩΓΜΕΣ .....	28
2.5 ΑΤΕΛΗΣ ΤΗΞΗ .....	30

2.6 ΑΤΕΛΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ.....	31
2.7 ΥΠΟΚΟΠΗ .....	32
2.8 ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ .....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ .....	37
3.1 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ .....	37
3.1.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ .....	37
3.1.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	38
3.2 ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ .....	40
3.2.1 ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061.....	43
4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	43
4.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	43
4.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	44
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	45
4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	47
5.1 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	47
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	48
5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	60
6.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	60
6.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	61
6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	63
6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	75

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μεθόδοι σύνδεσης.....	13
Εικόνα 2: Τύποι μετωπικής σύνδεσης.....	14
Εικόνα 3: Είδη γωνιακής συγκόλλησης.....	14
Εικόνα 4: Τοπολογία συγκολλητής σύνδεσης.....	18
Εικόνα 5: Μέθοδος TIG .....	20
Εικόνα 6: Σφάλμα ανάμματος τόξου.....	33
Εικόνα 7: Πιτσίλισμα .....	34
Εικόνα 8: Σφάλμα υποπλήρωσης.....	34
Εικόνα 9: Σφάλμα επικάλυψης .....	35
Εικόνα 10: Σφάλμα κρατήρα .....	35
Εικόνα 11: Σφάλμα διαμπερούς τήξης.....	36
Εικόνα 12: Ραδιογράφημα ατελούς διείσδυσης.....	39
Εικόνα 13: Ραδιογράφημα πόρων .....	40
Εικόνα 14: Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού .....	41
Εικόνα 15: Φύλλα αλουμινίου 6061 πριν τη συγκόλληση και δοκίμια αναφοράς.....	48
Εικόνα 16: Μηχανή MasterTig AC/DC 3500W .....	49
Εικόνα 17: Πίνακας ελέγχου μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης.....	49
Εικόνα 18: Ηλεκτροσυγκόλληση φύλλων αλουμινίου 6061.....	51
Εικόνα 19: Ηλεκτροσυγκόλληση φύλλων αλουμινίου 6061.....	51
Εικόνα 20: Μπροστά όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο1 .....	52
Εικόνα 21: Πίσω όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο1.....	52
Εικόνα 22: Μπροστά όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο2 .....	53
Εικόνα 23: Πίσω όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο2.....	53
Εικόνα 24: Κοπή δοκιμίων στη συγκολλημένη πλάκα Νο1 .....	54
Εικόνα 25: Κοπή δοκιμίων στη συγκολλημένη πλάκα Νο2 .....	54
Εικόνα 26: Μηχανή εφελκυσμού Instron 4482.....	55
Εικόνα 27: Τοποθέτηση συγκολλημένου δοκιμίου στη μηχανή εφελκυστικών δοκιμών.....	55
Εικόνα 28: Δοκίμια αναφοράς .....	56
Εικόνα 29: Δοκίμια ανάφορας μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό.....	56
Εικόνα 30: Μπροστα όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο1.....	57
Εικόνα 31: Πίσω όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο1.....	57
Εικόνα 32: Δοκίμια πλάκας Νο1 μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό.....	58
Εικόνα 33: Μπροστα όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο2.....	58
Εικόνα 34: Πίσω όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο2 .....	59
Εικόνα 35: Δοκίμια πλάκας Νο2 μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό.....	59
Εικόνα 36: Ακτινογραφία πλάκας Νο.1.....	61
Εικόνα 37: Ακτινογραφία πλάκας Νο.2.....	62



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο ΒΜ1.....	63
Διάγραμμα 2: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο ΒΜ2.....	64
Διάγραμμα 3: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο ΒΜ3.....	64
Διάγραμμα 4: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο ΒΜ4.....	64
Διάγραμμα 5: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ11.....	66
Διάγραμμα 6: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ12.....	66
Διάγραμμα 7: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ13.....	66
Διάγραμμα 8: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ14.....	67
Διάγραμμα 9: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ15.....	67
Διάγραμμα 10: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ21.....	68
Διάγραμμα 11: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ22.....	69
Διάγραμμα 12: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ23.....	69
Διάγραμμα 13: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ24.....	69
Διάγραμμα 14: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ25.....	70

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ταξινόμηση πόρων.....	25
Πίνακας 2: Εγκλείσματα ξένου μετάλλου .....	26
Πίνακας 3: Εγκλείσματα σκουριάς.....	27
Πίνακας 4: Ταξινόμηση ρωγμών .....	30
Πίνακας 5: Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς τήξης.....	31
Πίνακας 6: Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς διείσδυσης .....	32
Πίνακας 7: Ταξινόμηση σφάλματος υποκοπών.....	33
Πίνακας 8: Χημική σύσταση αλουμινίου 6061 .....	43
Πίνακας 9: Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 6061 .....	44
Πίνακας 10: Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής.....	50
Πίνακας 11: Τιμές μέγιστης τάσης δοκιμίων .....	71
Πίνακας 12: Ολκιμότητα δοκιμίων.....	71
Πίνακας 13: Τιμές μέγιστης τάσης δοκιμίων χωρισμένων με βάση τη θέση αστοχίας.....	72
Πίνακας 14: Ολκιμότητα δοκιμίων χωρισμένων με βάση τη θέση αστοχίας.....	72
Πίνακας 15: Σύγκριση συνολικών μετρήσεων – Επίδραση συγκόλλησης στα εξεταζόμενα μεγέθη .....	73

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο κεντρικά μέρη, το βιβλιογραφικό και το πειραματικό.

Το πρώτο μέρος αποτελείται από τα τέσσερα πρώτα κεφάλαια, στα οποία θα γίνει μια σύντομη παράθεση στοιχείων περί των συγκολλήσεων. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι τρόποι σύνδεσης των συγκολλήσεων, η κατηγοριοποίηση των συγκολλήσεων και πιο αναλυτικά περιγράφεται η μέθοδος TIG. Εν συνεχεία, αναλύονται οι ιδιότητες του υπό μελέτη στη παρούσα διπλωματική εργασία αλουμινίου 6061. Γίνεται αναφορά στις καταστροφικές και μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου των συγκολλήσεων, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις δοκιμές εφελκισμού και στις ραδιογραφίες. Τέλος, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των σφαλμάτων των συγκολλήσεων.

Στο δεύτερο μέρος θα παρατεθεί αρχικά υλικό από τη διαδικασία κατασκευής των δοκιμών. Εν συνεχεία γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας των δοκιμών εφελκισμού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη βοήθεια διαγραμμάτων και φωτογραφικού υλικού. Τέλος γίνεται σύγκριση των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων και διερεύνηση για το τρόπο με τον οποίο οι προκύπτουσες ατέλειες στη συγκόλληση επηρεάζουν την αντοχή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Συγκόλληση ορίζεται ως η μέθοδος με την οποία πραγματοποιούμε μια μόνιμη σύνδεση κατά κανόνα μεταξύ δύο μεταλλικών τεμαχίων, μέσω τοπικής πρόσφυσης. Πρόκειται για μια κρυσταλλική σύνδεση η οποία επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και μεταλλουργικών συνθηκών. Έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί πολυάριθμες μέθοδοι συγκολλήσεων η κάθε μία από τις οποίες επιτυγχάνεται με διαφορετικό συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων. Σκοπός είναι το παραγόμενο τεμάχιο να έχει την ίδια ή και μεγαλύτερη αντοχή από τα επιμέρους τεμάχια. Για συγκολλήσεις αλουμινίου που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία ακολουθούνται κατά κανόνα οι παρακάτω μέθοδοι συγκολλήσεων:

- GTAW / TIG
- GMAW / MIG
- Συγκόλληση με ακτίνες λέιζερ και ηλεκτροσυγκόλληση
- Συγκόλληση με αντίσταση

### 1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Εφαρμογές των συγκολλήσεων συναντούνται σε όλα τα τεχνολογικά πεδία, όπως για παράδειγμα:

-Στη παραγωγή ενέργειας σε θερμικούς, υδροηλεκτρικούς, πυρηνικούς σταθμούς και σε πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου.

-Σε μεταφορικά μέσα, όπως τα αυτοκίνητα, τα πλοία, οι σιδηρόδρομοι και τα αεροπλάνα.

-Σε σύγχρονες μεταλλικές κατασκευές, όπως πύραυλοι, ουρανοξύστες και γέφυρες.

-Σε όλα τα βιομηχανικά μηχανήματα, όπως τρακτέρ, γεραμούς, μηχανήματα για εξόρυξη μετάλλων και ορυκτών ή διαμόρφωσης του εδάφους.

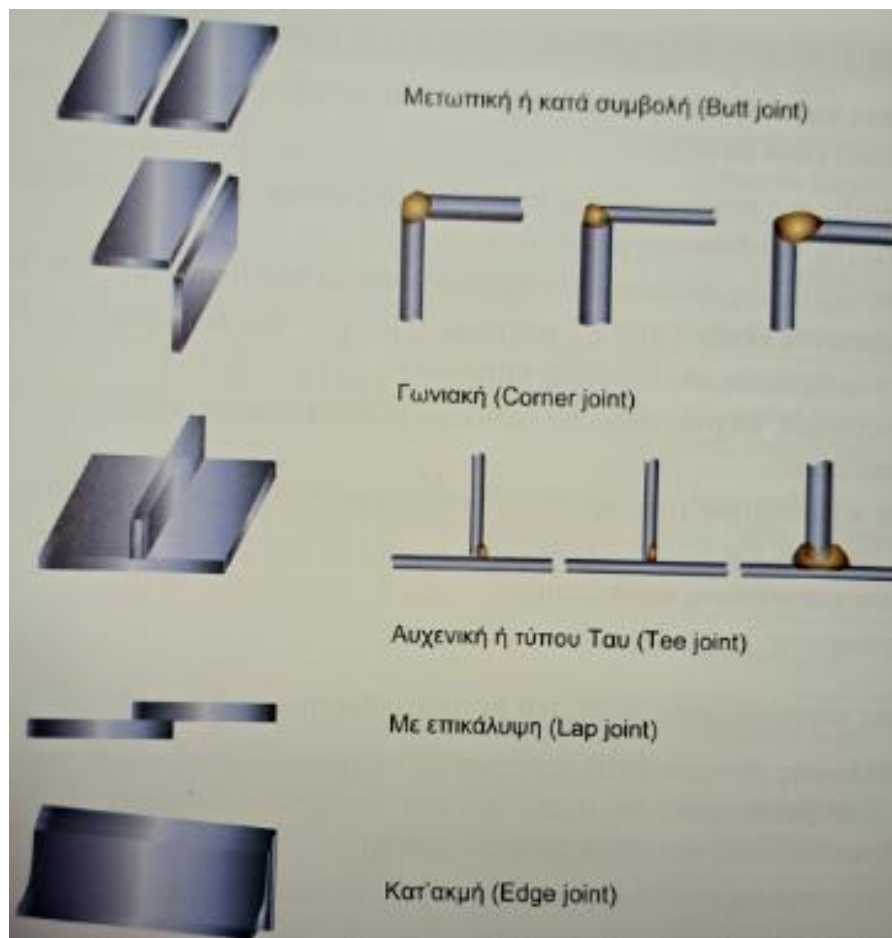
-Σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές της βιομηχανίας, όπως δοχεία πίεσης, δεξαμενές καυσίμων, αγωγούς και σωληνώσεις.

-Σε μεταλλικές κεραίες μετάδοσης σήματος που δημιουργούν το δίκτυο για τη χρήση του διαδικτύου, της κινητής τηλεφωνίας, του ραδιοφώνου και της τηλεόρασης.

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Ανάλογα με τη σχετική θέση των προς συγκόλληση τεμαχίων και τις προκύπτουσες γεωμετρίες συναρμογών, διακρίνουμε πέντε διαφορετικούς βασικούς τύπους

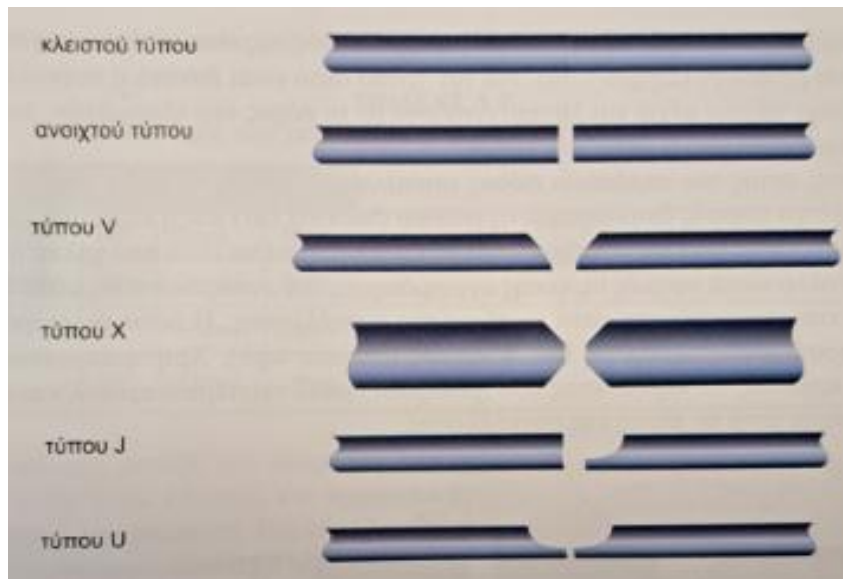
σύνδεσης, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τεχνικές συγκόλλησης ή και συνδυασμό αυτών. Οι πέντε βασικοί τύποι σύνδεσης απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.



Εικόνα 1: Μεθόδους σύνδεσης

#### 1.3.1 ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

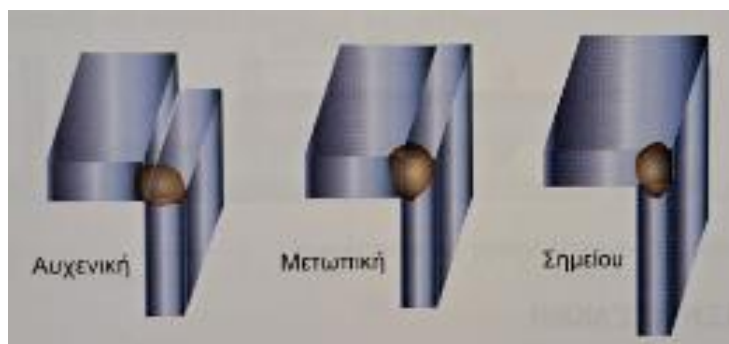
Η μετωπική σύνδεση ή και αλλιώς σύνδεση συμβολής είναι η σύνδεση μεταξύ δύο ελασμάτων τα οποία βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Ανάλογα με την επεξεργασία των άκρων των ελασμάτων που συνδέονται, δηλαδή το πάχος και τη σχετική τους θέση, διακρίνονται σε κλειστού τύπου, ανοιχτού τύπου, τύπου V, X, J, U, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2: Τύποι μετωπικής σύνδεσης

### 1.3.2 ΓΩΝΙΑΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Η γωνιακή σύνδεση αφορά στη σύνδεση μεταξύ δύο ελασμάτων που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $90^\circ$ . Η γωνιακής ραφής μπορεί να έχει κυρτή, επίπεδη ή κοίλη μορφή και υλοποιείται είτε στη μία είτε και στις δύο πλευρές. Η γωνιακή συγκόλληση παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σχετικά με τη μετωπική συγκόλληση, λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης τάσεων στη ραφή. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται σχηματικά τα είδη γωνιακής συγκόλλησης.



Εικόνα 3: Είδη γωνιακής συγκόλλησης

### 1.3.3 ΑΥΧΕΝΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Η αυχενική σύνδεση, ή και αλλιώς σύνδεση τύπου ταυ, είναι ο συνηθέστερος τύπος σύγκολλησης που εφαρμόζεται στη ναυπηγική. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και κάθε ελάσματος είναι  $45^\circ$  θεωρητικά. Δεν

απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία των ακμών, εκτός από περιπτώσεις όπου η συγκόλληση απαιτείται να μη προεξέχει, όπως επίσης δεν απαιτείται και ύπαρξη διακένου μεταξύ των συγκολλούμενων ελασμάτων. Η αντοχή της συγκόλλησης εξαρτάται από το πάχος της συγκόλλησης, με την προϋπόθεση επαρκούς διείσδυσης. Τα ελάσματα βρίσκονται σε ορθή γωνία μεταξύ τους, παρέχονται έτσι εξαιρετική ευχέρεια συγκόλλησης και ορατότητα από όλες τις θέσεις.

#### **1.3.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ**

Η σύνδεση με επικάλυψη είναι υπόλειμμα της μεθόδου ήλωσης με επικάλυψη και αρμοκαλύπτρες. Πλέον έχει περιορισμένη εφαρμογή με εξαίρεση ναυπηγικές και σιδηρές κατασκευές, όπου χρησιμοποιείται για ορισμένες συνδέσεις μορφοσιδήρων μέσω ελασμάτων. Γενικά η επικάλυψη πρέπει να είναι ίση με το τετραπλάσιο του πάχους του λεπτότερου ελάσματος και μικρότερη από 50mm.

#### **1.3.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΤΑ ΑΚΜΗ**

Η σύνδεση κατ' ακμή αφορά στη σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων ελασμάτων τα οποία είναι μεταξύ τους παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα. Σε αυτού του είδους τη σύνδεση το μέταλλο συγκόλλησης καλύπτει μόνο ένα μέρος του συνολικού πάχους των υπό επαφή ακμών. Για αυτό το λόγο η σύνδεση κατ' ακμή δε χρησιμοποιείται σε κατασκευές που βρίσκονται υπό τάση, αφού παρουσιάζουν ελάχιστη αντοχή.

### **1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ**

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες συγκολλήσεων ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μέσο. Πρόκειται για τις συγκολλήσεις τήξης και πίεσης.

#### **1.4.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΗΞΗΣ**

Οι συγκολλήσεις τήξης συνοδεύονται από το φαινόμενο της τήξης των μετάλλων στο σημείο συγκόλλησής τους. Η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι το σημείου τήξης των μετάλλων στα σημεία συγκόλλησής τους, με συνέπεια τα μόρια του ενός μετάλλου να εισχωρούν στα μόρια του άλλου και έτσι να πραγματοποιείται η σύνδεσή τους, μετά την επαναφορά τους στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η συγκολλήσεις τήξης μπορούν να πραγματοποιηθούν με τους παρακάτω τρόπους:

- Με την τήξη και των δύο μεταλλικών κομματιών στη θέση της συγκόλλησης. Σ' αυτήν την περίπτωση τα προς συγκόλληση μεταλλικά τεμάχια θα πρέπει να

είναι από το ίδιο μέταλλο ή από κράμα της ίδιας ή παρόμοιας χημικής σύστασης.

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

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

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

Οι συγκολλήσεις τήξης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος κόλλησης που υλοποιείται, τις αυτογενείς και τις ετερογενείς κολλήσεις.

#### **1.4.1.1 ΑΥΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ**

Αυτογενείς ονομάζονται οι συγκολλήσεις στις οποίες τα συγκολλούμενα τεμάχια είναι από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις, όταν στερεοποιηθούν τα τηχθέντα σημεία στην ένωση, πραγματοποιείται η εσωτερική κρυσταλλική σύνδεσή τους και, έτσι, η κόλληση και τα προς συγκόλληση τεμάχια αποτελούν πλέον μία ισχυρή σύνδεση, αποτελούν δηλαδή ένα ενιαίο σώμα. Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τις αυτογενείς συγκολλήσεις είναι συνήθως υψηλές και εξαρτώνται από το είδος των μετάλλων που θα συγκολληθούν.

Η πηγή θερμότητας είναι ηλεκτρικό τόξο ή φλόγα ασετυλίνης ή δέσμη ηλεκτρονίων ή ακτίνες laser. Η πηγή θερμότητας χρησιμεύει για να τήξει είτε το συγκολλούμενο μέταλλο στην περιοχή της σύνδεσης, είτε το συγκολλητικό υλικό μέσα στη σύνδεση. Ο αρμός που πρόκειται να συγκολληθεί πρέπει να προετοιμάζεται κατάλληλα. Απαιτείται τοπικά λιώσιμο των προς συγκόλληση τεμαχίων και προαιρετικά η τοποθέτηση κάποιου συγκολλητικού μέσου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η οξυγονοκόλληση, η ηλεκτροκόλληση, η συγκόλληση με αντίσταση ή με Laser. Στη παρούσα εργασία αναλύεται η μέθοδος TIG η οποία ανήκει στις συγκολλήσεις με τόξο.



#### **1.4.1.2 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ**

Ετερογενείς ονομάζονται οι συγκολλήσεις στις οποίες το υλικό κόλλησης και τα προς συγκόλληση τεμάχια έχουν διαφορετική χημική σύσταση. Η θερμοκρασία τήξης της κόλλησης είναι μικρότερη από εκείνη των συγκολλούμενων τεμαχίων. Στη περιοχή της συγκόλλησης μετά τη τήξη του υλικού, δημιουργείται ένα κράμα από τη κόλληση και τα προς συγκόλληση τεμάχια, το οποίο όταν σταθεροποιηθεί, πραγματοποιείται κρυσταλλική σύνδεση των τεμαχίων, δηλαδή η συγκόλλησή τους.

Η σύνδεση των κομματιών στις ετερογενείς κολλήσεις ενισχύεται και από τη διείσδυση της ρευστής κόλλησης μέσα στους πόρους των επιφανειών συγκόλλησης, δημιουργώντας, έτσι, ένα είδος αγκίστρωσης στην επιφάνεια των μεταλλικών κομματιών. Γι' αυτό στις ετερογενείς συγκολλήσεις οι επιφάνειες που πρόκειται να συγκολληθούν πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά με ειδικά υλικά καθαρισμού.

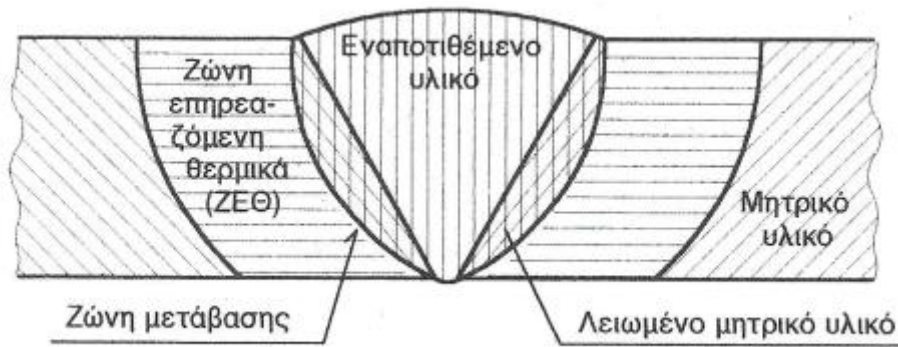
Τέτοιες συγκολλήσεις χαμηλής θερμοκρασίας είναι η κασιτεροκόλληση, η μπρουντζοκόλληση και η ασημοκόλληση.

#### **1.4.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΙΕΣΗΣ**

Οι συγκολλήσεις πίεσης πραγματοποιούνται με ταυτόχρονη θέρμανση της θέσης συγκόλλησης των δύο κομματιών σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης τους και με εφαρμογή ισχυρής πίεσης στη θέση της συγκόλλησης. Συγκολλήσεις πίεσης είναι οι ψυχρές συγκολλήσεις, οι συγκολλήσεις τριβής, οι καμινοσυγκολλήσεις και οι ηλεκτροσυγκολλήσεις αντίστασης.

### **1.5 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ**

Η συγκολλητή σύνδεση διακρίνεται σε τρεις βασικές περιοχές, το βασικό ή μητρικό υλικό, την κόλληση ή εναποτιθέμενο υλικό ή αλλιώς τη ζώνη τήξης, και λόγω της αλληλεπίδρασης της θερμικής πηγής με το μέταλλο βάσης, εμφανίζεται και μία τρίτη ζώνη πολύ σημαντική, η ζώνη θερμικά επηρεαζόμενη (ΖΕΘ). Η τοπολογία της συγκόλλησης παρουσιάζεται στην εικόνα 4 που ακολουθεί.



Εικόνα 4: Τοπολογία συγκολλητής σύνδεσης

Η μορφή και τα όρια των τριών αυτών ζωνών εξαρτώνται από την θερμοκρασία, τον ρυθμό ψύξης και τον ρυθμό στερεοποίησης. Τα σημεία κατά μήκος των ζωνών δέχονται διαφορετική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, άρα έχουν και διαφορετικό θερμικό κύκλο.

Το μητρικό υλικό είναι η περιοχή η οποία δεν υπέστη καμία μεταβολή στα χαρακτηριστικά της, στη δομή της και στις ιδιοτητές της.

Η ζώνη τήξης ή αλλιώς η λίμνη της συγκόλλησης είναι η περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα η συγκόλληση, δηλαδή είναι η περιοχή στην οποία παρουσιάζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι ιδιότητες της συγκόλλησης εξαρτώνται από την δομή της λίμνης που προκύπτει μετά τη στερεοποίηση της. Το πάχος του ελάσματος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και ο ρυθμός προσδόσεως θερμότητας είναι παράγοντες που επιδρούν στη στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης. Στη ζώνη τήξης παρατηρούνται επίσης αντιδράσεις του τηγμένου μετάλλου με αέρια.

Η θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4 είναι η περιοχή μεταξύ του βασικού μετάλλου και της ζώνης τήξης. Είναι εκείνη η περιοχή της οποίας η μικροδομή και οι φυσικές σταθερές έχουν αλλάξει εξαιτίας της συγκόλλησης τόξου. Η υψηλή θερμότητα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης τόξου και η γρήγορη ψύξη δημιουργούν αυτή τη νέα περιοχή στο τελικό προϊόν. Οι ήδη υπάρχουσες σταθερές αλλάζουν αναλόγως με το υλικό, το είδος της συγκόλλησης και το ποσό της θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια.

Η αστοχία μίας συγκόλλησης είναι συνάρτηση των θερμικών κύκλων που αναπτύσσονται, οι οποίοι οδηγούν σε ισχυρές παραμένουσες τάσεις και φυσικών σταθερών στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη τήξης οι οποίες διαφέρουν από αυτές του αρχικού υλικού. Οι περισσότερες αστοχίες μιας συγκόλλησης ξεκινούν από τη θερμοεπηρεασμένη ζώνη και κατευθύνονται στη συγκολλημένη

περιοχή. Για το λόγο αυτό καταβάλλεται προσπάθεια από τους συγκολλητές ωστέ να ελέγχεται η μικροδομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης.

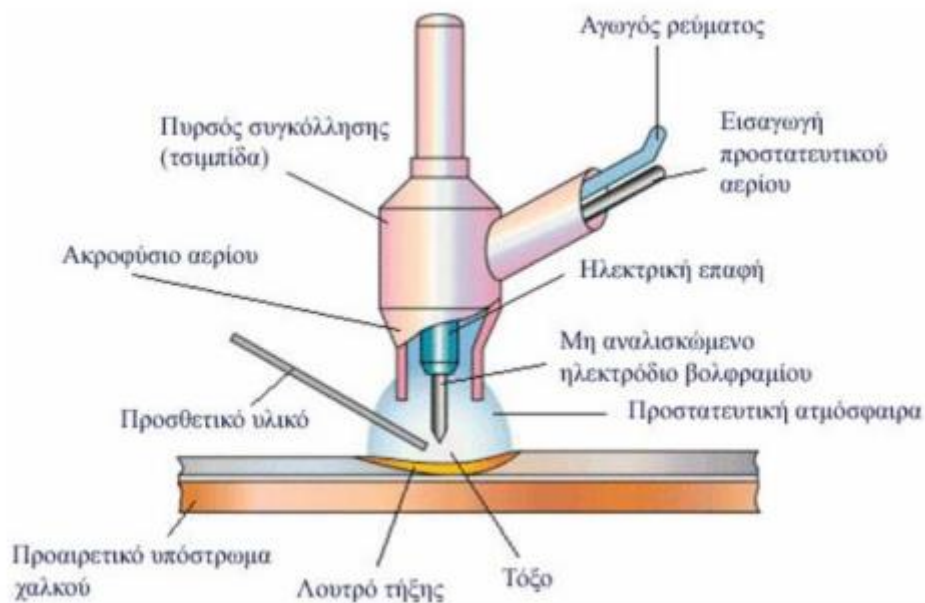
## **1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ T.I.G.**

### **1.6.1 ΟΡΙΣΜΟΣ**

Η μέθοδος συγκόλλησης TIG (Tungsten Inert Gas), είναι η μέθοδος συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου το οποίο δεν καταναλώνεται κατά τη συγκόλληση, και εκτελείται σε προστατευτική ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου. Στις ΗΠΑ η μέθοδος λαμβάνει το ακρωνύμιο GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) και σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 4063, το νούμερο για το συμβολισμό της μεθόδου είναι το 141.

### **1.6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

Στη μέθοδο TIG, η απαραίτητη θερμότητα για τη τήξη των βασικών υλικών καθώς και του προσθετικού μετάλλου, όπου αυτό χρησιμοποιείται, προέρχεται από ένα τόξο που διατηρείται ανάμεσα σε ένα μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου και στο βασικό μέταλλο. Η απαραίτητη για συγκολλήσεις τόξου προστατευτική ατμόσφαιρα, προέρχεται από αδρανές αέριο καθώς μόνο έτσι αποφεύγεται η οξείδωση του ηλεκτροδίου βολφραμίου. Προσθήκη προσθετικού υλικού μπορεί να απαιτείται μπορεί και όχι. Το ηλεκτρόδιο που συντηρεί το τόξο, έχει επικρατήσει να είναι από βολφράμιο, λόγω του υψηλού σημείου τήξης του, που φτάνει τους 3370°C, θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη από αυτή των περισσότερων γνωστών μετάλλων.



Εικόνα 5: Μέθοδος TIG

Η μέθοδος συγκόλλησης TIG, είναι ιδανική για τη σύνδεση ελασμάτων μικρού σχετικά πάχους, καθώς και για τη συγκόλληση του πρώτου κορδονιού (ρίζας) σε συγκολλήσεις πλήρους διείδυσης όπου η πρόσβαση είναι εφικτή μόνο από τη μία πλευρά της συγκόλλησης. Στη περίπτωση που απαιτείται υλικό πλήρωσης, αυτό παρέχεται χειροκίνητα (μέσω ξεχωριστής βέργας, όπως φαίνεται προηγούμενη εικόνα, ή και σύρματος από ειδικά διαμορφωμένα ρολά). Στην αυτοματοποιημένη εκδοχή της μεθόδου, το υλικό πλήρωσης (σύρμα από ρολό) παρέχεται από ειδικά τροφοδοτικά. Λόγω του ότι το ηλεκτρόδιο βολφραμίου, που συντηρεί το τόξο, δεν είναι αναλίσκόμενο, είναι η κατάλληλη μέθοδος για συνδέσεις όπου είναι επιθυμητή η τήξη και σύνδεση των βασικών μετάλλων, χωρίς τη προσθήκη προσθετικού υλικού. Σε αυτή τη περίπτωση πρόκειται για αυτογενείς συγκολλήσεις.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων, αλλά συνήθως δεν εφαρμόζεται στη συγκόλληση μετάλλων χαμηλού σημείου τήξης, όπως ο μόλυβδος και ο κασσίτερος. Είναι επίσης ιδανική για τη συγκόλληση των μετάλλων που αντιδρούν εύκολα με τον ατμοσφαιρικό αέρα, σχηματίζοντας πολύ σταθερά επιφανειακά οξείδια. Τέτοια μέταλλα είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο και το ζirkόνιο. Θεωρείται ιδιαίτερα ποιοτική μέθοδος συγκόλλησης, και χρησιμοποιείται συχνά για τη σύνδεση των ακριβότερων μετάλλων καθώς και σε κατασκευές που προορίζονται για δύσκολες συνθήκες λειτουργίας.

### 1.6.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Οι περιορισμοί της μεθόδου είναι οι εξής:

- Η ταχύτητα εκτέλεσης της συγκόλλησης είναι μικρότερη σε σχέση με τη ταχύτητα εκτέλεσης της συγκόλλησης στις περισσότερες μεθόδους συγκόλλησης τόξου.
- Σε περίπτωση που το ηλεκτρόδιο βολφραμίου έρθει σε επαφή με το λουτρό τήξης, προκύπτει το χαρακτηριστικό σφάλμα για τη μέθοδο, τα εγκλείσματα βολφραμίου.
- Τα αδρανή αέρια που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο (αργό, ήλιο ή μίγμα τους) είναι σχετικά ακριβά.

Στη συνέχεια παρατίθενται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης:

### 1.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

- Μεγάλο εύρος ρύθμισης της τιμής της έντασης του ρεύματος για την ομαλή λειτουργία της. Αυτό το γεγονός, με τη σειρά του, συνεπάγεται τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου στη συγκόλληση βασικών υλικών των οποίων το πάχος μπορεί να παρουσιάζει επίσης μεγάλη διακύμανση. Χαρακτηριστικά, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στη συγκόλληση ελασμάτων πάχους που ξεκινάει από 0,15 mm.
- Ομαλή μεταφορά υλικού πλήρωσης στο λουτρό τήξης. Προκύπτουν έτσι μικρές απώλειες, και το κυριότερο, εντελώς περιορισμένη απώλεια χρήσιμων κραματικών στοιχείων. Κατά συνέπεια οι μεταλλουργικές ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης που επιτυγχάνεται με τη συγκόλληση TIG, είναι πολύ υψηλού επιπέδου.
- Το τόξο της μεθόδου TIG, είναι σχετικά περιορισμένο. Προκύπτει έτσι, υψηλή, και χωρικά περιορισμένη, θερμική απόδοση. Αυτή η ιδιότητα της μεθόδου ευνοεί τον περιορισμό των παραμορφώσεων που αναπόφευκτα προκαλεί η συγκόλληση. Επίσης, προκύπτει θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) μικρότερου πλάτους, και το φαινόμενο της μεγέθυνσης των κόκκων που παρατηρείται στη ΘΕΖ των συγκολλήσεων, είναι επίσης περιορισμένο. Με αυτό το τρόπο και οι μηχανικές ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης είναι επίσης αναβαθμισμένες.
- Επίσης, το τόξο της μεθόδου TIG, είναι αρκετά σταθερό και εύκολο στο χειρισμό του. Οι συγκολλήσεις που προκύπτουν, έτσι, έχουν ιδιαίτερα ομοιογενή, ομαλή και καλή εμφάνιση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η μέθοδος TIG πολλές φορές χρησιμοποιείται αυτογενώς (χωρίς προσθετικό υλικό), για το “φινίρισμα”, τη βελτίωση δηλαδή, της εξωτερικής εμφάνισης συγκολλήσεων που έχουν γίνει με χρήση άλλης μεθόδου.

#### 1.6.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

- Χαμηλός ρυθμός εναπόθεσης υλικού πλήρωσης. Η ταχύτητα προώθησης της συγκόλλησης είναι, έτσι, περιορισμένη γεγονός που τελικά έχει σαν αποτέλεσμα τη χαμηλή παραγωγικότητα της μεθόδου.
- Δυσκολία χειρισμού του πυρσού (τσιμπίδα) της συγκόλλησης και κατά συνέπεια του τόξου συγκόλλησης, παράλληλα με το χειρισμό του προσθετικού υλικού. Οι συγκολλητές που εκτελούν συγκολλήσεις με τη μέθοδο TIG, πρέπει να είναι ιδιαίτερα ικανοί και κατάλληλα εκπαιδευμένοι.
- Το τόξο που παράγει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερης “λαμπρότητας” και σίγουρα εντονότερης λάμψης από τις υπόλοιπες ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους συγκόλλησης (με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια ή ημιαυτόματη με σύρμα). Κατά συνέπεια τα μέτρα ασφαλείας πρέπει να τηρούνται αυστηρά και να λαμβάνεται ειδική μέριμνα τόσο για τη προστασία του δέρματος όσο και της όρασης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση και κατηγοριοποίηση των ασυνεχειών μιας συγκόλλησης ανάλογα με τη μορφή και το είδος τους.

Στη πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται ασυνέχειες που σχετίζονται με τις γεωμετρικές διαστάσεις και τις σχεδιαστικές απαιτήσεις της συγκόλλησης.

- Παραμορφώσεις / Διαστρεβλώσεις
- Ανακριβές μέγεθος συγκόλλησης
- Ανακριβές προφίλ / κατατομή συγκόλλησης
- Ανακριβείς τελικές διαστάσεις
- Υπερβολική ενίσχυση της συγκόλλησης / υπερβολική χρήση συγκολλητικού υλικού

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται ασυνέχειες οι οποίες σχετίζονται με την ίδια την εσωτερική δομή της συγκόλλησης. Οι περιπτώσεις αυτές θα εξεταστούν πιο αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

- Πόροι / Σπηλαιώσεις
- Εγκλείσματα σκουριάς
- Εγκλείσματα ξένου μετάλλου - βολφραμίου
- Ατελής τήξη
- Ανεπαρκής διείσδυση
- Υποκοπή
- Ρωγμές
- Επιφανειακές ανωμαλίες
- Λοιπές ανωμαλίες

Τέλος, ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν οι ασυνέχειες που σχετίζονται αποκλειστικά με τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των συγκολληθέντων μετάλλων και των χρησιμοποιούμενων για τη συγκόλληση υλικών.

## 2.1 ΠΟΡΟΙ – ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΕΙΣ

Οι πόροι ή σπηλαιώσεις αποτελούν μία από τις σημαντικότερες αιτίες, οι οποίες είναι σε θέση να οδηγήσουν στην αστοχία μιας συγκόλλησης. Την πιο χαρακτηριστική μορφή αυτού του είδους σφάλματος αποτελεί η περίπτωση σπηλαιωδών ασυνεχειών, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από τον εγκλεισμό αερίων κατά τη φάση της στερεοποίησης των τηγμένων μετάλλων. Υπάρχουν διαφόρων ειδών πόροι, τόσο ανάλογα με το σχήμα τους (σφαιρικοί- σκωληκοειδείς) όσο και με βάση τη θέση εμφάνισής τους (εσωτερικοί- εξωτερικοί) καθώς επίσης και με βάση την κατανομή τους μέσα στην συγκόλληση, η οποία μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφη είτε να σχηματίζει ομάδες ή γραμμές. Για την ανίχνευση των εσωτερικών πόρων είναι απαραίτητη η χρήση ραδιογραφήματος ενώ αυτή των εξωτερικών είναι σε θέση να πραγματοποιηθεί με γυμνό μάτι.

Εν γένει οι πόροι έχουν αρνητική επίδραση στην αντοχή της συγκόλλησης καθώς καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της διατομής της εκάστοτε συγκόλλησης. Η σπουδαιότητα των πόρων ως σφάλμα συγκολλήσεων έχει ερευνηθεί σε μεγάλο βάθος τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Έχει αποδειχθεί ότι η ύπαρξη πόρων σε ποσοστό 2 έως 3%, ποσοστό γενικά μεγαλύτερο από αυτό που επιτρέπουν οι διάφοροι κανονισμοί, έχει ασήμαντη επίδραση στη στατική αντοχή των συγκολλήσεων. Το ίδιο ισχύει και για την ολκιμότητα αν και η επίδραση εδώ αυξάνει όσο αυξάνει η αντοχή του υλικού.




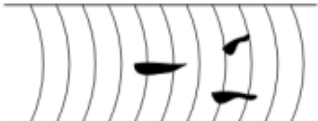

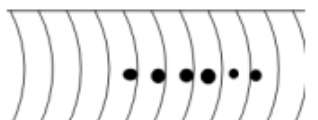




Οι πόροι ως επί το πλείστον αποτελούν το αποτέλεσμα αεριογόνων μεταλλουργικών αντιδράσεων. Ακόμη επίδραση ως προς το σχηματισμό των πόρων είναι σε θέση να ασκήσουν κατά σειρά η υγρασία της επένδυσης των βασικών ηλεκτροδίων, το συλλίπασμα, τα ενεργειακά ή προστατευτικά αέρια, η οξείδωση, τα χρώματα, τα λίπη ή η υγρασία στο σύρμα ή στα συνδεδεμένα άκρα. Επίσης η μεγάλη περιεκτικότητα του θείου (S) τόσο στα βασικά υλικά όσο και στα πρόσθετα συγκολλητικά, οι διαστάσεις του τόξου, οι οποίες πρέπει να αποφεύγεται να είναι αρκετά μικρές ή μεγάλες και τέλος η μεγάλη ταχύτητα στερεοποίησης της συγκόλλησης, η οποία υπονοεί την μικρή ένταση ρεύματος άρα και την έλλειψη αρχικής προθέρμανσης.

Τα αέρια, τα οποία βρίσκονται συνήθως στο τηγμένο μέταλλο είναι τα ακόλουθα, ενώ από αυτά το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) θεωρείται ως η κυριότερη αιτία της δημιουργίας πόρων σε συγκολλήσεις, καθώς είναι σε θέση να εισέλθει στο τηγμένο μέταλλο από πολλές πηγές π.χ. ατμοσφαιρικό αέρα, επένδυση ηλεκτροδίων, υγρασία, κλπ. Το άζωτο (N) μπορεί να δημιουργήσει πόρους σε συγκολλήσεις χάλυβα και κραμάτων νικελίου (Ni), ενώ προέρχεται είτε από την ατμόσφαιρα είτε από μόλυνση του αερίου προστασίας. Τέλος, το διαλυμένο στο τηγμένο μέταλλο οξυγόνο μπορεί επίσης να οδηγήσει στη δημιουργία πόρων. Το οξυγόνο προέρχεται από οξείδια των ηλεκτροδίων και της επιφάνειας του μετάλλου και από την ατμόσφαιρα.



Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται η ταξινόμηση των πόρων ανάλογα με τη μορφή τους και τη κατανομή τους στη συγκόλληση.

Πίνακας 1: Ταξινόμηση πόρων

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Σφαιρικός Πόρος (Gas Pore)			Πόρος με μορφή όμοια της σφαίρας
Σκωληκοειδής Πόρος (Worm hole)			Μήκος πόρων μεγαλύτερο του 3πλάσιου μέγιστου πλάτους σε διεύθυνση προς το βάθος της συγκόλλησης
Αλυσιδωτοί Πόροι (Linear Porosity)			Τουλάχιστον 4 σφαιρικοί πόροι στη σειρά κατά μήκος της κόλλησης σε απόσταση όχι μεγαλύτερη της τριπλάσιας διαμέτρου του μεγαλύτερου πόρου
Φωλιά Πόρων (Clustered Porosity)			Τουλάχιστον 4 σφαιρικοί πόροι ομαδοποιημένοι σε απόσταση όχι μεγαλύτερη της 3πλάσιας διαμέτρου του μεγαλύτερου πόρου
Διαμήκης Πόρος (Elongated Cavity)			Μήκος πόρου μεγαλύτερο του 3πλάσιου μέγιστου πλάτους και κύρια διάσταση παράλληλη της κόλλησης

## 2.2 ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΞΕΝΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ



Εκτός από την περίπτωση εγκλεισμάτων σκουριάς στην κόλληση μιας συγκόλλησης υπάρχει η πιθανότητα εγκλεισμάτων ξένου μετάλλου. Σε ορισμένα μέταλλα, και κυρίως σε αυτά που σχηματίζουν οξειδικές επιστρώσεις υψηλής θερμοκρασίας,

υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας εγκλεισμάτων οξειδίου στο μέταλλο συγκόλλησης. Η περίπτωση της συγκόλλησης αλουμινίου είναι χαρακτηριστική. Το οξείδιο του αλουμινίου δημιουργείται πολύ γρήγορα στην ατμόσφαιρα και μπορεί να παγιδευτεί πολύ εύκολα στο μέταλλο της συγκόλλησης αν δεν παρθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις.

Στη κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα εγκλείσματα βολφραμίου, υπό μορφή σωματιδίων παγιδευμένων στο μέταλλο συγκόλλησης που έχει εναποτεθεί με συγκόλληση σε αδρανές αέριο με ηλεκτρόδιο βολφραμίου με τη μέθοδο TIG. Το σφάλμα αυτό αναπτύσσεται στην περίπτωση κατά την οποία το ηλεκτρόδιο βολφραμίου ακουμπήσει το τηγμένο μέταλλο συγκόλλησης, είτε στη περίπτωση που το ρεύμα συγκόλλησης είναι υπερβολικά υψηλό, ώστε να προκαλέσει τήξη και μεταφορά σταγόνων βολφραμίου από το ηλεκτρόδιο στο τηγμένο μέταλλο συγκόλλησης.

Στον ακόλουθο πίνακα απεικονίζεται σχηματικά μια χαρακτηριστική περίπτωση εγκλείσματος ξένου μετάλλου.

Πίνακας 2: Εγκλείσματα ξένου μετάλλου

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Εγκλείσματα ξένου μετάλλου			Στοιχεία μετάλλου κόλληση ξένου στη

### 2.3 ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΣΚΟΥΡΙΑΣ

Ως εγκλείσματα σκουριάς ορίζονται οι μη μεταλλικές στερεές ουσίες, οι οποίες παγιδεύονται είτε στο μέταλλο συγκόλλησης είτε μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Παρουσιάζεται στις συγκολλήσεις με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια (SMAW) ή στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου (SAW).

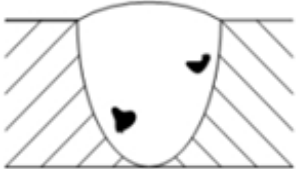

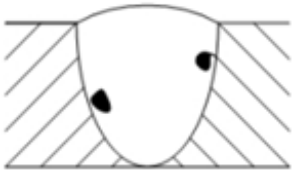
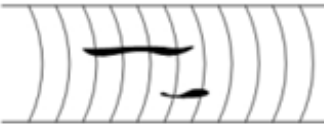
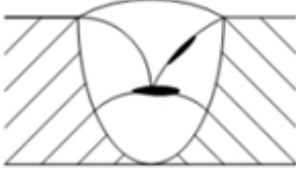

Αυτού του είδους τα εγκλείσματα παρουσιάζονται κυρίως στην επιφάνεια και την ρίζα ή μεταξύ των ραφών, σε ραφές με πολλαπλά πάσα λόγω κακού καθαρισμού. Ο

βασικός τρόπος αντιμετώπισης είναι η χρησιμοποίηση μεθόδων συγκόλλησης με προστατευόμενο αέριο.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη εγκλεισμάτων σκουριάς στις συγκολλήσεις είναι οι ακόλουθοι:

- Το υψηλό ιξώδες του βασικού μετάλλου
- Η γρήγορη στερεοποίηση των τηγμένων μετάλλων
- Η ανεπαρκής θερμότητα συγκόλλησης
- Ο εσφαλμένος χειρισμός του ηλεκτροδίου
- Οι υποκοπές από προηγούμενες ραφές

Πίνακας 3: Εγκλείσματα σκουριάς

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Σκουριά συμπαγής απομονωμένη (isolated slag inclusion)			Σκουριά ελεύθερης μορφής με εξαίρεση τη διαμήκη μορφή
Σκουριά διαμήκης (elongated slag inclusion)			Μήκος σκουριάς μεγαλύτερο από το 3πλάσιο του μέγιστου πλάτους
Σκουριά μεταξύ των ραφών			Σκουριά στην επιφάνεια κάθε ραφής

Οι επιρροές των εγκλεισμάτων σκουριάς στην συμπεριφορά της συγκόλλησης είναι ίδιες περίπου με αυτές των πόρων. Σε ποσοστό μικρότερο του 4% κατ' όγκο έχουν ασήμαντη επίδραση στη στατική αντοχή των συγκολλήσεων. Σε συγκολλημένα μέταλλα με όριο διαρροής μέχρι 517 MPa η ολκιμότητα των υλικών δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου. Αντίθετα σε μέταλλα με μεγαλύτερο όριο διαρροής η

ολκιμότητα μειώνεται ανάλογα με την πυκνότητα και το ποσοστό των εγκλεισμάτων σκουριάς.

## 2.4 ΡΩΓΜΕΣ

Οι ρωγμές αποτελούν την πιο συνήθη μορφή και αιτία για τον οποίο είναι πιθανόν να αστοχήσει μια συγκόλληση. Ως ρωγμή καλείται η ασυνέχεια του υλικού της συγκόλλησης, η οποία οφείλεται στη θραύση αυτού και χαρακτηρίζεται από οξύ άκρο εν αντιθέσει με την περίπτωση των πόρων, και μεγάλου λόγου μήκους σε σχέση με το πλάτος του διακένου - ασυνέχειας. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του είδους σφάλματος της συγκόλλησης αλλά και βασικό στοιχείο της επικινδυνότητας που χαρακτηρίζει αυτές, αποτελεί το γεγονός ότι είναι σε θέση να επεκταθούν ταχύτατα, οδηγώντας σε ελάχιστο χρονικό διάστημα την εκάστοτε συγκόλληση στην κατάρρευσή της.

Οι ρωγμές σε όλες τους τις μορφές, αποτελούν το πιο σημαντικό από όλα τα άλλα σφάλματα συγκολλήσεων. Από τη φύση της η ρωγμή έχει πολύ αιχμηρά άκρα που δρουν σα σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Για τον λόγο αυτό, όλοι οι διεθνείς και εθνικοί κανονισμοί που διέπουν συγκολλητές κατασκευές δεν επιτρέπουν την ύπαρξη ρωγμών, ανεξαρτήτου μεγέθους, σε συγκολλήσεις. Όλες οι ρωγμές που εντοπίζονται με οποιαδήποτε μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου πρέπει να επιδιορθώνονται.

Με τη σημερινή εξέλιξη της θεωρίας της θραύσης είναι δυνατή η αξιολόγηση της σημασίας των ρωγμών σε συγκολλητές κατασκευές. Έτσι όταν ακολουθείται η φιλοσοφία της καταλληλότητας για την επιδιωκόμενη χρήση, είναι δυνατό να επιτρέπεται η ύπαρξη ορισμένων ρωγμών δεδομένου μεγέθους, κατεύθυνσης και θέσης.

Ανάλογα με τις συνθήκες, υπό τις οποίες προκλήθηκε η εμφάνιση της ρωγμής στη συγκόλληση, οι ρωγμές δύναται να ταξινομηθούν στις θερμορωγμές, στις ρωγμές εν ψυχρώ, στις ψαθυρές ρωγμές και στις φυλλοειδείς ρωγμές.

Οι θερμορωγμές αναπτύσσονται ως περικρυσταλλικές και σε θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται στους 1100-1350°C τόσο για την περιοχή της κόλλησης των τεμαχίων όσο και στην θερμικά επηρεαζόμενη περιοχή (ΘΕΖ). Η εμφάνιση αυτών οφείλεται εν πολλοίς στην ύπαρξη και την επίδραση των τάσεων συστολής κατά τη στερεοποίηση των τηκόμενων υλικών. Για την ανάπτυξη αυτών σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι εξής παράγοντες:

- Η υψηλή περιεκτικότητα του άνθρακα καθώς επίσης και οι ακαθαρσίες στα βασικά υλικά και στα προστιθέμενα με χαμηλή περιεκτικότητα του μαγνησίου.

- Η υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης.
- Η αρκετά μικρή διατομή του πρώτου στρώματος.
- Η μεγάλη απόσταση του αυχένα της ρίζας της συγκόλλησης.
- Το υψηλό επίπεδο των εσωτερικών τάσεων, οι έχουν προκληθεί από την μεγάλη δυσκαμψία της κατασκευής και μεθόδου εκτέλεσης των συγκολλήσεων.

Οι ρωγμές εν ψυχρώ αναπτύσσονται ως ενδοκρυσταλλικές και συνήθως στην θερμικά επηρεαζόμενη περιοχή (ΘΕΖ) ή και σε άλλες περιπτώσεις και στην κόλληση για θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται γύρω στους 300°C. Για την εμφάνιση και την ανάπτυξη αυτών συνεισφέρουν το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) σε συνδυασμό με την παρουσία σκληρών δομών αλλά και τάσεων συγκόλλησης. Την ανάπτυξη αυτών επηρεάζουν σημαντικά οι ακόλουθοι παράγοντες:


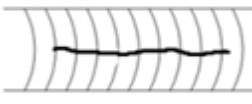

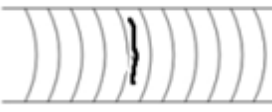


- Το ακατάλληλο για δεδομένο χάλυβα ισοδύναμο Ce >0.4.
- Η υψηλή ταχύτητα στερεοποίησης σύνδεσης, η οποία οφείλεται είτε στην αρκετά χαμηλή γραμμική ενέργεια είτε στην έλλειψη αρχικής προθέρμανσης.
- Την υψηλού βαθμού δυσκαμψία του υλικού κατασκευής.

Οι ψαθυρές ρωγμές αναπτύσσονται κατά αιφνίδιο τρόπο, δίχως την ύπαρξη παραμορφώσεων και διέρχονται καθ' όλο το πάχος της σύνδεσης και συνήθως σε μεγάλο μήκος. Η θέση έναρξης αυτού του είδους ρωγμών βρίσκεται στις θέσεις εγκοπών, δηλαδή σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και συνηθέστερα κατά τη δράση δυναμικών φορτίσεων. Για την ανάπτυξη αυτών επιδρά αρνητικά τόσο η ψαθυρότητα των χαλύβων, η οποία προκύπτει από τη χαμηλή θερμοκρασία εκμετάλλευσης και από την υποβαφή ή τη γήρανση των χαλύβων στην ΘΕΖ.

Οι φυλλοειδείς ρωγμές τέλος σχηματίζονται τις πλείστες φορές ως περικρυσταλλικές στη ΘΕΖ και στο βασικό υλικό σε θερμοκρασίες, οι οποίες δεν υπερβαίνουν τους 200°C. Η εμφάνιση αυτών οφείλεται στις παραμορφώσεις του ελάσματος κατά τη διεύθυνση του πάχους με χαμηλή ολκιμότητα. Η χαμηλή ολκιμότητα του ελάσματος είναι αποτέλεσμα της παρουσίας των μη μεταλλικών ακαθαρσιών υπό τη μορφή εξελασμένων φύλλων. Για την αποφυγή εμφάνισης αυτού του είδους ρηγματώσεων απαιτείται η περιεκτικότητα του θείου να μην υπερβαίνει το 0.02%.

Στον ακόλουθο πίνακα περιγράφονται τα είδη των ρωγμών, τα οποία έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τη μορφή και το σχήμα τους.

Πίνακας 4: Ταξινόμηση ρωγμών

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Διαμήκης Ρωγμή (elengadet crack)			Ρωγμή εντοπισμένη προς τη διεύθυνση του διαμήκους άξονα της κόλλησης
Εγκάρσια Ρωγμή			Ρωγμή εντοπισμένη εγκάρσια προς το διαμήκη άξονα της κόλλησης
Αστεροειδείς Ρωγμή			Ρωγμή διακλαδωμένη προς διάφορες κατευθύνσεις

## 2.5 ΑΤΕΛΗΣ ΤΗΞΗ

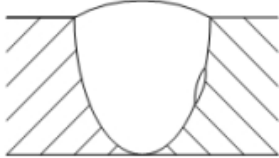
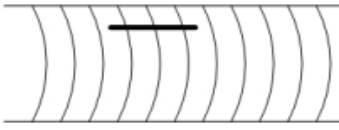
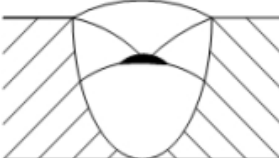
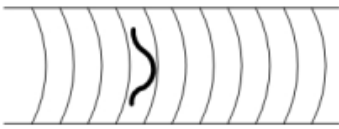
Με τον όρο ατελής τήξη της συγκόλλησης καλείται η ατελής σύντηξη της κόλλησης με το βασικό μέταλλο ή ακόμη η ατελής σύντηξη μεταξύ των στρωμάτων της κόλλησης. Αυτό το είδος σφάλματος αναπτύσσεται συνήθως στις πλευρικές επιφάνειες του μετάλλου συγκόλλησης.

Η ατελής τήξη προκύπτει είτε λόγω εσφαλμένου χειρισμού του ηλεκτροδίου είτε εξαιτίας των ακατάλληλων συνθηκών υπό τις οποίες πραγματοποιείται η συγκόλληση, όπως είναι η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, η ανεπαρκής ένταση ρεύματος και η ανεπαρκής προετοιμασία ακμών. Η παρουσία σκουριάς ή άλλων ξένων υλικών στις επιφάνειες συγκόλλησης είναι σε θέση να επιδράσει ως προς την εμφάνιση ατελούς τήξης.

Ο τρόπος με τον οποίο το σφάλμα της ατελούς τήξης επηρεάζει τη συμπεριφορά των συγκολλητών κατασκευών είναι σχεδόν ίδιος με εκείνο των πόρων και των στερεών εγκλεισμάτων.

Στον κάτωθι πίνακα παρουσιάζονται τα διάφορα είδη του σφάλματος της ατελούς τήξης, τα οποία σχετίζονται με το μέρος εμφάνισης αυτού του είδους σφάλματος.

Πίνακας 5: Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς τήξης

Ονομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Ατελής τήξη τοιχώματος (lack of side wall fusion)			Ατελής τήξη στα σύνορα της κόλλησης και του βασικού μετάλλου
Ατελής τήξη μεταξύ των ραφών (lack of inter-run fusion)			Ατελής τήξη μεταξύ των στρωμάτων

## 2.6 ΑΤΕΛΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ


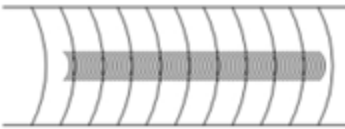

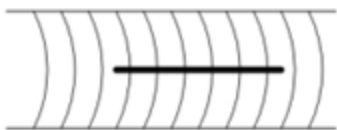
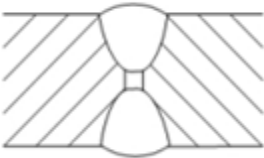
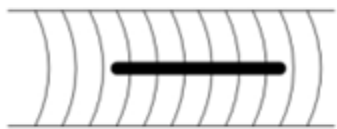
Με τον όρο ατελής διείσδυση καλείται το σφάλμα της συγκόλλησης κατά το οποίο πραγματοποιείται ανεπαρκής σχηματισμός μετάλλου συγκόλλησης καθ' όλο το διαθέσιμο πάχος ελάσματος. Στις συγκολλήσεις ενός πάσου εμφανίζεται συνήθως στη ρίζα της συγκόλλησης, ενώ στις συγκολλήσεις συμβολής με διπλό V εμφανίζεται μεταξύ των πάσων.

Οι αιτίες για την εμφάνιση αυτού του είδους σφαλμάτων συγκόλλησης είναι η ανεπαρκής προετοιμασία των βασικών μετάλλων, όπως το φρεζάρισμα αυτών ή η σχετική μεταξύ τους απόσταση, ο εσφαλμένος χειρισμός του ηλεκτροδίου, οι ακατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης, όπως είναι χαρακτηριστικά η υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, η ανεπαρκής ένταση ρεύματος καθώς και η παρουσία επιφανειακών οξειδίων, τα οποία είναι σε θέση να παρεμποδίσουν την τήξη του βασικού μετάλλου.

Το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης είναι πολύ σημαντικό, γιατί οι περιοχές που δεν έχουν υποστεί διείσδυση, και κυρίως η ρίζα, επιτρέπουν την ανάπτυξη συγκέντρωσης τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο στη περίπτωση κατά την οποία η συγκόλληση πρόκειται να καταπονηθεί με δυναμικά φορτία, ευνοώντας κατά αυτόν τον τρόπο τη δημιουργία ρωγμών, οι οποίες οδηγούν σε ταχεία κατάρρευση της συγκόλλησης.



Πίνακας 6: Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς διείσδυσης

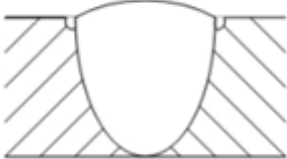
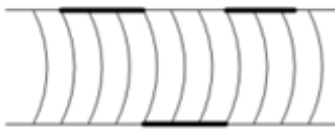

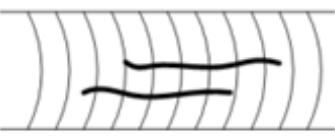
Ονομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Κοιλότητα στη ρίζα			Κοιλότητα στη ρίζα συγκόλλησης με πλήρη διείσδυση και των δύο άκρων του αύλακα.
Ατελής διείσδυση σε μονόπλευρη κόλληση			Μη πλήρης διείσδυση στον αυχένα του αύλακα σε μονόπλευρη συγκόλληση.
Ατελής διείσδυση σε δίπλευρη κόλληση			Μη πλήρης διείσδυση στον αυχένα του αύλακα σε δίπλευρη συγκόλληση.

## 2.7 ΥΠΟΚΟΠΗ

Ως υποκοπή ορίζεται αυτή η περίπτωση σφάλματος συγκόλλησης, κατά την οποία παρατηρείται μια γεωμετρική ασυνέχεια με τη μορφή εγκοπής που έχει σχηματιστεί με τήξη του βασικού μετάλλου και δεν γέμισε με μέταλλο συγκόλλησης. Η υποκοπή είναι σε θέση να εμφανιστεί είτε στον πόδα είτε στη ρίζα της συγκόλλησης. Έτσι προκύπτει η ταξινόμηση αυτού του είδους σφάλματος, η οποία παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.



Πίνακας 7: Ταξινόμηση σφάλματος υποκοπών

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Υποκοπές στο μέτωπο (face undercut)			Αυλάκωση στο βασικό υλικό στα σύνορα του μετώπου της κόλλησης.
Υποκοπές στη ρίζα (root undercut)			Αυλάκωση στο βασικό υλικό στα σύνορα στη ρίζα της κόλλησης.

## 2.8 ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Άναμμα τόξου: Αυτού του είδους σφάλμα συγκόλλησης παρατηρείται στη περίπτωση κατά την οποία ο συγκολλητής ανάψει κατά λάθος το τόξο πάνω στο βασικό μέταλλο που γειτονεύει με το μέταλλο της συγκόλλησης με αποτέλεσμα τη προσωρινή τήξη μικρού όγκου από το βασικό μέταλλο. Τα ανάμματα τόξου είναι ανεπίτρεπτα σε ορισμένες συγκολλητές κατασκευές, γιατί το τηγμένο βασικό μέταλλο μπορεί να υποστεί ρηγματώση από τη ταχεία απόψυξη, ή γιατί μπορεί να δημιουργηθεί επιφανειακός πόρος σε αυτή τη περιοχή. Οι ασυνέχειες αυτές μπορούν, κάτω από κατάλληλες συνθήκες, να οδηγήσουν σε ρηγματώσεις μεγάλης έκτασης.



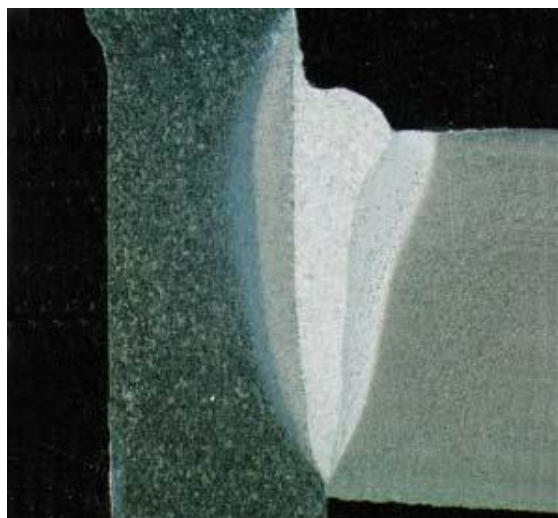
Εικόνα 6: Σφάλμα ανάμματος τόξου

Πιτσίλισμα μετάλλου: Πρόκειται για σωματίδια μετάλλου, τα οποία εκτοξεύονται από τη λίμνη συγκόλλησης και εμφανίζονται στην επιφάνεια του βασικού μετάλλου κοντά στη συγκόλληση. Τα αίτια εμφάνισης αυτού του είδους σφάλμα αποτελούν το μαγνητικό φύσημα, η εσφαλμένη επιλογή ηλεκτροδίου ή έντασης ρεύματος, το υπερβολικά μεγάλο μήκος του τόξου συγκόλλησης. Από την άλλη μεριά είναι σε θέση να διορθωθεί με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, με ρύθμιση της έντασης ρεύματος στη σωστή τιμή για το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο.



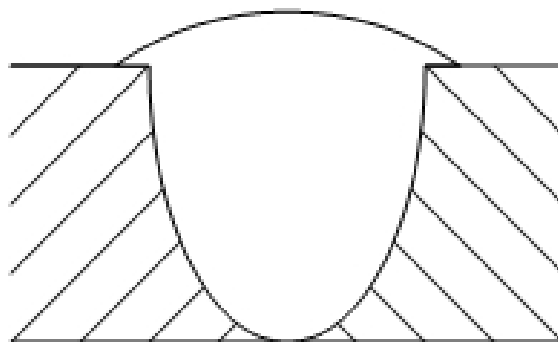
*Εικόνα 7: Πιτσίλισμα*

Υποπλήρωση: Πρόκειται για μια εντύπωση στο πρόσωπο ή στη ρίζα της συγκόλλησης σε ένα επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του βασικού μετάλλου. Η ασυνέχεια αυτή διορθώνεται σχετικά εύκολα με την συμπλήρωση ραφών.



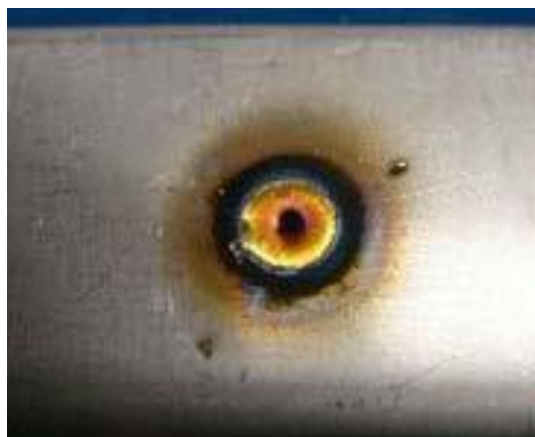
*Εικόνα 8: Σφάλμα υποπλήρωσης*

Επικάλυψη: Η επικάλυψη πρόκειται για μια κατάσταση κατά την οποία το μέταλλο συγκόλλησης ξεπερνά τα όρια που έχουν οριστεί για αυτή με αποτέλεσμα να υπερκαλύπτει άλλα μέρη του προς συγκόλληση αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται εγκοπές που είναι επικίνδυνες σε διάφορες συγκεντρώσεις τάσεων και φορτίσεων. Τέτοια σφάλματα προκαλούνται λόγω εσφαλμένων διαδικασιών και τεχνικών συγκόλλησης.



*Εικόνα 9: Σφάλμα επικάλυσης*

Κρατήρας: Πρόκειται για εντύπωση στον τερματισμό μιας ραφής. Κρατήρες επίσης εμφανίζονται πάνω στο μέταλλο συγκόλλησης.



*Εικόνα 10: Σφάλμα κρατήρα*

Διαμπερής τήξη: Πρόκειται για μια κατάσταση κατά την οποία το τόξο προκαλεί τήξη του πυθμένα σύνδεσης.



*Εικόνα 11: Σφάλμα διαμπερούς τήξης*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

### 3.1 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Με τον όρο «Μη καταστρεπτικός έλεγχος συγκολλήσεων(Non destructive evaluation of welds, NDT)» καλούμε όλες τις μεθόδους και δραστηριότητες δοκιμών, ελέγχου και επιθεώρησης μιας συγκόλλησης τόσο για την ανίχνευση και τον εντοπισμό μιας ασυνέχειας ή ενός σφάλματος όσο για και την ανάλυση και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών αυτού (είδος, θέση, μέγεθος, προσανατολισμός), ούτως ώστε να αξιολογηθεί ορθώς εάν η συγκόλληση είναι αποδεκτή σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα και προδιαγραφές, τα οποία διέπουν την συγκεκριμένη εφαρμογή και συγκολλητή κατασκευή. Στην περίπτωση κατά την οποία εντοπιστεί ασυνέχεια μη αποδεκτή με βάση τα συγκεκριμένα πρότυπα, τότε χαρακτηρίζεται ως σφάλμα συγκόλλησης (weld defect) και ως εκ τούτου η επισκευή της συγκεκριμένης συγκόλλησης (weld repair) κρίνεται ως απαραίτητη. Ο όρος «μη καταστρεπτικός» αναφέρεται στο ότι ο έλεγχος η μέθοδος, η οποία θα εφαρμοστεί δεν επηρεάζει και δεν επεμβαίνει στη δομή της κατασκευής, μη προκαλώντας την καταστροφή του. Οι πιο σημαντικές τεχνικές μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου είναι οι εξής:

- Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection)
- Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Liquid Penetrant Inspection)
- Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particle Inspection)
- Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic Inspection)
- Έλεγχος με δινορρεύματα (Eddy Current Inspection)
- Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic Inspection)

#### 3.1.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο οπτικός έλεγχος των εξωτερικών ατελειών και ελαττωμάτων των συγκολλήσεων είναι ίσως ο βασικότερος τρόπος ελέγχου και υποχρεωτικά εφαρμοζόμενος σε κάθε είδος κατασκευών.

Ο έλεγχος αυτός συνίσταται στην παρατήρηση με πρότυπα και μετρήσεις των συγκολλήσεων, με σκοπό την εξακρίβωση εάν οι μορφές και οι διαστάσεις αυτών συμφωνούν με τις τεχνικές προδιαγραφές εκτέλεσης ή μήπως περιέχουν επιφανειακά σφάλματα.

Τόσο η ραφή όσο και το μητρικό υλικό, το οποίο εφάπτεται σε αυτήν πριν από τον έλεγχο καθαρίζονται επιμελώς από σκουριές, πιτσιλίσματα και άλλων διαφόρων

ειδών ακαθαρσίες, οι οποίες καθιστούν τον αποτελεσματικό έλεγχο της συγκόλλησης και την εξακρίβωση των μετρήσεων δυσκολότερη.

Μέσω του οπτικού ελέγχου είναι σε θέση να παρατηρηθούν και να εξακριβωθούν πλήρως ή σε έναν βαθμό οι ακόλουθες αστοχίες:

- Οι παραμορφώσεις της κατασκευής καθώς επίσης και η μεταβολή των ονομαστικών διαστάσεων της αρχικής κατασκευής.
- Οι εσφαλμένες διαστάσεις μιας αυχενικής συγκόλλησης, δηλαδή το πάχος, το μήκος του τμήματος της συγκόλλησης και το βήμα.
- Το εσφαλμένο και μη αποδεκτό σχήμα μιας αυχενικής συγκόλλησης, όπως αυτή είναι σε θέση να εκφραστεί από την υπερβολικά μεγάλη κυρτότητα ή η ανομοιομορφία όσον αφορά στο μήκος των πλευρών της κόλλησης.
- Η κοιλότητα του μετώπου μιας μετωπικής συγκόλλησης, καθώς επίσης και η αρκετά μεγάλη ενίσχυση του μετώπου, το άπλωμα ή οι υποκοπές αυτού και η μετατόπιση των άκρων.
- Στις μονόπλευρες μετωπικές συγκολλήσεις η ελλιπής διείσδυση, η κοιλότητα στη ρίζα της συγκόλλησης και το κρέμασμα αυτών.
- Στις μετωπικές και στις γωνιακές συγκολλητές συνδέσεις μετάλλων οι μη επαρκώς συγκολλημένοι κρατήρες, τα καψίματα, το πορώδες του μετώπου, τα ίχνη ανάμματος τόξου στο μητρικό υλικό αυτών.
- Οι ρωγμές, οι οποίες είναι σε θέση να εμφανιστούν τόσο στην ίδια την κόλληση όσο και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Τα σφάλματα αυτού του είδους χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης εξαιτίας της επικινδυνότητας αυτών και επομένως κρίνεται ως απαραίτητη η πλήρης και ακριβής αναγνώριση όλων των χαρακτηριστικών των ρωγμών (προσανατολισμός και κατεύθυνση ρωγμής, μέγεθος, θέση κλπ.). Για αυτό το λόγο η εξέταση αυτών γίνεται είτε με χρήση κατάλληλης μεγεθυντικής ικανότητας μεγεθυντικό φακό, είτε μέσω διεισδυτικών ελέγχων.

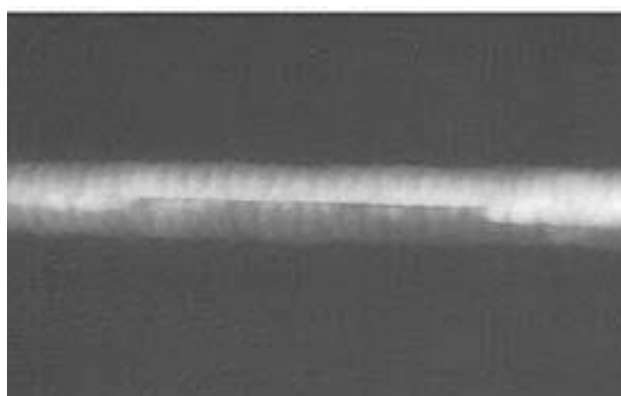
### **3.1.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**

Ο ραδιογραφικός έλεγχος αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλητών συνδέσεων μετάλλων. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στη διαφορική απορρόφηση διεισδύουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το ελεγχθέν αντικείμενο, η οποία μπορεί να είναι αποτέλεσμα της διαφοράς στην πυκνότητα και στη σύσταση του υλικού και του πάχους αυτού. Επομένως μέσω του ραδιογραφικού ελέγχου είναι δυνατός ο προσδιορισμός και η ανίχνευση περιοχών με διαφορετική πυκνότητα ή πάχος σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο, όπως είναι οι ασυνέχειες των συγκολλήσεων. Εν γένει με τη μέθοδο αυτή

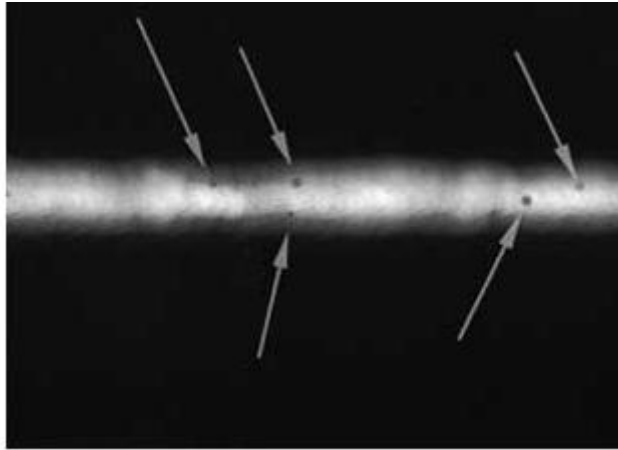
είναι δυνατή η ανίχνευση ασυνεχειών με αξιόλογο πάχος σε μια μόνο διεύθυνση παράλληλη προς τη δέσμη της ακτινοβολίας, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η δυνατότητα της μεθόδου ως προς την ανίχνευση επίπεδων ασυνεχειών, όπως είναι οι ρωγμές, εξαρτάται από τον προσανατολισμό της δέσμης σε σχέση με τη συγκόλληση. Από την άλλη μεριά τρισδιάστατες ασυνέχειες, όπως είναι οι πόροι και τα εγκλείσματα, τα οποία έχουν υπολογίσιμο πάχος σε όλες τις διευθύνσεις, είναι σε θέση να ανιχνευτούν μονάχα στην περίπτωση κατά την οποία η διαφορά στη τιμή της πυκνότητας σε σχέση με το περιβάλλον υλικό είναι άνω του 1%.

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται μια πηγή ακτινοβολίας και ένα φιλμ. Στον ραδιογραφικό έλεγχο χρησιμοποιούνται δύο πηγές ακτινοβολίας, ακτίνες- X και ακτίνες- γ. Για την εφαρμογή της μεθόδου με ακτίνες- X χρησιμοποιούνται φορητές πηγές (X-ray tubes), για ακτίνες- γ χρησιμοποιούνται τα ραδιενεργά ισότοπα Ιρίδιο-19 και κοβάλτιο-60.

Η τεχνική της μεθόδου είναι η εξής: έστω ότι σε μια συγκόλληση έχει αναπτυχθεί υποεπιφανειακή ρωγμή, η οποία σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης ακτινοβολίας. Έτσι η προσπίπτουσα στο έλασμα ακτινοβολία απορροφάται από αυτό, με την απορροφόμενη ακτινοβολία από τη ρωγμή να είναι διαφορετική σε μέγεθος από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος ελάσματος. Επομένως τελικά το ποσό ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φιλμ ακριβώς κάτω από τη ρωγμή είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο των παρακείμενων περιοχών. Με τον τρόπο αυτό αποτυπώνεται ένα είδωλο ή σκιά της ρωγμής επάνω στο φιλμ. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ραδιογραφήματων απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες.



*Εικόνα 12: Ραδιογράφημα ατελούς διεύθυνσης*



*Εικόνα 13: Ραδιογράφημα πόρων*

### **3.2 ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ**

Με τον όρο «Καταστρεπτικοί έλεγχοι συγκολλήσεων» καλούνται οι τεχνικές και οι μέθοδοι ελέγχου συγκολλήσεων ως προς την ορθότητα της λειτουργίας της και των μηχανικών της ιδιοτήτων, οι οποίες επιφέρουν τη θραύση του ελεγχθέντος συγκολλημένου δοκιμίου με το πέρας του ελέγχου. Έτσι παραδείγματος χάριν για τον έλεγχο των συγκολλήσεων ενός συγκολλημένου δοχείου πίεσεως, η εξέταση αυτών πραγματοποιείται με την άσκηση υδραυλικής πίεσεως σε αυτό μέχρι τη τελική θραύση αυτού. Στην περίπτωση κατά την οποία η θραύση προέλθει από αστοχία των τοιχωμάτων και όχι των συγκολλήσεων τότε θεωρείται η συγκόλληση ως επιτυχημένη και αποδεκτή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται πως έχουν επηρεαστεί οι μηχανικές ιδιότητες αυτού. Οι κυριότερες μέθοδοι και δοκιμές που μπορεί να πραγματοποιηθούν για την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων μιας συγκολλητής σύνδεσης είναι οι εξής:

- Δοκιμή εφελκυσμού (Tension Inspection)
- Δοκιμή κάμψης και λυγισμού (Bend Test)
- Δοκιμή κρούσης και δυσθραυστότητας (Impact Test)
- Δοκιμή σκληρότητας (Hardness Inspection)

#### **3.2.1 ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

Η δοκιμή εφελκυσμού αποτελεί τη βασικότερη μέθοδο δοκιμών αντοχής ενός συγκολλημένου τεμαχίου. Μέσω των δοκιμών αυτών καθίσταται δυνατή η λήψη συγκεκριμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων, τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες αντοχής της ελεγχθείσας συγκολλητής σύνδεσης και μέσω αυτών είναι δυνατός ο



ορθός σχεδιασμός και υπολογισμός της κατασκευής αυτής. Στις συγκολλήσεις εφαρμόζονται τα ακόλουθα είδη στατικών δοκιμών εφελκυσμού:

- Δοκιμή εφελκυσμού επίπεδης μετωπικής σύνδεσης. Μέσω της δοκιμής αυτής είναι δυνατή η εξέταση τόσο της αντοχής της σύνδεσης όσο και η αντοχή της ίδιας της κόλλησης. Για αυτό το λόγο υπάρχουν και δύο διαφορετικοί τύποι δοκιμίων. Κατά τη δοκιμή αυτή καθορίζεται μόνο η αντοχή στον εφελκυσμό, σύμφωνα με τη σχέση:

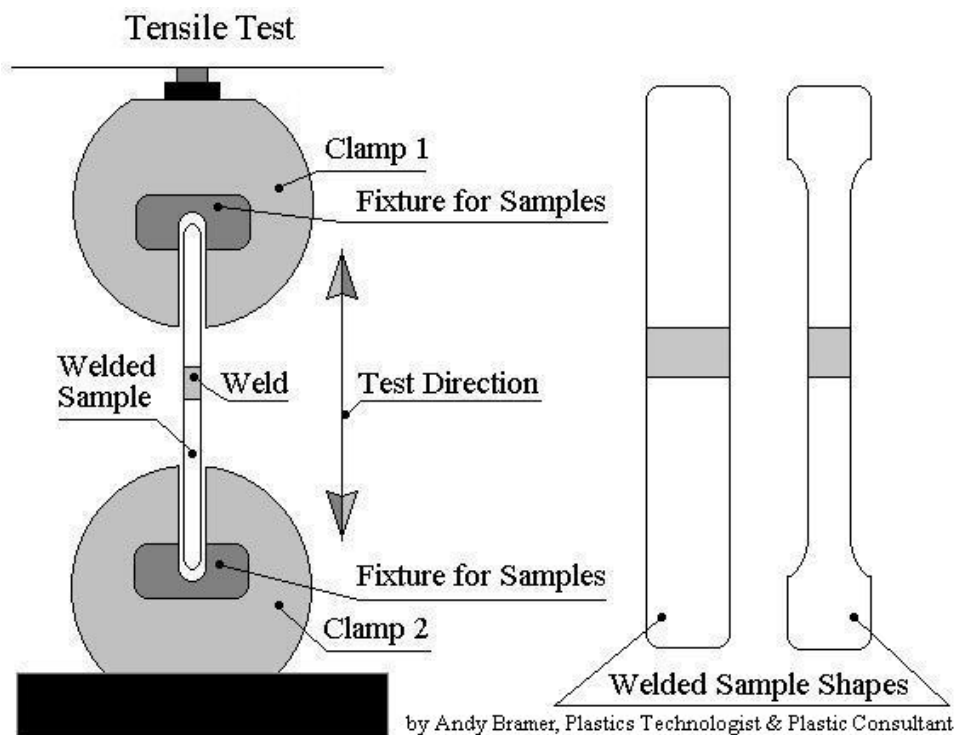
$$Rm = \frac{Fm}{S_0 \times k} \text{ (MPa)}$$

$F_m$  : η μέγιστη δύναμη εφελκυσμού κατά τη δοκιμή (daN)

$S_0$ : η αρχική διατομή του δοκιμίου ( $S_0 = a_0 b_0$ )

$k=1.0$  για εξέταση της αντοχής της σύνδεσης

$k=1.08$  για εξέταση της αντοχής της κόλλησης της σύνδεσης



Εικόνα 14: Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού

- Δοκιμή εφελκυσμού περιφερειακής σύνδεσης σωλήνα ή στρογγυλών ράβδων. Η τεχνική, η οποία θα εφαρμοστεί και ο τρόπος διενέργειας του ελέγχου αυτού καθορίζεται από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα ή της ράβδου που πρόκειται να εξεταστεί.

- Δοκιμή εφελκυσμού της κόλλησης. Η μέθοδος αυτή διενεργείται σε δοκίμια, τα οποία έχουν αποκοπεί από μετωπικές ή αυχενικές συγκολλητές συνδέσεις και έχουν πάχος μικρότερο των 10mm.
- Δοκιμή εφελκυσμού εναποτιθέμενου υλικού. Το εναποτιθέμενο υλικό προκύπτει από την αναγόμωση ή τη μετωπική συγκόλληση δοκιμαστικών πλακών, με τη συμμόρφωση προς τις συνθήκες συγκόλλησης, για δεδομένο είδος εναποτιθέμενου υλικού.
- Δοκιμές εφελκυσμού αυχενικών συγκολλήσεων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι συγκολλήσεις σταυρωτής σύνδεσης, οι συγκολλήσεις σύνδεσης επικάλυψης τόσο εγκάρσιες όσο και με διαμήκεις κολλήσεις. Για τα δοκίμια αυχενικών συνδέσεων και αυτών με εγκάρσιες κολλήσεις, η αντοχή τους υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$Rm = 2 \times \frac{Fm}{\Sigma(\alpha h)} \text{ (MPa)}$$

$\Sigma(\alpha h)$ : το άθροισμα των επιφανειών των διαμηκών διατομών και των τεσσάρων κολλήσεων ( $\text{mm}^2$ )

Για τα δοκίμια διαμηκών κολλήσεων η αντοχή των κολλήσεων σύνδεσης υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$Rm = \frac{Fm}{\frac{\Sigma\alpha}{4} \times \frac{\Sigma i}{4}} \text{ (MPa)}$$

$\Sigma\alpha$ : το άθροισμα όλων των παχών των κολλήσεων (mm)

$\Sigma i$ : το άθροισμα όλων των 8 μηκών των κολλήσεων (mm)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061

### 4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το αλουμίνιο τύπου 6061 είναι από τα κράματα αλουμινίου 6000, το οποίο περιλαμβάνει εκείνα τα μείγματα που χρησιμοποιούν μαγνήσιο και πυρίτιο ως κύρια στοιχεία κράματος. Το δεύτερο ψηφίο υποδεικνύει τον βαθμό ελέγχου ακαθαρσιών για το αλουμίνιο βάσης. Όταν αυτό το δεύτερο ψηφίο είναι "0", υποδηλώνει ότι ο κύριος όγκος του κράματος είναι αλουμίνιο του εμπορίου και περιέχει τα αναμενόμενα επίπεδα ακαθαρσιών. Το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο είναι δείκτες για μεμονωμένα κράματα. Η ονομαστική σύνθεση του αλουμινίου τύπου 6061 δίνεται στον Πίνακα 8. Η πυκνότητα του κράματος αλουμινίου 6061 είναι 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

Πίνακας 8: Χημική σύσταση αλουμινίου 6061

Χημική σύσταση αλουμινίου 6061 (%)				
Πυρίτιο	Σίδηρο	Χαλκός	Μαγνήσιο	Μαγγάνιο
0,4 - 0,8	0,7	0,15 - 0,4	0,8 - 1,2	0,15
Χρώμιο	Ψευδάργυρος	Τιτάνιο	Υπόλοιπα	Αλουμίνιο
0,05 - 0,35	0,25	0,15	0,15	97,9

Το AA6061-T6 αποτελεί μέτριας αντοχής κράμα αλουμινίου της θερμοσκληρυνόμενης σειράς 6000 με θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση σε θερμοκρασία υψηλότερη του περιβάλλοντος με στόχο τις καλύτερες μηχανικές αντοχές. Η θερμική κατεργασία T6 αντιστοιχεί στη θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης κατά την οποία προσδίδεται στο κράμα η υψηλή αντοχή μέσω ανάπτυξης λεπτομερούς διασποράς σωματιδίων στη μήτρα του κράματος αλουμινίου και συγκεκριμένα αυτή η φάση είναι η β-Mg<sub>2</sub>Si.

### 4.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 6061 διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία ή γίνεται ισχυρότερο χρησιμοποιώντας τη διαδικασία σκλήρυνσης.

Όλες οι θεωρητικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 9. Ο συντελεστής ελαστικότητάς του είναι 68,9 GPa (10.000 ksi) και ο συντελεστής διάτμησης είναι 26 GPa (3770 ksi). Αυτές οι τιμές μετρούν την ακαμψία ή την αντίσταση του κράματος στην παραμόρφωση.

Δύο σημαντικοί παράγοντες κατά την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι η αντοχή διαρροής και η τελική αντοχή. Η αντοχή διαρροής περιγράφει τη μέγιστη ποσότητα τάσης που απαιτείται για την ελαστική παραμόρφωση του εξαρτήματος σε μια δεδομένη διάταξη φόρτισης. Η τελική αντοχή, από την άλλη πλευρά,

περιγράφει τη μέγιστη ποσότητα τάσης που μπορεί να αντέξει ένα υλικό πριν από τη θραύση. Το κράμα αλουμινίου 6061 έχει αντοχή εφελκυσμού διαρροής 276 MPa (40000 psi) και μέγιστη αντοχή εφελκυσμού 310 MPa (45000 psi).

Η αντοχή σε διάτμηση είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται στη διάτμηση από αντίθετες δυνάμεις κατά μήκος ενός επιπέδου. Αυτή η τιμή είναι χρήσιμη σε εφαρμογές στρέψης, όπως σε άξονες ή ράβδους, όπου η συστροφή μπορεί να προκαλέσει αυτού του είδους τη διατμητική τάση σε ένα υλικό. Η αντοχή στη διάτμηση του κράματος αλουμινίου 6061 είναι 207 MPa (30000 psi).

Η αντοχή στην κόπωση είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται στη θραύση υπό κυκλική φόρτιση, όπου ένα μικρό φορτίο προσδίδεται επανειλημμένα στο υλικό με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η τιμή είναι χρήσιμη για εφαρμογές όπου ένα εξάρτημα υπόκειται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτωσης, όπως άξονες οχημάτων ή έμβολα. Η αντοχή σε κόπωση του κράματος αλουμινίου 6061 είναι 96,5 MPa (14000 psi).

*Πίνακας 9: Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 6061*

<b>Μηχανικές ιδιότητες</b>	<b>Μετρικό σύστημα</b>	<b>Αγγλικό σύστημα</b>
<b>Απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό</b>	310 MPa	45000 psi
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό</b>	276 MPa	40000 psi
<b>Αντοχή διάτμησης</b>	207 MPa	30000 psi
<b>Δύναμη κόπωσης</b>	96,5 MPa	14000 psi
<b>Μέτρο ελαστικότητας</b>	68,9 GPa	10000 ksi
<b>Μέτρο διάτμησης</b>	26 GPa	3770 ksi

### **4.3 ANTOXH SE DIABRWSEH**

Όταν εκτίθεται σε αέρα ή σε νερό, το κράμα αλουμινίου 6061 σχηματίζει ένα στρώμα οξειδίου που το καθιστά μη αντιδραστικό με στοιχεία που είναι διαβρωτικά στο υποκείμενο μέταλλο. Η αντίσταση στη διάβρωση εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές ή τις υδατικές συνθήκες. Ωστόσο, σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, τα διαβρωτικά αποτελέσματα είναι γενικά αμελητέα στον αέρα και νερό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι λόγω της περιεκτικότητάς του σε χαλκό, είναι ελαφρώς

λιγότερο ανθεκτικό στη διάβρωση από άλλους τύπους κραμάτων, όπως το κράμα αλουμινίου 5052, που δεν περιέχει χαλκό. Το κράμα 6061 παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή αντίσταση στη διάβρωση από πυκνό νιτρικό οξύ, καθώς και από αμμωνία και υδροξείδιο του αμμωνίου.

#### **4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Το αλουμίνιο τύπου 6061 είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κράματα αλουμινίου. Η ικανότητα συγκόλλησης και μορφοποίησής του το καθιστούν κατάλληλο για πολλές εφαρμογές γενικής χρήσης. Η υψηλή μηχανική αντοχή και η αντοχή του σε διάβρωση καθιστούν το κράμα τύπου 6061 ιδιαίτερα χρήσιμο σε αρχιτεκτονικές, δομικές και μηχανοκίνητες εφαρμογές. Ο κατάλογος των χρήσεών του είναι εξαντλητικός, αλλά ορισμένες σημαντικές εφαρμογές του κράματος αλουμινίου 6061 περιλαμβάνουν:

- Συγκολλημένα συγκροτήματα
- Σκελετοί θαλάσσης
- Αεροσκάφη και κουφώματα φορτηγών
- Χημικός εξοπλισμός
- Ηλεκτρονικά μέρη
- Έπιπλα
- Συνδετήρες
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Ψύκτες θερμότητας
- Δεξαμενές αποθήκευσης

#### **4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Παρατηρείται ότι ειδικά η ελληνική βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, και ότι δεν υπάρχει εργασία με περιεχόμενο σχετικό της παρούσης. Με βάση λοιπόν, τη χρήση του αλουμινίου 6061 σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών, κάποιες από τις οποίες μάλιστα εντοπίζονται σε κλάδους με υψηλές προδιαγραφές και απαιτήσεις, κρίνεται απαραίτητη η μελέτη της αντοχής των συγκολλήσεων του εν λόγω υλικού.

Μια εργασία με σχετικό περιεχόμενο με την οποία μάλιστα στο τέλος της παρουσίασης θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι η εξής.

Qiang Zhu, Han Yu, Jiquan Zhang, Miao Li, Xiaoguang Hu, Experimental study on Tig welding properties of 6061 and 7003 aluminum Alloys , IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 621, 2020 5th International Conference on Renewable Energy and Environmental Protection 23-25 October 2020, Shenzhen, China (1)

Ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση για συγκολλήσεις AA6061 – T6 με μέθοδο TIG ή και άλλες τεχνικές.

1. Ευθυμίου, Ε. , Μελέτη και σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης EBW και TIG στο κράμα αλουμινίου 6061, Βόλος, Οκτώβριος 2006
2. Σπηλιοπούλου, Μαρία-Ελισσάβετ Κ. Χαρακτηρισμός μικροδομής κράματος αλουμινίου 6061 μετά από συνεχή χύτευση και κατά την κατεργασία της ομογενοποίησης, 2004, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
3. Cheng, J., Zhang, Z., Dong, X., Song, G., Liu, L., A novel post-weld composite treatment process for improving the mechanical properties of AA 6061-T6 aluminum alloy welded joints, 2022, Journal of Manufacturing Processes
4. Guzmán, I., Granda, E., Cruz, C., Velazquez, R., Flores, L. Corrosion Performance and Mechanical Strength in Aluminum 6061 Joints by Pulsed Gas Metal Arc Welding, 2022, Materials
5. Hu, Y., Leng, Y., Wu, T., Wang, H., Wang, M., Effect of SiC Content and T6 Heat Treatment on Bending Properties of Al6061/SiCp Composites: Homogenous and Graded , 2022, Journal of Materials Engineering and Performance
6. Nie F., Dong H., Chen S., Li P., Wang L., Zhao Z., Li X., Zhang H. Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints. J. Mater. Sci. Technol. 2018
7. Petit, T., Ritter, C., Besson, J., Morgener, T.F. Effects of neutron irradiation and post-irradiation annealing on pop-in crack propagation instabilities in 6061 aluminium alloy, 2022, Journal of Nuclear Materials

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 5.1 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό μιας συγκολλητής σύνδεσης μεταλλικών τεμαχίων καθώς, και η επίδραση των ατελειών στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μια σειρά καταστρεπτικών ελέγχων δοκιμών εφελκυσμού ειδικών συγκολλητών μεταλλικών τεμαχίων (εικόνα 15) ιδίου υλικού στο εργαστήριο του κτιρίου Ξ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου.

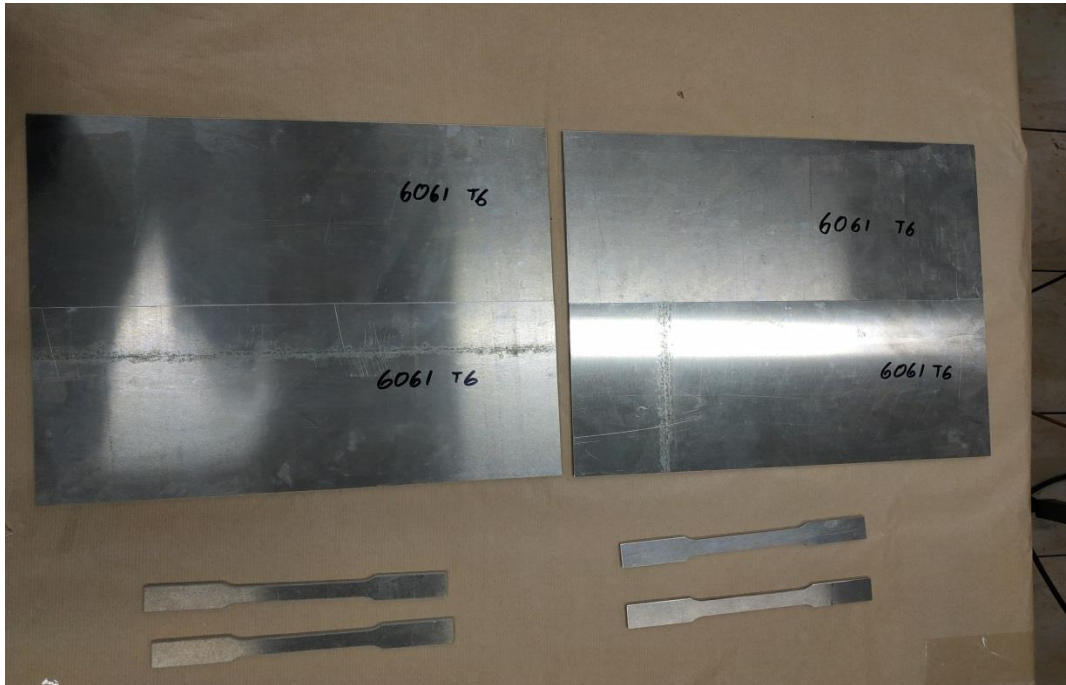
Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού για διαφορετικά δοκίμια. Τα δείγματα που εξετάστηκαν ήταν φύλλα AA6061-T6, τέσσερα από τα οποία (BM1, BM2, BM3, BM4) λειτούργησαν ως δείγματα αναφοράς, διότι δεν αποτελούν προϊόντα συγκόλλησης. Πέντε δείγματα (Δ11, Δ12, Δ13, Δ14, Δ15) προέκυψαν από μια τέλεια συγκόλλημενη πλάκα και τέλος, πέντε δείγματα (Δ21, Δ22, Δ23, Δ24, Δ25) τα οποία προέκυψαν από μια πλάκα που περιείχε εκούσια σφάλματα κατα μήκος της ραφής της συγκόλλησης.

Κατά τη διενέργεια των δοκιμών εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν τα διαγράμματα τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης των δοκιμών. Έτσι υπολογίζεται η μέγιστη εφελκυστική τάση (UTS) που ασκείται σε κάθε δοκίμιο προτού αστοχήσει και την ομοιόμορφη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη τιμή αυτή.

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μελέτη της επίδρασης των σφαλμάτων που προέκυψαν κατά την συγκόλληση αλλά και η σύγκριση της αντοχής των δοκιμών της συγκολλημένης πλάκας καλής ποιότητας με αυτή της αντίστοιχης πλάκας με τα εκούσια σφάλματα και με τα δοκίμια αναφοράς. Επίσης, εντοπίζοντας τα δοκίμια τα οποία δε περιλαμβάνουν κάποιο σφάλμα στη συγκόλληση πραγματοποιείται η σύγκριση της αντοχής των τέλεια συγκολλημένων δοκιμών με αυτή των δοκιμών που περιλαμβάνουν σφάλμα και των δοκιμών αναφοράς.

## 5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Τα δοκίμια προκύπτουν από φύλλα κράματος ΑΑ6061-Τ6 πάχους 3,1mm. Τα φύλλα αλουμινίου και τα δοκίμια αναφοράς απεικονίζονται στη Εικόνα 15.



*Εικόνα 15: Φύλλα αλουμινίου 6061 πριν τη συγκόλληση και δοκίμια αναφοράς*

Οι διαστάσεις των δοκιμίων αναφοράς, επομένως και όλων των υπολοίπων συγκολλητών δοκιμίων, είναι 85x13,1x3,1 mm.

Για τη συγκόλληση των φύλλων αλουμινίου χρησιμοποιείται η μέθοδος TIG, η οποία έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Υλοποιήθηκε στη μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης Kemppi MasterTig AC/DC pulse 3500W Inverter η οποία φαίνεται στις Εικόνες 16 και 17.





*Εικόνα 16: Μηχανή MasterTig AC/DC 3500W*



*Εικόνα 17: Πίνακας ελέγχου μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης*

Στον πίνακα 10 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως δίνονται στο manual της κατασκευάστριας εταιρίας.

*Πίνακας 10: Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής*

<b>Technical data</b>		
<b>Mastertig AC/DC 3500 W</b>		
<b>Supply voltage</b>	3~50/60 Hz	400 V +/- 10%
<b>Loadability</b>	TIG 70% ED	350 A / 11,7 kVA
	TIG 100% ED	320 A / 9,3 kVA
	MMA 60% ED	350 A / 15,7 kVA
	MMA 100% ED	280 A / 11,2 kVA
<b>Fuse</b>	400 V	20 A Slow
<b>W elding current range</b>	TIG DC	3 A / 10 V ... 350 A / 24 V
	TIG AC	10 A / 10 V ... 350 A / 24 V
	MMA DC	0 A / 20V ... 350 A / 34 V
	MMA AC	0 A / 20V ... 350 A / 34 V
<b>OCV</b>		70 V DC
<b>AC frequency</b>	Fixed/adjustable	60 Hz / 50 ... 200 Hz
<b>Efficiency</b>		80 % ( 350 A / 34 V )
<b>Power factor</b>		0,9 ( 350 A / 34 V )
<b>Temp class</b>		B ( 130 C ) H ( 180 C )
<b>Degree of protection</b>		IP 23 C
<b>Dimensions</b>	L, W, H (mm)	690 x 260 x 870
<b>Weight</b>	Kg	74
<b>Coolant max. press</b>		350 kPa
<b>Cooling unit power</b>		1300 W

Χρησιμοποιήθηκε ητσιμπίδα της ίδιας εταιρίας Kemppi TTK 350W και ηλεκτρόδιο συγκόλλησης η βέργα TIG Αλουμινίου Al.Mg 5 Mn/5356 που χρησιμοποιείται κυρίως σε συγκολλήσεις εναλλασσόμενου ρεύματος και για τη διεξαγωγή συγκολλήσεων πολύ υψηλών ποιοτικών απαιτήσεων. Η ένταση του ρεύματος κατά τη συγκόλληση είναι μεταξύ 120 και 160A.

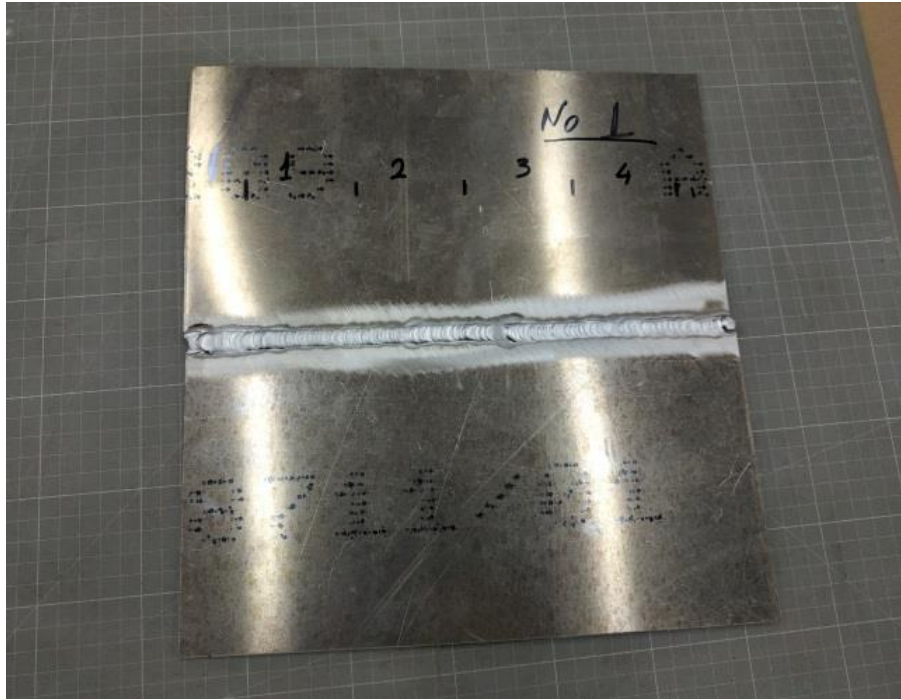
Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό από τη διαδικασία της συγκόλλησης (Εικόνα 18 και Εικόνα 19) και των τελικών συγκολλημένων τεμαχίων, σε μπροστά και πίσω όψη (για την πλάκα Νο1: Εικόνα 20 και Εικόνα 21 και για την πλάκα Νο2: Εικόνα 22 και Εικόνα 23).



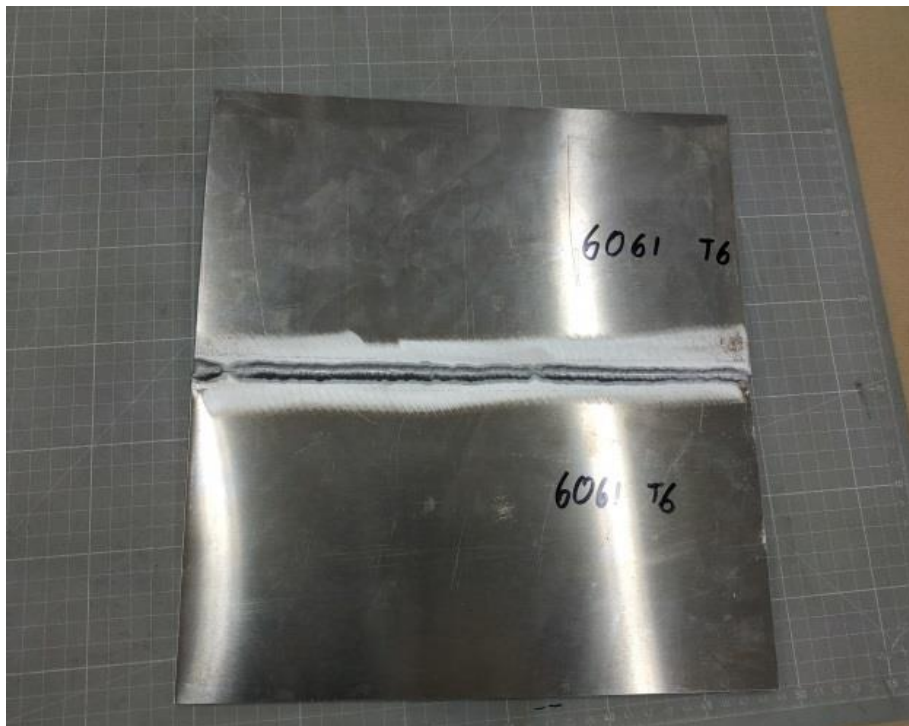
*Εικόνα 18: Ηλεκτροσυγκόλληση φύλλων αλουμινίου 6061*



*Εικόνα 19: Ηλεκτροσυγκόλληση φύλλων αλουμινίου 6061*

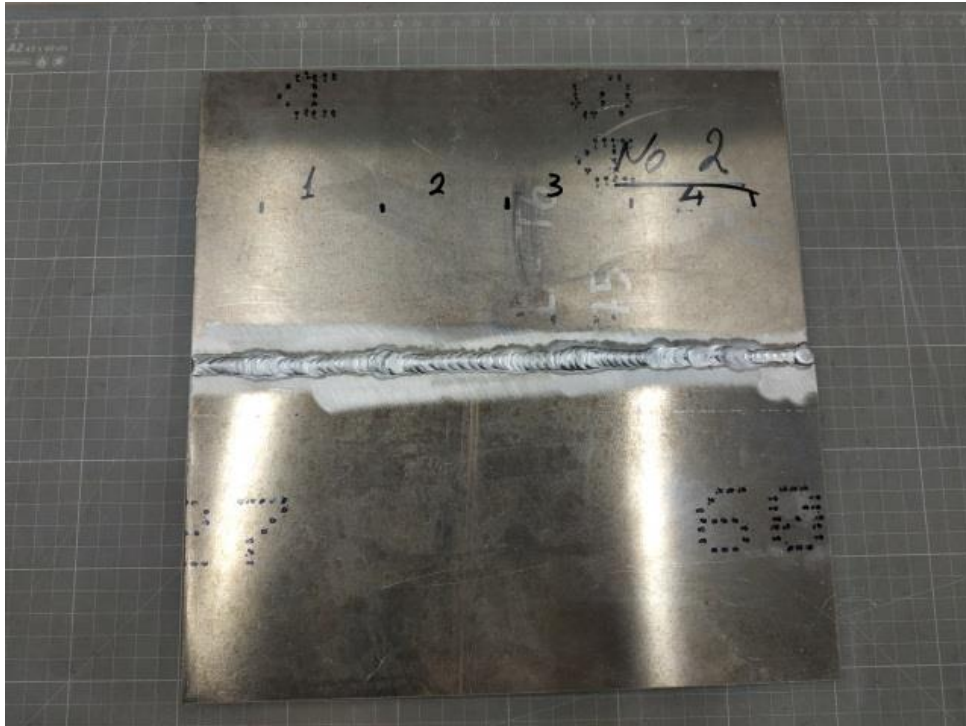


*Εικόνα 20: Μπροστά όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο1*

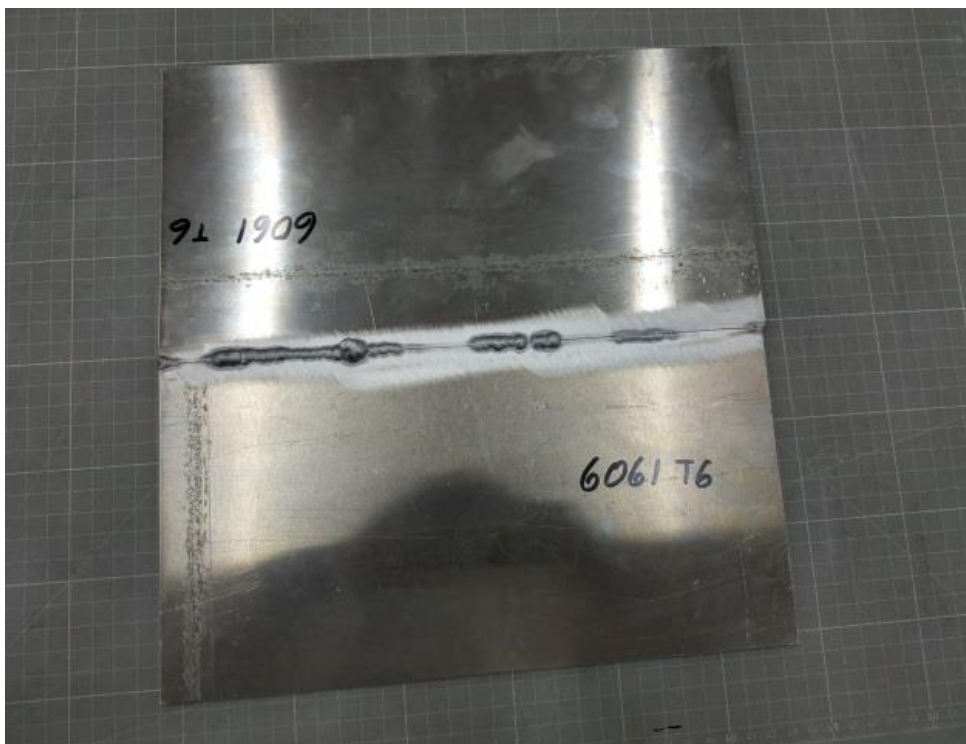


*Εικόνα 21: Πίσω όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο1*



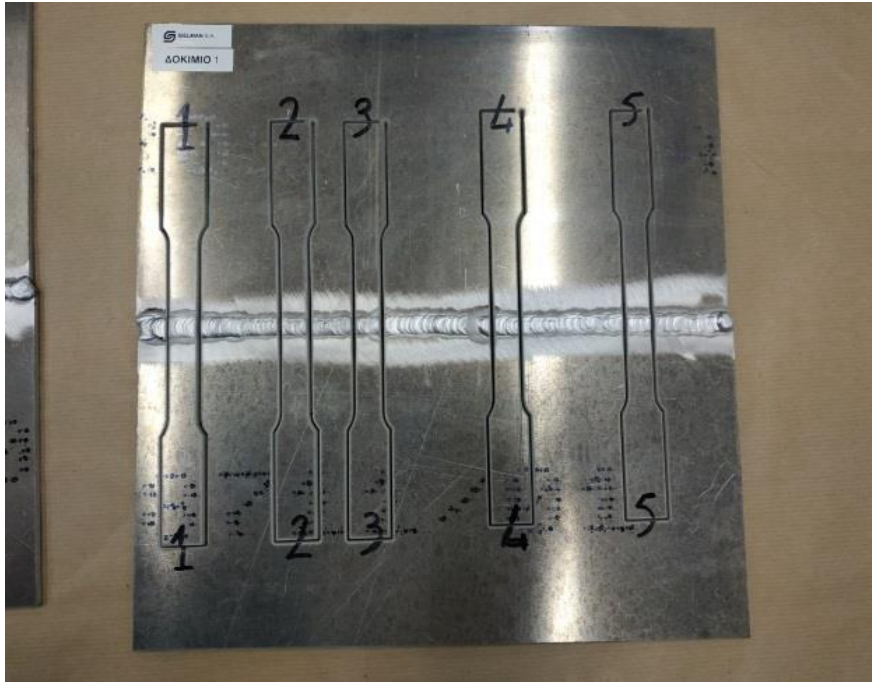


*Εικόνα 22: Μπροστά όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο2*



*Εικόνα 23: Πίσω όψη της συγκολλημένης πλάκας Νο2*

Τέλος παρουσιάζονται τα τελικά δοκίμια, όπως φαίνονται στις εικόνες 24 και 25, αφού έχουν συγκολληθεί, κοπεί και αριθμηθεί, έτοιμα για τη διαδικασία της καταπόνησης σε εφελκυσμό.



Εικόνα 24: Κοπή δοκιμίων στη συγκολλημένη πλάκα Νο1



Εικόνα 25: Κοπή δοκιμίων στη συγκολλημένη πλάκα Νο2

### 5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Με το πέρας των συγκολλήσεων ακολούθησε η διαδικασία των δοκιμών εφελκυσμού για τα παραγόμενα δοκίμια και τα δοκίμια αναφοράς. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται στη μηχανή εφελκυσμού Instron 4482 (100kN), η οποία απεικονίζεται στις εικόνες 26 και 27.



*Εικόνα 26: Μηχανή εφελκυσμού Instron 4482*



*Εικόνα 27: Τοποθέτηση συγκολλημένου δοκιμίου στη μηχανή εφελκυστικών δοκιμών*

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών γίνεται και η λήψη των απαραίτητων μετρήσεων, οι οποίες καταγράφονται και επεξεργάζονται από το πρόγραμμα Instron Bluehill, από όπου προκύπτουν οι ζητούμενες καμπύλες τάσης παραμόρφωσης.

Στην συνέχεια, στην Εικόνα 28 και Εικόνα 29 φαίνονται τα δοκίμια αναφοράς πριν και μετά τη δοκιμή εφελκυσμού αντίστοιχα.



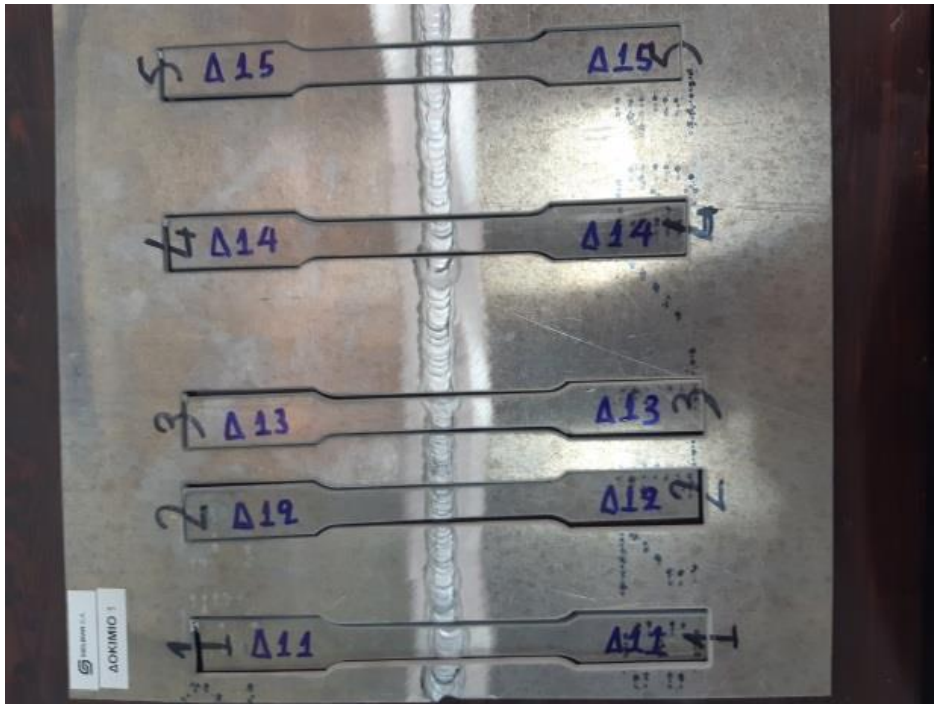
*Εικόνα 28: Δοκίμια αναφοράς*



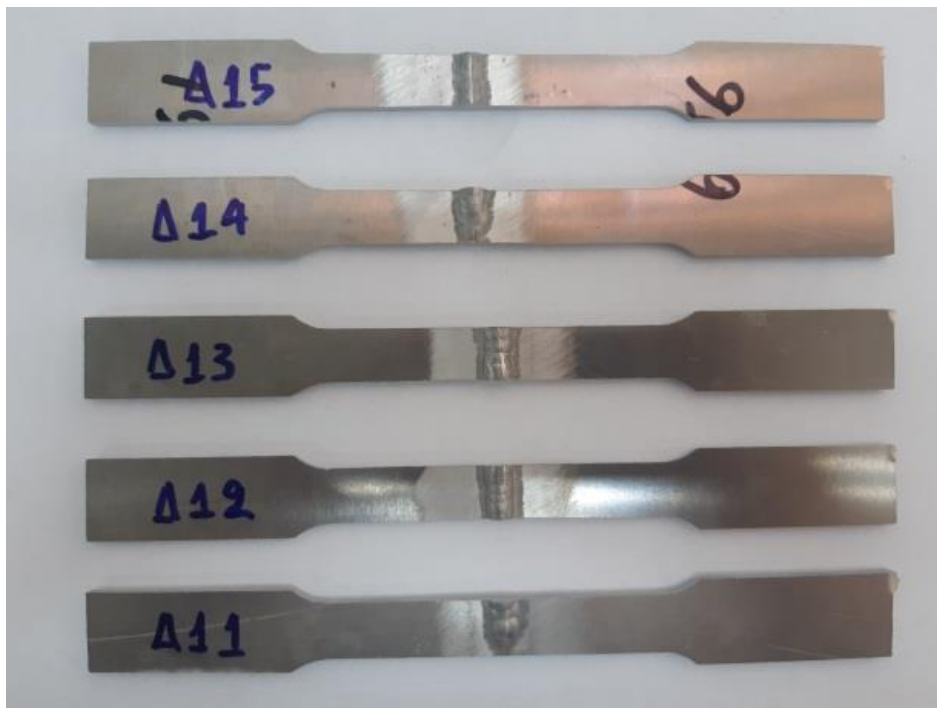
*Εικόνα 29: Δοκίμια ανάφορας μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό*

Ομοίως, για τα δείγματα από την πλάκα Νο1, η μπροστά και η πίσω όψη πριν από την θραυση αλλά και η θέση της αστοχίας μετά την θραυση των υπο εξέταση δειγμάτων φαίνονται στην Εικόνα 30, Εικόνα 31 και Εικόνα 32, αντίστοιχα.





Εικόνα 30: Μπροστα όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο1

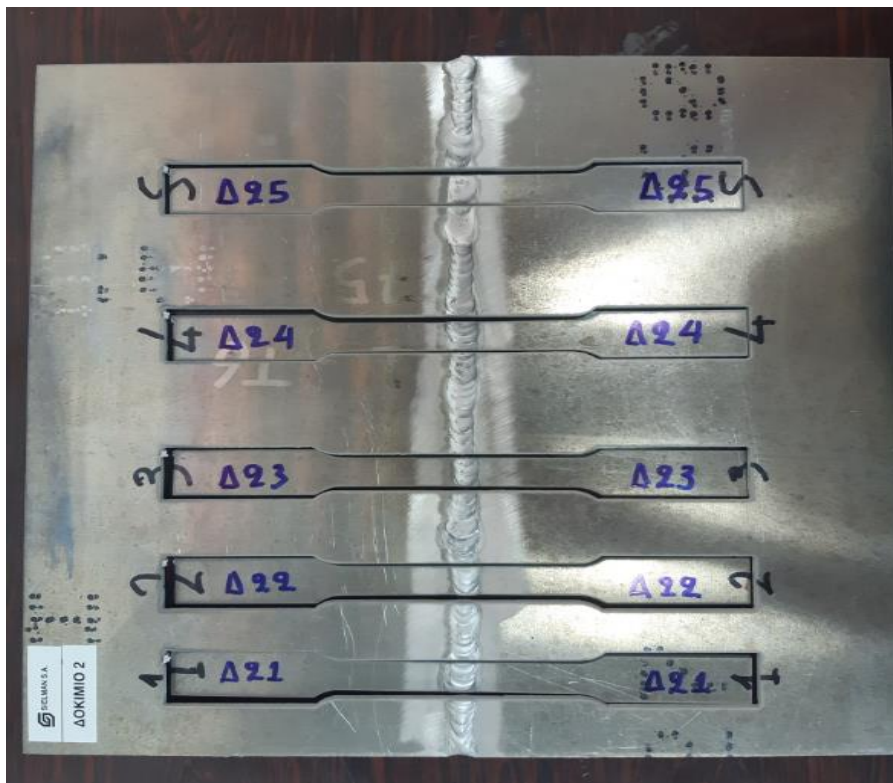


Εικόνα 31: Πίσω όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο1



Εικόνα 32: Δοκίμια πλάκας Νο1 μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό

Τέλος, στην Εικόνα 33, Εικόνα 34 και Εικόνα 35 φαίνονται η μπροστά και η πίσω όψη πριν από την θραυση αλλά και η θέση της αστοχίας μετά την θραυση των υπο εξέταση δειγμάτων για την πλάκα Νο2.



Εικόνα 33: Μπροστα όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο2



Εικόνα 34: Πίσω όψη των δοκιμίων της πλάκας Νο2



Εικόνα 35: Δοκίμια πλάκας Νο2 μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 6.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στα δοκίμια αναφοράς δεν έχει γίνει συγκόλληση, άρα αναμένεται η αστοχία στο κέντρο. Παρατηρείται όμως ότι η θραύση δεν δημιουργείται ακριβώς στο κέντρο σε όλα τα δοκίμια, παρά μόνο στο ΒΜ2. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στη διακύμανση του πάχους κατά μήκος των δοκιμίων είτε σε τυχαίους παράγοντες που αφορούν τη δομή του υλικού. Επίσης παρατηρείται η δημιουργία λαιμού στη περιοχή γύρω από τη θραύση σε όλα τα δοκίμια. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό, αφού το δοκίμιο βρίσκεται για αρκετή ώρα στη πλαστική περιοχή έως ότου φτάσει στη μέγιστη εφελκυστική τάση. Θα φανεί καλύτερα κατά την ανάλυση των διαγραμμάτων τάσης παραμόρφωσης που θα γίνει σε επόμενη παράγραφο.

Για τα δοκίμια τα οποία προκύπτουν από τη συγκολλημένη πλάκα Νο1 , αναμένεται ότι λόγω καλής ποιότητας συγκόλλησης, η αστοχία θα προκύψει στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και όχι στη ραφή της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 30 και στην Εικόνα 31, διακρίνονται ανωμαλίες στη συγκόλληση. Συγκεκριμένα στην αρχή και λίγο μετά τη μέση παρατηρείται έλλειψη υλικού στη ρίζα της συγκόλλησης, δηλαδή ένα μικρό κενό στη ραφή που μπορεί να οφείλεται σε ατελή διείδυση. Επομένως, ενδεχόμενη αστοχία στη ραφή της συγκόλλησης κρίνεται λογική, λόγω των παρατηρούμενων σφαλμάτων κατά μήκος της.

Όπως παρατηρείται και από τη πίσω όψη των συγκολλημένων δοκιμίων στην Εικόνα 31 στα δοκίμια Δ11, Δ14 εντοπίζεται ελλιπής ποσότητα υλικού στη ρίζα συγκόλλησης, κυρίως στη κάτω μεριά της ραφής. Το σφάλμα αυτό επιβεβαιώνεται μετά τις δοκιμές σε εφελκυσμό. Βλέπουμε στην Εικόνα 32 ότι τα δοκίμια Δ11 και Δ14 παρουσιάζουν αστοχία στη ραφή της συγκόλλησης και δε δημιουργείται λαιμός. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα δοκίμια δε βρέθηκαν για ώρα στη πλαστική περιοχή, δηλαδή η αστοχία επήλθε νωρίς και για σχετικά χαμηλή τάση εφελκυσμού σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Τα δοκίμια Δ11 και Δ14, λοιπόν, δεν φτάνουν τη τάση διαρροής του υλικού, είτε τη προσεγγίζουν οριακά, αφού αστοχούν στη ραφή, λόγω των σφαλμάτων στη συγκόλληση. Στα δοκίμια Δ12, Δ13, Δ15 η αστοχία επήλθε αριστερά ή δεξιά της ραφής στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και ως εκ τούτου παρατηρείται η δημιουργία λαιμού στο σημείο θραύσης. Κρίνεται λογικό σε μια συγκόλληση δίχως σφάλματα η αστοχία να προκύπτει στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και όχι στη ραφή συγκόλλησης, όπως γίνεται στα τρία από τα πέντε δοκίμια της πλάκας Νο1.

Για τα δοκίμια τα οποία προκύπτουν από τη συγκολλημένη πλάκα Νο2 , αναμένεται ότι λόγω των σφαλμάτων που δημιουργήθηκαν εκουσίως κατά τη συγκόλληση, η αστοχία θα προκύψει στη ραφή της συγκόλλησης.

Η συγκόλληση της πλάκας Νο2 περιέχει εκούσια σφάλματα κατά μήκος όλης της ραφής. Παρόλα αυτά τα δοκίμια Δ21 και Δ24, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, αν και στο μεν πρώτο παρατηρείται υπερκάλυψη με υλικό και κρατήρας στη ραφή συγκόλλησης, στο δε δεύτερο παρατηρείται κενό στη ραφή στη μέση της συγκόλλησης. Τα σφάλματα αυτά δείχνουν να μην επηρεάζουν την αντοχή των δοκιμών στη ραφή της συγκόλλησης αφού έχουν συμπεριφορά ίδια με τα δίχως σφάλματα δοκίμια της πλάκας Νο1. Στα δοκίμια Δ21 και Δ24 δημιουργείται λαιμός στη περιοχή γύρω από τη θραύση. Τα δοκίμια Δ22, Δ23 και Δ25 αστοχούν στη ραφή της συγκόλλησης. Στα δοκίμια Δ23 και Δ25, όπως φαίνεται στη πίσω όψη στην Εικόνα 34, παρατηρείται κενό στη ραφή συγκόλλησης που μπορεί να προκύψει από ατελή διείσδυση, οπότε κρίνεται λογικό η αστοχία να προκύψει στη ραφή της συγκόλλησης και μάλιστα χωρίς να δημιουργηθεί λαιμός. Αντίθετα στο δοκίμιο Δ22 δεν εντοπίζεται κάποιο εμφανές σφάλμα στη ραφή συγκόλλησης και παρατηρείται μάλιστα η δημιουργία λαιμού. Άρα παρά το ότι η αστοχία στο δοκίμιο Δ22 προκύπτει στο κέντρο αναμένουμε η μέγιστη τάση και η ομοιόμορφη παραμόρφωση που δέχεται, να είναι υψηλότερη συγκριτικά με τα δοκίμια Δ23 και Δ25.

## 6.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ακολουθούν οι ακτινογραφίες των συγκολλήσεων των δύο πλακών, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 36 για τη πλάκα Νο.1 και στην Εικόνα 37 για τη πλάκα Νο.2. Θα ακολουθήσει η ανάλυση των σφαλμάτων που εντοπίζονται στις ακτινογραφίες και θα εξεταστεί αν επαληθεύονται τα συμπεράσματα του οπτικού ελέγχου.



*Εικόνα 36: Ακτινογραφία πλάκας Νο.1*

Κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης της πλάκας Νο.1 και κυρίως στο κεντρικό τμήμα εντοπίζονται στην ακτινογραφία πόροι. Βρίσκονται στο τμήμα που θα



μπορούσαν να επηρεάσουν την αντοχή και τις ιδιότητες του Δ13. Το Δ13 όμως αστοχεί στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη όπως και τα δοκίμια στα οποία δεν εντοπίζεται κάποιο σφάλμα στη συγκόλληση, επομένως αναμένεται να έχει και αντίστοιχη μέγιστη αντοχή. Στην αρχή της ραφής της συγκόλλησης και συγκεκριμένα στην περιοχή στην οποία επηρεάζεται το Δ11 εντοπίζεται σφάλμα ατελούς τήξης. Πιθανή αιτία της εν λόγω ατέλειας είναι η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, η ανεπαρκής ένταση ρεύματος ή η ανεπαρκής προετοιμασία των ακμών. Επιπρόσθετως, λοιπόν, του οπτικού ελέγχου όπου εντοπίζεται ελλιπής ποσότητα υλικού στη ραφή της συγκόλλησης αναμένεται ότι το Δ11 θα έχει μικρότερη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και θα αστοχίσει στη ραφή. Στο τμήμα που βρίσκεται το Δ14 εντοπίζεται το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης επιβεβαιώνοντας τα συμπεράσματα του οπτικού ελέγχου. Το δοκίμιο Δ14 αστοχεί στη ραφή και παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη μέγιστη αντοχή, αφού οι περιοχές που δεν έχουν υποστεί επαρκή διείσδυση, και κυρίως η ρίζα, επιτρέπουν την ανάπτυξη συγκέντρωσης τάσεων, ευνοώντας έτσι τη δημιουργία ρωγμών και ως εκ τούτου τη ταχεία κατάρρευση της συγκόλλησης. Τέλος, στην υπόλοιπη έκταση της ακτινογραφίας της ραφής της συγκόλλησης της πλάκας Νο.1 δεν εντοπίζονται άλλες ατέλειες. Έτσι, τα Δ12 και Δ15, όπως προκύπτει και στον οπτικό έλεγχο αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και δεν υφίστανται μείωση μέγιστης αντοχής αντίστοιχης με τα Δ11 και Δ14, όπου εντοπίζονται τα προαναφερθέντα σφάλματα.



*Εικόνα 37: Ακτινογραφία πλάκας Νο.2*

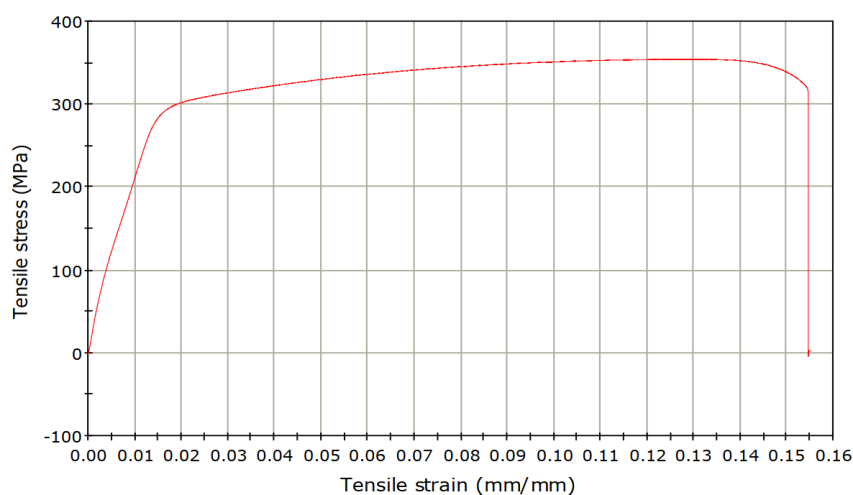
Στην ακτινογραφία της πλάκας Νο.2 αποτυπώνεται μια συγκόλληση χειρότερης ποιότητας από αυτή της πλάκας Νο.1. Κατά μήκος σχεδόν όλης της ραφής της συγκόλλησης εντοπίζεται το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης, ενώ σε κάποια σημεία κυρίως στην αρχή και στο τέλος της ακτινογραφίας εντοπίζεται και το σφάλμα της ατελούς τήξης. Τα δοκίμια Δ22, Δ23 και Δ25 αστοχούν στη ραφή της συγκόλλησης και εμφανίζουν μειωμένη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, το οποίο

κρίνεται λογικό αφού το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης κατά μήκος όλης της ραφής δύναται να οδηγήσει σε ταχεία κατάρρευση της συγκόλλησης. Αντίθετα τα Δ21 και Δ24 αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και αναμένεται να έχουν καλύτερη μέγιστη αντοχή. Στη περίπτωση των δύο αυτών δοκιμών η έκταση των εντοπιζόμενων σφαλμάτων από τον οπτικό και ραδιογραφικό έλεγχο δεν είναι μεγάλη ώστε οδηγήσει σε κατάρρευση της συγκόλλησης στη ραφή της.

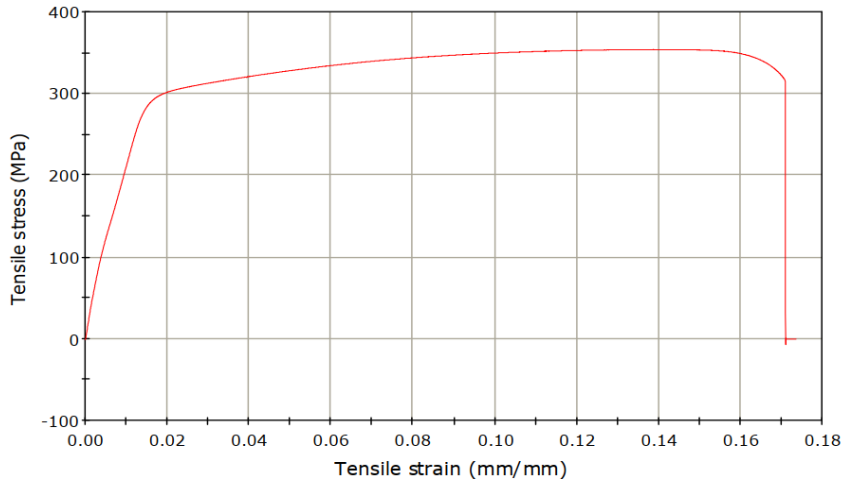
### 6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Όπως αναφέρεται και προηγουμένως, κατά τη διάρκεια των δοκιμών εφελκυσμού γίνονται μετρήσεις που συνεισφέρουν στην περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς των συγκολλημένων δοκιμών. Από τις μετρήσεις αυτές κατασκευάζονται οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για κάθε ένα δοκίμιο ξεχωριστά. Στη παράγραφο αυτή παρατίθενται και σχολιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν.

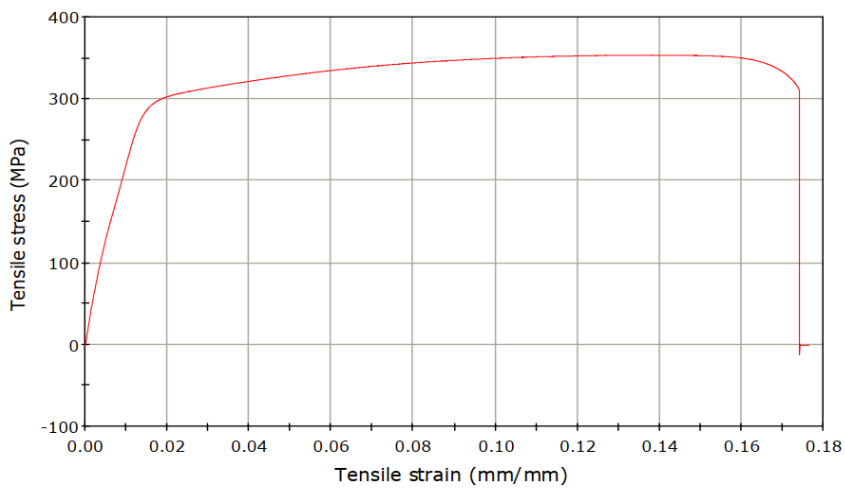
Αρχικά πραγματοποιείται εξέταση των διαγραμμάτων των δοκιμών αναφοράς, τα οποία δεν έχουν συγκολληθεί και αναμένουμε να συμπεριφέρονται όπως αναφέρεται στη θεωρία για το αλουμίνιο 6061.



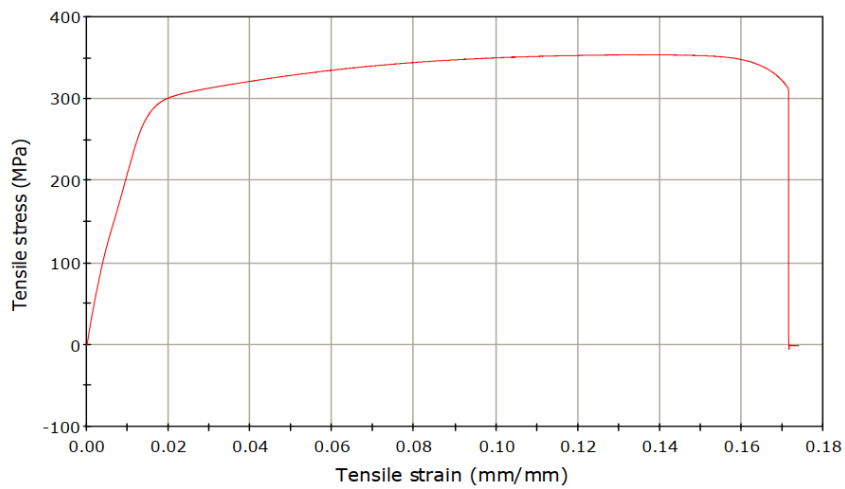
*Διάγραμμα 1: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο ΒΜ1*



*Διάγραμμα 2: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο BM2*



*Διάγραμμα 3: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο BM3*

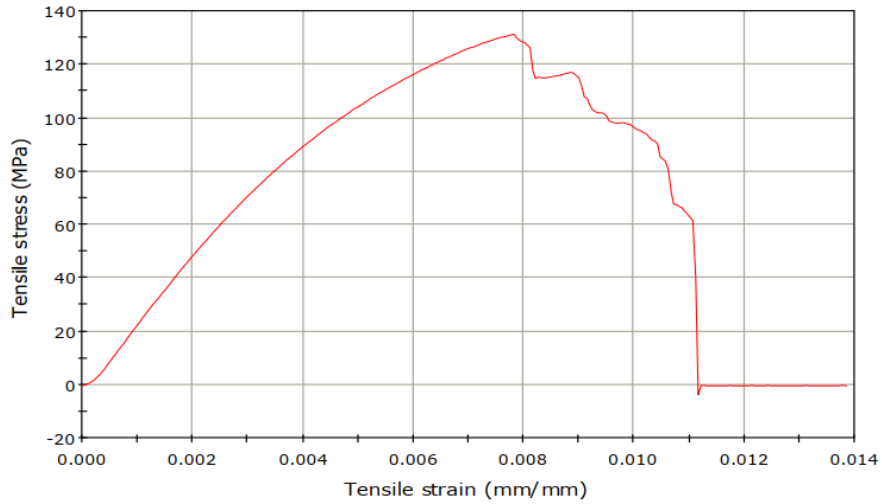


*Διάγραμμα 4: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο BM4*

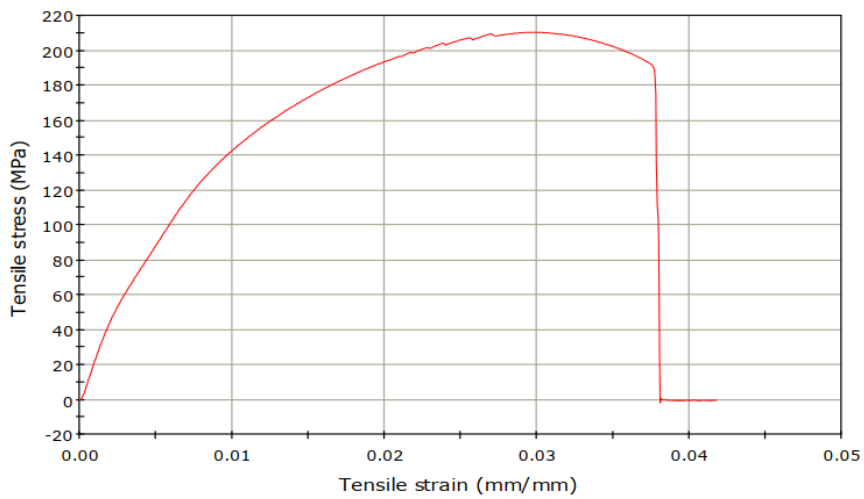


Οι καμπύλες οι οποίες προκύπτουν έχουν όντως παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για αλουμίνια. Η απόλυτη αντοχή σε τάση εφελκυσμού είναι κατά μέσο όρο στα τέσσερα δοκίμια 353MPa, τιμή η οποία κρίνεται λογική αφού τα κράματα αλουμινίου 6061 παρουσιάζουν αντοχή σε εφελκυσμό μέχρι και 400 MPa. Επίσης παρατηρείται η εξαιρετική ολκιμότητα του υλικού αφού κατά τη μέγιστη εφελκυστική τάση έχουμε ομοιόμορφη παραμόρφωση 13,44% του αρχικού μήκους των δοκιμίων, ενώ η ολική παραμόρφωση φτάνει ακόμη και μέχρι τη τιμή 17%. Το σημείο διαρροής στα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης των αλουμινίων δεν είναι εμφανές, οπότε ορίζεται η συμβατική τάση διαρροής που προκύπτει για παραμένουσα παραμόρφωση 0,2%. Έτσι, προκύπτει πως οι τιμές της τάσης διαρροής για τα δοκίμια αναφοράς συμπίπτουν με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή, αφού κυμαίνονται από 275 έως 285MPa. Από την άλλη, το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου 6061 περιμέναμε να έχει τιμή περίπου 68GPa, από τα διαγράμματα όμως λαμβάνουμε τιμή 20GPa, τεράστια απόκλιση από την αναμενόμενη θεωρητική τιμή. Εξαιρέση αποτελεί το δοκίμιο BM1, το οποίο δε διαφέρει στις εξεταζόμενες ιδιότητες από τα υπόλοιπα δοκίμια αναφοράς, υπολογίζουμε όμως όριο διαρροής 160MPa, και ως εκ τούτου και μεγαλύτερη ελαστικότητα από τα υπόλοιπα δοκίμια, 30GPa αφού η παραμόρφωση παραμένει παρόμοια.

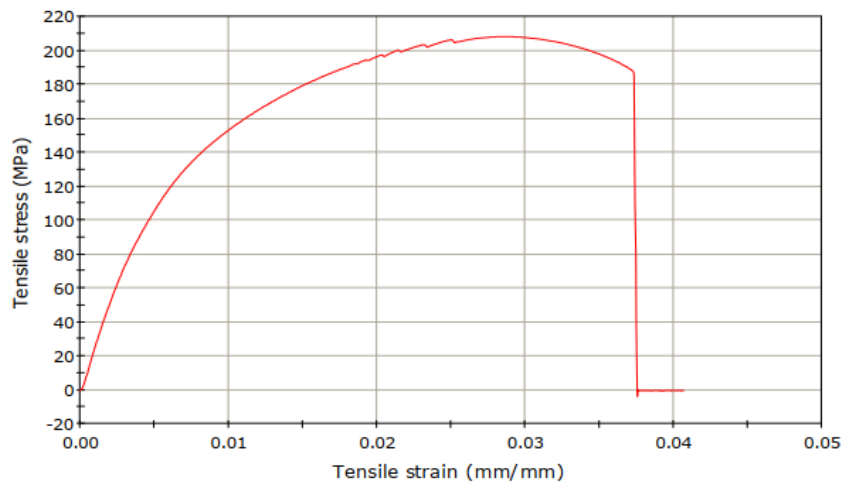
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης των συγκολλημένων δοκιμίων που προκύπτουν από τη πλάκα No1. Αναμένεται η αρχική κλίση των διαγραμμάτων, που δίνει την ελαστικότητα των δοκιμίων να παραμείνει ίδια με αυτή των δοκιμίων αναφοράς, καθώς δεν αναμένεται μεταβολή λόγω της διαδικασίας της συγκόλλησης. Θα μελετηθεί η μορφή που παίρνουν τα διαγράμματα ανάλογα με τη θέση αστοχίας των δοκιμίων, αλλά και τη μεταβολή της ανώτερης εφελκυστικής τάσης και της παραμόρφωσης αναλόγως και με τα παρατηρούμενα σφάλματα της συγκολλήσης.



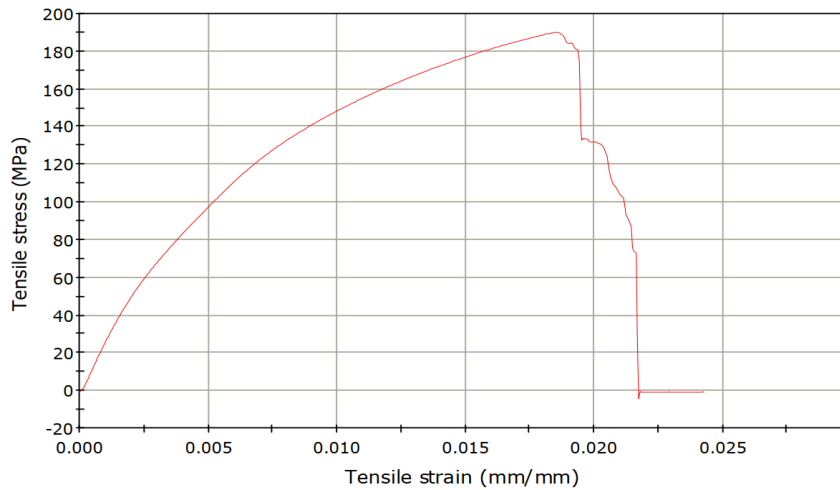
*Διάγραμμα 5: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ11*



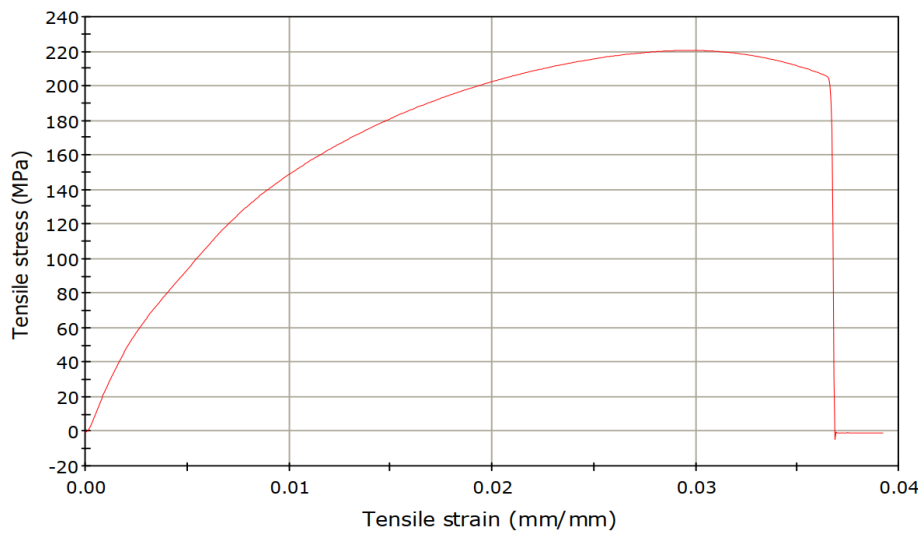
*Διάγραμμα 6: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ12*



*Διάγραμμα 7: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ13*



*Διάγραμμα 8: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ14*



*Διάγραμμα 9: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ15*

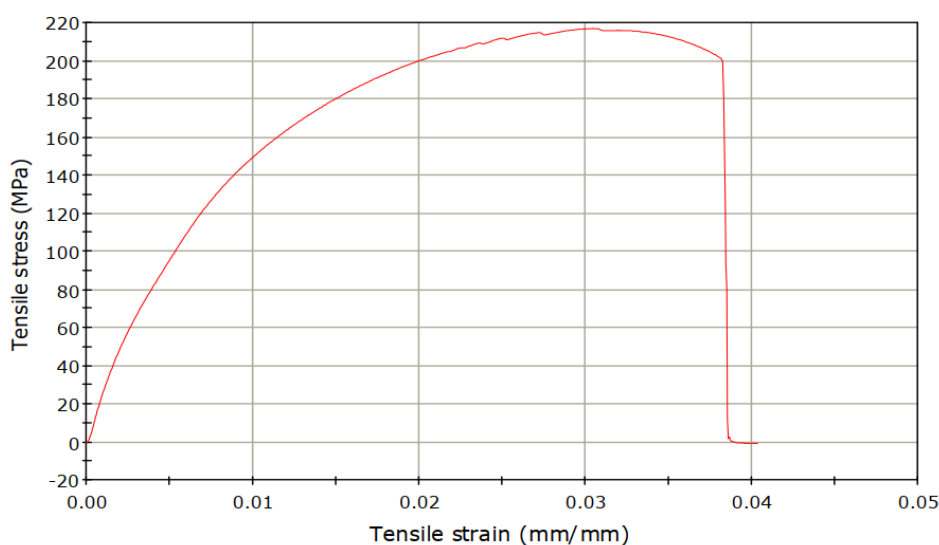
Τα διαγράμματα που προκύπτουν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Στη πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται τα δοκίμια Δ12, Δ13 και Δ15 στα οποία δεν παρατηρείται κάποιο εμφανές σφάλμα στη συγκόλληση, και τα οποία αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μάλιστα με τη δημιουργία λαϊμού. Από τα διαγράμματα των εν λόγω δοκιμών προκύπτουν μέγιστες εφαρμοζόμενες τάσεις 210,03MPa για ομοιόμορφη παραμόρφωση 2,96% του αρχικού μήκους, 207,71MPa για 2,84% και 220,35MPa για 2,93%. Η τάση θραύσης των δοκιμών είναι 20MPa μικρότερη των μέγιστων τάσεων και τα δοκίμια έχουν τελική παραμόρφωση μέχρι και 3,75% του αρχικού μήκους. Το όριο διαρροής και η ελαστικότητα είναι σταθερά για όλα τα δοκίμια. Το όριο εντοπίζεται για τάση διαρροής ίση με 160MPa, δηλαδή έχουμε μείωση κατά 40% συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς, ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι 13GPa, δηλαδή μειωμένο κατά 35%. Προκύπτει το συμπέρασμα, λοιπόν, ότι η διαδικασία της συγκόλλησης, ακόμη και αν αυτή είναι

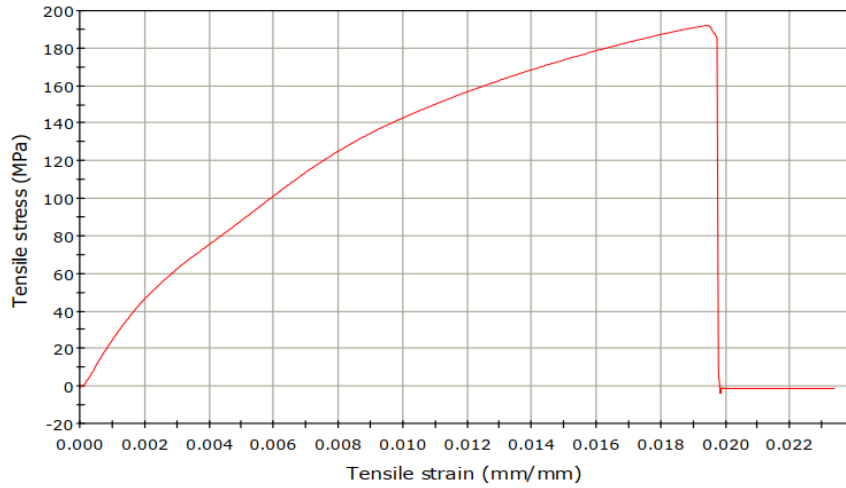
τέλεια, μειώνει σημαντικά την αντοχή και την ολκιμότητα των δοκιμών, όπως επίσης τη τάση διαρροής και την ελαστικότητα των δοκιμών.

Τα διαγράμματα των Δ11 και Δ14 στα οποία προκύπτει η ανωμαλία στο τέλος των διαγραμμάτων είναι τα δοκίμια τα οποία αστόχησαν στη ραφή της συγκόλλησης. Στα δύο αυτά δοκίμια εντοπίζονται σφάλματα στη συγκόλληση που δικαιολογούν την αστοχία στο κέντρο. Παρατηρείται στα διαγράμματα πως η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από τα υπόλοιπα δοκίμια που αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Το ίδιο ισχύει και για την ομοιόμορφη παραμόρφωση των δοκιμών Δ11 και Δ14. Στο Δ11 μάλιστα η μέγιστη εφελκυστική τάση παίρνει τη τιμή 130,93MPa για παραμόρφωση επί του αρχικού μήκους μόνο 0,78% , τιμές σημαντικά μικρότερες των υπολοίπων που δείχνουν ότι το κενό που παρατηρούμε στη ραφή πριν τις δοκιμές εφελκυσμού είναι κρίσιμης σημασίας για την αντοχή του δοκιμίου. Στα δοκίμια Δ11 και Δ14 η τιμή της μέγιστης τάσης συμπίπτει με τη τάση θραύσης του δοκιμίου, εξού και η μη δημιουργία λαιμού. Στη περίπτωση όμως του δοκιμίου Δ14 η μέγιστη εφελκυστική τάση παίρνει τη τιμή 189,74MPa για παραμόρφωση 1,85% του αρχικού μήκους τιμές μικρότερες, αλλά ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές των δοκιμών που αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Προκύπτει το συμπέρασμα πως η ελλιπής, όπως φαίνεται ποσότητα υλικού στη ρίζα της συγκόλλησης, στη συγκεκριμένη περίπτωση μειώνει την αντοχή και την ολκιμότητα του δοκιμίου, αλλά όχι στο βαθμό που συμβαίνει αυτό στο Δ11.

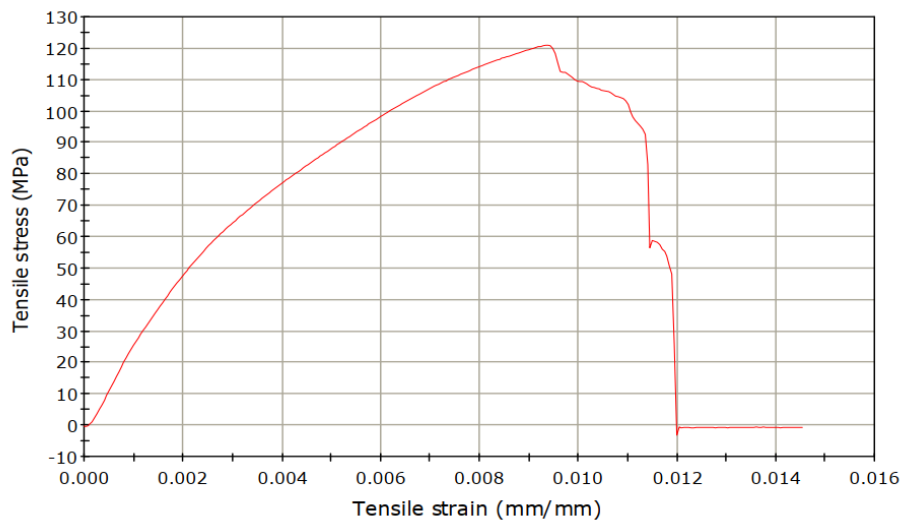
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης των συγκολλημένων δοκιμών που προκύπτουν από τη πλάκα Νο2. Επισημαίνεται πως κατά τη διαδικασία της συγκεκριμένης συγκόλλησης γίναν εκούσια σφάλματα. Επομένως, αναμένεται οι υπολογιζόμενες τιμές να είναι μικρότερες κατά μέσο όρο.



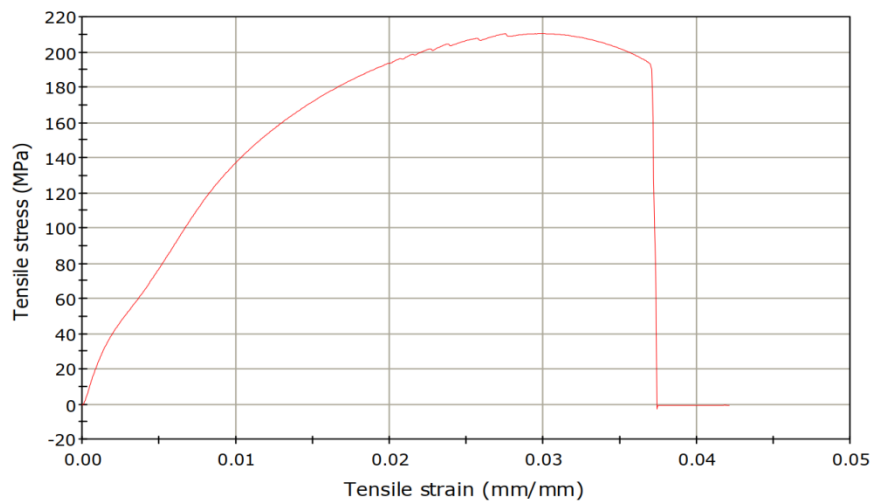
Διάγραμμα 10: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ21



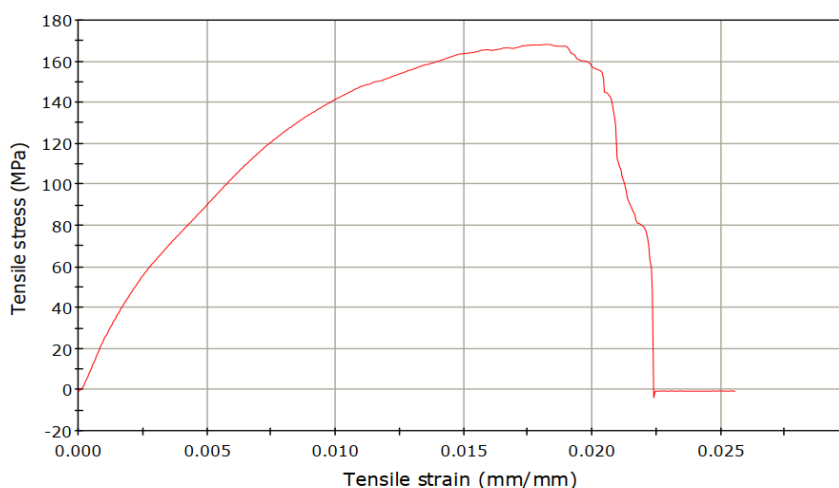
Διάγραμμα 11: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ22



Διάγραμμα 12: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ23



Διάγραμμα 13: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ24



*Διάγραμμα 14: Τάσης – Παραμόρφωσης για το δοκίμιο Δ25*

Η αρχική κλίση των διαγραμμάτων παραμένει και για τα δοκίμια της πλάκας Νο2 σταθερή, άρα όπως είναι λογικό η ελαστικότητα δεν έχει μεταβληθεί. Όπως και προηγουμένως τα δοκίμια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Τα διαγράμματα των δοκιμών Δ21 και Δ24 είναι σχεδόν όμοια με αυτά των δοκιμών Δ12, Δ13 και Δ15, και παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Δεν έχουν εντοπιστεί σφάλματα στη συγκόλλησή τους, αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μάλιστα δημιουργείται λαιμός. Όσον αφορά τις τιμές μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης είναι και αυτές ίδιας τάξης μεγέθους αφού για το Δ21 έχουμε μέγιστη τάση 216,68MPa και παραμόρφωση 3,04% του αρχικού μήκους, ενώ για το Δ24 210,25MPa και 2,99%. Τάση διαρροής παραμένει 160MPa και μέτρο ελαστικότητας 13GPa.

Αντίστοιχα τα δοκίμια Δ22, Δ23 και Δ25 συμπεριφέρονται παρόμοια με τα δοκίμια Δ11 και Δ14 και τα διαγράμματα τους έχουν ίδια μορφή. Στο Δ23 το κενό που παρατηρείται στη ραφή της συγκόλλησης που οφείλεται σε ατελή διείδυση, έχει ρίξει κατακόρυφα την αντοχή και την ολκιμότητα του δοκιμίου. Προκύπτουν τιμές μέγιστης τάσης 120,77MPa και ομοιόμορφης παραμόρφωσης 0,93%, δηλαδή τιμές ανάλογες με του δοκιμίου Δ11. Το δοκίμιο Δ25 στο οποίο επίσης εντοπίζεται κενό στη ραφή συγκόλλησης παρουσιάζει λίγο καλύτερη αντοχή και ολκιμότητα και λαμβάνουμε τιμές 167,97MPa και 1,81%. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το δοκίμιο Δ22. Όπως και τα προηγούμενα δύο δοκίμια αστοχεί στο κέντρο στη ραφή της συγκόλλησης. Στο συγκεκριμένο όμως διάγραμμα δεν εμφανίζονται αναταραχές στο τέλος. Πρόκειται για τη περίπτωση που η αντοχή στο σημείο της ραφής συγκόλλησης είναι ελάχιστα μικρότερη από την αντοχή του δοκιμίου στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Παρατηρείται μάλιστα η δημιουργία λαιμού μετά την αστοχία του δοκιμίου, σε μικρότερο βαθμό φυσικά από τα τέλεια συγκολλημένα δοκίμια.

Προκύπτει τιμή μέγιστης τάσης 191,75MPa η οποία είναι λίγο μικρότερη από αυτές που έχουν τα δοκίμια που δε παρουσιάζουν σφάλμα στη συγκόλληση, και παραμόρφωσης 1,94%. Αν και η αντοχή δείχνει να μην επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό στο Δ22 η ολκιμότητα επηρεάζεται και είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή των δοκιμών που περιλαμβάνουν σφάλμα στη συγκόλληση.

#### 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αρχικά, θα γίνει σύγκριση των μετρήσεων μέγιστης εφελκυστικής τάσης και ομοιόμορφης παραμόρφωσης που ελήφθησαν για τα δοκίμια αναφοράς, με αυτές των δοκιμών που προκύπτουν από τη πλάκα Νο1, προϊόν καλής ποιότητας συγκόλλησης και με αυτές των δοκιμών της πλάκας Νο2 που προέρχεται από συγκόλληση με εκούσια σφάλματα. Οι μετρήσεις και οι υπολογιζόμενοι μέσοι όροι συνοψίζονται στους Πίνακες 11 και 12.

Πίνακας 11: Τιμές μέγιστης τάσης δοκιμών

<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ(Mpa)</b>					
BM1	353,83	Δ11	130,93	Δ21	216,68
BM2	353,49	Δ12	210,03	Δ22	191,75
BM3	352,99	Δ13	207,71	Δ23	120,77
BM4	353,23	Δ14	189,74	Δ24	210,25
		Δ15	220,35	Δ25	167,97
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	353,385		191,752		181,484

Πίνακας 12: Ολκιμότητα δοκιμών

<b>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ(mm/mm)</b>					
BM1	12,72%	Δ11	0,78%	Δ21	3,04%
BM2	13,86%	Δ12	2,96%	Δ22	1,94%
BM3	13,81%	Δ13	2,84%	Δ23	0,93%
BM4	13,35%	Δ14	1,85%	Δ24	2,99%
		Δ15	2,93%	Δ25	1,81%
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	13,44%		2,27%		2,14%

Όπως προκύπτει από τους πίνακες για τα δοκίμια της πλάκας Νο1 παρατηρείται μείωση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυστική καταπόνηση κατά 45%, ενώ για τα δοκίμια της πλάκας Νο2 49%. Για την ομοιόμορφη επιμήκυνση διαπιστώνεται μείωση 83% για τα δοκίμια της πλάκας Νο1 και 84% για τα δοκίμια της πλάκας Νο2. Η διαφορά στη ποιότητα των δύο συγκολλήσεων δεν δείχνει να δημιουργεί σημαντική διαφορά στην αντοχή και στην ολκιμότητα των τεμαχίων. Η τέλεια συγκόλληση, όπως και η συγκόλληση με τα εκούσια σφάλματα βγάζουν παρόμοια

αποτελέσματα, αφού τελικά και στις δύο περιπτώσεις έχουμε δοκίμια τέλεια συγκολλημένα, αλλά και με σφάλματα.

Θα γίνει διαχωρισμός των δοκιμών με βάση τη συμπεριφορά τους κατά τις δοκιμές, όπως αυτή προκύπτει και από τα διαγράμματα που παρατέθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο. Έτσι, θα υπολογιστούν η μέγιστη τάση και η ομοιόμορφη παραμόρφωση για τα δοκίμια που δε περιλαμβάνουν όντως σφάλμα στη συγκόλληση και ως εκ τούτου αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, και θα γίνει σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν για τα δοκίμια με σφάλμα, τα οποία δηλαδή αστοχούν στη μέση στη ραφή συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 13 και 14.

*Πίνακας 13: Τιμές μέγιστης τάσης δοκιμών χωρισμένων με βάση τη θέση αστοχίας*

<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ(Mpa)</b>			
<b>ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΗ ΘΕΣ</b>		<b>ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ</b>	
$\Delta 12$	210,03	$\Delta 11$	130,93
$\Delta 13$	207,71	$\Delta 14$	189,74
$\Delta 15$	220,35	$\Delta 22$	191,75
$\Delta 21$	216,68	$\Delta 23$	120,77
$\Delta 24$	210,25	$\Delta 25$	167,97
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	213,004		160,232

*Πίνακας 14: Ολκιμότητα δοκιμών χωρισμένων με βάση τη θέση αστοχίας*

<b>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΙ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ(mm/mm)</b>			
<b>ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΗ ΘΕΣ</b>		<b>ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ</b>	
$\Delta 12$	2,96%	$\Delta 11$	0,78%
$\Delta 13$	2,84%	$\Delta 14$	1,85%
$\Delta 15$	2,93%	$\Delta 22$	1,94%
$\Delta 21$	3,04%	$\Delta 23$	0,93%
$\Delta 24$	2,99%	$\Delta 25$	1,81%
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	2,95%		1,46%

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται η επίδραση της ποιότητας της συγκόλλησης στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και στην ομοιόμορφη παραμόρφωση του αλουμινίου 6061. Σφάλματα στη συγκόλληση και τελική θραύση



στη συγκολλημένη ραφή μειώνουν τη μέγιστη εφελκυστική τάση κατά 25% και την ομοιόμορφη παραμόρφωση κατά 50%.

Τέλος, στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές που ελήφθησαν από τις μετρήσεις για τα δοκίμια αναφοράς και συγκρίνονται με αυτές για τα τέλεια συγκολλημένα δοκίμια. Σκοπός είναι να φανεί η συνολική επίδραση που έχει η συγκόλληση, ακόμη και όταν αυτή είναι τέλεια, στην αντοχή του αλουμινίου 6061 σε εφελκυσμό και στις υπόλοιπες εξεταζόμενες ιδιότητες.

*Πίνακας 15: Σύγκριση συνολικών μετρήσεων – Επίδραση συγκόλλησης στα εξεταζόμενα μεγέθη*

	<b>ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ</b>	<b>ΤΕΛΕΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΑ</b>	<b>ΜΕΙΩΣΗ ΛΟΓΩ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ</b>
<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ(Mpa)</b>	353,385	213	40%
<b>ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ</b>	13,44%	2,95%	78%
<b>ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ(Mpa)</b>	270,39	163,2	40%
<b>ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ(Gpa)</b>	20,58	13,1	36%

Ακολουθεί σύγκριση με τα αποτελέσματα τις εργασίας (1) στη βιβλιογραφική αναφορά. Η μέγιστη αντοχή των δοκιμών αναφοράς AA 6061-T6 είναι 273MPa και η μέγιστη αντοχή των συγκολλημένων δοκιμών είναι 187MPa. Παρατηρείται σημαντική διαφορά στην αντοχή των δοκιμών αναφοράς η οποία μπορεί να ωφείλεται στη διαφορετική σύσταση του αλουμινίου 6061 ή και σε διαφορετικές συνθήκες πειράματος. Σημειώνεται, λοιπόν μείωση της μέγιστης αντοχής κατά 31% ποσοστό αρκετά καλύτερο σε σχέση με το 40% που προκύπτει στη παρούσα εργασία, και μάλιστα για τα δοκίμια που αστοχούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δεν επηρεάζονται δηλαδή από τα σφάλματα στη συγκόλληση. Μια σημαντική διαφορά είναι το πάχος των εξεταζόμενων δοκιμών καθώς στη παρούσα είναι 3.1mm , ενώ στην εργασία (1) είναι 4mm. Τέλος, η πιο σημαντική παράμετρος που οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα, είναι ότι σκοπός της παρούσης είναι και η μελέτη και η επίδραση των σφαλμάτων των συγκολλήσεων στη στην αντοχή του AA 6061-T6, οπότε οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν περιέχοντας σφάλματα εκουσίως, αυξάνοντας έτσι την επίδραση της συγκόλλησης στη μέγιστη αντοχή των δοκιμών. Στην εργασία (1) εντοπίζονται πόροι και μικρορωγμές κατά τον έλεγχο των δοκιμών, όπως υπάρχουν αναπόφευκτα σε όλα τα συγκολλημένα δοκίμια, δεν είναι όμως δημιουργημένα εκουσίως, οι συγκολλήσεις δηλαδή είναι καλύτερης ποιότητας συγκριτικά με τις συγκολλήσεις της παρούσης.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καταρχήν παρατηρείται ότι από τη τέλεια συγκόλληση στη πλάκα No1 και τη συγκόλληση με εκούσια σφάλματα στη πλάκα No2 προκύπτουν αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους. Αυτό μεταφράζεται στο ότι υπάρχουν σφάλματα και στις δύο περιπτώσεις συγκόλλησης, περισσότερα στη πλάκα No2, τα οποία τελικά οδηγούν σε μια ελάχιστη απόκλιση, όχι όμως σημαντική. Αξιολογείται λοιπόν, πως οι δύο συγκολλήσεις είναι παρόμοιας ποιότητας.

Από τα δέκα συγκολλημένα δοκίμια τα οποία εξετάζονται τα μισά αστόχησαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τα υπόλοιπα μισά στη ραφή της συγκόλλησης. Τα πρώτα παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή και ολκιμότητα από τα υπόλοιπα πέντε στα οποία έχουν εντοπιστεί και σφάλματα κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, επομένως αυτό το αποτέλεσμα κρίνεται λογικό.

Τέλος συγκρίνοντας τα εξεταζόμενα μεγέθη των δοκιμών αναφοράς με αυτά των τέλειων συγκολλημένων δοκιμών, δηλαδή αυτών που αστόχησαν κατά τις δοκιμές σε εφελκυσμό στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, διαπιστώνεται το μέγεθος της επίδρασης μιας συγκόλλησης στα μεγέθη αυτά. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε μείωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά 40%, της ομοιόμορφης παραμόρφωσης κατά 78%, της τάσης διαρροής κατά 40% και της ελαστικότητας κατά 36%. Στη περίπτωση των συγκολλήσεων που περιέχουν σφάλματα, η μέγιστη εφελκυστική τάση μειώνεται περαιτέρω κατά 25% και η παραμόρφωση κατά 50% των προηγούμενων τιμών.

Συνοψίζοντας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο τέλεια και ορθώς μορφοποιημένη και κατεργασμένη και αν θεωρείται μια συγκολλητή σύνδεση, σχεδόν σε κάθε περίπτωση θα ελλοχεύουν σφάλματα, τα οποία επιδρούν στην αντοχή και την εν γένει μηχανική συμπεριφορά. Αποδεικνύεται ότι καλύτερη αντοχή εξασφαλίζεται όταν η αστοχία στις δοκιμές εφελκυσμού γίνεται στη θερμικά επηρεασμένη από τη συγκόλληση ζώνη, και όχι στη ραφή της συγκόλλησης. Ωστόσο ασφαλή συμπεράσματα για το ποσοστό ακρίβειας της επίδρασης της συγκόλλησης στα εξεταζόμενα μεγέθη δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν, καθώς το δείγμα των εξεταζόμενων δοκιμών είναι αρκετά μικρό.

Με τη διενέργεια παρόμοιων δοκιμών και αναλύσεων για μεγαλύτερο πλήθος εξεταζόμενων δοκιμών, καθώς επίσης και με τη πραγματοποίηση περαιτέρω μη καταστρεπτικών ελέγχων, επιπλέον της ραδιογραφίας, θα μπορούσαν να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη διερεύνηση της έκτασης των σφαλμάτων στις συγκολλήσεις, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους και της τελικής επίδρασης που έχουν στις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γιαννόπουλος, Π. Αστοχίες συγκολλήσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2014
2. Δασκαλοπούλου, Θ. Μέθοδος συγκόλλησης με προστατευτικό αέριο και ηλεκτρόδιο βολφραμίου, 2016
3. Ευθυμίου, Ε. , Μελέτη και σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης EBW και TIG στο κράμα αλουμινίου 6061, Βόλος, Οκτώβριος 2006
4. Καΐρης, Σ. Η εφαρμογή της ραδιογραφίας για το μη καταστροφικό έλεγχο συγκολλητών συνδέσεων στη βιομηχανία: εξέταση των μεταβλητών της μεθόδου και πειραματική επαλήθευση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2009
5. Κυριαζόγλου, Α. Σημειώσεις στο μάθημα μη καταστροφικών ελέγχων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2022
6. Μανωλάκος, Δ. , Σημειώσεις Μαθήματος Συγκολλήσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
7. Παντελής, Δημήτρης Ι. , Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης Ν. , Παπάζογλου, Β. Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων , Εκδόσεις Τζιόλα 2017
8. Πολυζωγοπούλου, Γ. , Θερμοκρασιακές κατανομές και Υπολογισμός Ζώνης Μερικής Τήξης και Θερμοεπηρεασμένης Ζώνης σε συγκολλήσεις Αλουμινίου, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2009
9. Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης Ν. Εισαγωγή στις συγκολλήσεις , Εκδόσεις Τζιόλα Ιούλιος 2010
10. Aviationaluminum.Miandigroup (2021) Google Search.  
<https://www.aviationaluminum.com/el/news/what-is-6061-aluminum-alloy/>