



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ»
«WELDING DEFECTS»



ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΠΟΛΥΔΕΥΚΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανικών Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του καθηγητή του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών Δ. Μανωλάκο στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες τόσο για την ανάθεση της εργασίας όσο και για την γενικότερη καθοδήγησή του για την εκπόνηση της διπλωματικής. Επίσης, ευχαριστώ θερμά το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου του τομέα για τον χρόνο αλλά και την βοήθεια που μου παρείχαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον Γ. Κούζιλο καθώς και τον Μ. Γκιθώνα για την πολύτιμη βοήθεια τους στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΠΟΛΥΔΕΥΚΗΣ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο να εξετάσει κατά πόσο οι αστοχίες συγκολλήσεων επηρεάζουν την αντοχή των κατασκευών.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενική αναφορά στις συγκολλήσεις και πως αυτές εξελίχθηκαν στο χρόνο καθώς και η τοπολογία και η μηχανική συμπεριφορά των συγκολλήσεων.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι αστοχίες συγκολλήσεων ενώ στο Κεφάλαιο 3 οι μέθοδοι ελέγχου των συγκολλήσεων.

Το Κεφάλαιο 4 είναι το πειραματικό μέρος της εργασίας όπου περιγράφονται και σχολιάζονται οι δοκιμές εφελκυσμού σε συγκολλητά δοκίμια με συγκεκριμένα σφάλματα.

Λέξεις Κλειδιά

Συγκόλληση, Σφάλματα, Ασυνέχειες συγκολλήσεων, εφελκυσμός, αντοχή, οπτικός έλεγχος, συγκόλληση τόξου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συγκολλήσεις	11
1.1 Γενική Εποπτεία Συγκολλήσεων.....	11
1.1.1 Ορισμός- Χαρακτηριστικά	11
1.1.2 Ιστορική Αναδρομή	12
1.1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Έναντι Άλλων Μεθόδων Συνδέσεως	13
1.2 Τοπολογία Συγκολλητών Συνδέσεων	15
1.3 Ταξινόμηση Συγκολλήσεων.....	16
1.3.1 Αυτογενείς συγκολλήσεις.....	16
1.3.2 Ετερογενείς Συγκολλήσεις	24
1.4 Μηχανική Συμπεριφορά Συγκολλήσεων.....	28
1.4.1 Ανάλυση Καταπονήσεων Συγκολλήσεων	28
1.4.2 Παραμένουσες Τάσεις	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αστοχίες Συγκολλήσεων	38
2.1 Εισαγωγή.....	38
2.1.1 Γενικά Περί Αστοχιών Συγκολλήσεων	38
2.1.2 Χαρακτηριστικά Παραδείγματα Αστοχίας Συγκολλήσεων	38
2.2 Ταξινόμηση Τυπικών Σφαλμάτων Συγκολλήσεων	40
2.2.1 Αρχική Κατηγοριοποίηση Σφαλμάτων Συγκολλήσεων Βάσει του Μεγέθους τους.....	40
2.2.2 Ταξινόμηση Τυπικών Σφαλμάτων Συγκόλλησης Βάσει Διεθνών Προτύπων	41
2.3 Αναλυτική Παρουσίαση Αστοχιών Συγκολλήσεων	43
2.3.1 Ασυνέχειες Σχετιζόμενες με την Εσωτερική Δομή της Συγκόλλησης.....	43
2.3.2 Ασυνέχειες Σχετιζόμενες με τις Γεωμετρικές Διαστάσεις και τις Σχεδιαστικές Απαιτήσεις της Συγκόλλησης	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Έλεγχος Συγκολλήσεων	57

3.1	Εισαγωγή.....	57
3.2	Μη Καταστρεπτικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων	57
3.2.1	Οπτικός έλεγχος.....	58
3.2.2	Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά.....	59
3.2.3	Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια.....	60
3.2.4	Έλεγχος με Υπερήχους.....	61
3.2.5	Έλεγχος με Δινορρέυματα.....	62
3.2.6	Ραδιογραφικός Έλεγχος.....	62
3.3	Καταστρεπτικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων.....	64
3.3.1	Δοκιμή Εφελκυσμού.....	64
3.3.2	Δοκιμή Κάμψης.....	66
3.3.3	Δοκιμή Κρούσης (Δυσθραυστότητας).....	67
3.3.4	Δοκιμή Σκληρότητας.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικό Μέρος.....		69
4.1	Εισαγωγή-Σκοπός Πειραμάτων	69
4.2	Περιγραφή Εξοπλισμού- Δοκιμίων	69
4.3	Ανάλυση και Περιγραφή Συγκολλημένων Δοκιμίων	74
4.4	Διενέργεια Καταστρεπτικού Ελέγχου Δοκιμών Εφελκυσμού	81
4.4.1	Περιγραφή Μεθοδολογίας.....	81
4.4.2	Οπτική Ανάλυση Εξεταζομένων Δοκιμίων.....	81
4.4.3	Ανάλυση Μηχανικής Συμπεριφοράς Εξεταζομένων Δοκιμίων .	86
4.5	Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	101
4.5.1	Εισαγωγή	101
4.5.2	Σύγκριση Ελαστικότητας Δοκιμίων	101
4.5.3	Σύγκριση Δυσθραυστότητας Δοκιμίων	103
4.5.4	Σύγκριση Ολκιμότητας Δοκιμίων.....	105
4.5.5	Σύγκριση Αντοχής Δοκιμίων.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα		109
Βιβλιογραφία		111

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1 Παραδείγματα εφαρμογών συγκολλήσεων συγκόλληση φλάντζας (αριστερά) και υποβρύχια συγκόλληση (δεξιά).....	12
Εικόνα 1.2 Τοπολογία συγκολλητής σύνδεσης	15
Εικόνα 1.3 Διάταξη ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου	17
Εικόνα 1.4 Παράδειγμα ονομασίας ηλεκτροδίου	19
Εικόνα 1.5 Εξοπλισμός Οξυγονοσυγκόλλησης.....	21
Εικόνα 1.6 Καυστήρας οξυγονοσυγκόλλησης σε τομή.....	21
Εικόνα 1.7 Σταθερή ηλεκτροπόντα (αριστερά) και φορητή ηλεκτροπόντα (δεξιά).....	22
Εικόνα 1.8 Διάταξη μεθόδου συγκόλλησης LBW.....	23
Εικόνα 1.9 Σχηματική διάταξη μεθόδου συγκόλλησης EBW.....	24
Εικόνα 1.10 Φάσεις ετερογενούς συγκόλλησης.....	25
Εικόνα 1.11 Κασσιτεροκόλληση μολυβδοσωλήνα	26
Εικόνα 1.12 Μπρουτζοκόλληση ελάσματος.....	28
Εικόνα 2.1 Αστοχία συγκολλήσεων πλοίου SS Schenectady.....	39
Εικόνα 2.2 Αστοχία συγκολλήσεων πλατφόρμας εξόρυξης Alexandra L Kielland.....	40
Εικόνα 2.3 Απεικόνιση σφάλματος ανάματος τόξου (αριστερά) και πιτσιλίσματος (δεξιά).....	54
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση σφάλματος υποπλήρωσης (αριστερά) και επικάλυψης (δεξιά).....	54
Εικόνα 2.5 Απεικόνιση σφάλματος κρατήρα (αριστερά) και διαμπερούς τήξης (δεξιά).....	54
Εικόνα 3.1 Μηχανισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με διεισδυτικά υγρά (αριστερά) και απεικόνιση ρωγμής με την ολοκλήρωση του ελέγχου (δεξιά).....	59
Εικόνα 3.2 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με μαγνητικά σωματίδια (αριστερά) και απεικόνιση ρωγμών με χρωστική φερομαγνητική σκόνη (δεξιά).....	61

Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με υπέρηχους (αριστερά) και.....	61
Εικόνα 3.4 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου με δινορρεύματα (αριστερά) και παραγόμενα δινορρεύματα (δεξιά).....	62
Εικόνα 3.5 Ραδιογράφημα ατελούς διείσδυσης (αριστερά) και πόρων (δεξιά)	63
Εικόνα 3.6 Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού	65
Εικόνα 3.7 Διάταξη δοκιμής κάμψης.....	67
Εικόνα 3.8 Διάταξη δοκιμής κρούσης	67
Εικόνα 4.1 Σκαρίφημα αρχικού δοκιμίου με αναγραφόμενες διαστάσεις	70
Εικόνα 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίων συγκόλλησης.....	71
Εικόνα 4.3 Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης	72
Εικόνα 4.4 Μηχανή εφελκυσμού Instron 4482 (100 kN).....	74
Εικόνα 4.5 Εξεταζόμενο δοκίμιο 1	75
Εικόνα 4.6 Εξεταζόμενο δοκίμιο 2	75
Εικόνα 4.7 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 2	76
Εικόνα 4.8 Εξεταζόμενο δοκίμιο 3	76
Εικόνα 4.9 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 3	77
Εικόνα 4.10 . Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 4	77
Εικόνα 4.11 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 4	78
Εικόνα 4.12 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 5	78
Εικόνα 4.13 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 5	79
Εικόνα 4.14 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 6	79
Εικόνα 4.15 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 6	80
Εικόνα 4.16 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 7	80
Εικόνα 4.17 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 7	81
Εικόνα 4.18 Εξεταζόμενο δοκίμιο 1 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	82
Εικόνα 4.19 Εξεταζόμενο δοκίμιο 2 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	82

Εικόνα 4.20 . Εξεταζόμενο δοκίμιο 3 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	83
Εικόνα 4.21 Εξεταζόμενο δοκίμιο 4 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	83
Εικόνα 4.22 Εξεταζόμενο δοκίμιο 5 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	83
Εικόνα 4.23 Εξεταζόμενο δοκίμιο 6 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	84
Εικόνα 4.24 Εξεταζόμενο δοκίμιο 7 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου	84
Εικόνα 4.25 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα St37	87
Εικόνα 4.26 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 1	89
Εικόνα 4.27 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 2	90
Εικόνα 4.28 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 3	92
Εικόνα 4.29 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 4	94
Εικόνα 4.30 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 5	95
Εικόνα 4.31 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 5 (μεγέθυνση)	96
Εικόνα 4.32 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 6	98
Εικόνα 4.33 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 7	100
Εικόνα 4.34 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων τάσεων παραμορφώσεων εξεταζομένων δοκιμίων	102
Εικόνα 4.35 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων δυσθραυστότητας εξεταζομένων δοκιμίων	103
Εικόνα 4.36 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων ολκιμότητας εξεταζομένων δοκιμίων	105

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Στοιχεία ηλεκτροδίων.....	18
Πίνακας 1.2 Ταξινόμηση συγκολλήσεων τόξου/ ηλεκτροσυγκολλήσεων	20
Πίνακας 1.3 Παραδείγματα καταπονήσεων συγκολλήσεων	34
Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση σφαλμάτων συγκολλήσεων κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο	42
Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση πόρων	45
Πίνακας 2.3 Εγκλείσματα ξένου μετάλλου	46
Πίνακας 2.4 Ταξινόμηση ρωγμών	49
Πίνακας 2.5 Ταξινόμηση εγκλεισμάτων σκουριάς.....	50
Πίνακας 2.6 Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς τήξης	51
Πίνακας 2.7 . Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς διείδυσης.....	52
Πίνακας 2.8 Ταξινόμηση σφάλματος υποκοπών.....	53
Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίου πειραματικής διαδικασίας	70
Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης.....	72
Πίνακας 4.3 Σφάλματα συγκολλήσεων εξεταζομένων δοκιμίων	73
Πίνακας 4.4 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά δυσθραυστότητας	104
Πίνακας 4.5 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά ολκιμότητας.....	106
Πίνακας 4.6 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά άνω ορίου διαρροής.	107
Πίνακας 4.7 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά τιμής μέγιστης αντοχής	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συγκολλήσεις

1.1 Γενική Εποπτεία Συγκολλήσεων

1.1.1 Ορισμός- Χαρακτηριστικά

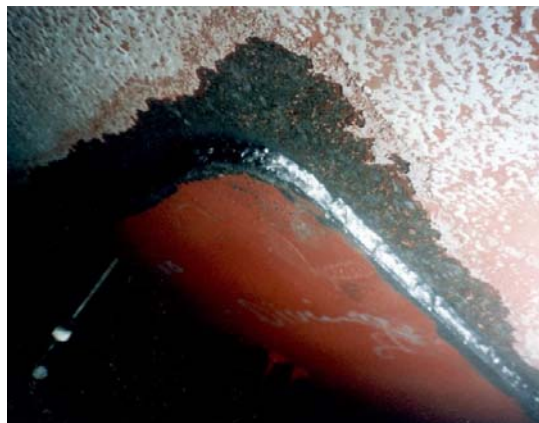
Με τον όρο συγκόλληση καλείται η μη λυόμενη σύνδεση δύο ή περισσοτέρων υλικών, συνήθως σε πλαστική ή ρευστή κατάσταση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της πρόσδοσης θερμότητας ή πίεσης ή ακόμη και των δύο, με ή δίχως την προσθήκη υλικού παρόμοιας σύνθεσης με τα προς συγκόλληση τεμάχια. Η συγκόλληση γενικότερα αποτελεί μια κρυσταλλική σύνδεση και έχει ως στόχο το τελικό τεμάχιο να εμφανίζει την ίδια ή και μεγαλύτερη αντοχή από το αρχικό. Οι βασικές και απαραίτητες προϋποθέσεις για την επίτευξη μιας τέτοιου είδους σύνδεσης είναι οι ακόλουθες:

- Τα προς συγκόλληση τεμάχια να είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό ή από υλικά με σύνθεση τέτοια ώστε να είναι σε θέση να δημιουργήσουν κράμα.
- Μεταξύ των προς σύνδεση τεμαχίων και συγκεκριμένα στην περιοχή κατά την οποία πρόκειται να συγκολληθούν, να μην παρεμβάλλεται κάποιο ενδιάμεσο στρώμα από ξένο υλικό, όπως λίπη, ακαθαρσίες, οξείδια κλπ. Επομένως για την αποφυγή αυτού, πρέπει οι επιφάνειες που πρόκειται να συγκολληθούν να υφίστανται προηγουμένως κάποιας μορφής καθαρισμού ή μηχανικής προκατεργασίας, όπως είναι η λείανση με τροχό.
- Η ενεργειακή κατάσταση του υλικού των προς σύνδεση στοιχείων στη θέση συγκολλήσεως να αυξηθεί είτε με θερμική είτε με χημική ενέργεια, σε βαθμό κατά τον οποίο η κρυσταλλική σύνδεση των δύο στοιχείων να είναι σε θέση να πραγματοποιηθεί επαρκώς.

Η μέθοδος της συγκόλλησης χρησιμοποιείται σε διάφορες μηχανολογικές κατασκευές και ιδίως όταν πρόκειται για μεμονωμένες κατασκευές ή για μικρό αριθμό τεμαχίων. Χαρακτηριστικές εφαρμογές κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα η μέθοδος της συγκόλλησης είναι στα κιβώτια μειωτήρων στροφών, στις στεφάνες τροχών, στα πλαίσια, στα τύμπανα των συρματόσκοινων και αλλού. Εκτός από τα ανωτέρω συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται για επισκευές τεμαχίων, τα οποία έχουν υποστεί κάποιας μορφής θραύση ή ρωγμή, για επικαλύψεις και θωράκιση φθαρμένων και μη επιφανειών, ενώ ευρύτατα η τεχνική της συγκόλλησης χρησιμοποιείται στην περιοχή της λεβητοποιίας και των σιδηρών κατασκευών, κατά την οποία έχει αντικαταστήσει πλήρως τις ηλώσεις. Ακόμη σε ορισμένες εφαρμογές, κατά τις οποίες η σύνδεση δεν απαιτείτο να είναι λυόμενη, η τεχνική της συγκόλλησης αντικατέστησε τις κοχλιώσεις, ενώ και ως μέθοδος συνθέσεως κατασκευών η συγκόλληση αντικατέστησε τη χύτευση σε έναν ευρύ τομέα εφαρμογών.

1.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η σύνδεση των μετάλλων με θέρμανση ήταν ήδη γνωστή στην αρχαιότητα και στον Μεσαίωνα. Ήδη τότε τα κατασκευάσματα από χρυσό, ασήμι, χαλκό, μπρούντζο, ορείχαλκο και αργότερα από χάλυβα, επιτυγχάνονταν με τη θέρμανσή τους σε εστίες φωτιάς και οι όποιες μορφές συγκόλλησης της τότε εποχής στηρίζονταν στη μέχρι τότε γνώση των υλικών. Έτσι, η συγκόλληση με χύτευση καθιερώθηκε από τους αρχαίους χρόνους ως η κύρια μορφή σύνδεσης και επισκευής σπασμένων κατασκευών από μπρούντζο ή χυτοσίδηρο. Στην αρχική περίοδο των συγκολλήσεων, οι μέθοδοι παραγωγής συνδέονται με τη χρησιμοποίηση της φλόγας αερίων και του ηλεκτρικού τόξου για τη σύνδεση των μετάλλων. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η συγκόλληση σε κάμινο (καμινοσυγκόλληση), η κασσιτεροκόλληση, που χρησιμοποιείται μέχρι τις μέρες μας, ιδιαίτερα στη λευκοσιδηρουργία, η μπρουτζοκόλληση κ.λπ.. Η πιο κλασική μέθοδος συγκόλλησης, που είναι η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη, εμφανίστηκε στην αρχή του εικοστού αιώνα. Σήμερα με τις εμπειρίες που έχουν αποκτηθεί, με την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων συγκόλλησης καθώς επίσης και με τη συμμετοχή της ηλεκτρονικής επιστήμης επιτυγχάνονται κατασκευές υψηλής αντοχής και διασφαλισμένης ποιότητας μέσω καταλλήλων προτύπων και κανονισμών. Όλο και πολυπλοκότερης γεωμετρίας και μορφής προϊόντα και κατασκευές είναι σε θέση πλέον να δημιουργούνται, ενώ το σύστημα TQM απαιτεί τη διατήρηση της αρχής μηδενικών σφαλμάτων στις συγκολλητές συνδέσεις. Η λίστα με τα αντικείμενα ή προϊόντα, που έχουν συγκολλητά μέρη είναι ατελείωτη και περιλαμβάνει από στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέχρι πλοία, μηχανές αεριοθούμενων, αυτοκίνητα, γέφυρες, μεταλλικά έπιπλα, κτίρια με μεταλλικό σκελετό κλπ..



Εικόνα 1.1 Παραδείγματα εφαρμογών συγκολλήσεων συγκόλληση φλάντζας (αριστερά) και υποβρύχια συγκόλληση (δεξιά)

Οι κυριότερες χρονικές περιόδους, οι οποίες συνδέονται με την ανάπτυξη και τη βελτίωση της τεχνικής της συγκόλλησης αναφέρονται κατά αύξουσα χρονολογική σειρά ακολούθως.

- 1820 Καυστήρας υδρογόνου- οξυγόνου N.Broke.
- 1836 Ανακάλυψη ασετυλίνης και οι ιδιοτήτων της A.Davy.
- 1850 Καυστήρας φωταερίου Sainte Claire Devuce.
- 1877 M.Thompson (ΗΠΑ), μέθοδοι και μηχανήματα για τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση.
- 1881 Moissan (Γαλλία), πρώτη χρήση ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα για τήξη μετάλλων.
- 1882 J.Bernardos(Ρωσία) – S.Olszewski (Πολωνία), χρησιμοποίηση του ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίου από γραφίτη και βασικού υλικού, ως πηγή θερμότητας για τη συγκόλληση.
- 1890 N.Slavianoff (Ρωσία), χρησιμοποίηση της ενέργειας του ηλεκτρικού τόξου μεταξύ μεταλλικού τηκομένου ηλεκτροδίου και βασικού μετάλλου για τη συγκόλληση.
- 1899 N.Goldschmidt (Αγγλία), μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση θερμότης για τη συγκόλληση.
- 1901 N.Picard, κατασκευή καυστήρα ασετυλίνης-οξυγόνου υψηλής πίεσης.
- 1926 H.M.Hobert και P.K.Devers (ΗΠΑ), μέθοδος συγκόλλησης TIG (GTA).
- 1926 Alexander (ΗΠΑ), μέθοδος MIG (GMA).
- 1957 W.A.Stohr, χρησιμοποίηση της δέσμης ηλεκτρονίων στις συγκολλήσεις
- 1958-1961 C.H. Thones, L.Maiman, και Ali Javan, χρησιμοποίηση των στερεών και αερίων Laser στις συγκολλήσεις.

1.1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Έναντι Άλλων Μεθόδων Συνδέσεως

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω η τεχνική της συγκόλλησης έχει αντικαταστήσει έως και εξοστρακίσει άλλες μεθόδους συνδέσεως σε έναν ευρύ φάσμα μηχανολογικών και όχι μόνο κατασκευών. Το γεγονός αυτό οφείλεται εν πολλοίς στα συγκριτικά πλεονεκτήματα, που εμφανίζει αυτού του είδους η τεχνική έναντι των υπολοίπων, όπως είναι οι ηλώσεις και η χύτευση.

Τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης ως μεθόδου συνθέσεως δύο ή περισσότερων τεμαχίων έναντι της χύτευσης είναι τα εξής:

- Σε κατασκευές κυρίως μεγάλων διαστάσεων παρατηρείται μια σημαντική οικονομία υλικού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τόσο την ελάττωση του βάρους της ίδιας της κατασκευής που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 50% όσο και τη μείωση του κόστους των υλικών. Για αυτό το λόγο η τεχνική της συγκόλλησης αποτελεί πλέον σχεδόν την αποκλειστική μέθοδο κατασκευής ελαφρών κατασκευών.
- Σε μικρές σειρές παραγωγής τεμαχίων η τεχνική της συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατασκευής ανά τεμάχιο. Το γεγονός αυτό οφείλεται από τη μία μεριά στην οικονομία του υλικού που αναφέρθηκε και προηγουμένως και από την άλλη μεριά στο υψηλό αρχικό κόστος που απαιτείται για τη μέθοδο της χύτευσης (κατασκευή μοντέλων, καλουπιών, αγορά φούρνων κλπ)
- Με τη τεχνική της συγκόλλησης καθίσταται δυνατή η δημιουργία τεμαχίων και κατασκευών πολύπλοκης μορφής και γεωμετρίας δίχως περιορισμούς και σε σχετικά περιορισμένο χρόνο προεργασίας.
- Μέσω της τεχνικής της συγκόλλησης δημιουργούνται κατασκευές, οι οποίες εμφανίζουν αυξημένη στατική και δυναμική αντοχή έναντι των αντιστοίχων χυτών τεμαχίων. Αφενός γενικότερα οι χάλυβες συγκολλήσεως εμφανίζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες έναντι των ψαθυρών χυτοσιδήρων και αφετέρου τα χυτά εξαρτήματα είναι σε θέση πολλές φορές να περιέχουν εγκλείσματα οξειδίων και αερίου που μειώνουν την αντοχή του και επηρεάζουν αρνητικά τις εν γένει μηχανικές τους ιδιότητες.

Τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης ως μεθόδου συνθέσεως δύο ή περισσότερων τεμαχίων έναντι της ήλωσης είναι τα εξής:

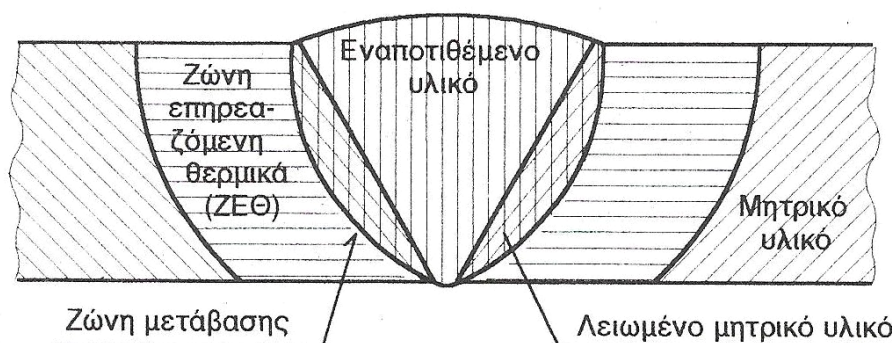
- Όπως και στη σύγκριση της τεχνικής της συγκόλλησης με τη αυτή της χύτευσης, έτσι και εδώ παρατηρείται μείωση του βάρους. Αυτό οφείλεται διότι στις ηλώσεις είναι απαραίτητες πολλές φορές οι αρμοκαλύπτρες οι οποίες μαζί με τις κεφαλές των ήλων και λόγω της αναγκαιάς, λόγω της εξασθένησης από τις οπές των ήλων, αύξησης των διαστάσεων των διατομών των στοιχείων, αυξάνουν το βάρος της κατασκευής.
- Με τη τεχνική της συγκόλλησης σε κατασκευές όπως είναι αγωγοί, θαλάσσια σκάφη κλπ, δεν παρατηρείται απώλεια ενέργειας και παρεμπόδιση της ροής του ρευστού. Με τις ηλώσεις παρατηρείται η ύπαρξη τυρβώδους ροής, η οποία γεννάται από τους ήλους και τις αρμοκαλύπτρες των ηλώσεων. Έτσι με κατάλληλη μηχανική κατεργασία λείανσης των ραφών των συγκολλήσεων οι απώλειες ενέργειας αυτού του είδους περιορίζονται στο ελάχιστο.
- Σε κατασκευές μεγάλων διαστάσεων η τεχνική της συγκόλλησης είναι οικονομικότερη σε σχέση με αυτή των ηλώσεων. Αυτό οφείλεται από τη μία μεριά στη μεγαλύτερη ποσότητα υλικού που χρησιμοποιείται και από την άλλη μεριά στις σαφώς περισσότερες ώρες εργασίας και εκτέλεσης.

Όπως κάθε τεχνική, η οποία εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, έτσι και αυτή των συγκολλήσεων εμφανίζει μερικά γενικά μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως:

- Με την τεχνική της συγκόλλησης είναι δυνατή η σύνδεση τεμαχίων, τα οποία είναι κατασκευασμένα μονάχα από το ίδιο υλικό ή από υλικά τα οποία είναι σε θέση να δημιουργήσουν κράμα.
- Με την τεχνική αυτή υπάρχει κίνδυνος είτε στρέβλωσης των τεμαχίων, είτε επιβλαβής μεταβολής του ιστού και της δομής αυτών είτε ακόμη εμφάνιση υψηλών εσωτερικών παραμενουσών τάσεων λόγω της υψηλής τοπικής θερμοκρασίας.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, και συγκεκριμένα σε αυτές κατά τις οποίες απαιτείται η επί τόπου συγκόλληση σε εργοτάξιο παραδείγματος χάριν, η τεχνική αυτή είναι ακριβότερη και σαφώς δυσκολότερη έναντι της ήλωσης ή της κοχλίωσης.
- Για τη συναρμολόγηση ενός δικτυώματος η τεχνική της συγκόλλησης είναι δυσκολότερη και απαιτητικότερη έναντι αυτής της ήλωσης ή της κοχλίωσης, κατά τις οποίες οι θέσεις σύνδεσης είναι προκαθορισμένες από τις οπές που έχουν δημιουργηθεί.
- Στις γωνιακές ραφές, η δημιουργία των οποίων είναι αρκετά απαιτητική, ο έλεγχος αυτών είναι αρκετά δύσκολος.

1.2 Τοπολογία Συγκολλητών Συνδέσεων

Η συγκολλητή σύνδεση διακρίνεται σε τρεις βασικές περιοχές, το βασικό ή μητρικό υλικό, την κόλληση ή εναποτιθέμενο υλικό και λόγω της αλληλεπίδρασης της θερμικής πηγής με το μέταλλο βάσης εμφανίζεται και μία τρίτη ζώνη πολύ σημαντική, η ζώνη θερμικά επηρεαζόμενη (ΖΕΘ), δηλαδή στρώμα μητρικού μετάλλου που εφάπτεται με την κόλληση, στο οποίο από το αποτέλεσμα της θερμότητας συγκόλλησης εμφανίζονται συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα. Το πλάτος της ζώνης αυτής εξαρτάται από την προσαγόμενη θερμική ενέργεια καθώς και από τον βαθμό συγκέντρωσης της θερμικής πηγής.



Εικόνα 1.2 Τοπολογία συγκολλητής σύνδεσης

Πιο συγκεκριμένα η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (Heat Affected Zone (HAZ)) είναι η περιοχή του βασικού μετάλλου που δεν τήκεται κατά τη συγκόλληση και της οποίας η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες τροποποιούνται από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αποτέλεσμα είναι η μείωση της μηχανικής αντοχής, η μείωση της δυσθραυστότητας και ολκιμότητας καθώς και η μείωση της αντοχής σε διάβρωση.

1.3 Ταξινόμηση Συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις είναι μία από τις κυριότερες τεχνικές τόσο σύνδεσης όσο και εκτέλεσης και επισκευής διαφόρων μεταλλικών συσκευών και εξαρτημάτων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μια συγκόλληση μεταξύ δύο ή περισσότερων τεμαχίων είναι σε θέση να επιτευχθεί είτε μέσω της κατάλληλης πρόσδοσης θερμότητας και την επακόλουθη θέρμανση των προς σύνδεση μετάλλων είτε μέσω πίεσης ή μη είτε με τη χρήση πρόσθετου υλικού ή χωρίς.

Οι συγκολλήσεις επομένως είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες ευρύτερες ομάδες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Έτσι κατηγοριοποιούνται στις συγκολλήσεις πίεση, οι οποίες πραγματοποιούνται με διάχυση υλικού μέσω μια ενδιάμεσης επιφάνειας σύνδεσης ή μέσω μιας αυτόματης επιφάνειας σύνδεσης των επιφανειών, οι οποίες έρχονται σε επαφή και συγκολλήσεις τήξης, οι οποίες πραγματοποιούνται με πλήρωση της περιοχής σύνδεσης με κατάλληλο τηγμένο υλικό. Οι τελευταίες με τη σειρά τους διακρίνονται στις αυτογενείς και τις ετερογενείς συγκολλήσεις.

1.3.1 Αυτογενείς συγκολλήσεις

Οι αυτογενείς συγκολλήσεις περιλαμβάνονται στις συγκολλήσεις τήξης, δηλαδή είναι συγκολλήσεις οι οποίες επιτυγχάνονται με τη θέρμανση των προς σύνδεση μετάλλων μέχρι το σημείο τήξης τους. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του είδους συγκολλήσεων είναι ότι πραγματοποιείται με τη προσθήκη ή μη πρόσθετου αυτογενούς μετάλλου, δηλαδή τόσο η ίδια η κόλληση όσο και τα συγκολλώμενα τεμάχια αποτελούνται από ίδιο ή παρόμοιας σύστασης υλικό. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται σύντηξη του βασικού μετάλλου με το εναποτιθέμενο υλικό, δηλαδή το υλικό το οποίο προέρχεται από το πρόσθετο υλικό (ηλεκτρόδιο) και σχηματίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο η κόλληση της σύνδεσης.

Η πηγή θερμότητας στις αυτογενείς συγκολλήσεις μπορεί να είναι είτε από ηλεκτρικό τόξο, είτε από φλόγα ασετυλίνης, είτε από δέσμη ηλεκτρονίων είτε από ακτίνες Laser. Οι κυριότερες μέθοδοι αυτογενούς συγκόλλησης τήξης είναι οι εξής:

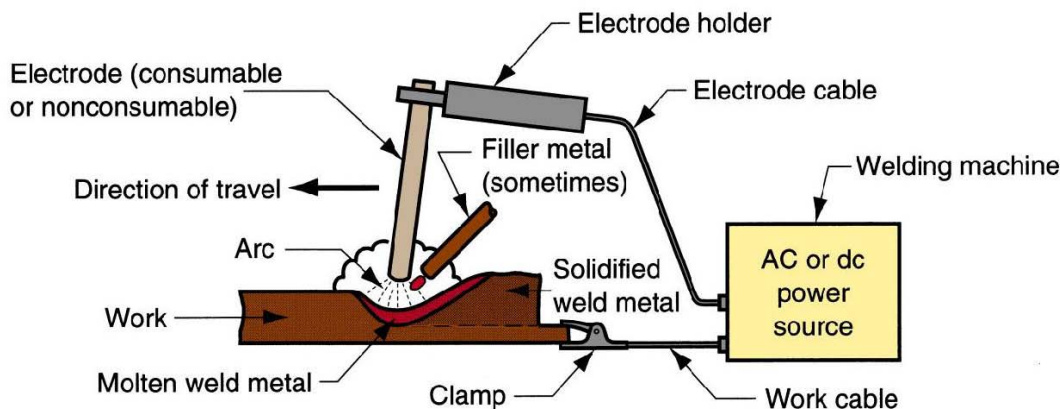
- Ηλεκτροσυγκόλληση ή συγκόλληση τόξου
- Οξυγονοσυγκόλληση ή συγκόλληση αερίου

- Συγκόλληση αντίστασης ή ηλεκτροπόντα
- Μέθοδος LBW
- Μέθοδος EBW

1.3.1.1 Ηλεκτροσυγκόλληση ή Συγκόλληση Τόξου

Η ηλεκτροσυγκόλληση ή συγκόλληση τόξου είναι η αυτογενής συγκόλληση τήξεως, κατά την οποία η απαιτούμενη θερμότητα παράγεται μέσω ηλεκτρικού ή αλλιώς βολταϊκού τόξου. Με τη θερμότητα αυτή τα προς σύνδεση μεταλλικά τεμάχια τήκονται επιφανειακά, στη θέση στην οποία πρόκειται να πραγματοποιηθεί η σύνδεσή τους, και ταυτόχρονα αναμειγνύονται με την λιωμένη κόλληση, η οποία είναι από υλικό ίδιο ή παρόμοιας σύστασης με αυτό των τεμαχίων.

Η τεχνική της ηλεκτροσυγκόλλησης πραγματοποιείται συνήθως με μεταλλικό ηλεκτρόδιο, το οποίο συνήθως αποτελεί και την ίδια την κόλληση, η οποία τήκεται και πληροί το διάκενο μεταξύ των δύο προς σύνδεση τεμαχίων. Τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το κομμάτι, το οποίο παίζει το ρόλο του άλλου ηλεκτροδίου, συνδέονται στα άκρα κατάλληλης ηλεκτρικής πηγής, συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια για τη συγκόλληση, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Κατά τη συγκόλληση αυτού του είδους η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία είναι της τάξεως των 5500°C.



Εικόνα 1.3 Διάταξη ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου

Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από δύο μέρη, τον πυρήνα και την εξωτερική επένδυση. Μέσω του πυρήνα άγεται το ηλεκτρικό ρεύμα και είναι συνήθως από μαλακό χάλυβα, ενώ υπάρχουν και ηλεκτρόδια από χυτοσίδηρο ή από διάφορα χαλυβοκράματα. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι κράμα διαφόρων οργανικών και ορυκτών συστατικών και είναι συνήθως επενδεδυμένα κατάλληλα με πλαστική εύτηκτη ουσία, η οποία από τη μια μεριά σχηματίζει έναν προστατευτικό μανδύα από αέρια στην περιοχή της συγκόλλησης και από την άλλη μεριά χρησιμεύει έτσι ώστε να αποτρέπεται η

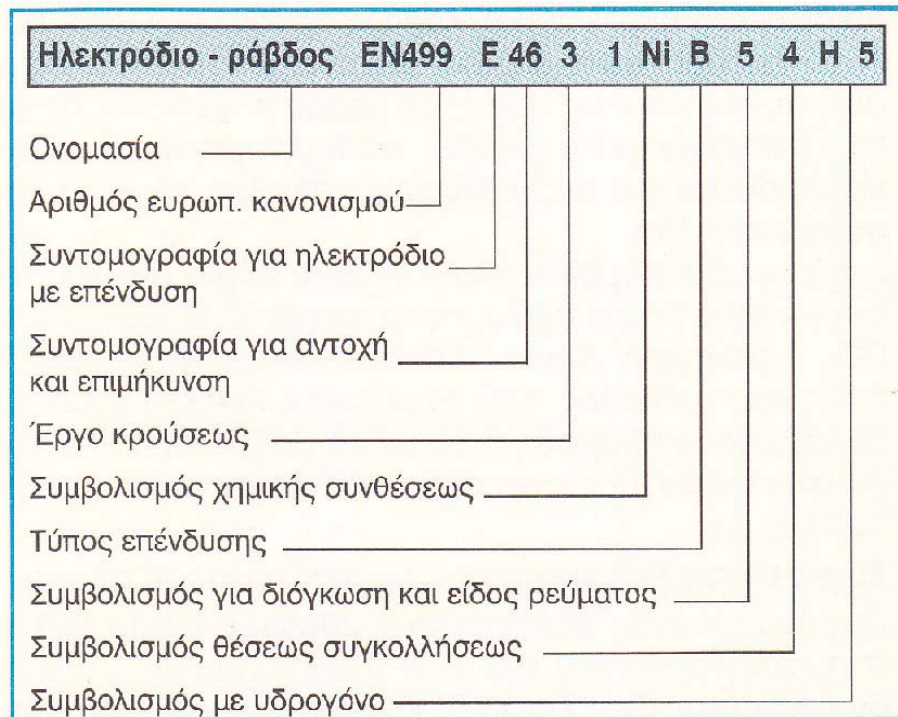
δημιουργία των ανεπιθύμητων, για λόγους που θα αναλυθούν σε επόμενο εδάφιο, φυσαλίδων αέρα μέσα στη ραφή της συγκόλλησης. Ως εκ τούτου οι συγκολλήσεις, κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με επένδυση οδηγούν στη δημιουργία συγκολλήσεων υψηλότερης μηχανικής αντοχής σε σχέση με αυτές κατά τις οποίες τα ηλεκτρόδια δεν είναι επενδεδυμένα.

Τα ηλεκτρόδια κυκλοφορούν σε πολλά μεγέθη με διαφορετικό μήκος και διάμετρο, όπως και με διαφορετικό πάχος επένδυσης. Ανάλογα με τις διαστάσεις τους, καθορίζεται και η απαιτούμενη τιμή του ρεύματος που είναι σε θέση να διέλθει για την τήξη του ηλεκτροδίου. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)	Πάχος Ηλεκτροδίου (mm)	Ένταση Ρεύματος (A)
1,6	250	25
2,0	350	45
2,5	350	65
3,5	450	115
4,0	450	145
5,0	450	215
6,0	450	265
6,3	450	285
7,0	450	320
8,0	450	360

Πίνακας 1.1 Στοιχεία ηλεκτροδίων

Επίσης τα ηλεκτρόδια έχουν τυποποιηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με Ευρωπαϊκά και άλλα διεθνή πρότυπα. Στην ετικέτα του κουτιού, στα οποία είναι συσκευασμένα τα ηλεκτρόδια, γράφονται με τη σειρά σύμβολα που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένες ιδιότητες του ηλεκτροδίου. Στον παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της μεθόδου τυποποίησης ηλεκτροδίου.



Εικόνα 1.4 Παράδειγμα ονομασίας ηλεκτροδίου

Οι ηλεκτροσυγκολλήσεις είναι σε θέση να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες ανάλογα με τις μεθόδους προσθήκης του υλικού στο λουτρό συγκόλλησης και τις μεθόδους προστασίας του λουτρού συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Ως λουτρό συγκόλλησης καλείται η περιοχή από τηγμένο μέταλλο, η οποία, όταν στερεοποιηθεί, προκαλεί τη συγκόλληση των δύο τεμαχίων. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

Ονομασία	Μέθοδος Προσθήκης Υλικού	Μέθοδος Προστασίας	Κωδική Ονομασία
Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια	Αναλώσιμο ηλεκτρόδιο	Πάστα εξωτερικά του ηλεκτροδίου	MMA
Συγκόλληση συμπαγούς σύρματος σε προστατευτική ατμόσφαιρα	Αναλώσιμο ηλεκτρόδιο	Προστατευτικό αέριο	MIG/MAG
Συγκόλληση σωληνωτού σύρματος πληρωμένου με πάστα	Αναλώσιμο ηλεκτρόδιο	Πάστα εσωτερικά του ηλεκτροδίου+ προστατευτικό αέριο	FCAW

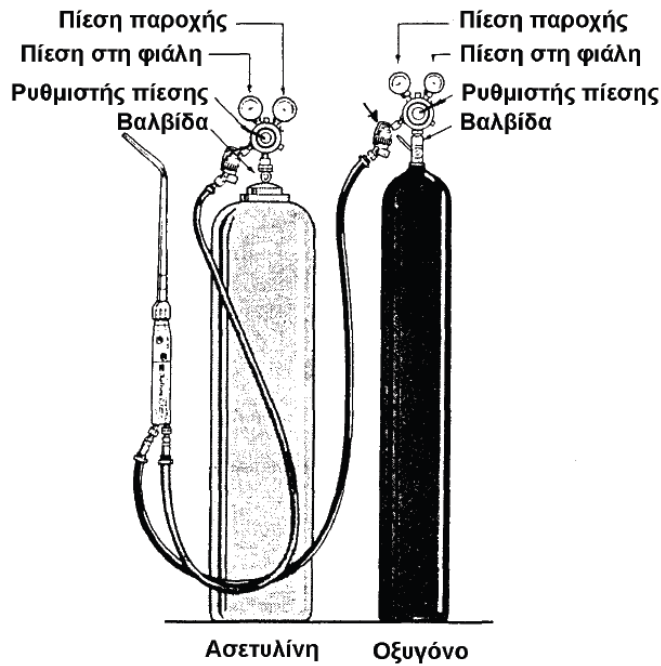
Όνομασία (Συν.)	Μέθοδος Προσθήκης Υλικού	Μέθοδος Προστασίας	Κωδική Ονομασία
Συγκόλληση με μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο σε προστατευτική ατμόσφαιρα	Ράβδος	Προστατευτικό αέριο	TIG
Συγκόλληση βυθισμένου τόξου	Αναλώσιμο ηλεκτρόδιο	Πάστα επάνω στο λουτρό συγκόλλησης	SAW
Συγκόλληση πλάσματος	Ράβδος	Προστατευτικό αέριο, μέρος του οποίου είναι ιονισμένο	PAW

Πίνακας 1.2 Ταξινόμηση συγκολλήσεων τόξου/ ηλεκτροσυγκολλήσεων

1.3.1.2 Οξυγονοσυγκόλληση ή Συγκόλληση Αερίου

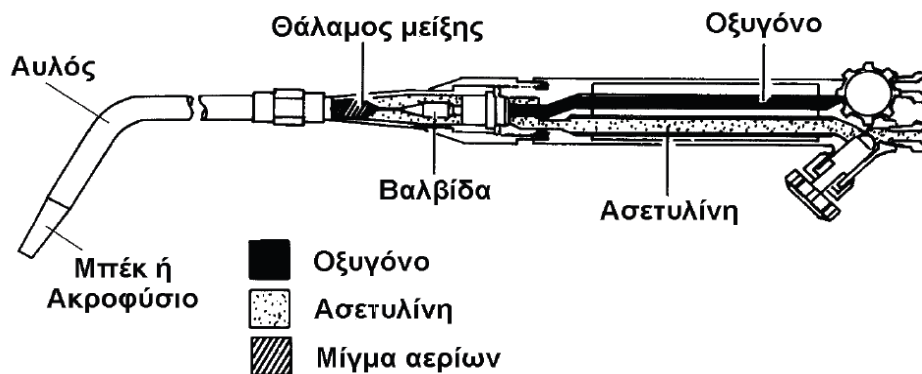
Η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη (οξυγονοσυγκόλληση ή οξυγονοκόλληση) πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα. Χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση μεταλλικών ελασμάτων ή δοκών, ράβδων, σωλήνων κ.λπ. Η οξυγονοκόλληση είναι μία αυτογενής συγκόλληση, γιατί πραγματοποιείται μέσω της τήξης των άκρων των δύο προς συγκόλληση τεμαχίων και με προσθήκη ή όχι συγκολλητικού υλικού.

Ο μηχανισμός λειτουργίας αυτής της μεθόδου έχει ως εξής: Η απαραίτητη θερμότητα για το λιώσιμο των άκρων των δύο προς συγκόλληση τεμαχίων παράγεται με τη βοήθεια του οξυγόνου (O_2) και της ασετυλίνης (C_2H_2). Το οξυγόνο που είναι αέριο, άχρωμο, άγευστο, άοσμο και διατηρεί την καύση, καίει την ασετυλίνη, που είναι επίσης αέριο άχρωμο, μη τοξικό με δυσάρεστη οσμή και εύφλεκτο. Και τα δύο αυτά αέρια τοποθετούνται σε φιάλες, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, οι οποίες είναι σημαδεμένες με χαρακτηριστικά χρώματα για να αναγνωρίζεται το περιεχόμενό τους (μπλε για το οξυγόνο και κίτρινο για την ασετυλίνη).



Εικόνα 1.5 Εξοπλισμός Οξυγονοσυγκόλλησης

Η ρύθμιση της πίεσεως στις φιάλες του οξυγόνου και της ασετυλίνης αντίστοιχα γίνεται με κατάλληλους εκτονωτές, οι οποίοι ρίχνουν την πίεση έτσι ώστε να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν τα αέρια. Με την εκτόνωση των δύο αερίων, πραγματοποιείται ακολούθως η ανάμειξή τους στον καυστήρα, όπου και παράγεται η φλόγα. σωστή αναλογία οξυγόνου και ασετυλίνης ρυθμίζει και την ποιότητα της φλόγας, η οποία δεν πρέπει να έχει περισσότερο οξυγόνο (οξειδωτική φλόγα) ούτε περισσότερο ασετυλίνη (ανθρακωτική). Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται σε τομή ένας τυπικός καυστήρας οξυγονοσυγκόλλησης.

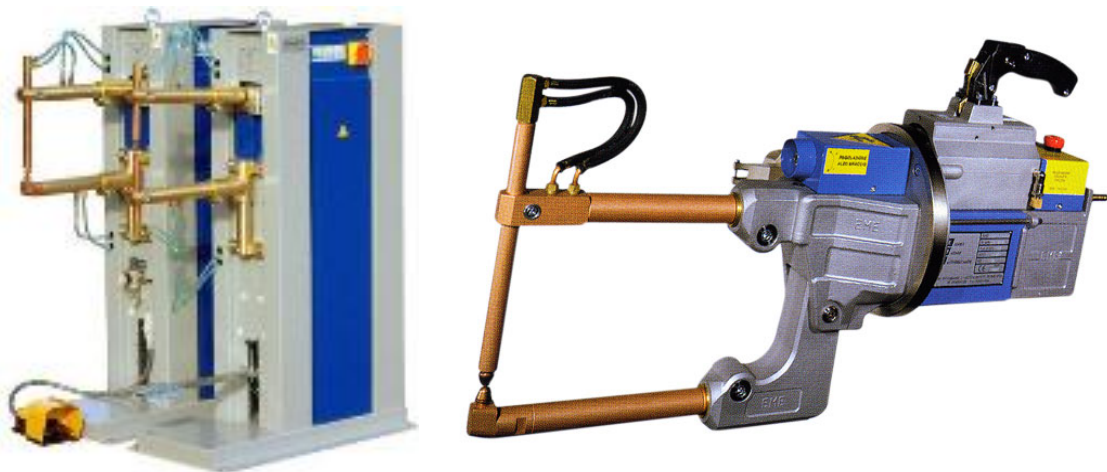


Εικόνα 1.6 Καυστήρας οξυγονοσυγκόλλησης σε τομή

1.3.1.3 Συγκόλληση Αντίστασης ή Ηλεκτροπόντα

Η ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι αυτογενής συγκόλληση, η οποία δε χρησιμοποιεί συγκολλητικό υλικό. Τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν θερμαίνονται συμπιεζόμενα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και συγκολλώνται. Για τη συγκόλληση με αντίσταση σημαντικό ρόλο παίζουν ο χρόνος συγκόλλησης και η πίεση που ασκείται από τα ηλεκτρόδια. Ανάλογα με τα υλικά που πρόκειται να συγκολληθούν και το πάχος τους, επιλέγονται και οι συνθήκες της συγκόλλησης. Ο μηχανισμός στον οποίο στηρίζεται η εν λόγω τεχνική συγκόλλησης είναι ότι όταν ένα σχετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα διέλθει από μια σύνδεση, συναντά εσωτερική αντίσταση διέλευσης, αναπτύσσοντας έτσι θερμότητα λόγω αντίστασης, που είναι σχετικά τοπική στην περιοχή της συγκόλλησης.

Η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μηχανή για ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι η ηλεκτροπόντα. Οι ηλεκτροπόντες που κυκλοφορούν είναι συνήθως σταθερές και ποδοκίνητες, ενώ υπάρχουν και φορητές. Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζεται δύο τέτοιου είδους ηλεκτροπόντες.

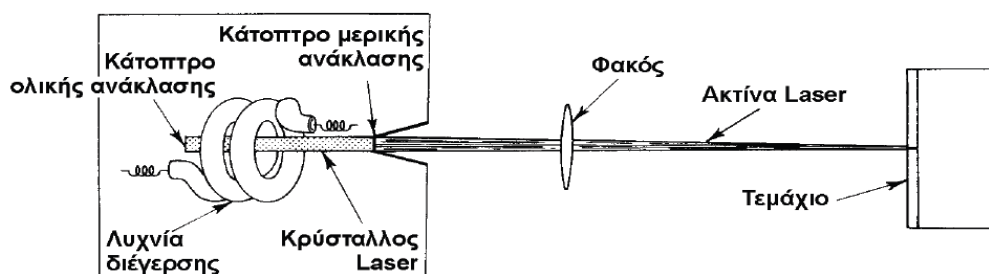


Εικόνα 1.7 Σταθερή ηλεκτροπόντα (αριστερά) και φορητή ηλεκτροπόντα (δεξιά)

1.3.1.4 Μέθοδος LBW

Η μέθοδος LBW, δηλαδή Laser Beam Welding, χρησιμοποιεί για την τήξη του μετάλλου, δέσμη ακτίνας Laser από πού παράγεται από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η μέθοδος αυτή πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1950. Η συγκόλληση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, όταν μία δέσμη ακτίνων

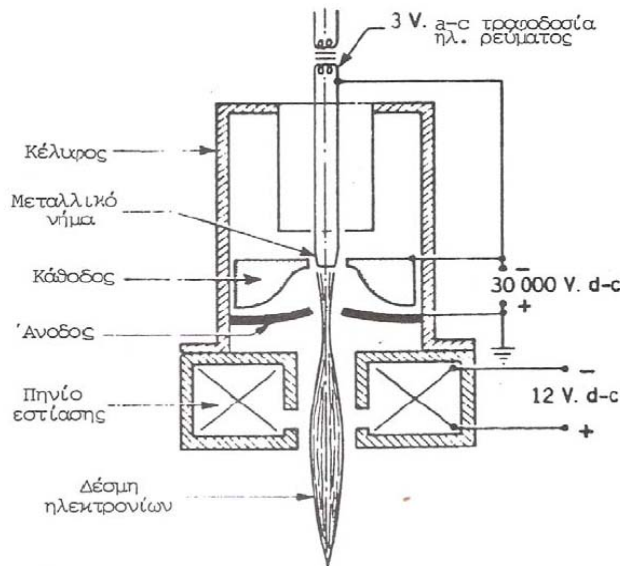
Laser προσπίπτει πάνω στα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν. Το CO₂ χρησιμοποιείται σε μείγμα με ήλιο (He), άζωτο (N₂), με αναλογίες 4.5%, 13.5% και 82% αντίστοιχα. Τα αέρια αυτά λαμβάνονται συνήθως από φιάλες πεπιεσμένων αερίων και αναμειγνύονται πριν από την είσοδο τους στην κοιλότητα του laser. Η κοιλότητα αυτή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της, ψύχεται εξωτερικά από κλειστό κύκλωμα απιονισμένου νερού. Οι συσκευές βιομηχανικών laser είναι συνήθως εφοδιασμένες με μονάδα αριθμητικού ελέγχου με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος της θέσης της ακτίνας. Η μέθοδος αυτή λόγω του υψηλού της κόστους και του μικρού βαθμού απόδοσης της ακτίνας, χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση άλλων μεθόδων. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται μια χαρακτηριστική διάταξη LBW.



Εικόνα 1.8 Διάταξη μεθόδου συγκόλλησης LBW

1.3.1.5 Μέθοδος EBW

Η μέθοδος EBW, δηλαδή Electron Beam Welding, περιλαμβάνει τη συγκόλληση δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων μέσω της πρόσδοσης θερμότητας τήξης η οποία προέρχεται από τη μετατροπή σε θερμότητα της κινητικής ενέργειας δέσμης ηλεκτρονίων. Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται από την υψηλή διαφορά δυναμικού μεταξύ της θερμαινόμενης καθόδου και του προς συγκόλληση αντικειμένου. Το κενό αυτό δημιουργεί ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης για μέταλλα όπως το βολφράμιο, το βηρύλλιο, το τιτάνιο κλπ, τα οποία είναι πολύ δύσκολο να συγκολληθούν με άλλες μεθόδους.



Εικόνα 1.9 Σχηματική διάταξη μεθόδου συγκόλλησης EBW

1.3.2 Ετερογενείς Συγκολλήσεις

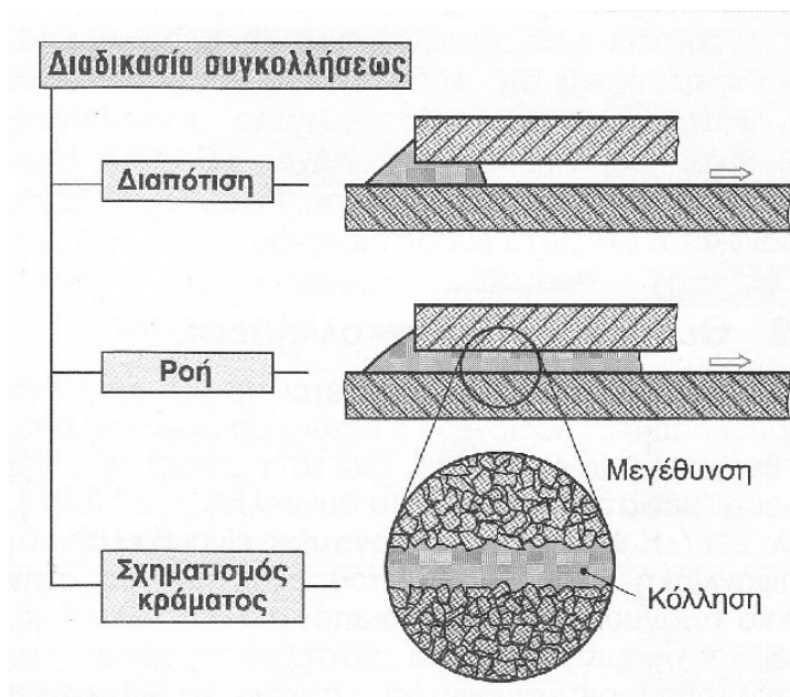
Ετερογενείς καλούνται οι συγκολλήσεις τήξεως, οι οποίες πραγματοποιούνται με τη χρήση εύτηκτου συγκολλητικού υλικού διαφορετικής όμως σύστασης σε σχέση με τα προς σύνδεση μεταλλικά τεμάχια (βασικό υλικό). Οι συγκολλήσεις αυτού του είδους δεν είναι τόσο ισχυρές όσο οι αντίστοιχες αυτογενείς συγκολλήσεις τήξεως. Η σύνδεση των τεμαχίων στην ετερογενή συγκόλληση επιτυγχάνεται κυρίως με την διείσδυση της ρευστοποιημένης κόλλησης μέσα στους πόρους των συγκολλημένων μεταλλικών επιφανειών και την ανάπτυξη μοριακών δυνάμεων με τον σχηματισμό κραμάτων στην περιοχή της σύνδεσης. Για να υπάρξει ικανοποιητική πρόσφυση στις προς συγκόλληση επιφάνειες, θα πρέπει οι επιφάνειες να έχουν καθαριστεί σχολαστικά, αλλιώς θα προκύψουν αδύναμες συγκολλήσεις με όλες τις αρνητικές επιπτώσεις που είναι σε θέση να παρουσιαστούν σε αυτήν την περίπτωση.

Ο μηχανισμός που λαμβάνει χώρα κατά τις ετερογενείς συγκολλήσεις είναι ο εξής: Αρχικά τα προς συγκόλληση τεμάχια θερμαίνονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το σημείο τήξης τους, υψηλότερη όμως από το σημείο τήξης της κόλλησης. Στη θερμοκρασία αυτή η κόλληση λιώνει και λεπτόρρευστη καθώς είναι απλώνεται στις επιφάνειες που θα συγκολληθούν. Η κρυσταλλική σύνδεση των κομματιών επιτυγχάνεται με τη στερεοποίηση ενός κράματος που σχηματίζεται από τα στοιχεία της κόλλησης και μιας περιορισμένης περιοχής των επιφανειών συγκόλλησης των κομματιών. Η σύνδεση ενισχύεται και με μηχανικό δεσμό, που οφείλεται στη διείσδυση της ρευστής κόλλησης μέσα στους πόρους των επιφανειών συγκόλλησης. Βασική προϋπόθεση για την εκτέλεση μιας ετερογενούς συγκόλλησης είναι η απόλυτη καθαρότητα των επιφανειών συγκόλλησης των κομματιών, από το λεπτό στρώμα οξειδίων που σχηματίζεται πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες, ιδιαίτερα όταν

πυρώνονται. Η παρουσία των οξειδίων εμποδίζει την πραγματοποίηση του μηχανισμού της ετερογενούς συγκόλλησης.

Κατά την ετερογενή συγκόλληση η κρυσταλλική σύνδεση των μεταλλικών κομματιών επιτυγχάνεται σε τρεις φάσεις, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:

- διαπότιση (διαβροχή) του βασικού υλικού με τη ρευστή κόλληση
- ροή της κόλλησης
- σχηματισμός κράματος ανάμεσα στα στοιχεία της κόλλησης και μιας περιορισμένης περιοχής των επιφανειών συγκόλλησης.



Εικόνα 1.10 Φάσεις ετερογενούς συγκόλλησης

Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται όταν για διάφορους λόγους αποκλειστεί η περίπτωση της χρήσης μια αυτογενούς συγκόλλησης, συνήθως διότι επειδή συγκολλώνται τεμάχια από διαφορετικό υλικό και επίσης όταν δεν επιθυμείτε η τήξη των τεμαχίων και επομένως δε πραγματοποιείται τοπική τήξη των αντικειμένων, που θα συγκολληθούν, παρά μόνο θέρμανση και εναπόθεση λιωμένου συγκολλητικού υλικού. Ακόμη χρησιμοποιούνται όταν χρειάζεται να πληρωθούν από κατάλληλο υλικό τοπικές κοιλότητες και τέλος στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η αντοχή των παραγομένων τεμαχίων κατά τη μαζική παραγωγή αυτών κρίνεται ως αποδεκτή και ικανοποιητική.

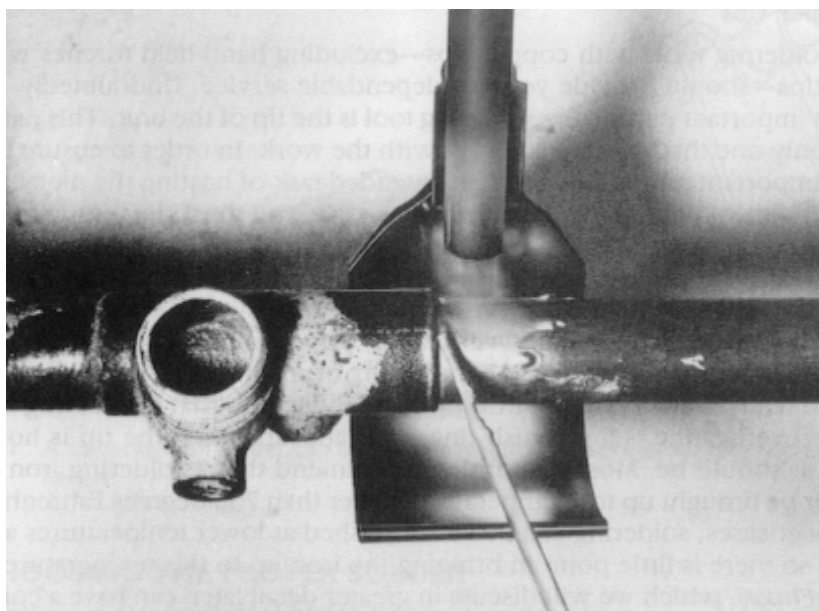
Ανάλογα με το σημείο τήξεως οι ετερογενείς συγκολλήσεις τήξεως είναι σε θέση να διαχωριστούν στις μαλακές ετερογενείς συγκολλήσεις τήξεως (κασσιτεροκόλληση-

μολυβδοκόλληση) και στις σκληρές (μπρουτζοκολλήσεις-ασημοκολλήσεις). Μαλακές ονομάζονται οι ετερογενείς συγκολλήσεις, κατά τις οποίες η θερμοκρασία θέρμανσης δεν υπερβαίνει τους 400-500°C. Αντίθετα ως σκληρές καλούνται οι ετερογενείς συγκολλήσεις, κατά τις οποίες η απαιτούμενη θερμοκρασία υπερβαίνει τους 500°C.

1.3.2.1 Μαλακές Ετερογενείς Συγκολλήσεις Τήξεως

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως χαρακτηριστικό των μαλακών συγκολλήσεων αποτελεί η τιμή της θερμοκρασίας θέρμανσης των προς σύνδεση τεμαχίων, η οποία δεν υπερβαίνει τους 500°C. Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιου είδους συγκόλλησης, χρησιμοποιείται ως συγκολλητικό υλικό κράμα κασσίτερου και μολύβδου. Η θερμότητα, που απαιτείται για την τήξη του συγκολλητικού υλικού, παρέχεται από καμινέτο ή κολλητήρι ή άλλες πηγές. Μαλακές συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλληση, η μολυβδοκόλληση και άλλες, με σημαντικότερη εξ αυτών να είναι η κασσιτεροκόλληση.

Στην κασσιτεροκόλληση το υλικό της συγκόλλησης αποτελεί κράμα κασσίτερου (Sn) και μολύβδου (Pb) σε διάφορες αναλογίες, με μικρή ποσότητα αντιμονίου (Sb), που καθιστά την κόλληση πιο ανθεκτική και την κάνει ταυτόχρονα πιο σκληρή. Το ποσοστό αντιμονίου στις κασσιτεροκολλήσεις αρχίζει από 0,5% και φτάνει μέχρι και 3,3%. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα κασσιτεροκόλλησης μολυβδωσώληνα.



Εικόνα 1.11 Κασσιτεροκόλληση μολυβδωσώληνα

Τα κριτήρια που οδηγούν στην εκλογή της κασσιτεροκόλλησης ως μέθοδος συγκόλλησης είναι η ευχερή εξάπλωση της κόλλησης πάνω στα τεμάχια και η οικονομική χρήση του κασσίτερου μιας και είναι πιο ακριβός από τον μολύβδο. Η

αντοχή των κασσιτεροκολλήσεων φθάνει το πολύ τα 45N/mm^2 και εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την διάρκεια της φόρτισης.

1.3.2.2 Σκληρές Ετερογενείς Συγκολλήσεις Τήξεως

Ιδιαίτερο γνώρισμα των σκληρών ετερογενών συγκολλήσεων τήξεως αποτελεί η τιμή της θερμοκρασίας θέρμανσης των προς σύνδεση μεταλλικών τεμαχίων, η οποία υπερβαίνει τους 500°C και κυμαίνεται συνήθως από τους 600°C έως και τους 900°C . Αυτού του είδους η κόλληση χρησιμοποιείται για τη σύνδεση τεμαχίων κατασκευασμένα από όλα τα συνήθη μεταλλικά υλικά, εκτός του αλουμινίου (Al). Μεγάλη εφαρμογή έχουν σε συγκολλήσεις χάλκινων εξαρτημάτων ή εξαρτημάτων από κράματα του χαλκού. Οι σημαντικότερες σκληρές συγκολλήσεις είναι η μπρουντζοκόλληση και η ασημοκόλληση, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άργυρο. Έτσι οι μπρουντζοκολλήσεις έχουν περιεκτικότητα σε άργυρο μικρότερη του 8%, ενώ οι ασημοκολλήσεις άνω του 8%.

Η μπρουντζοκόλληση χρησιμοποιεί ως κόλληση κράμα χαλκού (Cu) και ψευδαργύρου (Zn), παρά το γεγονός ότι ο μπρούντζος είναι κράμα χαλκού και κασσιτέρου. Το συγκολλητικό υλικό λιώνει μέσω θέρμανσης σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία τήξης των προς συγκόλληση τεμαχίων και απλώνει στις επιφάνειες που θα συγκολληθούν. Για να υπάρξει μεγαλύτερη πρόσφυση του συγκολλητικού υλικού χρησιμοποιείται βόρακας ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Η θέρμανση των κομματιών και του συγκολλητικού υλικού εξασφαλίζεται με καμινέτα, φλόγα οξυγονοασετυλίνης, φωταερίου κλπ..

Στην ασημοκόλληση χρησιμοποιείται συγκολλητικό υλικό που περιέχει άργυρο (Ag), χαλκό (Cu), ψευδάργυρο (Zn), κασσίτερο (Sn) και κάδμιο (Cd). Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της κόλλησης σε άργυρο, τόσο μειώνεται και η τιμή της θερμοκρασίας τήξεως της κόλλησης. Οι κολλήσεις της ασημοκόλλησης περιέχουν τουλάχιστον 8% άργυρο και κυκλοφορούν στο εμπόριο σε μορφή σύρματος, ελάσματος ή σε μορφή σκόνης. Όπως και στις άλλες ετερογενείς συγκολλήσεις, έτσι και στην ασημοκόλληση, χρησιμοποιούνται ως θερμαντικά μέσα καμινέτα ή φλόγα της οξυγονοασετυλίνης, του φωταερίου κ.λπ.. Η ασημοκόλληση έχει πολλές εφαρμογές στην κοσμηματοποιία και στα ηλεκτρονικά παρά το κόστος της που είναι μεγάλο λόγω της παρουσίας του αργύρου.



Εικόνα 1.12 Μπρουτζοκόλληση ελάσματος

1.4 Μηχανική Συμπεριφορά Συγκολλήσεων

1.4.1 Ανάλυση Καταπονήσεων Συγκολλήσεων

Όπως και οι πλείστες μηχανολογικές κατασκευές και στοιχεία μηχανής, έτσι και οι συγκολλήσεις καταπονούνται είτε από στατικά είτε από δυναμικά φορτία κατά τη χρήση της συγκολλημένης κατασκευής, τα οποία είναι σε θέση να προκαλέσουν αστοχίες ή ασυνέχειες στη συγκόλληση. Για αυτό το λόγο πραγματοποιούνται δοκιμές ελέγχου στις δημιουργηθείσες συγκολλήσεις, οι οποίες καλούνται να τηρούν τα απαραίτητα για την εκάστοτε εφαρμογή πρότυπα και κανονισμούς.

Για να ελεγχθεί αν μια ραφή συγκόλλησης είναι ικανοποιητική πρέπει να υπολογιστούν οι μέγιστες ορθές, διατμητικές, καμπτικές και στρεπτικές τάσεις, που αναπτύσσονται στην σύνδεση από την εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση. Στην συνέχεια, αυτές οι τάσεις συγκρίνονται είτε με την αντοχή σε διάτμηση ή με αντοχή σε μοναξονικό εφελκυσμό. Το είδος του ελέγχου και των δοκιμών καθορίζεται ανάλογα με τη φόρτιση και το είδος και τη διάταξη της συγκόλλησης, που έχει πραγματοποιηθεί.

Εξαιτίας διαφόρων κατασκευαστικών ατελειών, οι οποίες έχουν προκύψει κατά τη διενέργεια της συγκόλλησης, όπως αποτυπώνονται από ενδεχόμενη γεωμετρική ασυμμετρία και ασυνέχειες στη συγκόλληση, ο υπολογισμός με ακρίβεια των ονομαστικών τάσεων που αναπτύσσονται στην εκάστοτε συγκόλληση κατά τη λειτουργία της είναι αρκετά δύσκολος.

Οι σχέσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εφελκυστικών/θλιπτικών και διατμητικών τάσεων είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_z = \frac{F_m}{\Sigma ah} \quad (1.4.1)$$

$$\tau_x = \frac{F_m}{\Sigma ah} \quad (1.4.2)$$

όπου:

F_m : η εφελκυστική, θλιπτική ή διατμητική δύναμη σε kN που εφαρμόζεται στην επιφάνεια υπολογισμού της ραφής.

$\Sigma(ah)$: το άθροισμα των επιφανειών υπολογισμού μιας συγκόλλησης σε mm²

a: το πάχος των ραφών σε mm

h: το μήκος των ραφών σε mm

Ο υπολογισμός της μέγιστης καμπτικής εφελκυστικής ή θλιπτικής τάσης, η οποία είναι σε θέση να αναπτυχθεί στην επιφάνεια υπολογισμού μιας εσωραφής ή εξωραφής προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_b = \frac{M}{J} y \quad (1.4.3)$$

όπου:

M: η καμπτική ροπή σε kN mm που εμφανίζεται στην επιφάνεια της ραφής.

J: η ροπή αδρανείας σε κάμψη της ραφής γύρω από τον ουδέτερο άξονα κάμψεως της σε mm⁴

y: η απόσταση του πιο απομακρυσμένου σημείου της ραφής από τον ουδέτερο άξονα κάμψεως της σε mm.

Στις συγκολλήσεις των σιδηρών κατασκευών οι εφαρμογή στρεπτικών τάσεων είναι μη αποδεκτές και πρέπει γενικά να αποφεύγονται. Ωστόσο η σχέση υπολογισμού των αναπτυσσόμενων στρεπτικών τάσεων, σε kN/mm², σε μια ραφή συγκολλητής σύνδεσης είναι η εξής:

$$\tau = \frac{M_t}{I_p} R_{max} \quad (1.4.4)$$

όπου:

M_t : η στρεπτική ροπή σε kN mm που εμφανίζεται στην επιφάνεια της ραφής.

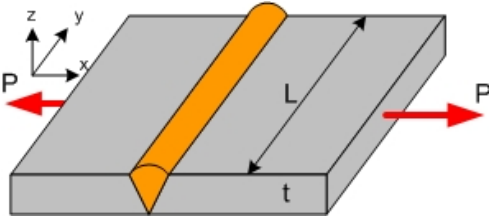
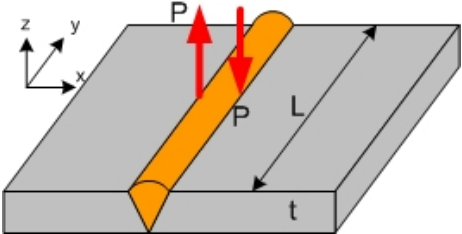
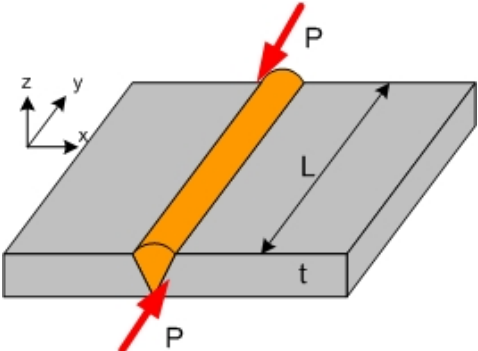
I_p : η πολική ροπή αδρανείας σε στρέψη της ραφής σε mm⁴.

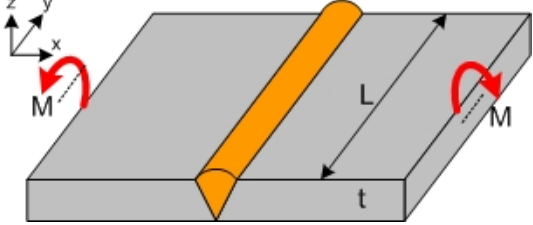
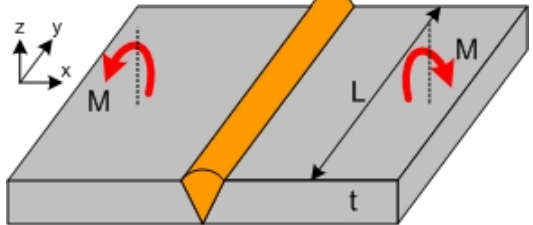
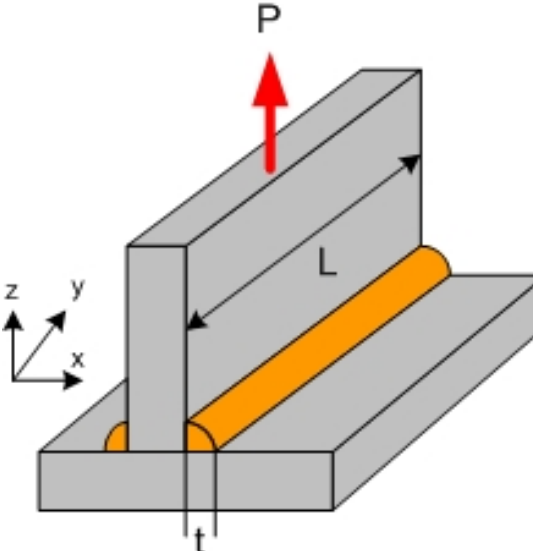
R_{max} : η απόσταση του πιο απομακρυσμένου σημείου της ραφής από τον άξονα στρέψεως της σε mm.

Σε σύνθετη καταπόνηση μιας συγκολλητής ραφής από ορθή και διατμητική τάση η ισοδύναμη τάση δίνεται από τον τύπο:

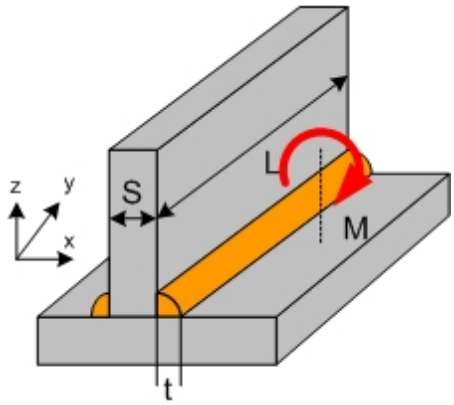
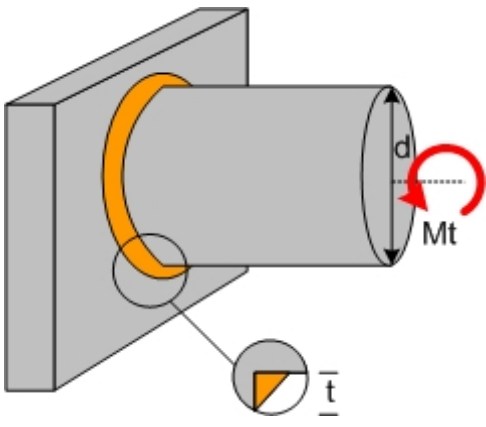
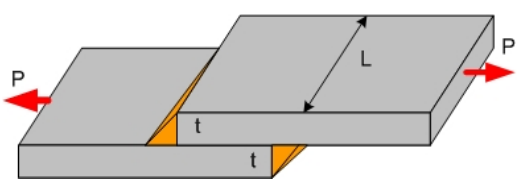
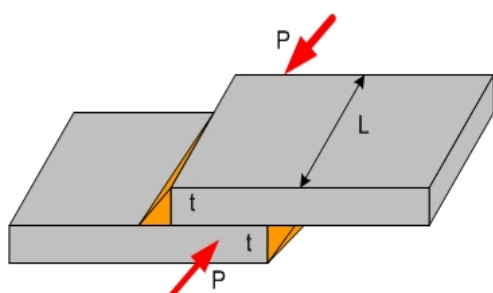
$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{(\sigma_x^2 \pm \sigma_y^2) + \tau_x^2 + \tau_y^2} \quad (1.4.5)$$

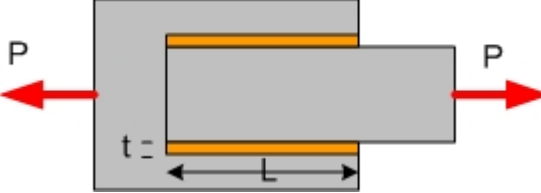
Ακολούθως παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις για διάφορες περιπτώσεις συγκολλητών συνδέσεων μεταλλικών εξαρτημάτων.

Σχηματική Αναπαράσταση Σύνδεσης	Είδος Σύνδεσης	Είδος Καταπόνησης	Σχέση Έκφρασης της Καταπόνησης
	Εσωραφή τύπου V	Εφελκυστική	$\sigma_x = \frac{P}{tL}$
	Εσωραφή τύπου V	Διατμητική	$\tau_x = \frac{P}{tL}$
	Εσωραφή τύπου V	Διατμητική	$\tau_y = \frac{P}{tL}$

Σχηματική Αναπαράσταση Σύνδεσης	Είδος Σύνδεσης	Είδος Καταπόνησης	Σχέση Έκφρασης της Καταπόνησης
	Εσωραφή τύπου V	Καμπτική	$\sigma = \frac{M_y}{I_y} z_{max}$ $I_y = Lt^3/12$ $z_{max} = t/2$
	Εσωραφή τύπου V	Καμπτική	$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y_{max}$ $I_x = tL^3/12$ $y_{max} = L/2$
	Διπλή Επίπεδη Εξωραφή	Εφελκυστική	$\sigma_x = \frac{P}{2tL}$

Σχηματική Αναπαράσταση Σύνδεσης	Είδος Σύνδεσης	Είδος Καταπόνησης	Σχέση Έκφρασης της Καταπόνησης
	Διπλή Επίπεδη Εξωραφή	Διατμητική	$\tau_y = \frac{P}{2 \frac{\sqrt{2}}{2} t l}$
	Διπλή Επίπεδη Εξωραφή	Διατμητική	$\tau_x = \frac{P}{2tl}$
	Διπλή Επίπεδη Εξωραφή	Καμπτική	$\sigma = \frac{M_y}{I_y} x_{max}$ $I_y = [(S + 2t)^3 - S^3]$ $x_{max} = S/2 + t$

Σχηματική Αναπαράσταση Σύνδεσης	Είδος Σύνδεσης	Είδος Καταπόνησης	Σχέση Έκφρασης της Καταπόνησης
	Διπλή Επίπεδη Εξωρραφή	Καμπτική	$\sigma = \frac{M_z}{I_y} y_{max}$ $I_y = [2tL^3]/12$ $y_{max} = S/2 + t$
	Εξωρραφή	Στρεπτική	$\tau = \frac{M_t}{I_p} R_{max}$ $I_p = \frac{\pi}{32} [(d+t)^4 - d^4]$ $R_{max} = \frac{d}{2} + t$
	Παράλληλη Εξωρραφή	Εφελκυστική	$\sigma = \frac{P}{2tL}$
	Παράλληλη Εξωρραφή	Διατμητική	$\tau = \frac{P}{2\frac{\sqrt{2}}{2}tL}$

Σχηματική Αναπαράσταση Σύνδεσης	Είδος Σύνδεσης	Είδος Καταπόνησης	Σχέση Έκφρασης της Καταπόνησης
	Παράλληλη Εξωρραφή	Διατμητική	$\tau = \frac{P}{2 \frac{\sqrt{2}}{2} tL}$

Πίνακας 1.3 Παραδείγματα καταπονήσεων συγκολλήσεων

1.4.2 Παραμένουσες Τάσεις

1.4.2.1 Εισαγωγή -Κατηγοριοποίηση

Με τον όρο «Παραμένουσες Τάσεις» καλούνται οι τάσεις, οι οποίες υφίστανται σε ένα υλικό ή μια κατασκευή, η οποία ισορροπεί και βρίσκεται σε ακινησία. Χαρακτηριστικό των τάσεων αυτών αποτελεί το γεγονός ότι εμφανίζονται δίχως την άσκηση εξωτερικών φορτίσεων, ισορροπούν μεταξύ τους αλληλοεξουδετερώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο η μία την άλλη και επίσης κρίνονται ως απαραίτητες για τη διατήρηση της ισορροπίας του στερεού σώματος με το περιβάλλον αυτού.

Οι παραμένουσες τάσεις ανάλογα με τα εκάστοτε κριτήρια είναι σε θέση να ταξινομηθούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.

Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη κατηγοριοποίηση αυτών πραγματοποιείται ανάλογα με τη γενεσιουργό αιτία αυτών. Έτσι, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες παραμενουσών τάσεων:

- Θερμικές Παραμένουσες Τάσεις: Προξενούν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις στο στερεό σώμα
- Μόνιμες Παραμένουσες Τάσεις: Αποτελούν το αποτέλεσμα των πλαστικών παραμορφώσεων σε ένα ελαστο-πλαστικό υλικό.
- Μόνιμες Παραμένουσες Τάσεις: Γεννώνται κατά την ανομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασιακής κατάστασης (θέρμανση ή ψύξη) ενός σώματος.
- Μόνιμες Παραμένουσες Τάσεις: Δημιουργούνται εξαιτίας μετασχηματισμού είτε των φάσεων ενός σώματος είτε των δομικών του στοιχείων.

Ακολούθως, η δεύτερη κατηγοριοποίηση των παραμενουσών τάσεων λαμβάνει χώρα ανάλογα με τις διαστάσεις του όγκου της κατασκευής, στον οποίο οι τάσεις αυτές

εξισορροπούνται. Έτσι υπάρχουν οι παραμένουσες τάσεις τύπου I, οι οποίες εξισορροπούνται σε μακροσκοπικές διαστάσεις, οι παραμένουσες τάσεις τύπου II, οι οποίες εξισορροπούνται σε μικροσκοπικές διαστάσεις, δηλαδή στα όρια των γειτονικών κόκκων του υλικού και τέλος οι παραμένουσες τάσεις τύπου III, οι οποίες με τη σειρά του εξισορροπούνται εντός των κρυσταλλικών πλεγμάτων.

Η τρίτη και τελευταία μορφή κατηγοριοποίησης των παραμενουσών τάσεων πραγματοποιείται σύμφωνα με τη θέση και την εν γένει διάταξή τους στο χώρο. Έτσι λοιπόν, οι επιμέρους κατηγορίες σύμφωνα με αυτό το κριτήριο είναι οι εξής:

- Μονοαξονικές παραμένουσες τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται κατά μία διεύθυνση, ενώ οι υπόλοιπες θεωρούνται αμελητέες.
- Διαξονικές παραμένουσες τάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους αναπτύσσονται σε δύο διευθύνσεις, ενώ οι υπόλοιπες εξ αυτών θεωρούνται ως αμελητέες.
- Τριαξονικές παραμένουσες τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται και στις τρεις διευθύνσεις.

1.4.2.2 Οι Παραμένουσες Τάσεις στις Συγκολλήσεις

Ένα από τα πεδία, στα οποία χρίζει ιδιαίτερης μελέτης και προσοχής η ύπαρξη των παραμενουσών τάσεων είναι αυτό των εφαρμογών συγκόλλησης. Παραμένουσες τάσεις σε εφαρμογές συγκολλήσεων είναι δυνατόν να αναπτυχθούν λόγω της τοπικής θέρμανσης και της ακόλουθης ψύξης του μετάλλου στην περιοχή αυτή. Πιο συγκεκριμένα καθώς η συγκόλληση ψύχεται, η συστολή που λαμβάνει χώρα στη ζώνη τήξης παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων εμφανίζεται αρχικά ως ελαστική παραμόρφωση, η οποία ακολούθως οδηγεί στην εμφάνιση παραμενουσών τάσεων, οι οποίες με τη σειρά τους εξισορροπούνται από αντιδρώσες τάσεις αντίθετου πρόσημου και ίδιου μέτρου που βρίσκονται στη περιοχή του βασικού μετάλλου.

Οι βασικοί λόγοι και αίτια που σχετίζονται με την εμφάνιση και τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων στις συγκολλητές συνδέσεις, οι οποίες μάλιστα είναι σε θέση να καθορίσουν και το είδος των τάσεων αυτών είναι ποικίλοι. Παραμένουσες τάσεις όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι σε θέση να προϋπάρχουν στην προς συγκόλληση κατασκευή, λόγω των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν κατά την προετοιμασία των προς σύνδεση τμημάτων. Οι τάσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε θερμικές ή μηχανικές διεργασίες, όπως είναι η διέλαση, η χύτευση, η βαφή, η κοπή, η ενανθράκωση κλπ.. Σε πολλές περιπτώσεις για να αποφευχθεί η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων κατά την εφαρμογή κάποιων από τις παραπάνω διεργασίες, ακολουθούνται, είτε κατά την διάρκεια είτε μετά, τεχνικές εξομάλυνσης των τάσεων οι οποίες μπορούν να μειώσουν το εύρος αυτών έως και στο ήμισυ του ορίου

διαρροής του υλικού. Μία τέτοια διεργασία είναι η αναθέρμανση του υλικού ακολουθούμενη από αργό ρυθμό ψύξης.

Επιπροσθέτως, ένας ακόμη παράγοντας, ο οποίος είναι σε θέση να οδηγήσει στη δημιουργία παραμενουσών τάσεων είναι οι ιδιότητες του υλικού κόλλησης και βάσης, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η σύνθεση, η μικροδομή και η μηχανική και θερμική συμπεριφορά αυτών. Πιο συγκεκριμένα το πλήθος και η συχνότητα εμφάνισης παραμενουσών τάσεων αυξάνεται από την ιδιότητα μετασχηματισμού των φάσεων, ο οποίος λαμβάνει χώρα σε μεγάλο εύρος υλικών. Ο μετασχηματισμός φάσεων εισάγει πρόσθετες παραμορφώσεις (και άρα τάσεις) συμβάλλοντας στις μεταβολές όγκου που λαμβάνουν χώρα στο υλικό ιδιαίτερα όταν λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες κατά την ψύξη μετά την συγκόλληση.

Επίσης για την αποφυγή δημιουργίας παραμενουσών τάσεων ευρείας κλίμακας, ως απαραίτητη κρίνεται η επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας συγκόλλησης. Σε αυτήν συμπεριλαμβάνεται τόσο η μέθοδος, όσο και η προετοιμασία των προς συγκόλληση τμημάτων καθώς επίσης οι συνθήκες υπό τις οποίες θα λάβει χώρα από τη μια μεριά και από την άλλη η σειρά και η αλληλουχία των πάσων της ραφής.

Ακόμη μείζονος σημασίας ρόλο για τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων, διαδραματίζει η γεωμετρία των προς συγκόλληση υλικών και οι επιπλέον περιορισμοί, οι οποίοι επιβάλλονται στα τεμάχια αυτά. Αυτοί σχετίζονται είτε με τις μεθόδους στήριξης, λόγου χάριν η χρήση μέγγενης ή μη, είτε με τον προσανατολισμό της όλης διάταξης για την εν γένει διευκόλυνση του συγκολλητή. Οι περιορισμοί σε μία συγκολλητή σύνδεση μπορούν γενικά να περιγραφούν ως οι αντιστάσεις που προβάλλονται στα τεμάχια ενάντια στην ελεύθερη διαστολή τους λόγω της θερμότητας που διοχετεύεται σε αυτά. Η έννοια του περιορισμού μοιάζει αρκετά απλή αλλά στην πραγματικότητα παρουσιάζει κάποια πολυπλοκότητα καθώς διαφοροποιείται ως προς την διεύθυνση και την θέση σε μία συγκόλληση ενώ μπορεί να μεταβάλλεται ακόμη και κατά την κόλληση του ίδιου τεμαχίου. Οι εξωτερικά επιβαλλόμενοι περιορισμοί συνεισφέρουν στην δημιουργία των παραμενουσών τάσεων μέσω των τάσεων συγκόλλησης.

Τέλος, παραμένουσες τάσεις είναι σε θέση να προκύψουν σε μια συγκολλητή κατασκευή και με το πέρας της συγκόλλησης και πιο συγκεκριμένα με τις διαδικασίες που ακολούθησαν αυτής. Αυτές μπορεί να είναι είτε μηχανικές (λείανση) είτε θερμικές.

Γενικότερα, όμως πρέπει να τονισθεί ότι οι παραμένουσες τάσεις κατά βάσει έχουν αρνητικές συνέπειες στη συγκολλημένη κατασκευή, επηρεάζοντας την αντοχή αυτής και τις εν γένει μηχανικές τις ιδιότητες. Ωστόσο, είναι σε θέση να δράσουν θετικά, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν για τη σχεδίαση υλικών και εξαρτημάτων βελτιωμένων ιδιοτήτων και μεγαλύτερης αντοχής. Πρακτικά όπως και ένα μηχανολογικό εξάρτημα έτσι και μια συγκολλητή σύνδεση είναι σχεδόν αδύνατον να είναι πλήρως απαλλαγμένο από παραμένουσες τάσεις, οι οποίες εισήχθησαν κατά την

διαδικασία παραγωγής του. Μάλιστα, οι παραμένουσες τάσεις είναι πολύ πιο δύσκολο να προβλεφθούν σε σύγκριση με τις τάσεις που εισάγονται λόγω λειτουργίας, με τις οποίες όπως αναφέραμε ήδη, αλληλεπιδρούν. Επομένως η χρήση καταλλήλων οργάνων και μεθόδων πρόβλεψης και εντοπισμού αυτών θεωρείται βασική προϋπόθεση για την αποφυγή δυσμενών αστοχιών και αποτελεσματικότερης εποπτείας και αντίληψης του επιπέδου και των πληροφοριών αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αστοχίες Συγκολλήσεων

2.1 Εισαγωγή

2.1.1 Γενικά Περί Αστοχιών Συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις, όπως και όλα τα μηχανολογικά υλικά και κατασκευές, περιέχουν ασυνέχειες ή ατέλειες, οι οποίες οδηγούν στις πλείστες περιπτώσεις είτε στη μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων είτε στην αστοχία αυτών. Με τον όρο ασυνέχεια (discontinuity) συγκολλήσεων καλείται η παρεμβολή στη συνεχή δομή μιας συγκόλλησης. Μια ασυνέχεια συγκόλλησης, η οποία είναι σε θέση να εμφανίζεται με ποικίλες μορφές και να οφείλεται σε πολλούς διαφορετικούς παράγοντες και αίτια (πόροι, ατελής τήξη κλπ.), είναι σε θέση να αποτελέσει είτε καταστροφική για την ίδια τη συγκόλληση είτε και σε άλλες περιπτώσεις όχι. Επομένως, για αυτό το λόγο λοιπόν, η συγκόλληση πρέπει να εξετάζεται στο πλαίσιο της λειτουργικής καταλληλότητας (fitness for service) των συγκολλητών κατασκευών.

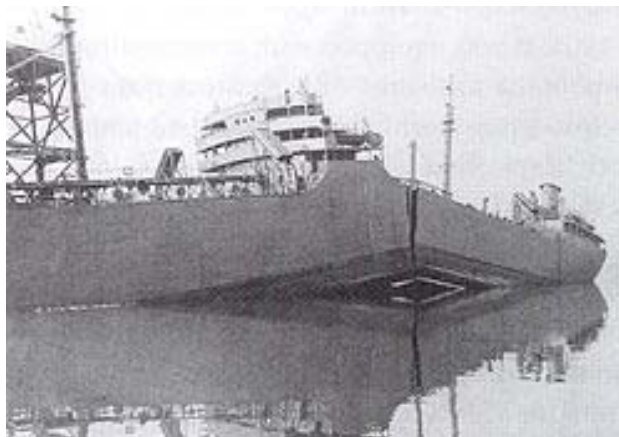
Με τον όρο καταλληλότητα για λειτουργία εννοείται ότι η αξιολόγηση της ίδιας της συγκόλλησης στηρίζεται σε μια ισορροπία μεταξύ ποιότητας, αξιοπιστίας και κόστους συγκόλλησης, η οποία από την άλλη μεριά εξαρτάται από τις λειτουργικές απαιτήσεις της συγκολλητής κατασκευής. Στην περίπτωση κατά την οποία μια ασυνέχεια θέτει σε κίνδυνο την καταλληλότητα για λειτουργία της συγκόλλησης τότε θεωρείται ως σφάλμα της συγκόλλησης (weld defect), οποία καλείται να αντιμετωπιστεί είτε με επισκευή (weld repair) είτε με μη αποδοχή της συγκόλλησης. Μόλις εντοπιστεί μέσω καταλλήλων μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου μια ασυνέχεια στη δομή της συγκόλλησης και όλα τα εν γένει χαρακτηριστικά της (είδος, θέση, μέγεθος, προσανατολισμός), τότε αξιολογείται κατά πόσο είναι σε θέση να γίνει αποδεκτή δίχως να επηρεάζει την αξιοπιστία της ίδιας της συγκόλλησης.

2.1.2 Χαρακτηριστικά Παραδείγματα Αστοχίας Συγκολλήσεων

Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχίας συγκολλήσεων, τα οποία προξένησαν καταστροφικά αποτελέσματα για την ίδια την κατασκευή παρουσιάζονται ακολούθως. Το πρώτο περιλαμβάνει την περίπτωση ενός εμπορικού πλοίου (τάνκερ), το οποίο κατασκευάστηκε σε μεγάλο βαθμό με τη μέθοδο των συγκολλήσεων, ενώ το δεύτερο την περίπτωση μιας πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου. Και στις δύο περιπτώσεις αιτία των αστοχιών των κατασκευών αποτέλεσε η αστοχία των συγκολλήσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά:

Swan Island HPIA 16 Ιανουαρίου 1943

Οι συγκολλήσεις μετάλλων έφτασαν στο ζενίθ κατά τη διάρκεια του Β' παγκοσμίου πολέμου. Οι ΗΠΑ προκειμένου να εξασφαλίσουν την τροφοδοσία των συμμαχικών δυνάμεων στην Ευρώπη ανέπτυξαν το μεγαλύτερο πρόγραμμα κατασκευής εμπορικών πλοίων, τα τάνκερς τύπου T-2 και τα πλοία γενικού φορτίου τύπου Liberty. Είναι χαρακτηριστικό το ρεκόρ κατασκευής ενός Liberty μέσα σε 4 μέρες 15 ώρες και 30 λεπτά. Από τα 5000 πλοία τα οποία κατασκευάστηκαν εκείνη την εποχή τα 1000 παρουσίασαν σοβαρές ρωγμές, ενώ 80 από αυτά κόπηκαν στη μέση. Ένα από αυτά ήταν το τάνκερ SS Schenectady, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, το οποίο κόπηκε στα δύο ενώ βρισκόταν δεμένο στη προβλήτα του Swan Island λίγο μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών πλεύσης και υπό ιδανικές καιρικές συνθήκες. Η αμερικανική ακτοφυλακή στην αναφορά της ανέφερε ως βασική αιτία του ατυχήματος την ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων. Οι αστοχίες αυτές είχαν σαν αποτέλεσμα να θεσπιστούν το 1950 οι πρώτοι κανονισμοί για την ποιότητα του χάλυβα κατασκευών.

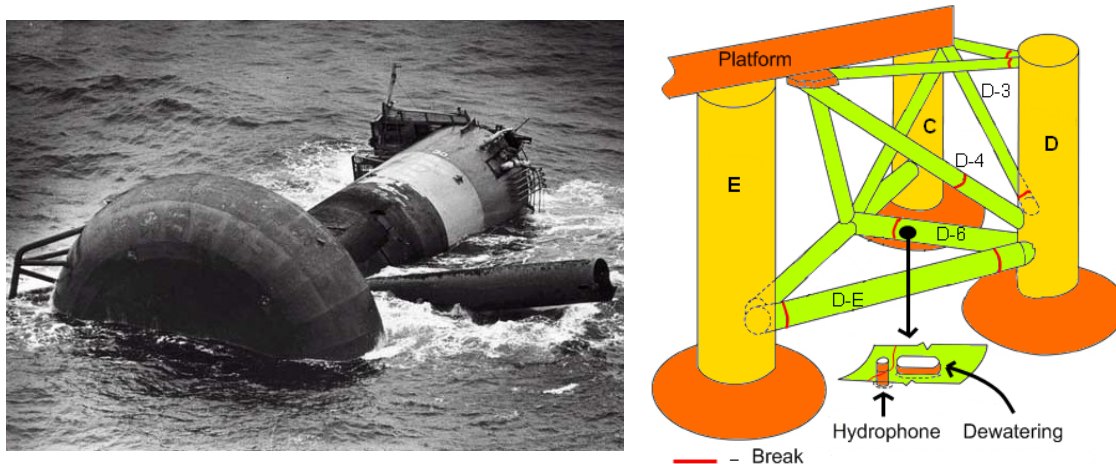


Εικόνα 2.1 Αστοχία συγκολλήσεων πλοίου SS Schenectady

Ekofisk Νορβηγία 27 Μαρτίου 1980

Η Alexandra L Kielland ήταν μια ημιβυθιζόμενη πλατφόρμα γεωτρύπανο, η οποία εκτελούσε εργασίες γεώτρησης ανοιχτά της Βόρειας Θάλασσας. Στις 27 Μαρτίου του 1980 αναποδογύρισε όταν χτυπήθηκε από δυνατή καταιγίδα. Κατά τη διάρκεια της καταιγίδας ένα από τα πέντε υποστυλώματα για την στήριξη της πλατφόρμας υπέστη θραύση, με αποτέλεσμα η πλατφόρμα να χάσει την ευστάθειά της, οι κάθετοι σωλήνες στήριξης να αρχίσουν να κλυδωνίζονται και η πλατφόρμα τελικά να αναποδογυρίσει, όπως απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα. Η έρευνα έδειξε ότι η θραύση προκλήθηκε από μια προϋπάρχουσα ρωγμή στην συγκόλληση ενός υδρόφωου στο υποστύλωμα και πάνω στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ). Επίσης βρέθηκαν και άλλες ρωγμές μία εκ των οποίων είχε μήκος 70mm. Το ατύχημα που είχε τραγικό απολογισμό 123 άτομα να χάσουν την ζωή τους οδήγησε των

Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) να θεσπίσει επιπλέον μέτρα σχετικά με την κατασκευή και την ασφάλεια των πλωτών εξεδρών.



Εικόνα 2.2 Αστοχία συγκολλήσεων πλατφόρμας εξόρυξης Alexandra L Kielland

2.2 Ταξινόμηση Τυπικών Σφαλμάτων Συγκολλήσεων

2.2.1 Αρχική Κατηγοριοποίηση Σφαλμάτων Συγκολλήσεων Βάσει του Μεγέθους τους

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ως ελαττωματική ή μη αποδεκτή καλείται μια συγκόλληση, η οποία δεν πληροί τις ελάχιστες προϋποθέσεις κάποιας συγκεκριμένης τυποποίησης ή ενός κώδικα προτύπων. Ταυτόχρονα η αποτίμηση μιας ελαττωματικής συγκολλήσεως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αν δεν γίνει με αναφορά κάποια τυποποίηση ή κώδικα σχετικό με την χρήση για την οποία προορίζετε η εκάστοτε συγκόλληση.

Τα ελαττώματα ή τα σφάλματα των συγκολλητών συνδέσεων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Τα υπομικροσκοπικά ελαττώματα, δηλαδή ατέλειες κρυσταλλογραφικού πλέγματος λόγω χάριν αταξίες (dislocation), κενά (vacancy)
- Τα μικροσκοπικά ελαττώματα, π.χ. μικροεγλείσματα, διαφορισμοί στοιχείων, μικρορηγματώσεις
- Τα μακροσκοπικά ελαττώματα-υποκοπές (αυλακώσεις), ατελής διείσδυση, πόροι, σκουριές, ατελής τήξη, ρηγματώσεις κλπ..Αυτή η κατηγορία σφαλμάτων είναι σε θέση να ταξινομηθεί εκ νέου από την άποψη του τελικού ελέγχου σε εσωτερικά και εξωτερικά σφάλματα. Στα εσωτερικά σφάλματα ανήκουν οι πόροι και τα εγκλείσματα, ενώ στα εξωτερικά ανήκουν τα επιφανειακά ελαττώματα και τα ελαττώματα σχήματος. Τέλος ανάλογα με τη θέση ανίχνευσής τους τα ελαττώματα της ατελής τήξης, της ελλειπής

διείσδυσης και των ρωγμών ταξινομούνται είτε στα εσωτερικά είτε στα εξωτερικά σφάλματα.

2.2.2 Ταξινόμηση Τυπικών Σφαλμάτων Συγκόλλησης Βάσει Διεθνών Προτύπων

2.2.2.1 Ταξινόμηση Κατά AWS (American Welding Society)

Με βάση το αμερικάνικο πρότυπο τυποποίησης, American Welding Society, τα τυπικά σφάλματα συγκολλήσεων είναι σε θέση να ταξινομηθούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες. Αυτές αναλύονται ακολούθως:

- Τα σφάλματα που οφείλονται στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των μεταλλικών τεμαχίων αλλά και την ίδια την εκτέλεση της συγκόλλησης. Τα σφάλματα κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης μπορεί να είναι είτε γεωμετρικά είτε άλλου είδους. Στα γεωμετρικά σφάλματα εντάσσονται οι υποκοπές, που μπορεί να δημιουργηθούν, η ελαττωματική ευθυγράμμιση των ελασμάτων, η υπερβολική κυρτότητα της επιφανείας, η υπερβολική ή από την άλλη μεριά η ανεπαρκής ενίσχυση όψης, η υπερκάλυψη των επιφανειών, η ατελής διείσδυση και τήξη, η συστολή, η διαρροή του τηγμένου μετάλλου και η ανώμαλη επιφανειακή όψη της ραφής. Στα μη γεωμετρικά σφάλματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται τα εγκλείσματα σκουριάς, τα στρώματα οξειδίων, οι εκτοξεύσεις μετάλλου, τα εγκλείσματα βολφραμίου και τα ανάματα τόξου.
- Τα μεταλλουργικά σφάλματα, τα οποία διακρίνονται στις ρωγμές, στους πόρους, στις αλλαγές της κρυσταλλικής δομής στην θερμαινόμενη περιοχή, στο διαχωρισμό σε ζώνες του τηκόμενου μετάλλου και θερμικά επηρεαζόμενης περιοχής (ΘΕΖ) και τέλος στην πλαστική παραμόρφωση των βασικών μετάλλων. Οι ρωγμές ταξινομούνται σε θερμές, ψυχρές ή καθυστερημένες, σε αυτές που οφείλονται σε αναθέρμανση και σε αυτές που είναι αποτέλεσμα σχάσεων κατά φυλλώσεις. Οι πόροι από την άλλη μεριά χωρίζονται στους σφαιρικούς, στους επιμήκεις, στους σκληκοειδείς και σε αυτούς που είναι αποτέλεσμα αλλαγής της δομής στην θερμαινόμενη περιοχή.
- Τα σφάλματα οφειλόμενα στην μελέτη πριν από την εκτέλεση της συγκόλλησης ή κατά τη διάρκειά της. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τα σφάλματα συγκολλήσεων, που οφείλονται στην πραγματοποίηση της συγκόλλησης σε περιοχές με υψηλή συγκέντρωση τάσεων και σε ανεπαρκή και εσφαλμένη διαμόρφωση των ακμών των προς συγκόλληση τεμαχίων.

2.2.2.2 Ταξινόμηση Κατά το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN ISO 6520.01

Οι ασυνέχειες και τα σφάλματα συγκολλήσεων κατά και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Προτύπων και συγκεκριμένα σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 6520.01/1998, κατατάσσονται σε 6 επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος τους. Κάθε κατηγορία αποτελεί μια σειρά με χαρακτηριστική αρίθμηση και κωδικό και αποτελείται από ομοειδή σφάλματα συγκολλήσεων. Η εν λόγω ταξινόμηση σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρότυπο παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Αριθμός Σειράς	Είδος Σφάλματος Συγκόλλησης	Λεπτομέρειες
100	Ρωγμές	Διαμήκειες Ρωγμές Εγκάρσιες Ρωγμές Κρατήρα κλπ.
200	Σπηλαιώσεις	Φυσαλίδες Αερίων Εσωτερικούς και Επιφανειακούς Πόρους Συστολή κλπ.
300	Στερεά Εγκλείσματα	Εγκλείσματα Σκουριάς Εγκλείσματα Βολφραμίου Εγκλείσματα Οξειδίων Εγκλείσματα Ξένων Ουσιών κλπ.
400	Ατελής Τήξη/ Διείσδυση	Ατελής Τήξη Ατελής Διείσδυση κλπ.
500	Ατελές Σχήμα ή Ανώμαλη Όψη Ραφής	Υποκοπή Υπερβολική Ενίσχυση Όψης Ανεπαρκές Γέμισμα Ακατάλληλο Σχήμα Αυχενικής Συγκόλλησης Υπερκάλυψη κλπ.
600	Λοιπά Σφάλματα Συγκολλήσεων	Ανάμματα Τόξου Εκτόξευση Μετάλλου Ανώμαλη Επιφάνεια κλπ.

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση σφαλμάτων συγκολλήσεων κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο

2.3 Αναλυτική Παρουσίαση Αστοχιών Συγκολλήσεων

Ακολούθως παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των ασυνεχειών μιας συγκόλλησης ανάλογα με τη μορφή τους και το είδος τους, όπως αυτές περιγράφηκαν στους άνωθεν κανονισμούς.

- Ασυνέχειες, οι οποίες σχετίζονται με τις γεωμετρικές διαστάσεις και σχεδιαστικές απαιτήσεις της εκάστοτε συγκόλλησης
 - Παραμορφώσεις/Διαστρεβλώσεις
 - Ανακριβές μέγεθος συγκόλλησης
 - Ανακριβές προφίλ/κατατομή συγκόλλησης
 - Ανακριβείς τελικές διαστάσεις
 - Υπερβολική ενίσχυση της συγκόλλησης ή αλλιώς υπερβολική χρήση συγκολλητού υλικού
- Ασυνέχειες, οι οποίες σχετίζονται με την ίδια την εσωτερική δομή της συγκόλλησης
 - Πόροι/ Σπηλαιώσεις (Porosity)
 - Εγκλείσματα σκουριάς (Slag Inclusions)
 - Εγκλείσματα ξένου μετάλλου-βολφραμίου
 - Ατελής τήξη (Lack of Fusion)
 - Ανεπαρκής διείσδυση (Lack of Penetration)
 - Υποκοπή (Undercut)
 - Ρωγμές (Cracks)
 - Επιφανειακές ανωμαλίες
 - Λοιπές ανωμαλίες
- Ασυνέχειες, οι οποίες σχετίζονται αποκλειστικά στις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των συγκολληθέντων μετάλλων και των ίδιων των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη πραγματοποίηση της συγκόλλησης

2.3.1 Ασυνέχειες Σχετιζόμενες με την Εσωτερική Δομή της Συγκόλλησης

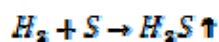
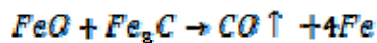
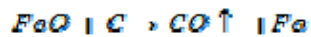
Πόροι-Σπηλαιώσεις

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. Αρχικά με την έκλυση του υδρογόνου (H) και του αζώτου (N) από το ρευστό μέταλλο, εξαιτίας της σημαντικά μειωμένης διαλυτότητας στη στερεή κατάσταση και ακολούθως μέσω των ακόλουθων χημικών αντιδράσεων:



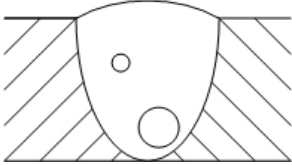
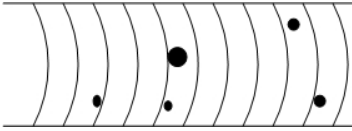

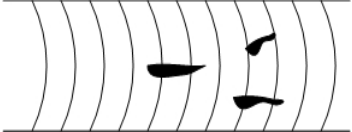
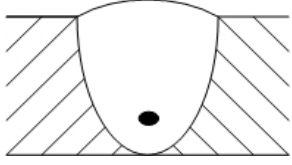
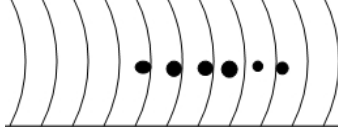
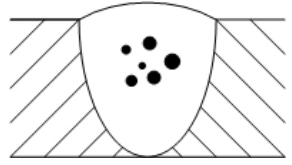
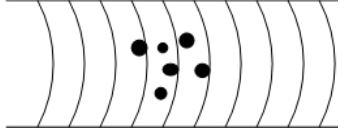
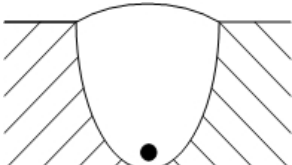
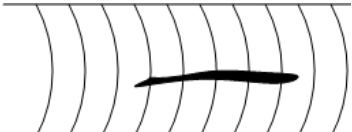
Ακόμη επίδραση ως προς το σχηματισμό των πόρων είναι σε θέση να ασκήσουν κατά σειρά η υγρασία της επένδυσης των βασικών ηλεκτροδίων, το συλλίπασμα, τα ενεργειακά ή προστατευτικά αέρια, η οξείδωση, τα χρώματα, τα λίπη ή η υγρασία στο σύρμα ή στα συνδεόμενα άκρα. Επίσης η μεγάλη περιεκτικότητα του θείου (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 (H₂) 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 οξειδία των ηλεκτροδίων και της επιφάνειας του μετάλλου και από την ατμόσφαιρα.

- Υδρογόνο (H₂)
- Οξυγόνο (O₂)
- Άζωτο (N₂)
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- Υδρατμοί
- Αργό (Ar)
- Ήλιο (He)

Στον ακόλουθο πίνακα περιγράφεται η ταξινόμηση των πόρων ανάλογα με τη μορφή τους και την κατανομή αυτών μέσα στην εκάστοτε συγκόλληση.

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

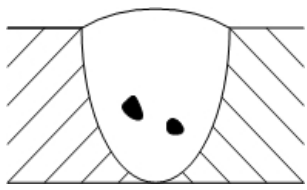

Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση πόρων

Εγκλείσματα Ξένου Μετάλλου- Βολφραμίου

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 GTA. Το σφάλμα αυτό αναπτύσσεται είτε στην περίπτωση κατά την οποία το ηλεκτρόδιο βολφραμίου ακουμπήσει το τηγμένο μέταλλο συγκόλλησης, είτε εάν 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.

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

Πίνακας 2.3 Εγκλείσματα ξένου μετάλλου

Ρωγμές

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 (fracture mechanics) 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 δύνανται να ταξινομηθούν στις θερμορωγμές, στις ρωγμές εν ψυχρώ, στις ψαθυρές ρωγμές και στις φυλλοειδείς ρωγμές (laminar).

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 (C) καθώς επίσης και οι ακαθαρσίες στα βασικά υλικά και στα προστιθέμενα με χαμηλή περιεκτικότητα του μαγνησίου (Mn).
- 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 (H₂) σε συνδυασμό με την παρουσία

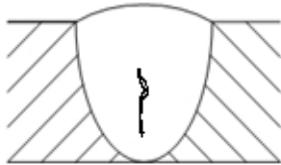
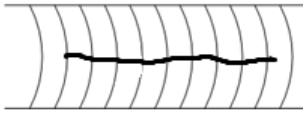
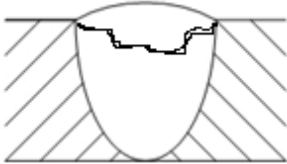

σκληρών δομών αλλά και τάσεων συγκόλλησης. Την ανάπτυξη αυτών επηρεάζουν σημαντικά οι ακόλουθοι παράγοντες:

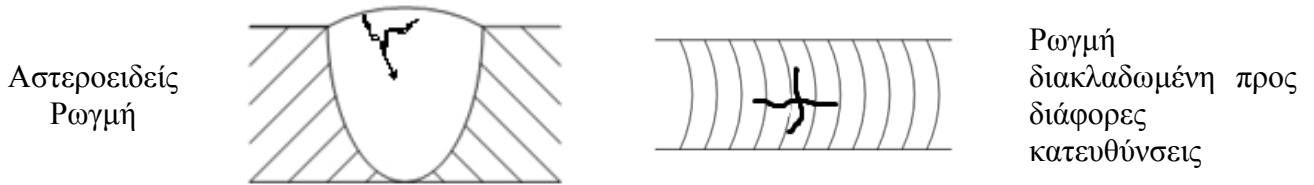
- Το ακατάλληλο για δεδομένο χάλυβα ισοδύναμο $Ce > 0.4$.
- Η υψηλή ταχύτητα στερεοποίησης σύνδεσης, η οποία οφείλεται είτε στην αρκετά χαμηλή γραμμική ενέργεια είτε στην έλλειψη αρχικής προθέρμανσης.
- Την υψηλού βαθμού δυσκαμψία του υλικού κατασκευής.

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 γύρανση 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 (S) 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:

Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομής 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



Πίνακας 2.4 Ταξινόμηση ρωγμών

Εγκλείσματα Σκουριάς

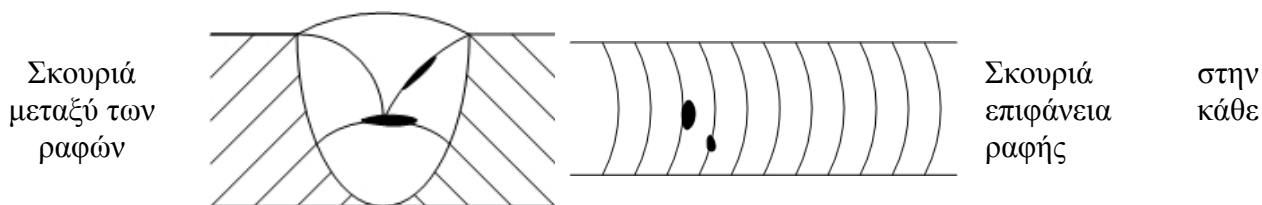
Ως εγκλείσματα σκουριάς ορίζονται οι μη μεταλλικές στερεές ουσίες, οι οποίες παγιδεύονται είτε στο μέταλλο συγκόλλησης είτε μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Παρουσιάζεται στις συγκολλήσεις με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια (SMAW) ή στις συγκολλήσεις βυθιζόμενου τόξου (SAW).

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

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



Πίνακας 2.5 Ταξινόμηση εγκλεισμάτων σκουριάς

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.

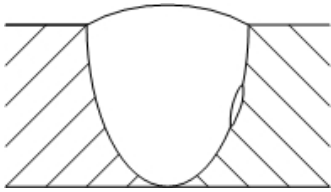
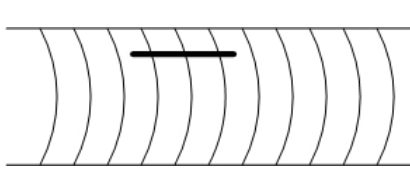
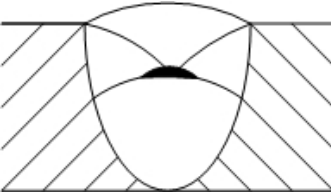
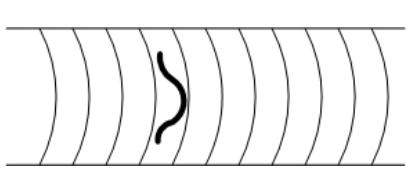
Ατελής Τήξη

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.

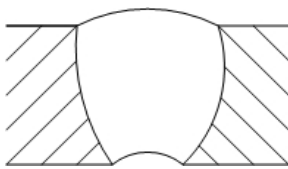
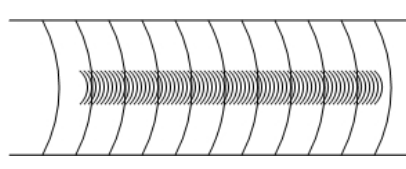
Όνομασία Σφάλματος	Σχηματική Όψη Σφάλματος		Περιγραφή Σφάλματος
	Εγκάρσια Διατομή Σύνδεσης	Ραδιογράφημα	
Ατελής τήξη τοιχώματος (lack of side wall fusion)			Ατελής τήξη στα σύνορα της κόλλησης και του βασικού μετάλλου
Ατελής τήξη μεταξύ των ραφών (lack of inter-run fusion)			Ατελής τήξη μεταξύ των στρωμάτων

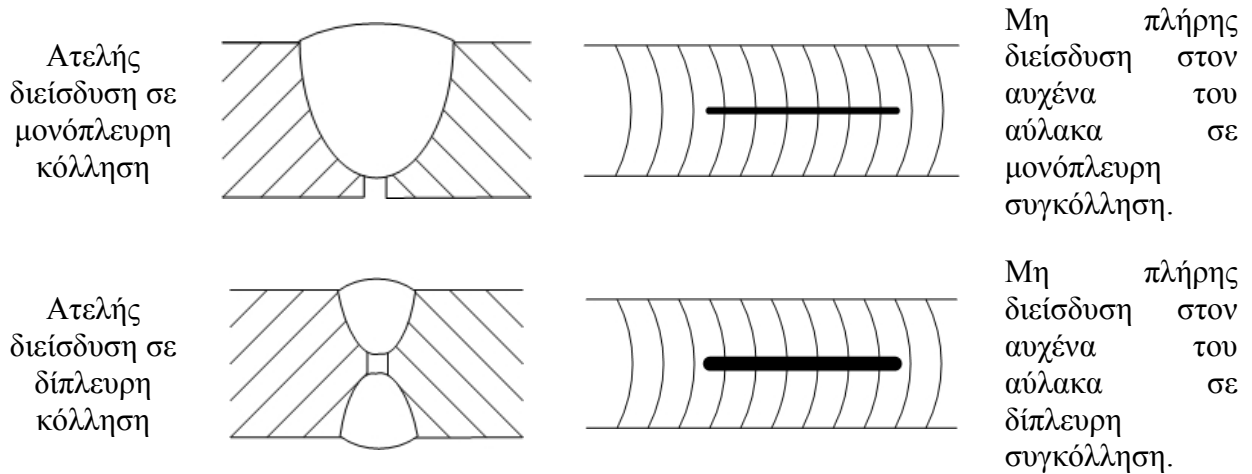
Πίνακας 2.6 Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς τήξης

Ατελής Διείσδυση

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.

Όνομασία 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.



Πίνακας 2.7 . Ταξινόμηση σφάλματος ατελούς διείσδυσης

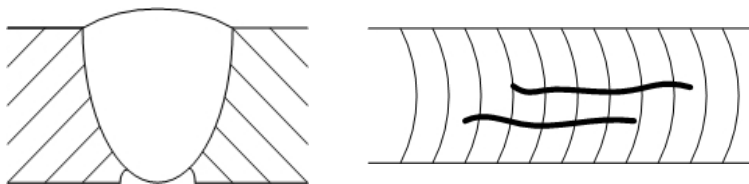
Το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης είναι πολύ σημαντικό, γιατί οι περιοχές που δεν έχουν υποστεί διείσδυση, και κυρίως η ρίζα, επιτρέπουν την ανάπτυξη συγκέντρωσης τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο στη περίπτωση κατά την οποία η συγκόλληση πρόκειται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

Υποκοπή

Με τον όρο υποκοπή καλείται αυτή η περίπτωση σφάλματος συγκόλλησης, κατά την οποία παρατηρείται μια γεωμετρική ασυνέχεια με την 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.

Ονομασία 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.

Πίνακας 2.8 Ταξινόμηση σφάλματος υποκοπών

Διάφορα Σφάλματα

Ανάματα τόξου (Arc Strikes): Αυτού του είδους σφάλμα συγκόλλησης παρατηρείται στην 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 ανάματα 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.

Πιτσίλισμα μετάλλου (Excessive Spatter): Πρόκειται για σωματίδια μετάλλου, τα οποία εκτοξεύονται από τη λίμνη συγκόλλησης και εμφανίζεται στην επιφάνεια του βασικού μετάλλου κοντά στη συγκόλληση. Τα αίτια εμφάνισης αυτού του είδους σφάλμα αποτελούν το μαγνητικό φύσημα (arc blow), 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 κλπ.

Υποπλήρωση (Underfill): 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.

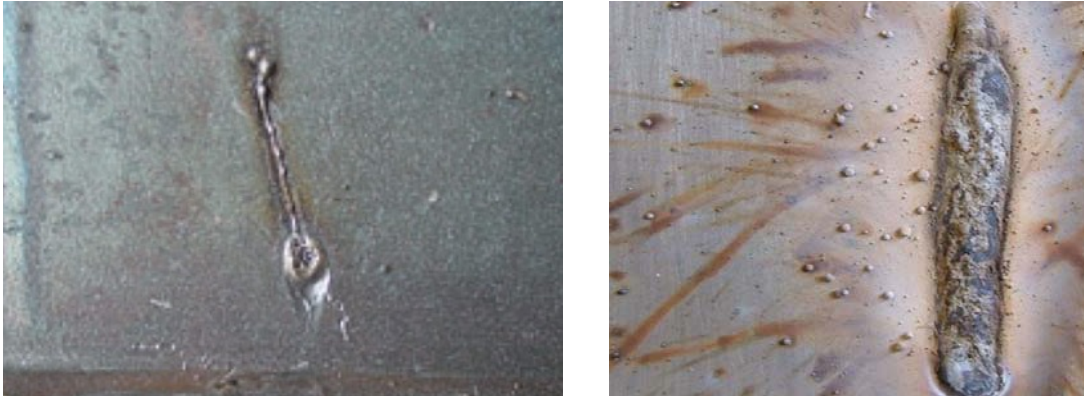
Επικάλυψη (Overlap): Η επικάλυψη πρόκειται για μια κατάσταση κατά την οποία το μέταλλο συγκόλλησης ξεπερνά τα όρια που έχουν οριστεί για αυτή με αποτέλεσμα να υπερκαλύπτει άλλα μέρη του προς συγκόλληση αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται εγχοπές που είναι επικίνδυνες σε διάφορες συγκεντρώσεις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

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

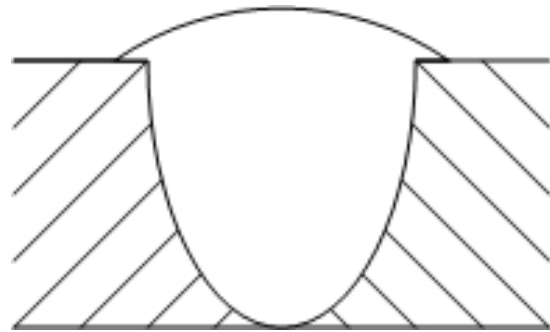
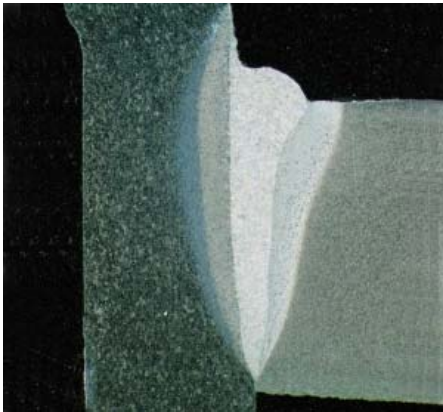
Διαμπερής τήξη (Melt-through): Πρόκειται για μια κατάσταση κατά την οποία το τόξο προκαλεί τήξη του πυθμένα σύνδεσης.

ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

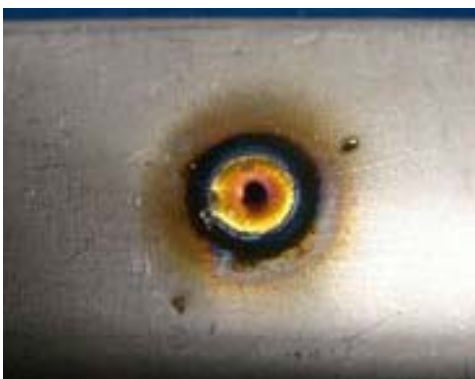
Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των ειδών σφαλμάτων συγκόλλησης.



Εικόνα 2.3 Απεικόνιση σφάλματος ανάματος τόξου (αριστερά) και πιτσιλίσματος (δεξιά)



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση σφάλματος υποπλήρωσης (αριστερά) και επικάλυψης (δεξιά)



Εικόνα 2.5 Απεικόνιση σφάλματος κρατήρα (αριστερά) και διαμερούς τήξης (δεξιά)

2.3.2 Ασυνέχειες Σχετιζόμενες με τις Γεωμετρικές Διαστάσεις και τις Σχεδιαστικές Απαιτήσεις της Συγκόλλησης

Για την πραγματοποίηση μιας παραδεκτής συγκόλλησης, η οποία θα είναι σε θέση να αντέξει υψηλές φορτίσεις και όχι μόνο απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η τήρηση ορισμένων κανονισμών, τα οποία σχετίζονται με το μέγεθος και το σχήμα, το οποίο καλείται να βρίσκεται σε πλήρη εναρμόνιση με τα σχέδια της συγκόλλησης. Ωστόσο είναι δυνατόν να υπάρξουν κάποιες ανοχές στις γεωμετρικές διαστάσεις της δημιουργηθείσας συγκόλλησης, πάντα με βάση την τήρηση κάποιου συγκεκριμένου κώδικα ή κανονισμού.

Παραμορφώσεις-Στρεβλώσεις

Οι παραμορφώσεις- στρεβλώσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να προκληθούν κατά τη συγκόλληση δύο μεταλλικών τεμαχίων, προέρχονται από τις αναπτυσσόμενες παραμένουσες τάσεις, κατά τη θέρμανση και την τήξη του μετάλλου, στις περιοχές συγκόλλησης των εν λόγω υλικών. Οι τάσεις αυτές είναι αποτέλεσμα θερμικών συστολών και διαστολών αλλά και αποτέλεσμα της στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης και παραμένουν ακόμη και μετά την απόψυξη του μετάλλου.

Για την αποφυγή εμφάνισης των παραμορφώσεων αυτών πρέπει τα προς συγκόλληση μεταλλικά τεμάχια να σταθεροποιούνται από άκαμπτα εξαρτήματα, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή διαδικασιών συγκόλλησης. Στις περιπτώσεις, κατά τις οποίες οι παραμορφώσεις δεν αποφεύγονται μπορούν να διορθωθούν είτε μέσω σφυρηλάτησης του συγκολλημένου τεμαχίου στις παραμορφωθείσες περιοχές, είτε με επαναφορά της συγκόλλησης στην ορθή διεύθυνση με ή χωρίς τη θέρμανση του, είτε ακόμη μέσω της αφαίρεσης των μερών της συγκόλλησης που προκαλούν την παραμόρφωση είτε τέλος με την επιπρόσθετη συγκόλληση σε συγκεκριμένα κατάλληλα σημεία έτσι ώστε να αναπτυχθούν τάσεις αντίθετες σε σχέση με εκείνες που έχουν αρχικώς προκαλέσει την παραμόρφωση του συγκολλημένου τεμαχίου.

Ανακριβές Μέγεθος Συγκόλλησης

Σε αυτήν την περίπτωση εντάσσονται οι συγκολλήσεις, οι οποίες δε διαθέτουν το απαραίτητο μέγεθος, δηλαδή είναι είτε μεγαλύτερες είτε μικρότερες του αποδεκτού μεγέθους, με αποτέλεσμα να μην ακολουθούν τις τυποποιήσεις και ως εκ τούτου οι μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας συγκόλλησης να είναι διαφορετικές του αναμενομένου και του επιθυμητού τις πλείστες φορές.

Ανακριβές Προφίλ/ Κατατομή Συγκόλλησης

Η κατατομή μιας συγκόλλησης είναι σε θέση να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση αυτής σε διάφορες φορτίσεις. Το προφίλ ενός στρώματος μιας συγκόλλησης που αποτελείται από πολλές στρώσεις μπορεί να έχει μεγάλη σχέση με την εμφάνιση διαφόρων άλλων ασυνεχειών όπως είναι τα εγκλείσματα και η ατελής τήξη. Ένα τέτοιο σφάλμα ανακριβούς προφίλ αποτελεί η λεγόμενη υπερκάλυψη, η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο εδάφιο.

Ανακριβείς Τελικές Διαστάσεις

Οι κανονισμοί και οι τυποποιήσεις, οι οποίοι έχουν θεσπιστεί εκτός από το είδος της συγκόλλησης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε περίπτωση, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών ορίζουν και τις απαραίτητες τελικές διαστάσεις που καλείται να έχει η προκύπτουσα συγκόλληση. Στην περίπτωση κατά την οποία οι διαστάσεις αυτές για διάφορους λόγους, που συνήθως έχουν να κάνουν με την χρήση μη κατάλληλων διαδικασιών και τεχνικών, δεν επιτευχθούν τότε οι ιδιότητες της συγκολλητής κατασκευής δεν θα είναι οι αποδεκτές, είτε διότι δεν θα καλύπτονται οι απαιτήσεις σε φορτίσεις διαφόρων τάσεων, είτε λόγω διαφορετικού τελικού μεγέθους θα είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό που σχεδιάστηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Έλεγχος Συγκολλήσεων

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν διαφόρων ειδών αιτίες και παράγοντες, οι οποίοι είναι σε θέση να οδηγήσουν στον είτε στην αστοχία μιας συγκόλλησης είτε στην περιορισμένη λειτουργικότητά της. Για αυτό το λόγο ο έλεγχος της καταλληλότητας των συγκολλήσεων κρίνεται ως απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αφενός εάν έχει επιλεχθεί η κατάλληλη τεχνική συγκόλλησης και αφετέρου αν η εν γένει μηχανική συμπεριφορά της εν λόγω συγκόλλησης είναι η αποδεκτή με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές της κατασκευής.

Υπάρχουν διαφόρων ειδών μέθοδοι ελέγχου μιας συγκόλλησης, οι οποίες ταξινομούνται ανάλογα με την κατάσταση του δοκιμίου ελέγχου με το πέρας του ελέγχου. Έτσι οι δύο κατηγορίες μεθόδων ελέγχου συγκολλήσεων είναι οι εξής:

- Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι συγκολλήσεων
- Καταστρεπτικοί έλεγχοι συγκολλήσεων

3.2 Μη Καταστρεπτικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων

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 δινορρέυματα (Eddy Current Inspection)
- Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic Inspection)

Οι άνωθεν τεχνικές θα αναλυθούν πιο εκτενώς ακολούθως.

3.2.1 Οπτικός έλεγχος

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 ένα 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 είναι σε θέση να δυσχεράνουν και να παρεμποδίσουν τον αποτελεσματικό έλεγχο της συγκόλλησης και παρατήρηση των μετρήσεων.

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

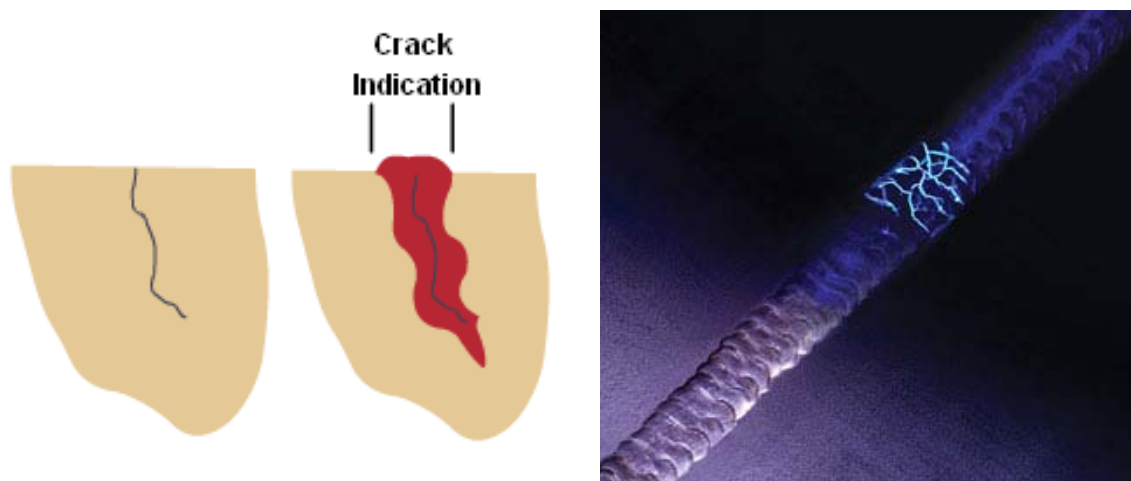
- Οι παραμορφώσεις της κατασκευής καθώς επίσης και η μεταβολή των ονομαστικών διαστάσεων της αρχικής κατασκευής.
- Οι εσφαλμένες διαστάσεις μιας αυχενικής συγκόλλησης, δηλαδή το πάχος, το μήκος του τμήματος της συγκόλλησης και το βήμα.
- Το εσφαλμένο και μη αποδεκτό σχήμα μιας αυχενικής συγκόλλησης, 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.

3.2.2 Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά

Ο διεισδυτικός έλεγχος διενεργείται για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων, τα οποία εξέρχονται στην επιφάνεια στις συγκολλητές συνδέσεις. Ο έλεγχος αυτός επομένως ενδείκνυται για την ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών, όπως είναι οι ρωγμές, οι πόροι και οι διαστρωματικές ρηγματώσεις, τόσο στα μη πορώδη μεταλλικά υλικά, όσο επίσης και στα μη μεταλλικά αλλά με διάφορες μαγνητικές ιδιότητες υλικά. Τέτοια υλικά είναι το αλουμίνιο και κράματα αυτού, οι οστενιτικοί χάλυβες, ο χαλκός και κράματα αυτού, το τιτάνιο, το ζirkόνιο και άλλα. Χαρακτηριστικό όλων των υλικών αυτών είναι ότι αποτελούν μη μαγνητικά υλικά, για τα οποία δεν είναι σε θέση να εφαρμοστεί έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια.

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη διείσδυση ενός υγρού κατάλληλης χημικής σύστασης με υψηλή διαβρεκτική ικανότητα (διεισδυτής) μέσα στην ασυνέχεια λόγω του φαινομένου της τριχοειδούς έλξης. Ακολούθως με την εφαρμογή ενός κατάλληλου σπρέι (εμφανιστής), αναγκάζεται ο διεισδυτής να εξέλθει από την εν λόγω ασυνέχεια, εμφανίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη θέση της. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου αυτής αποτελεί ο επαρκής καθαρισμός των επιφανειών από ακαθαρσίες.

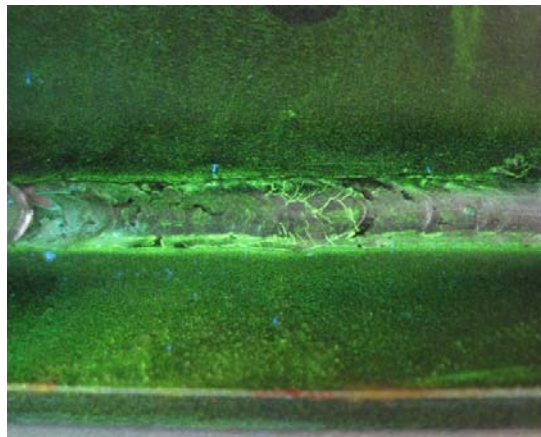


Εικόνα 3.1 Μηχανισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με διεισδυτικά υγρά (αριστερά) και απεικόνιση ρωγμής με την ολοκλήρωση του ελέγχου (δεξιά)

3.2.3 Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια

Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια αποτελεί μία από τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου, μέσω της οποίας είναι σε θέση να εντοπιστούν τόσο επιφανειακές όσο και ελαφρώς υποεπιφανειακές ασυνέχειες σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Τέτοια χαρακτηριστικά υλικά αυτού του είδους αποτελούν τα περισσότερα σιδηρούχα κράματα, τα κράματα νικελίου και κοβαλτίου. Επομένως από την άλλη μεριά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για υλικά δίχως μαγνητικές ιδιότητες, όπως είναι τα κράματα του αλουμινίου, μαγνησίου και χαλκού καθώς επίσης και στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται, οι ασυνέχειες, οι οποίες έχουν διεύθυνση εγκάρσια σε αυτήν του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται, προκαλούν διαρροή του εν λόγω μαγνητικού πεδίου (πεδίο διαρροής) γύρω από την ασυνέχεια. Επομένως ο εντοπισμός της πεδίου αυτού και άρα και της υπάρχουσας ασυνέχειας πραγματοποιείται με τη χρήση εξαιρετικά μικρού μεγέθους μαγνητικών σωματιδίων (ρινισμάτων), τα οποία όταν εφαρμοστούν κατάλληλα επάνω στην ελεγχθείσα επιφάνεια του ελάσματος, συγκεντρώνονται και παρακρατούνται από το πεδίο διαρροής. Με τον τρόπο αυτό, τα μαγνητικά σωματίδια σχηματίζουν το περίγραμμα της ασυνέχειας και επιτρέπουν ακολούθως τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της ασυνέχειας (θέση, προσανατολισμός, μέγεθος). Για την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του ελάσματος χρησιμοποιείται κατάλληλος ηλεκτρομαγνήτης πεταλοειδούς σχήματος (yoke), ενώ τα μαγνητικά σωματίδια ταξινομούνται σε υγρά και ξηρά ανάλογα με το φορέα. Στην πρώτη περίπτωση συνίσταται ο ψεκασμός του αντικειμένου με κατάλληλο επιλεγμένο υγρό με φερομαγνητική σκόνη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση συνίσταται η άμεση εναπόθεση φερομαγνητικής σκόνης στην ελεγχθείσα επιφάνεια. Ως φερομαγνητική σκόνη χρησιμοποιείται συνήθως ο μαγνητίτης Fe_3O_4 και Fe_2O_3 , με μέγεθος κόκκων το οποίο δεν υπερβαίνει τα 0,06mm.

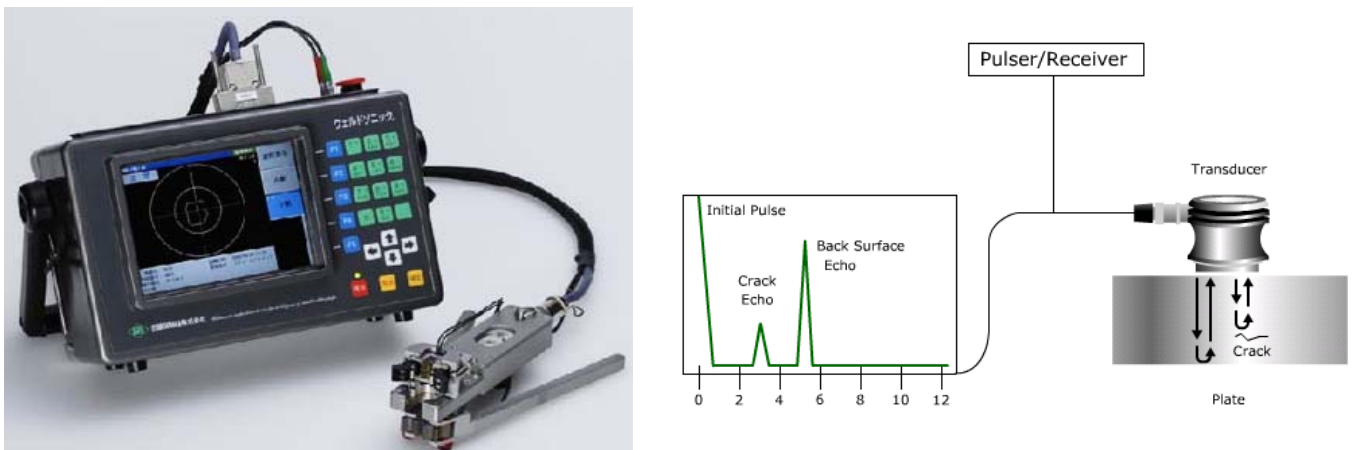


Εικόνα 3.2 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με μαγνητικά σωματίδια (αριστερά) και απεικόνιση ρωγμών με χρωστική φερομαγνητική σκόνη (δεξιά)

3.2.4 Έλεγχος με Υπερήχους

Ο έλεγχος μέσω υπερήχων αποτελεί μια μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου, η οποία βασίζεται στην ανάκλαση του ήχου από επίπεδες ασυνέχειες μέσα στο εξεταζόμενο υλικό και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση υποεπιφανειακών ασυνεχειών, κυρίως ρωγμών. Ο μηχανισμός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο εξής: Μια ηχητική δέσμη υψηλής συχνότητας (0,1- 25,0 MHz) εκπέμπεται από έναν πομπό, ταξιδεύει δια μέσου του υλικού και ανακλάται από επιφανειακές ή από υποεπιφανειακές ασυνέχειες. Η ανακλώμενη δέσμη στη συνέχεια φθάνει στον δέκτη, η οποία μετατρέπεται σε σήματα ηλεκτρικής τάσης. Στα πλείστα συστήματα ο πομπός και ο δέκτης συνδυάζονται στο ίδιο σύστημα (transducer) και ανάλυση των σημάτων αυτών επιτρέπει τον εντοπισμό και την ανάλυση της ασυνέχειας.

Πιο συγκεκριμένα η θέση της ασυνέχειας προσδιορίζεται από την χρονική διαφορά μεταξύ εκπεμπόμενου και ανακλώμενου σήματος, ενώ το μέγεθος αυτής σχετίζεται με την ένταση του ανακλώμενου σήματος. Η ανακλαστική ικανότητα των υπερήχων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της διεπιφάνειας της ασυνέχειας. Επομένως παρατηρείται σχεδόν ολική ανάκλαση στις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι διεπιφάνειες είναι από μέταλλο/αέρα, ενώ σε διεπιφάνειες μέταλλο/υγρού και μέταλλο/στερεού παρατηρείται μερική ανάκλαση. Μέσω της ολικής ανάκλασης των υπερήχων είναι δυνατόν να ανευρεθούν ρωγμές, διαστρωματικές ρηγματώσεις και πόροι, ενώ μέσω της μερικής ανάκλασης ευρίσκονται εγκλείσματα μετάλλου, αέρα κλπ..



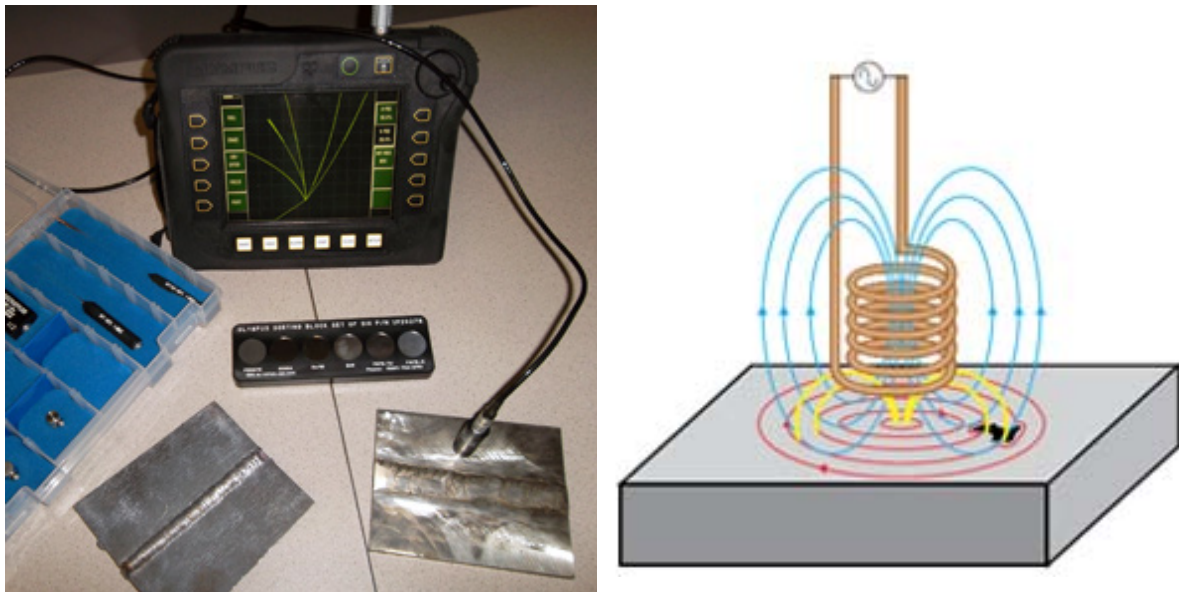
Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων με υπερήχους (αριστερά) και απλοποιημένο σχήμα τρόπου λειτουργίας διάταξης (δεξιά)

3.2.5 Έλεγχος με Δινορρέυματα

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή αποτελεί το φυσικό φαινόμενο, στο οποίο στηρίζεται ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των συγκολλητών συνδέσεων μετάλλων μέσω δινορρευμάτων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο σε σιδηρομαγνητικά όσο και σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά, με το μοναδικό περιορισμό για την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της μεθόδου να αποτελεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα των εξεταζομένων υλικών.

Το ελεγχόμενο αντικείμενο προσάγεται σε κατάλληλο πηνίο ελέγχου (inspection coil), το οποίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας (1-100 kHz) και επάγει κατά αυτόν τον τρόπο δινορρέυματα (eddy currents) στο αντικείμενο. Τα ρεύματα αυτά ρέουν σε κλειστούς βρόγχους και η ροή τους εξαρτάται τόσο από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού όσο και από την ύπαρξη ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες, όπως για παράδειγμα οι ρωγμές είναι σε θέση να προκαλέσουν τη διαταραχή στη ροή των δινορρευμάτων, η οποία ανιχνεύεται μέσω του πηνίου.

Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζεται ο συνήθης απαιτούμενος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση αυτού του είδους ελέγχου και τα παραγόμενα δινορρέυματα.



Εικόνα 3.4 Εξοπλισμός μη καταστρεπτικού ελέγχου με δινορρέυματα (αριστερά) και παραγόμενα δινορρέυματα (δεξιά)

3.2.6 Ραδιογραφικός Έλεγχος

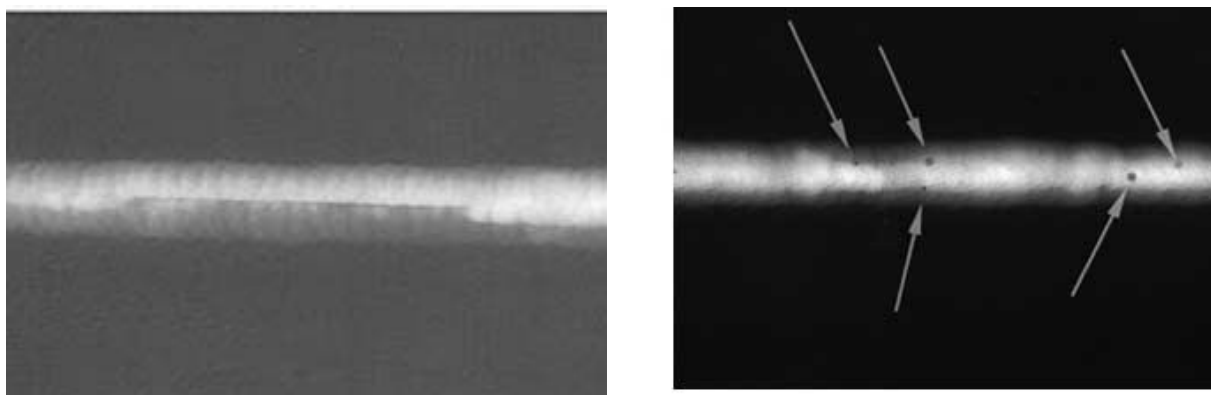
Ο ραδιογραφικός έλεγχος αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλητών συνδέσεων μετάλλων. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στη διαφορική απορρόφηση διεισδύουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το

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-192 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 στον 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 ραδιογραφημάτων απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.5 Ραδιογράφημα ατελούς διείσδυσης (αριστερά) και πόρων (δεξιά)

3.3 Καταστρεπτικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων

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 εν αντιθέσει με τις μη καταστρεπτικές μεθόδους που αναλύθηκαν προηγουμένως 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)

3.3.1 Δοκιμή Εφελκυσμού

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 δοκιμών.

Κατά τη δοκιμή αυτή καθορίζεται μόνο η αντοχή στον εφελκυσμό, σύμφωνα με τη σχέση

$$R_m = \frac{F_m}{S_0 k} \text{ (MPa)}$$

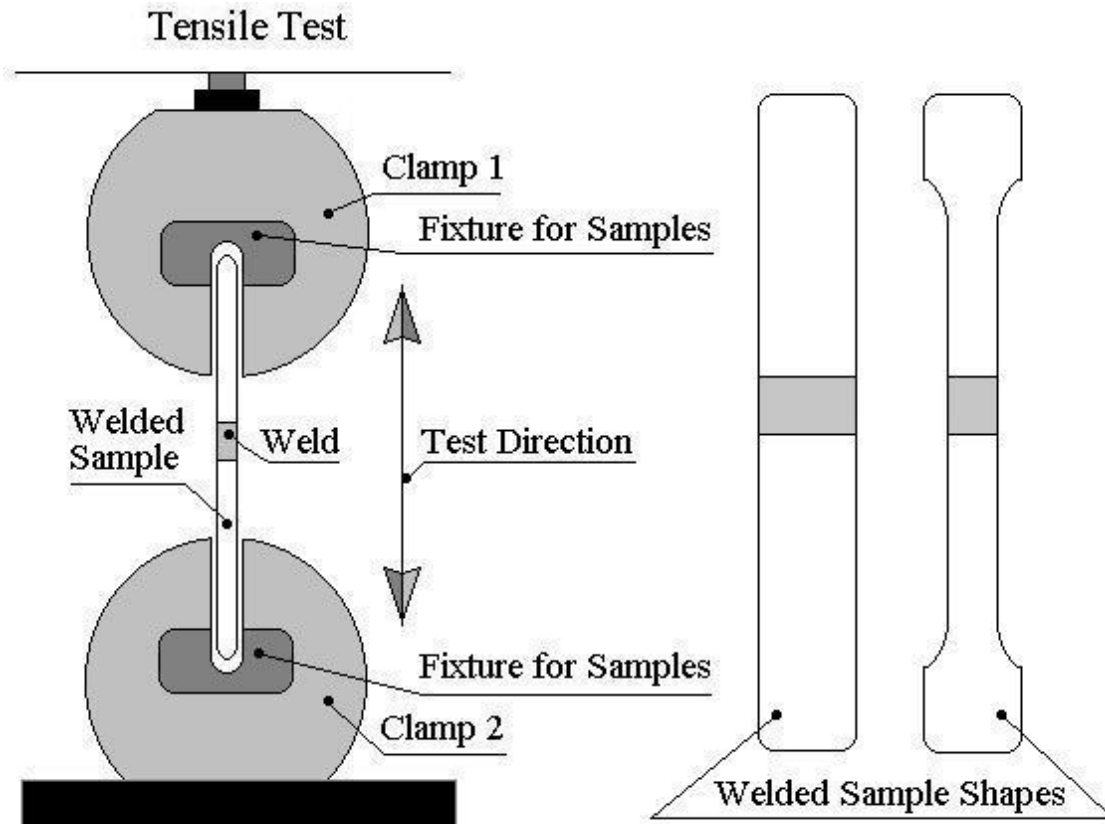
όπου

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

S_0 : η αρχική διατομή του δοκιμίου (mm^2) ($S_0=a_0b_0$)

$k=1.0$ για εξέταση της αντοχής της σύνδεσης

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



Εικόνα 3.6 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 αναγόμεση 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:

$$R_m = 2 \frac{F_m}{\Sigma(\alpha h)} \text{ (MPa)}$$

όπου

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

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

$$R_m = \frac{F_m}{\frac{\Sigma \alpha}{4} \frac{\Sigma l}{4}} \text{ (MPa)}$$

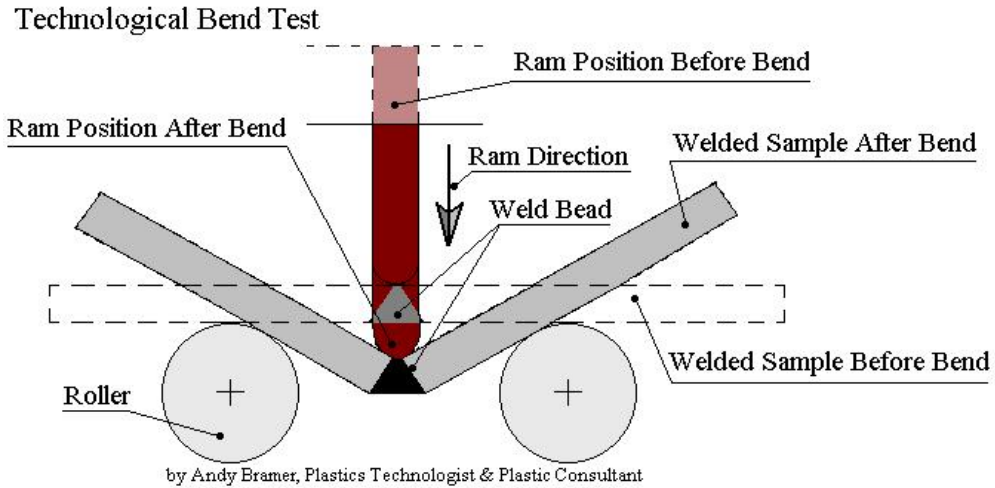
όπου

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

Σl : το άθροισμα όλων των 8 μηκών των κολλήσεων (mm)

3.3.2 Δοκιμή Κάμψης

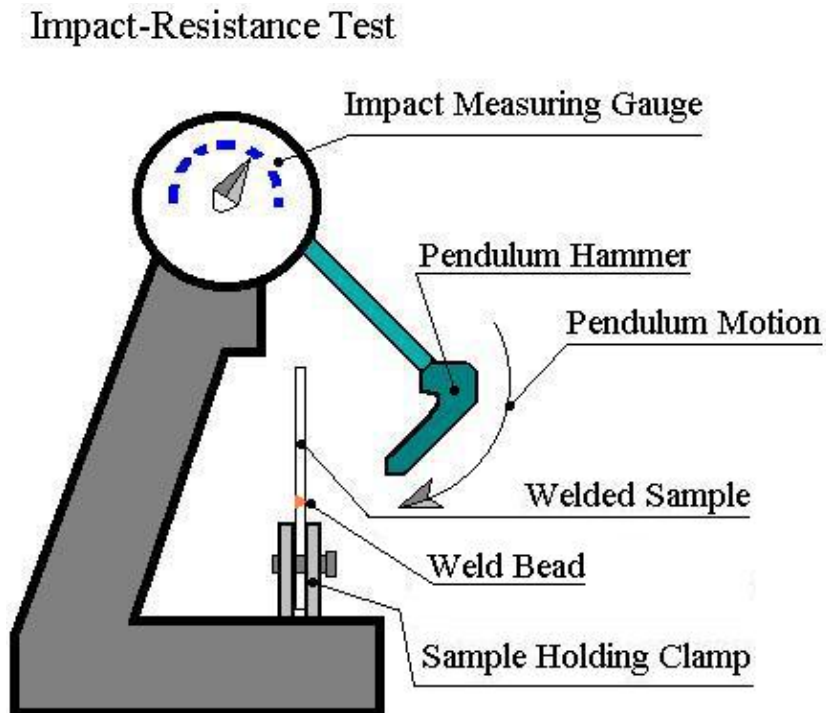
Η δοκιμή κάμψης αποτελεί τον μοναδικό τρόπο και μέθοδο καθορισμού της ολκιμότητας μιας συγκολλητής σύνδεσης. Κατά τη δοκιμή κάμψης, τμήμα ινών ευρισκομένων στην αντίθετη πλευρά του εμβολέα κάμψης, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, έγκειται σε εφελκυσμό. Επομένως ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης του δοκιμίου η κάμψη είναι ε θέση να διενεργείται είτε στο με εφελκυσμό στο μέτωπο συγκόλλησης είτε αντίστροφα, με εφελκυσμό δηλαδή της ρίζας της συγκόλλησης. Οποιαδήποτε ελαττώματα της συγκόλλησης και ιδιαίτερα αυτά, τα οποία ευρίσκονται στην περιοχή του μετώπου και της ρίζας της συγκόλλησης, όπως είναι οι υποκοπές, ή οι ατελείς τήξεις και διεισδύσεις, λειτουργούν ως εγκοπές, προξενώντας την τελική αστοχία και θραύση του ελεγχθέντος δοκιμίου. Για αυτό το λόγο η εν λόγω δοκιμή δεν εξετάζει μονάχα την πλαστικότητα της σύνδεσης αλλά και τον τρόπο και την ποιότητα εκτέλεσής της.



Εικόνα 3.7 Διάταξη δοκιμής κάμψης

3.3.3 Δοκιμή Κρούσης (Δυσθραυστότητας)

Στις συγκολλητές συνδέσεις, ο έλεγχος της δυσθραυστότητας αυτών μέσω της δοκιμής κρούσης εφαρμόζεται τόσο για τις μετωπικές συνδέσεις όσο και για το εναποτιθέμενο υλικό. Μια χαρακτηριστική διάταξη δοκιμής κρούσης απεικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 3.8 Διάταξη δοκιμής κρούσης

Πρέπει να τονισθεί ότι η δοκιμή κρούσης μετωπικής επίπεδης σύνδεσης πραγματοποιείται σε δοκίμια πάχους άνω των 10mm.

3.3.4 Δοκιμή Σκληρότητας

Οι συνηθέστερες μέθοδοι ελέγχου της σκληρότητας μιας συγκολλητής σύνδεσης είναι οι Brinell (HB), Vickers (HV), Rockwell (HR). Στις συγκολλήσεις τη μεγαλύτερη εφαρμογή παρουσιάζει η μέθοδος Vickers διότι είναι σε θέση να εφαρμοστεί σε στενές ζώνες και με πολύ διαφοροποιημένη σκληρότητα καθώς επίσης και για μικρές φορτίσεις κατά τον έλεγχο της λεγόμενης μικροσκληρότητας.

Ο έλεγχος της σκληρότητας διεξάγεται τόσο στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη όσο και στο εναποτιθέμενο υλικό. Στη δεύτερη περίπτωση η δοκιμή διενεργείται σε δοκιμαστική πλάκα υποσυγκολλημένη με αναγόμευση, η οποία εκτελείται με υπό έλεγχο εναποτιθέμενο υλικό και αποτελείται από τρεις τουλάχιστον στρώσεις. Ακολούθως η επιφάνεια υφίσταται λείανση κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το ελεγχόμενο επίπεδο να είναι παράλληλο προς τη δοκιμαστικά πλάκα. Τέλος η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εκτέλεση πέντε κατά ελάχιστο μετρήσεων, με έναν από τους προαναφερθέντες τρόπους μέτρησης της σκληρότητας, είτε κατά Vickers, είτε κατά Rockwell, είτε τέλος κατά Brinell.

Η μέτρηση της σκληρότητας στην περιοχή της σύνδεσης εκτελείται με σκοπό να καταγραφούν οι μεταβολές της σκληρότητας σε διάφορες θέσεις σύνδεσης, όπως είναι η περιοχή της κόλλησης, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και το μητρικό υλικό. Η δοκιμή της σκληρότητας διενεργείται σε εγκάρσια διατομή της σύνδεσης προσβεβλημένης προηγουμένως, για αναγνώριση των συνόρων της κόλλησης και της ΘΕΖ. Οι μετρήσεις της σκληρότητας όπως και προηγουμένως είναι σε θέση να πραγματοποιηθούν και με τις τρεις μεθόδους σκληρομέτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικό Μέρος

4.1 Εισαγωγή-Σκοπός Πειραμάτων

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και η εξέταση των αιτιών, οι οποίες οδηγούν στην αστοχία μιας συγκολλητής σύνδεσης δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μια σειρά καταστρεπτικών ελέγχων δοκιμών εφελκυσμού ειδικών συγκολλητών μεταλλικών τεμαχίων ιδίου υλικού στο εργαστήριο του κτιρίου Ξ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου.

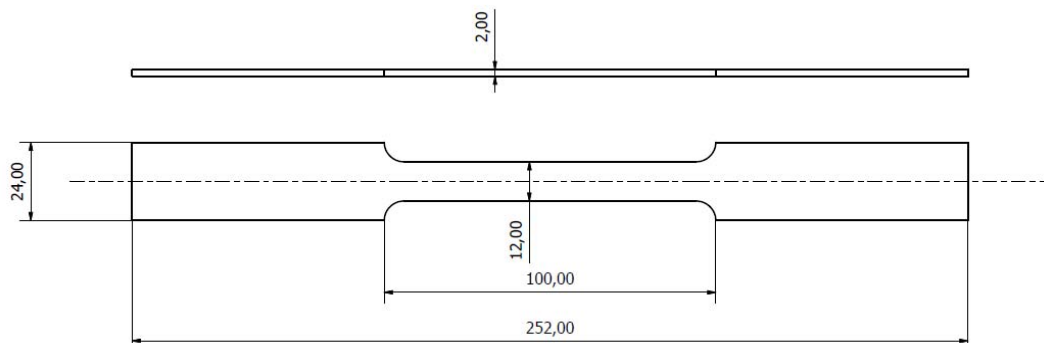
Πιο συγκεκριμένα διενεργήθηκαν επτά δοκιμές εφελκυσμού για επτά διαφορετικά τεμάχια. Από αυτά το μοναδικό τεμάχιο, το οποίο δεν είχε προκύψει μέσω συγκόλλησης ήταν το πρώτο, ενώ τα υπόλοιπα είχαν προκύψει μέσω συγκόλλησης. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στοιχείο των συγκολλημένων τεμαχίων ήταν ότι καθένα από αυτά είχε ένα σφάλμα συγκόλλησης, το οποίο ήταν εξ αρχής γνωστό και είχε προκύψει σκόπιμα κατά τη συγκόλλησή του, με εξαίρεση ενός εξ' αυτών, το οποίο ήταν τέλεια συγκολλημένο και λειασμένο ώστε να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τα συγκολλημένα τεμάχια. Απώτερος σκοπός αυτού ήταν η εξέταση του βαθμού επίδρασης που έχει καθένα από τα είδη ατέλειας της συγκόλλησης στην αστοχία αυτής. Για το λόγο αυτό κατά τη διενέργεια των πειραμάτων εφελκυσμού ελήφθησαν και κατεγράφησαν οι απαραίτητες μετρήσεις και χαρακτηριστικά της δοκιμής.

Ακολουθώντας από τις μετρήσεις αυτές προέκυψαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίου συναρτήσεως του χρόνου και τάσης συναρτήσεως της παραμόρφωσης του τεμαχίου. Μέσω αυτών ήταν δυνατή η εύρεση της τιμής της τάσης, στην οποία το δοκίμιο ήλθε σε αστοχία εν τέλει και η σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή, στην οποία επρόκειτο να αστοχήσει το υλικό.

4.2 Περιγραφή Εξοπλισμού- Δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως διενεργήθηκαν επτά διαφορετικές δοκιμές εφελκυσμού τεμαχίων ιδίου υλικού. Τα δοκίμια αυτά ήταν κατασκευασμένα από κοινό κατασκευαστικό ανθρακούχο χάλυβα St 37, με κατώτερο όριο θραύσεως $\sigma_B=37$ kp/mm^2 . Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του είδους υλικού αποτελεί το γεγονός ότι ανήκει στην κατηγορία των κραμάτων σιδήρου-άνθρακα, των οποίων η συγκόλληση είναι εύκολη και δεν είναι απαραίτητη η τήρηση συγκεκριμένων ειδικών συνθηκών, όπως συμβαίνει για τους χάλυβες St50, St60, St70. Ακόμη τα δοκίμια αυτά είχαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά προ της συγκολλησεώς τους, των οποίων το σχήμα

αλλά και οι γεωμετρικές διαστάσεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το πάχος των δοκιμίων ήταν 2mm, ενώ το πλάτος αυτών στο λαιμό ήταν 12mm.



Εικόνα 4.1 Σκαρίφημα αρχικού δοκιμίου με αναγραφόμενες διαστάσεις

Για τη συγκόλληση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο εξής τεχνικός εξοπλισμός. Καταρχήν το είδος της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των δοκιμίων ήταν αυτογενής ηλεκτροσυγκόλληση ή συγκόλληση τόξου. Τα ηλεκτρόδια μέσω των οποίων έλαβε χώρα η σύνδεση αυτών ήταν της εταιρείας Oerlikon μοντέλου Fincord-M και είχαν τα εξής χαρακτηριστικά για καθαρό αποτιθέμενο μέταλλο όπως φαίνεται και από την ακόλουθο πίνακα.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Σύσταση Ηλεκτροδίου (%)	C (0.08)-Mn (0.50)-Si (0.35)-S(<0.02)- P(<0.02)
Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	450-550
Όριο Διαρροής σε Εφελκυσμό (MPa)	>360
Επιμήκυνση (L=5d) (%)	>22
Αντοχή σε Κρούση Charpy V (Joule)	>60

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίου πειραματικής διαδικασίας

Ενδεικτικά να αναφερθεί ότι ήταν γενικής χρήσης, ρουτιλίου μέσης επένδυσης και χρησιμοποιείτο για συγκολλητή σύνδεση τεμαχίων από κοινό χάλυβα, ενώ οι προδιαγραφές, τις οποίες πληρούσαν ήταν κατά:

- DIN 1913: E 4321 R3

- DIN EN 499: E 35 AR 12
- AWS/SFA 5.1: E 6013

Classification: Grade 2



Εικόνα 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίων συγκόλλησης

Ακόμη η μηχανή της ηλεκτροσυγκόλλησης, η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ήταν μοντέλο Force 145 με ύπαρξη σταθεροποιητή τάσης (Inverter) της εταιρείας Telwin με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της να παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.



Εικόνα 4.3 Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης

Χαρακτηριστικά Μηχανής

Μοντέλο	Force 145 /Inverter
Κατασκευαστής	Telwin
Τάση (V)	230
Ισχύς (KW)	3.4
Ελάχιστο Ρεύμα (A)	10
Μέγιστο Ρεύμα (A)	130
Διαστάσεις Διαμέτρου Ηλεκτροδίου (mm)	1.6÷3.25
Διαστάσεις Μηχανής (Μήκος-Πλάτος-Ύψος) (mm)	380x420x170
Βάρος (kg)	2.8
International Protection (IP) Code	IP21

Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης

Αριθμός Δοκιμίου	Είδος Σφάλματος Συγκόλλησης
1	Ατόφιο δοκίμιο (δίχως συγκόλληση) Κανένα σφάλμα
2	Τέλεια συγκολλημένο και λειασμένο δοκίμιο Κανένα σφάλμα
3	Συγκολλημένο δοκίμιο Σφάλμα ατελούς τήξης
4	Συγκολλημένο δοκίμιο Σφάλμα πορώδους συγκόλλησης
5	Συγκολλημένο δοκίμιο Σφάλμα ατελούς διείσδυσης
6	Συγκολλημένο δοκίμιο Σφάλμα κρατήρα με υπερπλήρωση
7	Συγκολλημένο δοκίμιο Σφάλμα ατελούς διείσδυσης με κενό και κρατήρα

Πίνακας 4.3 Σφάλματα συγκολλήσεων εξεταζόμενων δοκιμίων

Καθένα από τα εξεταζόμενα δοκίμια, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, ήταν συγκολλημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να φέρουν και διαφορετική ατέλεια το καθένα, με εξαίρεση το πρώτο εξ' αυτών το οποίο ήταν ατόφιο και μη συγκολλημένο και χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς των δοκιμών εφελκυσμού και το δεύτερο κατά αριθμό το οποίο ήταν συγκολλημένο και λειασμένο ορθώς και χρησιμοποιήθηκε και αυτό με τη σειρά του ως σημείο αναφοράς για τα συγκολλημένα τεμάχια. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ατελειών που φέρουν τα επτά εξεταζόμενα δοκίμια.

Με το πέρας των συγκολλήσεων σύμφωνα με τα άνωθεν χαρακτηριστικά για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο ξεχωριστά, ακολούθησε η δοκιμή αυτών μέσω καταστρεπτικού ελέγχου δοκιμής εφελκυσμού. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω της μηχανής εφελκυσμού του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, μοντέλου 4482 (100 kN) της εταιρείας Instron, η οποία απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες. Με την ολοκλήρωση των δοκιμών αυτών και τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων προέκυψαν οι κατάλληλες καμπύλες για κάθε δοκίμιο μέσω του λογισμικού της Matlab R210a. Η ανάλυση αυτών θα λάβει χώρα σε ακόλουθο εδάφιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 4.4 Μηχάνη εφελκυσμού Instron 4482 (100 kN)

4.3 Ανάλυση και Περιγραφή Συγκολλημένων Δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο έφερε ένα συγκεκριμένο σφάλμα συγκόλλησης, το οποίο επηρέασε τις μηχανικές ιδιότητες του εκάστοτε δοκιμίου. Ο βαθμός και το ποσοστό επίδρασης της ατέλειας αυτής στην αντοχή του χαλύβδινου τεμαχίου θα εξεταστεί και θα συγκριθεί με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή αντοχής στο παρόν εδάφιο.

Για την αποτελεσματικότερη ανάλυση και για την εξαγωγή ορθότερων και εγκυρότερων αποτελεσμάτων απαραίτητη προϋπόθεση αποτέλεσε η πραγματοποίηση δύο δοκιμών εφελκυσμού για δύο διαφορετικά δοκίμια, τα οποία θα χρησιμοποιούντο ως σημεία και δοκίμια αναφοράς για τα επακόλουθα πειράματα.

Πιο συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί και άνωθεν το πρώτο δοκίμιο, το οποίο εξετάστηκε ήταν ατόφιο και δεν έφερε κάποιου είδους συγκόλλησης. Επομένως από τεχνικής πλευράς δεν είχε κάποιο σφάλμα, το οποίο θεωρητικά να επηρέαζε την αντοχή του. Η εικόνα αυτού προ της δοκιμής εφελκυσμού απεικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 4.5 Εξεταζόμενο δοκίμιο 1

Αντιστοίχως με το πρώτο δοκίμιο, το δεύτερο δοκίμιο το οποίο εξετάστηκε προέκυψε σε αντίθεση με το πρώτο, μέσω συγκόλλησης, η οποία ωστόσο ήταν από τεχνικής και κατασκευαστικής πλευράς άρτια και ορθώς πραγματοποιημένη τόσο κατά την ίδια την σύνδεση όσο και κατά τη λείανση αυτής. Επομένως το δοκίμιο αυτό, με αριθμό δύο, αποτέλεσε το δοκίμιο αναφοράς για τα επόμενα και φέροντα ατέλειες συγκολλημένα δοκίμια. Ανεξαρτήτως όμως της αρτιότητας της συγκόλλησης, μέσω του καταστρεπτικού ελέγχου αναμένεται η αντοχή του συγκεκριμένου συγκολλημένου δοκιμίου, να είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη του πρώτου και δίχως συγκόλληση τεμαχίου. Η εικόνα αυτού, προ του καταστρεπτικού ελέγχου του, παρατίθενται ακολούθως τόσο σε κανονική λήψη όσο και σε εστίαση στην συγκολλητή σύνδεση. Από τη δεύτερη εικόνα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι η συγκόλληση είναι τελείως λειασμένη δίχως την ύπαρξη ατελειών κάτι το οποίο θεωρητικά αναμένεται να επαληθευθεί και από την ανάλυση των ληφθέντων μετρήσεων.



Εικόνα 4.6 Εξεταζόμενο δοκίμιο 2



Εικόνα 4.7 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 2

Ακολούθως έλαβαν χώρα οι δοκιμές καταστρεπτικού ελέγχου εφέλκυσμού για τα εναπομείναντα και φέροντα εκούσιες ατέλειες κατά τη συγκόλλησή τους. Στον άνωθεν Πίνακα 4.3. έχουν αναφερθεί τα είδη των σφαλμάτων του εκάστοτε εξεταζόμενου δοκιμίου. Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζονται τα δοκίμια τόσο σε κανονική λήψη όσο και σε εστίαση στην περιοχή της συγκόλλησης προ της διενέργειας των δοκιμών ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα το τρίτο δοκίμιο φέρει ατέλεια ατελούς τήξης, η οποία προέκυψε εκούσια μέσω της ανεπαρκούς έντασης του ρεύματος, με το οποίο τροφοδοτείτο το ηλεκτρόδιο της συγκόλλησης, η τιμή της έντασης του οποίου ρυθμιζόταν από τη μηχανή της ηλεκτροσυγκόλλησης. Η ύπαρξη της ατέλειας αυτής αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή του μεταλλικού δοκιμίου, λόγω των αναπτυσσόμενων διακένων στις πλευρικές επιφάνειες της ραφής της συγκόλλησης.



Εικόνα 4.8 Εξεταζόμενο δοκίμιο 3



Εικόνα 4.9 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 3

Ακολουθως το επόμενο ελεχθέν δοκίμιο, το οποίο απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες προ της διενέργειας του πειράματος, συγκολλήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να φέρει πόρους στη ραφή της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, οι δημιουργηθέντες πόροι προέκυψαν κατά τη συγκόλληση του μεταλλικού δοκιμίου μέσω την πρόσδοσης στο ηλεκτρόδιο συγκόλλησης χαμηλής έντασης ρεύματος και επομένως θερμοκρασίας συγκόλλησης και μικρού τόξου καθώς επίσης μεγάλης γωνίας στο ηλεκτρόδιο που είχε σαν αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό αερίων και την δημιουργία πόρων.



Εικόνα 4.10 . Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 4



Εικόνα 4.11 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 4

Στη συνέχεια, το πέμπτο κατά σειρά δοκίμιο, το οποίο ελέγχθηκε μέσω καταστρεπτικού ελέγχου δοκιμής εφελκυσμού, έφερε εκούσια σφάλμα ατελούς διείσδυσης κατά τη συγκόλλησή του. Η ατέλεια αυτή, όπως και προηγούμενες προέκυψαν εκούσια. Στη συγκεκριμένη, όμως, περίπτωση για τη δημιουργία αυτού του είδους σφάλματος, στο προς συγκόλληση δοκίμιο, δεν πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη προετοιμασία αυτού και πιο συγκεκριμένα το διάκενο από τη μία και ο αυχέννας της συγκόλλησης από την άλλη δεν είχαν τις απαραίτητες, για μια αποτελεσματική συγκόλληση, διαστάσεις, καθώς το μεν διάκενο ήταν μικρότερο του επιτρεπτού ενώ ο δε αυχέννας υψηλότερος.



Εικόνα 4.12 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 5



Εικόνα 4.13 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 5

Ακολουθώς, το επόμενο, και έκτο κατά σειρά, δοκίμιο το οποίο συγκολλήθηκε και στη συνέχεια εξετάστηκε η μηχανική του συμπεριφορά μέσω καταστρεπτικού ελέγχου δοκιμής εφελκυσμού, έφερε εκούσια ατέλεια κρατήρα με υπερπλήρωση. Πιο συγκεκριμένα, το σφάλμα αυτό προέκυψε με την πρόσδοση στη δημιουργηθείσα συγκόλληση ποσότητα συγκολλητού υλικού υψηλότερης του κανονικού. Από απόψεως αντοχής η συγκόλληση αναμένεται να έχει υψηλότερη των προηγούμενων, ωστόσο είναι πιθανή η ύπαρξη σφαλμάτων, τα οποία οφείλονται στα υψηλότερα αναπτυσσόμενα, στη περιοχή της συγκόλλησης, θερμικά φορτία.



Εικόνα 4.14 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 6



Εικόνα 4.15 Συγκόλληση εξεταζόμενου δοκιμίου 6

Τέλος, το έβδομο εξεταζόμενο δοκίμιο, προέκυψε με συγκόλληση, η οποία έφερε ηθελημένα ένα συνδυασμό σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα οι ατέλειες, από τις οποίες αποτελείτο η δημιουργηθείσα συγκόλληση ήταν σφάλμα ατελούς διείσδυσης του υλικού με ταυτόχρονη ύπαρξη κενού και κρατήρα. Εκ πρώτης όψεως αναμένεται η επίδραση στην αντοχή και στη μηχανική συμπεριφορά της συγκόλλησης να είναι η υψηλότερη σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια. Ακολούθως απεικονίζεται το τελευταίο εξεταζόμενο δοκίμιο.



Εικόνα 4.16 Συγκόλληση εξεταζόμενου δοκιμίου 7



Εικόνα 4.17 Συγκόλληση εξεταζομένου δοκιμίου 7

4.4 Διενέργεια Καταστρεπτικού Ελέγχου Δοκιμών Εφελκυσμού

4.4.1 Περιγραφή Μεθοδολογίας

Με την ολοκλήρωση και τη δημιουργία των προς εξέταση συγκολλημένων δοκιμών ακολούθησε η εξέταση αυτών, όσον αφορά στην επίδραση που είχε η δημιουργηθείσα συγκόλληση του εκάστοτε δοκιμίου, τόσο στην αντοχή αυτών όσο και στις μηχανικές τους ιδιότητες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η εξέταση αυτών πραγματοποιήθηκε μέσω καταστρεπτικού ελέγχου δοκιμών εφελκυσμού, στη μηχανή δοκιμών του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Για την ορθότερη ανάλυση και αποτελεσματικότερη και εγκυρότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, εκτός του ίδιου ηλεκτροδίου συγκόλλησης, τόσο η διατομή των συγκολλήσεων και τις γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμών όσο και η τιμή της προώσεως της μηχανής δοκιμών εφελκυσμού ήταν ίδια και στις επτά δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της προώσεως ήταν 5,0 mm/min, ενώ τα χαλύβδινα δοκίμια στη περιοχή της συγκόλλησης είχαν πλάτος 12,0 mm και πάχος 2,0 mm.

Επομένως με τη διενέργεια των δοκιμών εφελκυσμού ελήφθησαν οι κατάλληλες μετρήσεις με τα αναπτυσσόμενα φορτία καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών μέχρι την πλήρη θραύση αυτών.

4.4.2 Οπτική Ανάλυση Εξεταζομένων Δοκιμών

Προτού πραγματοποιηθεί η πιο λεπτομερής ανάλυση των καταστρεπτικών ελέγχων δοκιμών εφελκυσμού, οι οποίοι έλαβαν χώρα για τη διερεύνηση της επίδρασης που είναι σε θέση να έχει κάθε είδος σφάλματος στην εν γένει μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών συγκολλημένων δοκιμών, διεξήχθη μια αρχική οπτική ανάλυση των θραυσμένων, με το πέρας του ελέγχου, δοκιμών. Μέσω αυτής είναι δυνατόν να

διαπιστωθούν εκ πρώτης απόψεως ο βαθμός επίδρασης που είχαν οι ατέλειες των δημιουργηθέντων συγκολλήσεων μέσω του τρόπου και του μηχανισμού, σύμφωνα με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η θραύση αυτών. Πιο ασφαλή συμπεράσματα είναι ε θέση να εξαχθούν με την ανάλυση και των ληφθέντων μετρήσεων, η οποία θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο εδάφιο. Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζονται τα εξεταζόμενα δοκίμια με το πέρας των καταστρεπτικών ελέγχων.



Εικόνα 4.18 Εξεταζόμενο δοκίμιο 1 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.19 Εξεταζόμενο δοκίμιο 2 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.20 . Εξεταζόμενο δοκίμιο 3 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.21 Εξεταζόμενο δοκίμιο 4 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.22 Εξεταζόμενο δοκίμιο 5 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.23 Εξεταζόμενο δοκίμιο 6 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου



Εικόνα 4.24 Εξεταζόμενο δοκίμιο 7 με το πέρας του καταστρεπτικού ελέγχου

Από τις άνωθεν εικόνες των εξεταζόμενων δοκιμίων είναι σε θέση να παρατηρηθούν τα εξής:

Καταρχήν όσον αφορά στο σημείο θραύσης του πρώτου δοκιμίου, παρατηρείται, μέσω της Εικόνας 4.17, όπως αναμενόταν εξάλλου καθώς το δοκίμιο αυτό ήταν ατόφιο δίχως συγκόλληση, ότι η θέση αστοχίας αυτού βρίσκεται ακριβώς στη μέση του μήκους του αρχικού δοκιμίου. Ακόμη παρατηρούμε το λαιμό, ο οποίος δημιουργήθηκε με την είσοδο του δοκιμίου στην πλαστική περιοχή, όταν δηλαδή η αναπτυσσόμενη τάση σε αυτό υπερέβη το όριο διαρροής αυτού.

Αντιστοίχως με το πρώτο δοκίμιο, το δεύτερο κατά σειρά εξεταζόμενο τεμάχιο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.18 αστόχησε στο κέντρο του μήκους του, το οποίο ταυτίζεται και με το κέντρο της ραφής της συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η δημιουργηθείσα συγκόλληση και η ακόλουθη λείανση αυτής ήταν άρτια, δίχως την ύπαρξη σφαλμάτων. Ωστόσο, σε αντίθεση με το ατόφιο δοκίμιο το

δοκίμιο αστόχησε δίχως τα δημιουργία λαιμού, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η αστοχία προήλθε ταχύτερα, δηλαδή η εφελκυστική παραμόρφωση αυτού πριν την αστοχία ήταν μικρότερη σε έκταση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο υψηλό μέτρο ελαστικότητας και τη δυσκαμψία, τα οποία χαρακτηρίζουν τη συγκόλληση, σε σχέση με τον χάλυβα, ο οποίος ως υλικό είναι πιο όλκιμο και μικρότερου μέτρου ελαστικότητας.

Από την άλλη για το τρίτο εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο όπως έχει αναφερθεί έφερε εκούσιο σφάλμα ατελούς τήξης στη συγκολλητή σύνδεσή του, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μέσω της Εικόνας 4.19 ότι το σημείο αστοχίας αυτού δεν ήταν στο κέντρο του μήκους του και δη πάνω στη ραφή της συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό μας προϊδεάζει είτε στο ότι η αντοχή της ραφής της προκύπτουσας συγκόλλησης ήταν υψηλότερη με της αντίστοιχης του αλουμινίου, είτε στο ότι κατά τη κοπή του αρχικού δοκιμίου και την κατά την ακόλουθη κόλληση αυτού επηρεάστηκε η αντοχή αυτού παράπλευρα του σημείου συγκόλλησης, με αποτέλεσμα και να αστοχήσει στο συγκεκριμένο σημείο. Το γεγονός ότι αστόχησε σε θέση εκτός της ραφής της συγκόλλησης επέφερε τη δημιουργία λαιμού προ της τελικής του θραύσης.

Για το τέταρτο εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω έφερε σφάλμα πορώδους συγκόλλησης, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μέσω της Εικόνας 4.20 η οποία απεικονίζει το δοκίμιο αυτό ύστερα από την ολοκλήρωση του καταστρεπτικού ελέγχου και την οριστική του θραύση, ότι η θέση στην οποία αστόχησε αρχικά ήταν η ραφή της συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό μαρτυρά ότι για την αστοχία θραύση αυτού οφείλεται η ύπαρξη της συγκεκριμένης συγκολλητικής. Από την άλλη όμως, για την οριστικοποίηση της αιτίας της θραύσης αυτής, ως απαραίτητη κρίνεται η ανάλυση των ληφθέντων, μέσω του ελέγχου αυτού, μετρήσεων και πιο συγκεκριμένα της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων. Στην περίπτωση κατά την οποία η μετατόπιση προ της οριστικής θραύσης για το δοκίμιο 4 είναι μικρότερη της αντίστοιχης του δοκιμίου 2, τότε πρακτικά σημαίνει ότι για την αστοχία αυτού σημαντικό ρόλο έχει διαδραματίσει η ύπαρξη της συγκεκριμένης εκούσιας ατέλειας. Ωστόσο αν πραγματοποιηθεί μια πιο ενδελεχής παρατήρηση της θραυσμένης ραφής είναι δυνατόν να διαπιστωθεί ότι με την αστοχία της συγκόλλησης στη περιοχή της ραφής, ακολούθησε η παραμόρφωση του δοκιμίου παραπλήσια αυτής με τη δημιουργία «λαιμού», μέχρι την οριστική θραύση του δοκιμίου. Τέλος το σημείο αστοχίας της ραφής ενδεχομένως να μαρτυρά την ύπαρξη πόρων στο συγκεκριμένο σημείο.

Το πέμπτο κατά σειρά εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε καταστρεπτικό έλεγχο δοκιμής εφελκυσμού και έφερε εκούσιο σφάλμα ατελούς διείσδυσης, όπως είναι δυνατόν να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.21, η οποία απεικονίζει αυτό με το πέρας του ελέγχου, έχει αστοχήσει ακριβώς στο κέντρο της συγκόλλησης. Η αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου στη θέση αυτή ήταν κάτι, το οποίο αναμενόταν καθώς κύριο χαρακτηριστικό του σφάλματος αυτού είναι η ελλιπής ποσότητα υλικού σύνδεσης στη ρίζα της συγκόλλησης, καθώς πρόκειται για κόλληση ενός πάσου.

Το επόμενο δοκίμιο και έκτο κατά σειρά, το οποίο συγκολλήθηκε και έφερε σφάλμα κρατήρα με υπερπλήρωση, όπως είναι δυνατόν να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.22, δεν αστόχησε στη θέση της συγκόλλησης ή στην ευρύτερη περιοχή αυτής αλλά σε σημείο διάφορο αυτής. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η δημιουργία της συγκεκριμένης συγκόλλησης με την προσθήκη πλεονάζουσας ποσότητας υλικού σύνδεσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής της συγκόλλησης εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες συνδέσεις, καθιστώντας την κατά αυτόν τον τρόπο στιβαρότερη. Ως εκ τούτου, όπως φαίνεται και στην συγκεκριμένη εικόνα το δοκίμιο αστόχησε σε σημείο που δεν υπήρχε συγκολλητή σύνδεση, με ταυτόχρονη δημιουργία λαιμού. Από την άλλη η ύπαρξη του κρατήρα στη ραφή της συγκόλλησης δεν επηρέασε όπως φαίνεται την αντοχής της συγκόλλησης.

Τέλος, το έβδομο και τελευταίο κατά σειρά εξεταζόμενο συγκολλημένο δοκίμιο, έφερε όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω σφάλμα ατελούς διείσδυσης με ταυτόχρονη παρουσία κρατήρα και κενού στη ραφή της συγκόλλησης. Όπως παρατηρείται από την εικόνα 4.23, το συγκεκριμένο συγκολλημένο δοκίμιο αστόχησε στη περιοχή της συγκόλλησης και όχι ακριβώς στο κέντρο της συγκόλλησης, με την αστοχία αυτής να ξεκινά από το σημείο του κενού και το δοκίμιο να παραμορφώνεται προτού προέλθει η οριστική του θραύση. Ο κρατήρας της ραφής της συγκόλλησης δε φαίνεται εκ πρώτης όψεως να επηρέασε σε σημαντικό βαθμό την αντοχή της σύνδεσης αυτής.

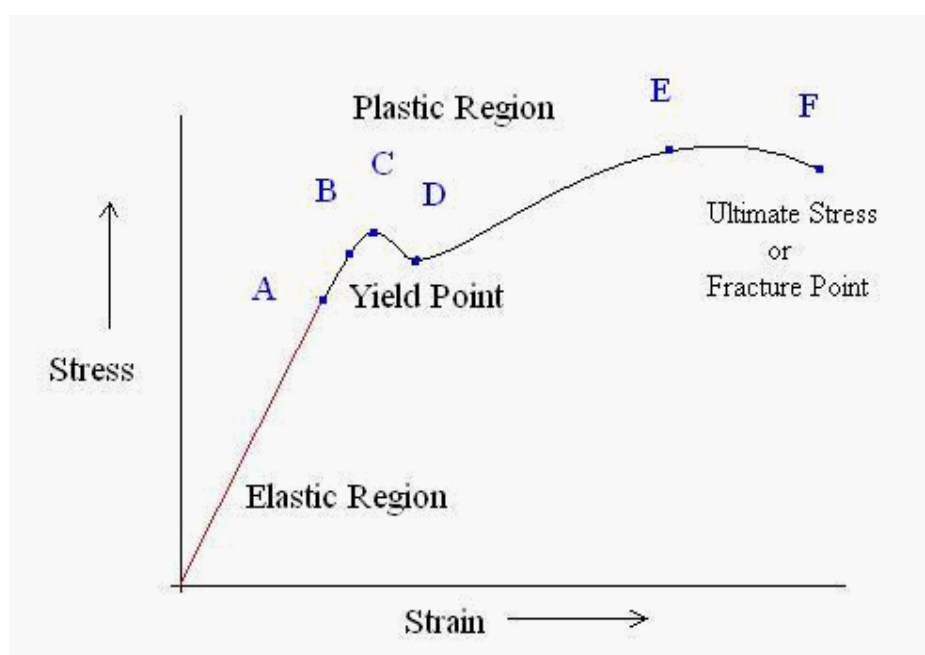
4.4.3 Ανάλυση Μηχανικής Συμπεριφοράς Εξεταζομένων Δοκιμίων

4.4.3.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση της αρχικής οπτικής ανάλυσης των ελεγμένων μέσω δοκιμής εφελκυσμού τεμαχίων, ακολουθεί στο παρόν εδάφιο η ενδεδειγμένη και πιο ακριβής ανάλυση των ληφθέντων, κατά τη διάρκεια των δοκιμών, μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή θα εστιαστεί αρχικά στη σύγκριση των αναπτυσσομένων τάσεων και παραμορφώσεων στα δοκίμια που ελέγχθησαν με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές τάσης θραύσης και ορίου διαρροής. Ακολούθως τα δοκίμια φέροντα τις εκούσιες ατέλειες συγκόλλησης θα συγκριθούν τόσο μεταξύ τους όσο και με το δεύτερο κατά σειρά ελεγθέν δοκίμιο, η μηχανική συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του οποίου, όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω, αποτελούν το σημείο αναφοράς για τα συγκολλημένα δοκίμια. Το δοκίμιο αυτό έχει συγκολληθεί και ακολούθως λειανθεί ορθώς δίχως να φέρει κάποιας μορφής ατέλεια.

Για την ανάλυση των μετρήσεων και τη δημιουργία των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων καμπύλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της Matlab R210a, ενώ η επεξεργασία των τιμών αυτών πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Microsoft ExcelTM.

Τα μεγέθη, τα οποία θα υπολογιστούν και θα συγκριθούν, όπως περιγράφηκε ανωτέρω, είναι το άνω και κάτω όριο διαρροής του υλικού, το μέτρο ελαστικότητας αυτού, το όριο θραύσης και εφελκυσμού του εκάστοτε τεμαχίου, καθώς επίσης θα πραγματοποιηθεί και σύγκριση της δυσθραυστότητας μεταξύ των εξεταζομένων δοκιμίων εφελκυσμού. Για τη λήψη όλων των αναφερθέντων απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η δημιουργία των καμπύλων τάσης- παραμόρφωσης για το εκάστοτε ελεγχθέν δοκίμιο. Ακολουθώς απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης για ένα τυπικό κατασκευαστικό άβαφο χαλύβδινο δοκίμιο St37 και οι χαρακτηριστικές θέσεις αυτής, οι οποίες προσδιορίζουν τις τιμές των ανωτέρω μεγεθών.



Εικόνα 4.25 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα St37

Αυτό, το οποίο αξίζει να τονισθεί είναι, αρχικά η ύπαρξη μιας ελαφράς καμπυλότητας μετά το όριο αναλογίας και επίσης την ύπαρξη ταλάντωσης μικρού πλάτους της καμπύλης μετά το άνω όριο διαρροής του υλικού. Η ταλάντωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό αυτό με την επιβολή τάσεως μεγαλύτερης του ορίου διαρροής αυτού και την εισαγωγή του στην πλαστική περιοχή, τεντώνεται με σταθερό φορτίο. Η τιμή της τάσεως γύρω από την οποία πραγματοποιείται η ταλάντωση αυτή, ονομάζεται όριο ροής R_e .

Σύμφωνα με τη σχέση υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων συναρτήσει του ασκούμενου φορτίου κατά τη δοκιμή καταστρεπτικού ελέγχου εφελκυσμού και με βάση τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των δημιουργηθέντων μετωπικών συγκολλήσεων, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, η οποία θεωρητικά είναι σε θέση να

αναπτυχθεί στα συγκολλημένα δοκίμια μέχρι την αστοχία αυτών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_z = \frac{F_m}{\Sigma a h} \leq \sigma_{\text{επ}} \quad (4.4.1)$$

Όπου:

$\sigma_{\text{επ}}$ η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή

Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση ως η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση αντιστοιχεί στο άνω όριο διαρροής του εκάστοτε δοκιμίου. Το γεγονός αυτό ισχύει διότι τα εξεταζόμενα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από όλκιμο κατασκευαστικό χάλυβα St37. Άρα η θεωρητικά μέγιστη επιτρεπόμενη τάση ισούται με 240 kP/cm² ή αλλιώς 235.5 MPa, ωστόσο η τιμή με βάση, την οποία θα εξεταστεί η αντοχή και η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων, είναι η τιμή της τάσης του άνω ορίου διαρροής που θα προκύψει από την ανάλυση του δεύτερου εξεταζόμενου δοκιμίου αναφοράς, το οποίο δεν έφερα κάποιου είδους ατέλεια. Η εύρεση της τιμής αυτής θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο εδάφιο.

Τέλος, για την ανάλυση αυτή πρέπει ιδιαιτέρως να τονισθεί ότι καθοριστικής ρόλο στην εν γένει μηχανική συμπεριφορά και ειδικότερα στην αντοχή και στο όριο διαρροής των συγκολλημένων δοκιμίων είναι σε θέση να διαδραματίσει το αποτιθέμενο υλικό, δηλαδή το ηλεκτρόδιο, το οποίο όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως έχει αντοχή σε εφελκυσμό 450-550 MPa και όριο διαρροής μεγαλύτερο από 360 MPa, δηλαδή τιμές οι οποίες είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του κατασκευαστικού χάλυβα St37.

4.4.3.2 Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

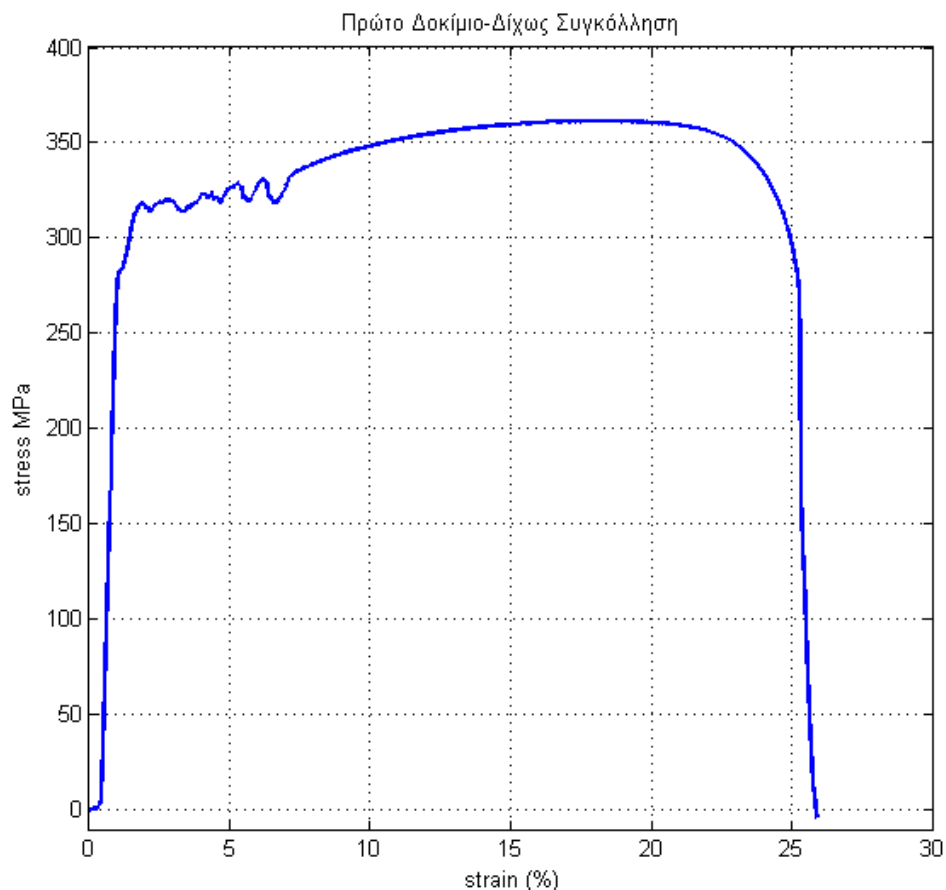
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την ορθότερη και ενδεδειγμένη ανάλυση των ληφθέντων μετρήσεων και αποτελεσμάτων και παράλληλα την εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς του εκάστοτε δοκιμίου, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο δοκίμιο, αποτέλεσαν δοκίμια αναφοράς, καθώς κανένα από τα δύο πρώτα εξεταζόμενα, μέσω καταστρεπτικού ελέγχου, δοκίμια εφελκυσμού, δεν έφεραν κανένα σφάλμα.

Πρώτο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Για το πρώτο εξεταζόμενο δοκίμιο, αναμένεται η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων, να έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο και συν τοις άλλοις οι χαρακτηριστικές

τιμές του άνω και κάτω ορίου διαρροής, της μέγιστης αντοχής και αυτή του μέτρου ελαστικότητας, να συμπίπτουν με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές για χάλυβα St37.

Επομένως η δημιουργηθείσα καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για το ατόφιο δοκίμιο είναι η ακόλουθη:



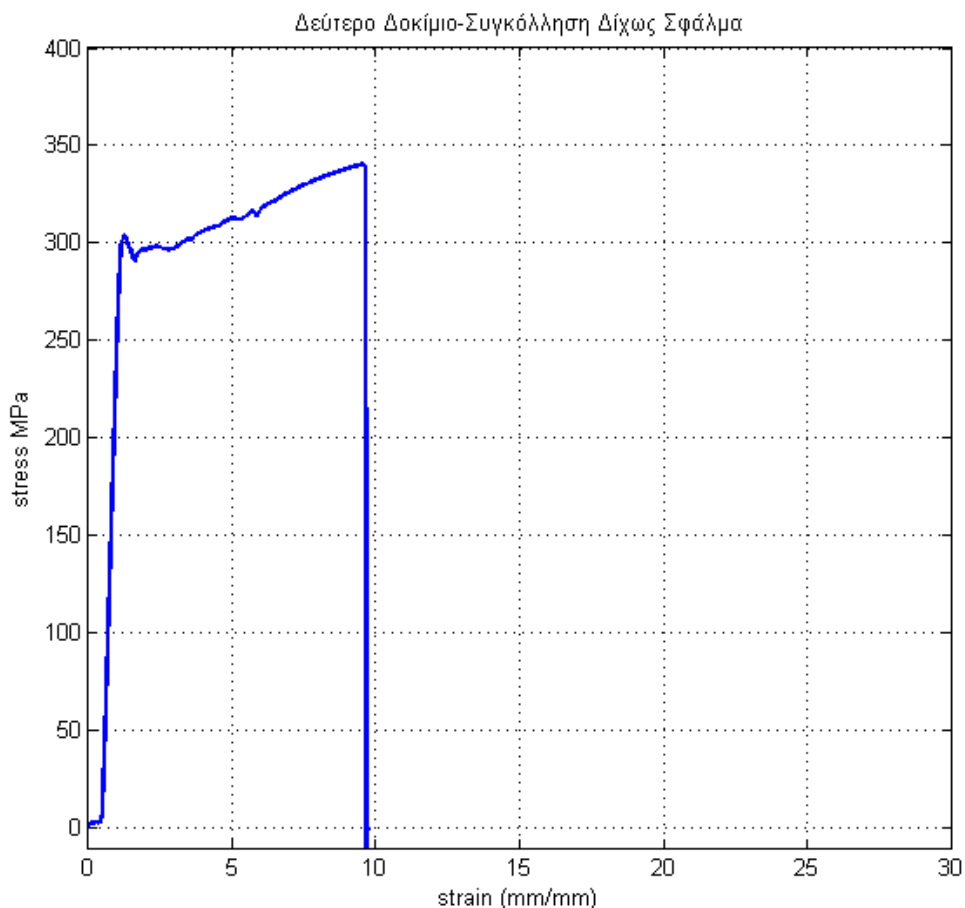
Εικόνα 4.26 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 1

Μέσω αυτής, είναι σε θέση να παρατηρηθεί ότι η αντοχή του δοκιμίου αυτού (Ultimate Tensile Strength-UTS), δηλαδή η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης, συμπίπτει με τη θεωρητική αντοχή του κατασκευαστικού άβαφου χάλυβα St37, η οποία ισούται με 37 kp/mm^2 ή 360 MPa περίπου, αντιστοίχως. Παρατηρείται ακόμη, ότι με την ανάπτυξη τάσεων υψηλότερης των 361.3 MPa , η οποία προκύπτει για παραμόρφωση 18.76% του αρχικού μήκους, το δοκίμιο αρχίζει να αστοχεί, το οποίο αντιστοιχεί στην κατακόρυφη πτώση της άνωθεν καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων. Η τιμή της τάσης θραύσης του δοκιμίου αυτού ισούται με 290.8 MPa και προκύπτει για παραμόρφωση περίπου ίση με το 25.4% του αρχικού μήκους. Από την άλλη μεριά, η τελική αστοχία του δοκιμίου αντιστοιχεί με το μηδενισμό της τιμής της αναπτυσσόμενης τάσης και προκύπτει για συνολική

παραμόρφωση 25.84% του αρχικού μήκους. Επιπροσθέτως, το άνω όριο διαρροής (Yield Strength) του υλικού, όπως προκύπτει μέσω του διαγράμματος αυτού ισούται με 318.5 MPa, ενώ το κάτω όριο διαρροής με 318.3 MPa. Ακόμη αξίζει να τονισθεί την ύπαρξη ταλάντωσης με την υπέρβαση του άνω ορίου διαρροής, κάτι το οποίο είχε τονισθεί και κατά την ανάλυση μιας θεωρητικής καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων για τον κατασκευαστικό χάλυβα St-37. Επομένως, το όριο ροής για το συγκεκριμένο δοκίμιο ισούται με τη μέση τιμή του άνω και κάτω ορίου διαρροής, άρα προκύπτει $R_e=318.4\text{MPa}$.

Δεύτερο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Ακολούθως παρατίθενται η προκύπτουσα, μέσω των ληφθέντων μετρήσεων, καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το δεύτερο κατά σειρά εξεταζόμενο δοκίμιο. Η καμπύλη αυτή, εξαιτίας του γεγονότος ότι η συγκόλληση του εν λόγω τεμαχίου, δε έφερε κάποιας μορφής ατέλεια, είναι σε θέση να διαδραματίσει το ρόλο του δοκιμίου αναφοράς, βάσει του οποίου θα συγκριθούν τα αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα οι δημιουργηθείσες καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των υπολοίπων συγκολλημένων δοκιμίων.

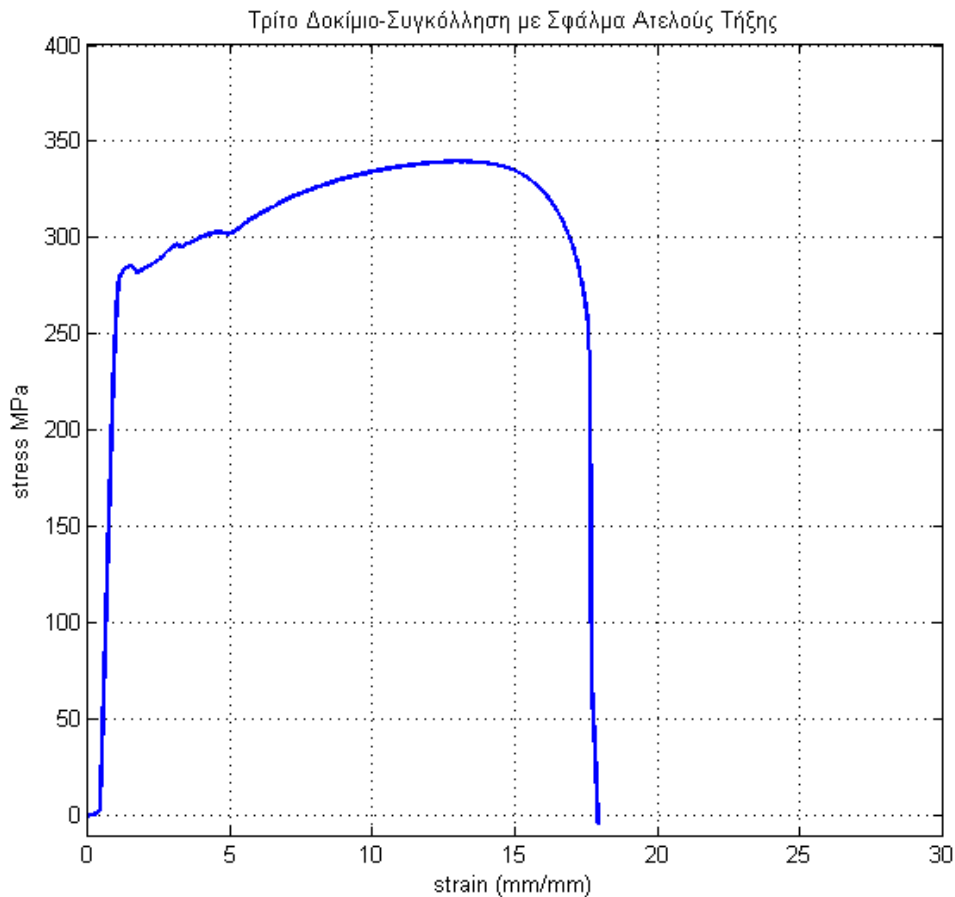


Εικόνα 4.27 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 2

Μέσω της άνωθεν καμπύλης, είναι σε θέση να παρατηρηθεί ότι σε σχέση με το πρώτο δοκίμιο, το δεύτερο κατά σειρά και ορθά συγκολλημένο δοκίμιο ήταν πιο ψαθυρό, κάτι το οποίο καταδεικνύεται μέσω της συνολικής του παραμόρφωσης μέχρι την τελική θραύση του, η οποία δεν υπερβαίνει το 10% του αρχικού μήκους συγκολλημένου δοκιμίου εφελκυσμού. Ακόμη, όπως φαίνεται, η άνωθεν καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων δεν εμφανίζει κάποιο τοπικό ακρότατο, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι στο δοκίμιο πριν την αστοχία του δε δημιουργήθηκε ο λεγόμενος λαιμός. Το γεγονός αυτό ήταν ορατό με γυμνό μάτι και τονίσθηκε και στην αρχική ανάλυση των θραυσμένων εξεταζομένων δοκιμίων. Επομένως η τιμή της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου αυτού ταυτίζεται με τη τιμή της τάσης θραύσεως, η οποία και ισούται με 340.3 MPa. Η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου αυτού, η οποία αντιστοιχεί και στην τάση θραύσης ήταν περίπου ίση με το 9.6% του αρχικού μήκους του δοκιμίου. Επιπροσθέτως η τιμή του άνω ορίου διαρροής ήταν ίση με 304.1 MPa, ενώ η αντίστοιχη του κάτω ορίου διαρροής 297.9 MPa. Τέλος όσον αφορά στην ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου και ειδικότερα στη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, παρατηρείται με μια πρώτη ματιά ότι είναι ίση με αυτή του πρώτου δοκιμίου, καθώς η κλίση της καμπύλης στην ελαστική περιοχή είναι ίδια.

Τρίτο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο καταστρεπτικός έλεγχος εφελκυσμού για το τρίτο κατά σειρά εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο έφερε σφάλμα ατελούς τήξης στη συγκολλητή σύνδεσή του. Μέσω του ελέγχου αυτού και τη λήψη των κατάλληλων μετρήσεων προέκυψε η κάτωθι καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο αυτό.



Εικόνα 4.28 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 3

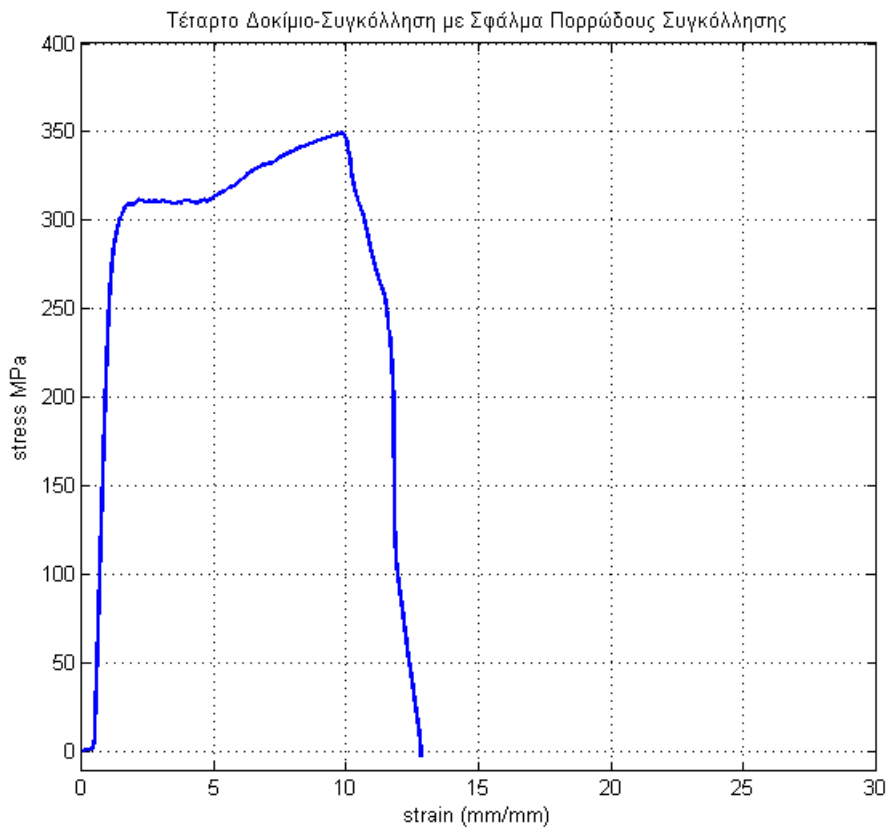
Από την άνωθεν δημιουργηθείσα καμπύλη, παρατηρείται ότι η μέγιστη αντοχή του συγκολλημένου τρίτου δοκιμίου δεν έχει μειωθεί σε σημαντικό βαθμό συγκρινόμενη με την τιμή στις μέγιστης αντοχής του δεύτερου δοκιμίου, το οποίο εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έφερε κάποιο σφάλμα, αποτελεί και το δοκίμιο αναφοράς για όλα τα συγκολλημένα δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή του δοκιμίου αυτού ισούται περίπου με 339.5MPa, η οποία μάλιστα αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με το 12.85% του αρχικού μήκους του δοκιμίου. Από την άλλη μεριά, η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου μέχρι την οριστική θραύση αυτού παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, κάτι το οποίο καθιστά το συγκεκριμένο εξεταζόμενο δοκίμιο ως πιο όλκιμο. Συγκεκριμένα η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου αυτού ισούται με το 17.59% του αρχικού μήκους και η αντίστοιχη τιμή της τάσης θραύσεως ισούται με 251.2MPa, ενώ του δεύτερου δοκιμίου αναφοράς ισούται με το 9.6% του αρχικού. Το γεγονός, ότι η τάση θραύσης δεν ταυτίζεται με την τιμή της μέγιστης αντοχής μαρτυρά αρχικά την ύπαρξη δημιουργίας «λαιμού» πριν την οριστική θραύση του δοκιμίου, κάτι το οποίο είναι δυνατόν να φανεί και μέσω μιας πρόχειρης παρατήρησης, και κατ' επέκταση ότι το

σημείο θραύσης του δοκιμίου ήταν εκτός της περιοχής της συγκόλλησης, παρατήρηση η οποία επισημάνθηκε και στην αρχική ανάλυση των δοκιμίων αυτών. Επιπροσθέτως παρατηρείται ότι η τιμή του άνω ορίου διαρροής είναι μικρότερη και συγκεκριμένα ίση με 285.9MPa, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι το τρίτο δοκίμιο διαρρέει και παραμορφώνεται πλαστικά πιο εύκολα, δηλαδή με την επιβολή μικρότερης τιμής τάσης, σε σχέση με το δεύτερο. Ακόμη η τιμή του κάτω ορίου διαρροής ισούται με 281.7MPa, ενώ όπως και στις δύο προηγούμενες καμπύλες είναι εμφανής, η ταλάντωση της καμπύλης για παραμόρφωση μεγαλύτερη της αντίστοιχης παραμόρφωσης του άνω ορίου διαρροής. Τέλος με μια πρώτη ματιά, όπως και προηγουμένως, είναι σε θέση να παρατηρηθεί ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας δεν έχει επηρεαστεί τόσο από την ύπαρξη της συγκόλλησης όσο και από τη δημιουργία ατελειών κατά τη δημιουργία αυτής.

Έτσι συνοψίζοντας, φαίνεται ότι η συγκόλληση αυτή παρόλη την ύπαρξη ατελούς τήξεως κατά τη δημιουργία αυτής, δεν επηρέασε την αντοχή του δοκιμίου αυτού σε σύγκριση με το συγκολλημένο δοκίμιο αναφοράς, δίχως μάλιστα να αποτελεί και την αιτία θραύσης του.

Τέταρτο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Εν συνεχεία, για το τέταρτο εξεταζόμενο συγκολλημένο δοκίμιο και φέρων εκούσια ατέλεια πορώδους συγκόλλησης, η καμπύλη, η οποία προέκυψε μέσω της του καταστρεπτικού έλεγχου απεικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 4.29 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 4

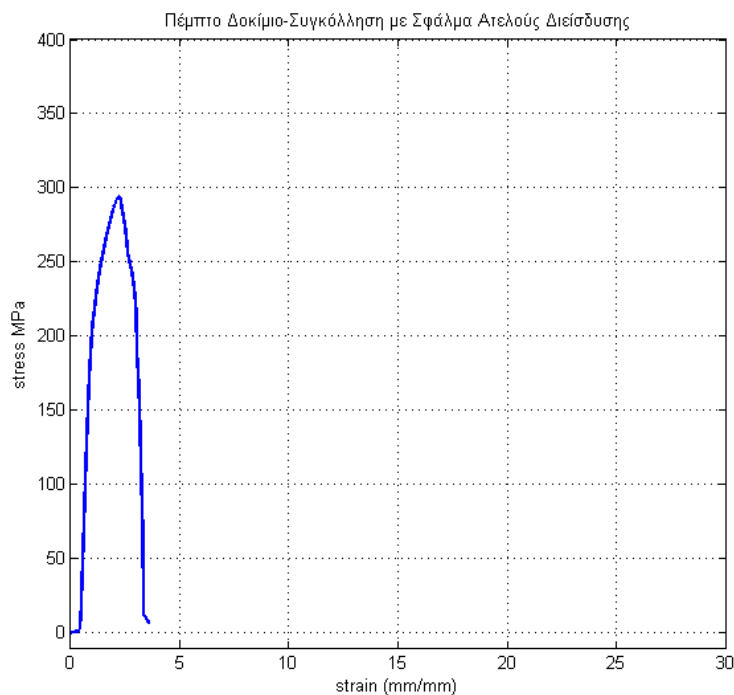
Για το άνωθεν δοκίμιο και συγκεκριμένα μέσω της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις. Αρχικά παρατηρείται ότι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή αυτή του τρίτου εξεταζόμενου δοκιμίου, η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική μεταβολή σε σχέση με την αντίστοιχη του συγκολλημένου δοκιμίου αναφοράς και δεύτερο κατά σειρά εξεταζόμενο δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της αντοχής του δοκιμίου ισούται με 349.1MPa και αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με το 9.9% του αρχικού μήκους του δοκιμίου, δηλαδή η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου αυτού είναι περίπου ίση με την αντίστοιχη του δοκιμίου αναφοράς. Όπως φάνηκε και στην οπτική ανάλυση, η οποία περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο, το δοκίμιο αστόχησε μερικώς αρχικά, μάλλον στην περιοχή δημιουργίας των πόρων και ακολούθησε η δημιουργία λαιμού στο υπόλοιπο τμήμα παραπλήσια της συγκόλλησης. Επομένως η τάση θραύσης δεν ταυτίζεται με αυτή της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου ήταν ίση με το 11.7% του αρχικού μήκους αυτού και αντιστοιχεί σε τάση ίση με 251.2MPa. Το γεγονός αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ταυτίζεται με τη δημιουργία «λαιμού» στο ελεγχθέν δοκίμιο πριν από την οριστική θραύση του. Έτσι, όπως επισημάνθηκε και στην αρχική ανάλυση των κατεστραμμένων δοκιμίων εφελκυσμού, το τέταρτο δοκίμιο, το οποίο έφερε πορώδη

συγκόλληση, αστόχησε στη περιοχή παρακείμενα της συγκολλητής σύνδεσης. Επιπροσθέτως, η προκύπτουσα τιμή του άνω ορίου διαρροής ισούται με 311.6MPa και αξίζει να τονισθεί ότι σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του δοκιμίου αναφοράς δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη διαφορά. Αντίστοιχα η τιμή του κάτω ορίου διαρροής είναι ίση με 310.1MPa, ενώ αυτό το οποίο αξίζει ακόμη να τονισθεί είναι το γεγονός ότι η ταλάντωση στο συγκεκριμένο ελεγχθέν δοκίμιο δεν είναι τόσο εμφανής όσο στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις δοκιμών. Τέλος, όπως φαίνεται η ελαστικότητα του δοκιμίου αυτού δε φαίνεται να έχει διαφοροποιηθεί αισθητά είτε λόγω τη δημιουργία συγκόλλησης είτε εξαιτίας την ύπαρξη πόρων στη περιοχή της σύνδεσης αυτής.

Συνοψίζοντας, με μια πρόχειρη εκτίμηση της άνωθεν ανάλυσης, παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο και η ύπαρξη πόρων στο εσωτερικό της συγκολλητής του σύνδεσης δεν επηρέασε την αντοχή αυτού και την εν γένει μηχανική του συμπεριφορά συγκρινόμενο με το αντίστοιχο δοκίμιο αναφοράς, του οποίου η συγκόλληση δεν έφερε κάποιου είδους ατέλεια.

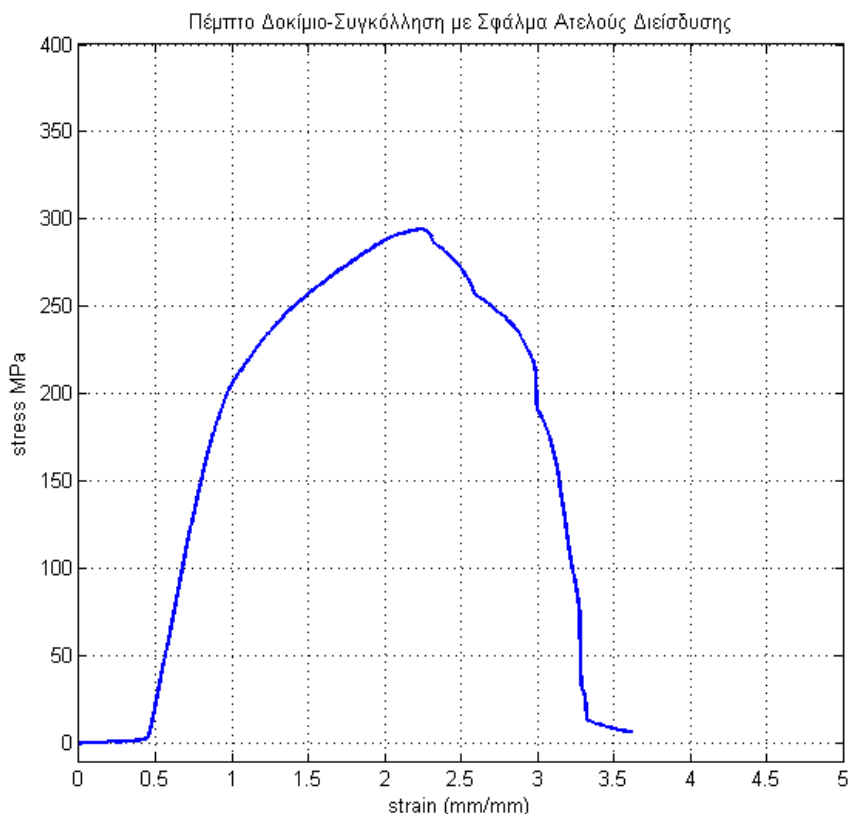
Πέμπτο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Επόμενο εξεταζόμενο και πέμπτο κατά αριθμόν δοκίμιο ήταν αυτό, το οποίο στη συγκολλητή του σύνδεση έφερε σφάλμα ατελούς διείσδυσης. Η δημιουργηθείσα καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το εν λόγω εξεταζόμενο δοκίμιο παρουσιάζεται ακολούθως.



Εικόνα 4.30 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 5

Όπως φαίνεται και στην άνωθεν καμπύλη, η εν γένει μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού έχει επηρεαστεί σε σημαντικό βαθμό, καθώς τόσο η μέγιστη αντοχή όσο και η συνολική παραμόρφωση πριν την οριστική θραύση του είναι αρκετά διαφοροποιημένες σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για την καλύτερη εποπτεία του διαγράμματος αυτού, κρίθηκε σκόπιμο η μεταβολή του πεδίου τιμών του οριζόντιου άξονα, δηλαδή αυτού των παραμορφώσεων. Επομένως, η νέα καμπύλη απεικονίζεται κάτωθι.



Εικόνα 4.31 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 5 (μεγέθυνση)

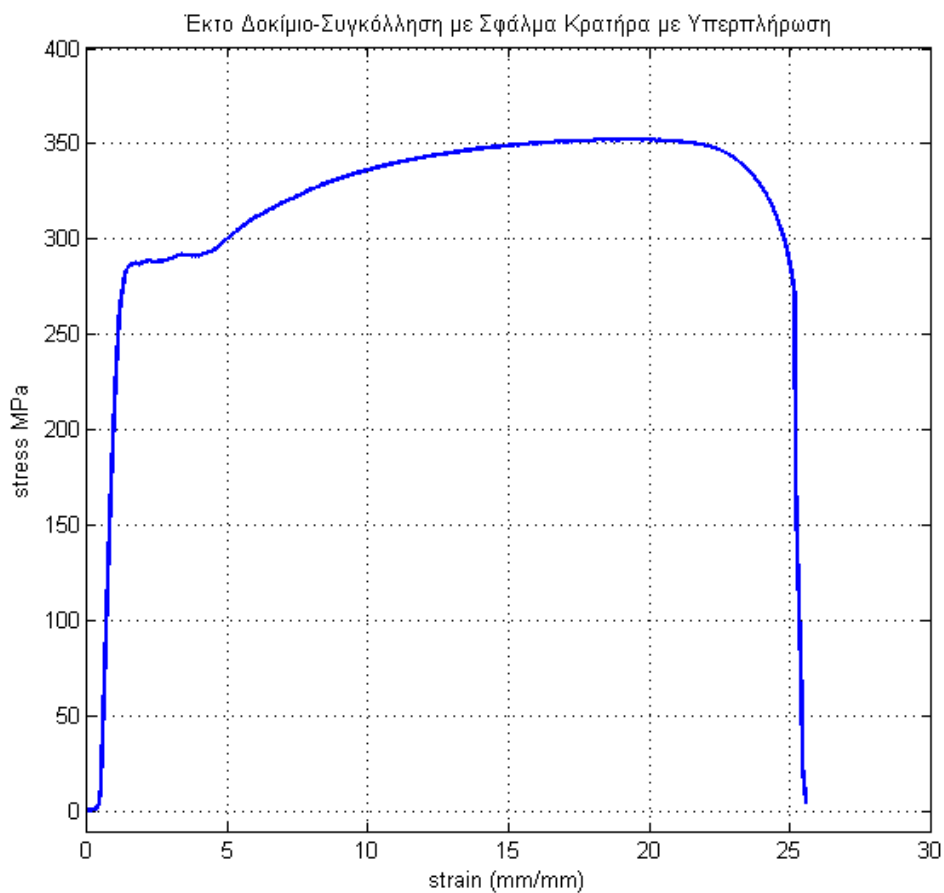
Καταρχήν, παρατηρείται ότι, όπως και στην περίπτωση του δευτέρου δοκιμίου, η τιμή της τάσης μέγιστης αντοχής ταυτίζεται με την αντίστοιχη τιμή τάσεως θραύσης του υλικού. Το γεγονός αυτό καταδεικνύεται και μέσω της μη δημιουργίας λαιμού στο θραυσμένο δοκίμιο με το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της μέγιστης αντοχής ισούται με 294.1 MPa και ισοδυναμεί για συνολική παραμόρφωση ίση με το 2.5% του αρχικού μήκους του δοκιμίου. Επιπροσθέτως, όπως και η αντοχή του τεμαχίου, έτσι και η τιμή του άνω ορίου διαρροής έχει διαφοροποιηθεί αρκετά, με την τιμή αυτού να ισούται με 201.2 MPa και αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με το 0.98% του αρχικού μήκους. Ακόμη αξίζει να τονισθεί η

απουσία ταλάντωσης και επομένως και χαρακτηριστική θέση και τιμή του κάτω ορίου διαρροής. Ωστόσο, αναμένεται κάτι το ποίο θα αναλυθεί σε επόμενο εδάφιο, η ελαστικότητα του δοκιμίου αυτού να μην έχει διαφοροποιηθεί σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια, παρά μόνο η τιμή της τάσης διαρροής και της εισόδου στην πλαστική περιοχή.

Έτσι συνοψίζοντας, συμπεραίνεται ότι η προκύπτουσα συγκολλητή σύνδεση με την ύπαρξη σφάλματος ατελούς διείσδυσης, έχει επηρεάσει σημαντικά τόσο την αντοχή όσο και την εν γένει μηχανική συμπεριφορά του χαλύβδινου συγκολλημένου δοκιμίου εφελκυσμού καθιστώντας το λιγότερο ανθεκτικό και ικανό για παραλαβή φορτίσεων σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο αναφοράς.

Έκτο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Εν συνεχεία, το έκτο δοκίμιο κατά σειρά, το οποίο υποβλήθηκε σε καταστρεπτικό έλεγχο δοκιμής εφελκυσμού έφερε σφάλμα υπερπλήρωσης με ταυτόχρονη δημιουργία κρατήρα, όπως φαίνεται και στις ληφθείσες εικόνες του συγκεκριμένου δοκιμίου, με το πέρας του ελέγχου. Η προκύπτουσα καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, η οποία προέκυψε μέσω των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τον έλεγχο του συγκολλημένου χαλύβδινου τεμαχίου παρουσιάζεται ακολούθως.



Εικόνα 4.32 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 6

Οι παρατηρήσεις, οι οποίες αξίζει να επισημανθούν και να ληφθούν μέσω της καμπύλης αυτής είναι οι εξής. Καταρχήν παρατηρείται ότι η μορφή της καμπύλης αυτής ομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό με την αντίστοιχη καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του ατόφιου χαλύβδινου δοκιμίου (πρώτο εξεταζόμενο δοκίμιο). Πιο συγκεκριμένα είναι παρατηρείται το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης, το οποίο αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή και συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού, μέχρι την ανάπτυξη τάσης ίσης του άνω ορίου διαρροής. Ακολούθως παρατηρείται μια ελαφρά ταλάντωση μέχρι το κάτω όριο διαρροής και τέλος την είσοδο στην πλαστική περιοχή μέχρι την οριστική θραύση του. Όπως και στο τρίτο υπό αριθμό εξεταζόμενο και φέρον σφάλμα ατελούς τήξης, η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου αυτού είναι διάφορη της τάσεως θραύσης, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι στο τεμάχιο πριν την αστοχία του δημιουργήθηκε λαιμός, το οποίο όπως αναφέρθηκε και άνωθεν μαρτυρά ότι το δοκίμιο αστόχησε σε περιοχή εκτός της συγκολλητικής σύνδεσης. Μάλιστα αυτό το οποίο αξίζει να τονιστεί συγκρινόμενα τα δύο δοκίμια (τρίτο και έκτο), τα οποία αστόχησαν σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση, αποτελεί το γεγονός ότι η μέγιστη αντοχή αυτών ήταν παραπλήσια, ενώ στο έκτο δοκίμιο η μέγιστη

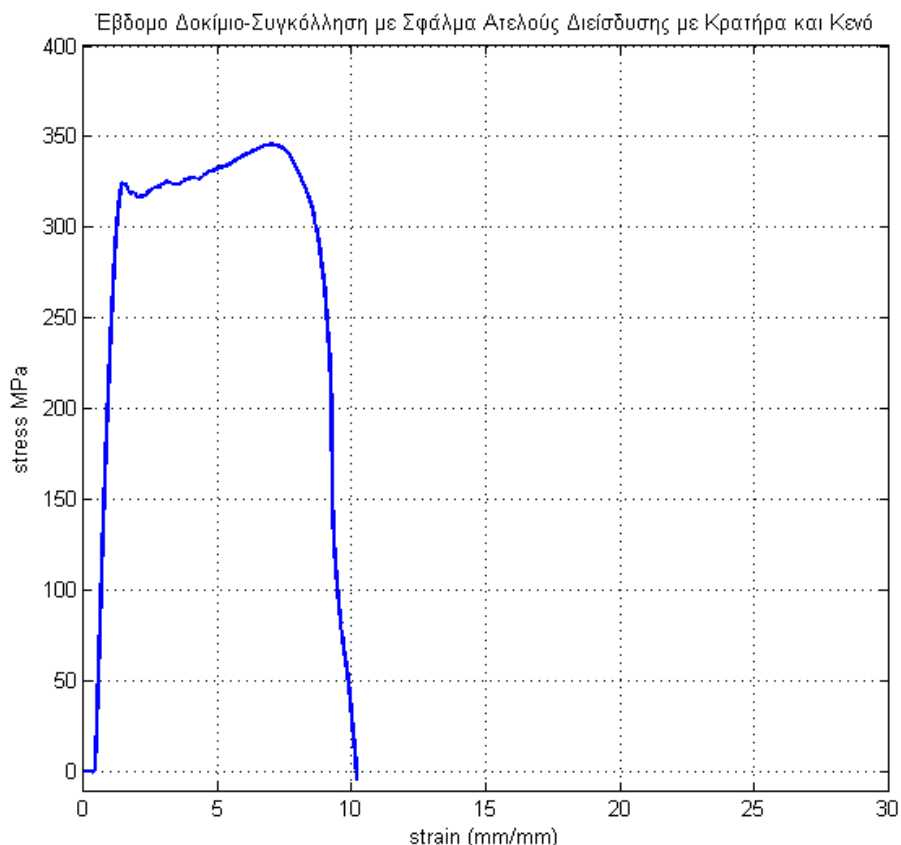
παραμόρφωση πριν την οριστική του θραύση ήταν αρκετά μεγαλύτερη. Όπως θα αναφερθεί και κάτωθι ασφαλή συμπεράσματα για τις αιτίες του γεγονότος αυτού δεν είναι σε θέση να εξαχθούν εξαιτίας του γεγονότος ότι απαιτείται μεγαλύτερο δείγμα εξεταζόμενων δοκιμίων. Ωστόσο είναι δυνατόν να υποτεθεί ότι η ύπαρξη μεγαλύτερης ποσότητας υλικού συγκόλλησης, διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο έτσι ώστε τόσο η μέγιστη αντοχή αυτού όσο και η συνολική του παραμόρφωση να είναι μεγαλύτερη.

Από την άνωθεν καμπύλη εξάγεται ότι η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου αυτού ισούται με 352.0 MPa και αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με το 18.74% του αρχικού μήκους του χαλύβδινου τεμαχίου. Επιπροσθέτως το άνω όριο διαρροής ισούται με 287.0 MPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή του κάτω ορίου διαρροής λόγω της ταλάντωσης μικρού πλάτους είναι σχεδόν ίση με αυτή του άνω. Ακόμη η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου μέχρι το σημείο της οριστικής του θραύσης ήταν ίση με το 25.20% των αρχικών διαστάσεων, και επήλθε για τάση θραύσης ίση με 267.0 MPa.

Συνοψίζοντας, ένα αρχικό συμπέρασμα το οποίο είναι σε θέση να εξαχθεί, είναι το γεγονός ότι η πρόσδοση συγκολλητού υλικού ποσότητας μεγαλύτερης του επιτρεπτού είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του δοκιμίου σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο αναφοράς, επηρεάζοντας σημαντικά της μηχανικές του ιδιότητες.

Έβδομο Εξεταζόμενο Δοκίμιο

Η ανάλυση και η εξέταση των δοκιμίων εφελκυσμού ολοκληρώθηκε με τη διενέργεια καταστρεπτικού ελέγχου στο έβδομο κατά σειρά τεμάχιο, το οποίο έφερε ένα μείγμα εκουσιών σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα η δημιουργηθείσα συγκόλληση εμφάνιζε σφάλμα ατελούς διείσδυσης με ταυτόχρονη ύπαρξη κρατήρα και κενού στη ραφή της συγκόλλησης. Έτσι μέσω των ληφθέντων μετρήσεων προέκυψε η κάτωθι καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο συγκολλημένο δοκίμιο.



Εικόνα 4.33 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων δοκίμιο 7

Με μια πρώτη ματιά, δεν είναι δυνατόν να διαφανεί ότι η θέση αστοχία του εν λόγω δοκιμίου ήταν στην περιοχή της συγκόλλησης, κάτι το οποίο απεφάνθη μέσω οπτικής ανάλυσης του ελεγχθέντος δοκιμίου, η οποία όπως περιγράφηκε ανωτέρω έδειξε ότι η αστοχία του δοκιμίου ξεκίνησε από την περιοχή του διακένου της συγκόλλησης και συνεχίστηκε στη θραύση του παρακείμενου υλικού και όχι της συγκόλλησης. Επομένως παρόλο που η αστοχία του δοκιμίου λαμβάνει χώρα στη περιοχή της συγκόλλησης, εξαιτίας του γεγονότος ότι το δοκίμιο αστοχεί παραπλήσια αυτής και όχι στη ψαθυρή ραφή, παρατηρείται η εμφάνιση του χαρακτηριστικού «λαιμού» με αποτέλεσμα και η μορφή της προκύπτουσας καμπύλης να είναι παρόμοια με αυτή του τρίτου και έκτου δοκιμίου αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου ήταν διάφορη της τιμής της τάσης θραύσης, και επομένως και της συνολικής παραμόρφωσης. Η μέγιστη αντοχή του συγκεκριμένου δοκιμίου ήταν 346.1 MPa και αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με το 6.99% του αρχικού μήκους, ενώ η τιμή της τάσης θραύσης ισούται με 207.9 MPa και αντιστοιχεί σε συνολική παραμόρφωση ίση με το 9.22%. Ακόμη η τιμή του άνω ορίου διαρροής είναι ίση με 324.6 MPa και του κάτω ορίου 317.7 MPa αντιστοίχως.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται από τις άνωθεν μετρήσεις ότι οι χαρακτηριστικές ληφθείσες τιμές ήταν σχεδόν ίσες με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές του δοκιμίου αναφοράς, τόσο όσον αφορά στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό του δοκιμίου όσο και στη συνολική παραμόρφωση αυτού. Η ειδοποιός διαφορά των δύο δοκιμίων αποτελεί το γεγονός ότι το δεύτερο δοκίμιο αστόχησε ακριβώς στη ραφή της συγκόλλησης, με αποτέλεσμα την μη ύπαρξη «λαιμού», ενώ το έβδομο δοκίμιο και φέρον εκούσιες ατέλειες, παραπλήσια αυτής με αποτέλεσμα η μέγιστη αντοχή να μην ταυτίζεται με την τάση θραύσης, η τιμή της οποίας για το εν λόγω δοκίμιο ήταν αναπόφευκτα μικρότερη από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Άρα, η ύπαρξη των συγκεκριμένων ατελειών επηρέασε τη μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου και δη την ολκιμότητα αυτού, δίχως όμως να διαφοροποιεί σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του.

4.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

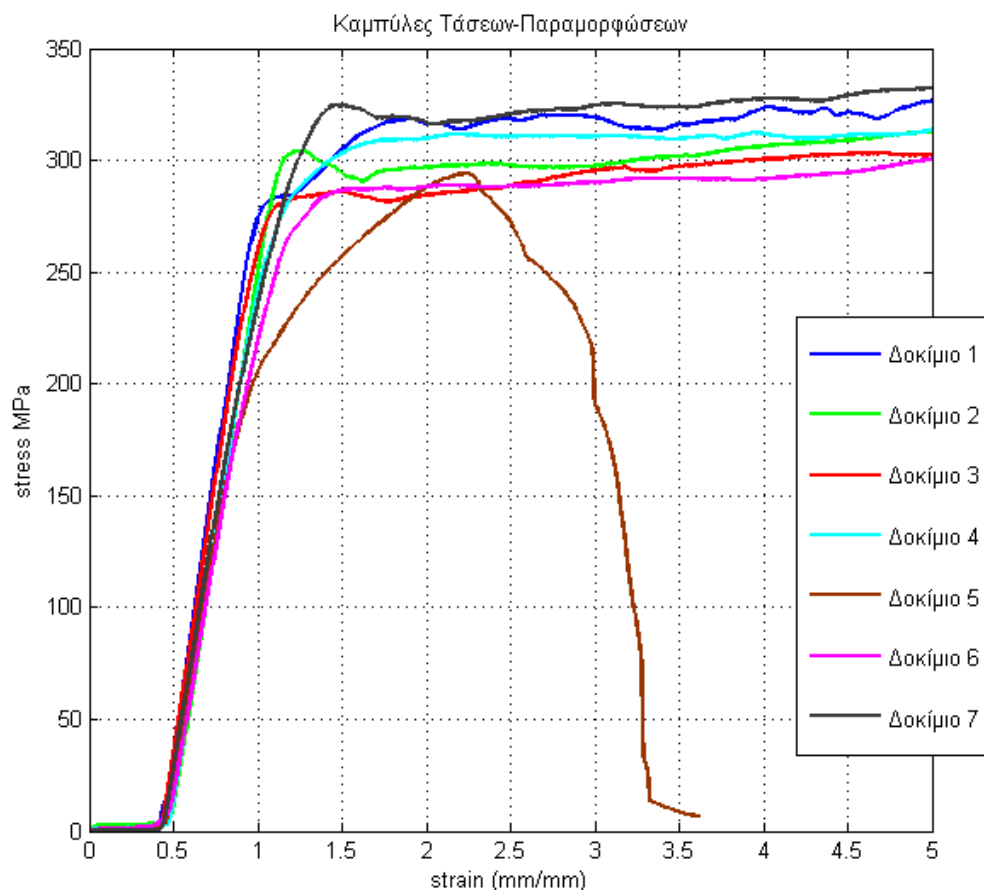
4.5.1 Εισαγωγή

Για την αποτελεσματικότερη ανάλυση και εποπτεία των αποτελεσμάτων και της επίδρασης των ατελειών συγκόλλησης, τα οποία περιγράφηκαν ανωτέρων και ελήφθησαν μέσω του καταστρεπτικού ελέγχου εφελκυσμού, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των χαρακτηριστικών τιμών αυτών. Πιο συγκεκριμένα, θα ελεγχθεί και θα συγκριθεί η αρχικά ελαστικότητα αυτών τόσο μεταξύ των συγκολλημένων δοκιμίων όσο και με τα δοκίμια αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί στην κλίση της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή και μέχρι την τάση διαρροής. Στη συνέχεια θα εκτιμηθεί η δυσθραυστότητα αυτών, η οποία υπολογίζεται από το εμβαδόν του χωρίου που περικλείεται κάτωθι της καμπύλης και τέλος η ολκιμότητά τους, η οποία ταυτίζεται με τη συνολική παραμόρφωση του εκάστοτε δοκιμίου. Ολοκληρώνοντας την ανάλυση θα δημιουργηθούν σχετικοί πίνακες, στους οποίους θα καταγράφονται κατά αύξουσα σειρά τιμής του άνω ορίου διαρροής των εξεταζομένων δοκιμίων.

4.5.2 Σύγκριση Ελαστικότητας Δοκιμίων

Πρώτο σκέλος της σύγκρισης των άνωθεν αποτελεσμάτων και κατανόησης του βαθμού επίδρασης της ατέλειας της εκάστοτε συγκόλλησης στην εν γένει μηχανική συμπεριφορά των εξεταζομένων δοκιμίων, αποτελεί η μελέτη της επιρροής της ελαστικότητας σε κάθε δοκίμιο. Για τη διενέργεια της παρούσης ανάλυσης, τα προς εξέταση δοκίμια και συγκεκριμένα η δημιουργηθείσες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες των δοκιμίων αναφοράς, τόσο του συγκολλημένου όσο και του ατόφιου δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, το τμήμα της εκάστοτε καμπύλης, το οποίο κρίνεται ως απαραίτητο να εξετασθεί είναι το ευθύγραμμο τμήμα αυτής, το οποίο καταλήγει στη τάση διαρροής.

Ακολουθως απεικονίζεται το δημιουργθέν διάγραμμα, το οποίο αποτελείται από τις καμπύλες τάσεων-παραμόρφωσης για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο. Για καλύτερη εποπτεία των δημιουργηθέντων καμπύλων θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει εστίαση στο τμήμα της καμπύλης, στο οποίο εστιάζεται το ενδιαφέρον της παρούσης ανάλυσης, δηλαδή στην ελαστική περιοχή. Για αυτό το λόγο επομένως, το ακόλουθο διάγραμμα περιλαμβάνει μονάχα την ελαστική περιοχή.



Εικόνα 4.34 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων τάσεων παραμορφώσεων εξεταζομένων δοκιμίων

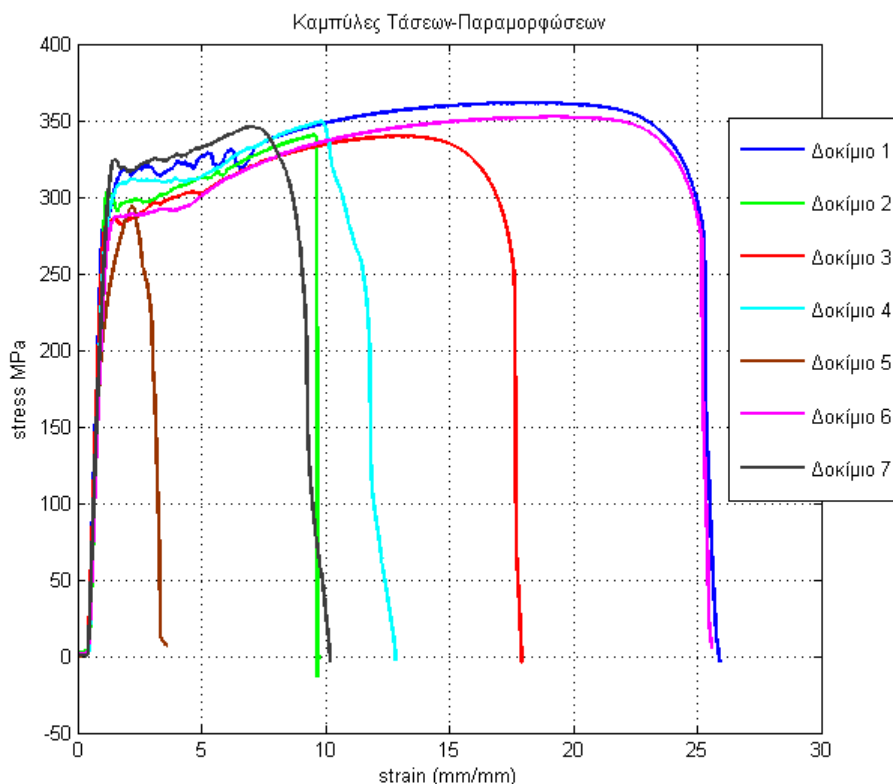
Μέσω της άνωθεν καμπύλης γίνεται αντιληπτό ότι όλες οι καμπύλες μέχρι το σημείο διαρροής των εκάστοτε αυτών και συγκεκριμένα στην ελαστική τους περιοχή σχεδόν συμπίπτουν. Πρακτικά αυτό καταδεικνύει ότι όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια εμφάνιζαν την ίδια συμπεριφορά ως προς την ελαστικότητά τους, η τιμή της οποίας, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας ήταν περίπου ίσο με 360 MPa, δηλαδή ίσο με αυτό του κατασκευαστικού χάλυβα St 37.

Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς και τα επτά εξεταζόμενα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό (St 37) και συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος

ότι η συγκόλληση δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού, αλλά μόνο τη μηχανική του συμπεριφορά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ελαστική συμπεριφορά των δοκιμών δεν επηρεάστηκε τόσο από την ύπαρξη της συγκόλλησης όσο και από την ύπαρξη ατελειών και σφαλμάτων κατά τη δημιουργία αυτής.

4.5.3 Σύγκριση Δυσθραυστότητας Δοκιμίων

Στη συνέχεια θα λάβει χώρα ο έλεγχος και η ανάλυση της δυσθραυστότητας των εξεταζομένων συγκολλημένων δοκιμών εφελκυσμού μέσω της σύγκρισης μεταξύ αυτών. Με τον όρο δυσθραυστότητα ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση μοναδιαίου όγκου υλικού, και μετράται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως με το εμβαδόν που περικλύεται κάτω από την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων. Επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν του εκάστοτε χωρίου τόσο μεγαλύτερη είναι και η δυσθραυστότητα του αντίστοιχου δοκιμίου.



Εικόνα 4.35 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων δυσθραυστότητας εξεταζομένων δοκιμίων

Έτσι λοιπόν, για τη σύγκριση αυτής μεταξύ των δοκιμών κρίνεται ως απαραίτητη η κατασκευή του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων και για τα επτά εξεταζόμενα δοκίμια. Το προκύπτον διάγραμμα, λοιπόν απεικονίζεται στο σχήμα 4.35.

Στο άνωθεν διάγραμμα, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η επίδραση της εκάστοτε συγκόλλησης στη δυσθραυστότητα του αντίστοιχου χαλύβδινου δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας ως δοκίμιο αναφοράς το πρώτο δοκίμιο, το οποίο δεν έφερε συγκόλληση και η καμπύλη αυτού απεικονίζεται με μπλε χρώμα, και συγκρινόμενο με το δεύτερο κατά σειρά δοκίμιο αναφοράς των συγκολλημένων δοκιμίων, η καμπύλη του οποίου αναπαρίσταται με πράσινο χρώμα, παρατηρείται ότι η δυσθραυστότητα του συγκολλημένου δοκιμίου έχει επηρεαστεί σε σημαντικό βαθμό, καθώς είναι κατά πολύ μικρότερη. Από την άλλη μεριά, η δυσθραυστότητα του έκτου δοκιμίου, το οποίο έφερε σφάλμα υπερπλήρωσης με κρατήρα, παρατηρείται ότι είναι σχεδόν ίση με του ατόφιου δοκιμίου, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι δεν έχει επηρεαστεί ούτε λόγω της ύπαρξης σφάλματος ούτε λόγω της συγκολλητής σύνδεσης. Ακόμη, από τα επτά εξεταζόμενα δοκίμια, τη λιγότερη ενέργεια απαιτούμενη ενέργεια θραύσης μοναδιαίου όγκου υλικού υη χρειάζεται το πέμπτο εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο έφερε σφάλμα ατελούς διείδυσης και όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η ατέλεια αυτή έχει επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τις εν γένει μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου αυτού.

Έτσι συνοψίζοντας και κατατάσσοντας τα δοκίμια κατά αύξουσα σειρά της δυσθραυστότητας αυτών προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

#	Αριθμός Δοκιμίου
1	Δοκίμιο 5 (Ατελής Διείδυση)
2	Δοκίμιο 7 (Ατελής Διείδυση, Κρατήρας, Κενό)
3	Δοκίμιο 2 (Τέλεια Συγκόλληση και Λείανση)
4	Δοκίμιο 4 (Πορώδης Συγκόλληση)
5	Δοκίμιο 3 (Ατελής Τήξη)
6	Δοκίμιο 6 (Υπερπλήρωση με Κρατήρα)
7	Δοκίμιο 1 (Ατόφιο)

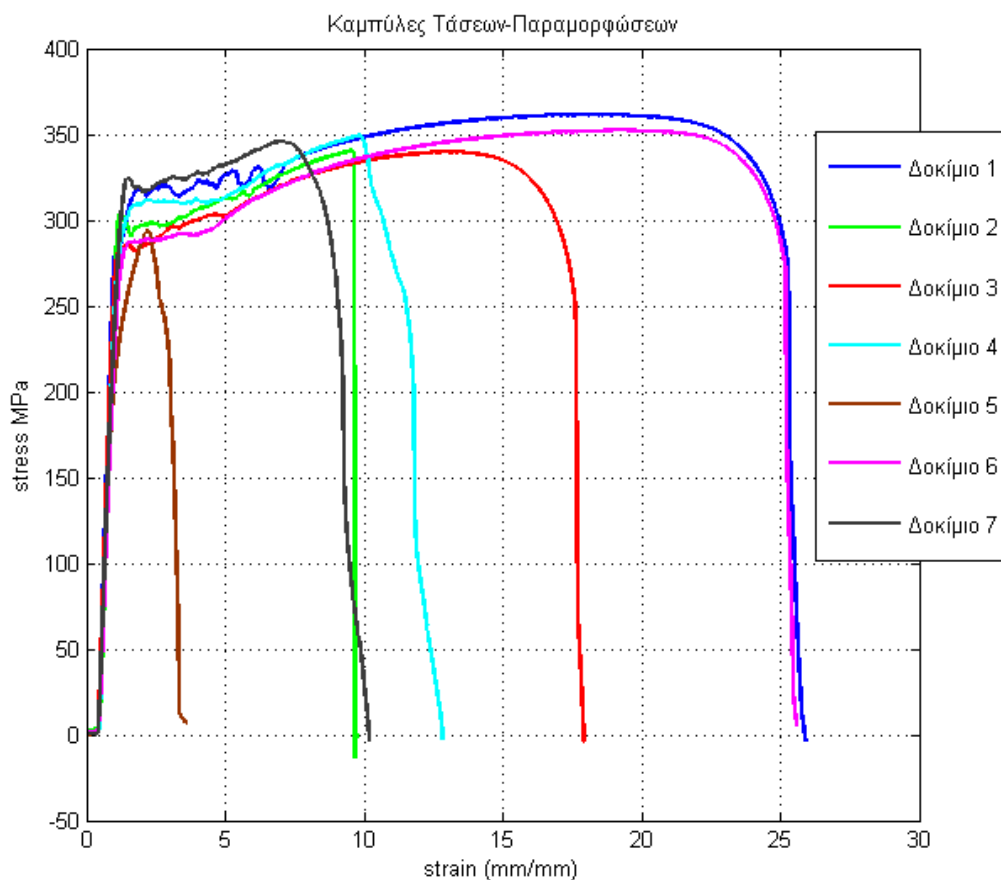
Πίνακας 4.4 Κατάταξη δοκιμών κατά αύξουσα σειρά δυσθραυστότητας

Έτσι, παρατηρείται ότι η ατέλεια, η οποία είναι σε θέση να επηρεάσει και να μειώσει τη δυσθραυστότητα ενός συγκολλημένου δοκιμίου είναι αυτή της ατελούς διείδυσης του συγκολλητού υλικού. Βέβαια, πρέπει να τονισθεί ότι σημαντικό αλλά και

πρωτεύοντα ρόλο διαδραματίζει η έκταση της εκάστοτε ατέλειας, γεγονός το οποίο καταδεικνύεται από την έντονη διαφορά όσον αφορά τη δυσθραυστότητα των δοκιμίων 5 και 7, όπου στο μεν πρώτο εξ αυτών η έκταση της ατέλειας αυτής είναι σαφώς μεγαλύτερη.

4.5.4 Σύγκριση Ολκιμότητας Δοκιμίων

Τελευταίο στάδιο της παρούσης ανάλυσης αποτελεί η σύγκριση της ολκιμότητας των εξεταζομένων δοκιμίων εφελκυσμού. Με τον όρο ολκιμότητα ενός δοκιμίου καλείται η συνολική παραμόρφωση, την οποία είναι σε θέση να δεχθεί ένα δοκίμιο μέχρι την οριστική του θραύση, δηλαδή αποτελεί την παραμόρφωση θραύσης. Όπως και προηγουμένως κατά την ανάλυση της δυσθραυστότητας, απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματικότερη εποπτεία και μελέτη των αποτελεσμάτων αποτελεί η δημιουργία του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για τα επτά εξεταζόμενα δοκίμια. Το συγκεκριμένο διάγραμμα απεικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 4.36 Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπύλων ολκιμότητας εξεταζομένων δοκιμίων

Μέσω του άνωθεν διαγράμματος και συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων οι οποίες ελήφθησαν και περιγράφηκαν σε προηγούμενο εδάφιο προκύπτει η κάτωθι διάταξη των δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά ολκιμότητας. Στη διάταξη αυτή παρατηρείται ότι τη μέγιστη ολκιμότητα από τα συγκολλημένα δοκίμια εμφανίζει το έκτο δοκίμιο, το οποίο φέρει εκούσιο σφάλμα υπερπλήρωσης συγκολλητού υλικού με ταυτόχρονη ύπαρξη κρατήρα στη ραφή συγκόλλησης. Από την άλλη μεριά πιο ψαθυρό δοκίμιο από τα εξεταζόμενα χαρακτηρίζεται το πέμπτο δοκίμιο, το οποίο έφερε σφάλμα ατελούς διείδυσης.

#	Αριθμός Δοκιμίου	Ολκιμότητα (%)
1	Δοκίμιο 5 (Ατελής Διείδυση)	25.4
2	Δοκίμιο 7 (Ατελής Διείδυση, Κρατήρας, Κενό)	9.6
3	Δοκίμιο 2 (Τέλεια Συγκόλληση και Λείανση)	17.6
4	Δοκίμιο 4 (Πορώδης Συγκόλληση)	11.7
5	Δοκίμιο 3 (Ατελής Τήξη)	2.5
6	Δοκίμιο 6 (Υπερπλήρωση με Κρατήρα)	25.2
7	Δοκίμιο 1 (Ατόφιο)	9.2

Πίνακας 4.5 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά ολκιμότητας

4.5.5 Σύγκριση Αντοχής Δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τιμή η οποία έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και χρήζει μεγαλύτερης προσοχής αποτελεί αυτή του άνω ορίου διαρροής των εξεταζομένων δοκιμίων εφελκυσμού. Το άνω όριο διαρροής αντιστοιχεί σε εκείνη τη τιμή εφελκυστικής τάσης, κατά την οποία το δοκίμιο εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, έχοντας πλέον αποκτήσει μόνιμες παραμορφώσεις, οι οποίες έχουν επηρεάσει την αντοχή του και τη μηχανική του συμπεριφορά ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία η δοκιμή σταματήσει και ξαναρχίσει εκ νέου. Το δοκίμιο μάλιστα είναι σε θέση να καταπονηθεί εκ νέου μέχρι η τιμή των αναπτυσσομένων τάσεων να γίνει ίση με αυτή της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού, κατά την οποία το δοκίμιο αρχίζει να θραύεται, είτε όλκιμα με τη δημιουργία του «λαιμού θραύσεως» είτε ψαθυρά, γεγονός το οποίο στην παρούσα ανάλυση λαμβάνει χώρα στις περιπτώσεις κατά τις οποίες τα δοκίμια έχουν αστοχήσει στη ραφή της συγκόλλησης. Έτσι συγκρίνοντας τις ληφθείσες τιμές για το άνω όριο διαρροής και τη μέγιστη αντοχή του εκάστοτε δοκιμίου προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες, στους τα δοκίμια έχουν διαταχθεί κατά αύξουσα σειρά τιμής τάσης.

#	Αριθμός Δοκιμίου	Άνω Όριο Διαρροής (MPa)
1	Δοκίμιο 5 (Ατελής Διείσδυση)	201.2
2	Δοκίμιο 3 (Ατελής Τήξη)	285.9
3	Δοκίμιο 6 (Υπερπλήρωση με Κρατήρα)	287.0
4	Δοκίμιο 2 (Τέλεια Συγκόλληση και Λείανση)	304.1
5	Δοκίμιο 4 (Πορώδης Συγκόλληση)	311.6
6	Δοκίμιο 1 (Ατόφιο)	318.5
7	Δοκίμιο 7 (Ατελής Διείσδυση, Κρατήρας, Κενό)	324.6

Πίνακας 4.6 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά άνω ορίου διαρροής

#	Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη Αντοχή (MPa)
1	Δοκίμιο 5 (Ατελής Διείσδυση)	294.1
2	Δοκίμιο 3 (Ατελής Τήξη)	339.5
3	Δοκίμιο 2 (Τέλεια Συγκόλληση και Λείανση)	340.3
4	Δοκίμιο 7 (Ατελής Διείσδυση, Κρατήρας, Κενό)	346.1
5	Δοκίμιο 4 (Πορώδης Συγκόλληση)	349.1
6	Δοκίμιο 6 (Υπερπλήρωση με Κρατήρα)	352.0
7	Δοκίμιο 1 (Ατόφιο)	361.3

Πίνακας 4.7 Κατάταξη δοκιμίων κατά αύξουσα σειρά τιμής μέγιστης αντοχής

Από τους άνωθεν πίνακες γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή του άνω ορίου διαρροής δεν είναι ανάλογη με αυτή της μέγιστης αντοχής ενός δοκιμίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των σφαλμάτων στην εκάστοτε συγκόλληση, τα οποία δυσχεραίνουν και οδηγούν στην εξαγωγή μη ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά τόσο στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων συγκολλημένων δοκιμίων που φέρουν αυτού του είδους ατέλειες, όσο και στο βαθμό επίδρασης και τη σύγκριση

μεταξύ αυτών που δύναται να επιφέρει η εκάστοτε ατέλεια. Έτσι παρατηρείται λόγω χάριν το ατόφιο, δίχως συγκόλληση δοκίμιο να εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή τάσης μέγιστης αντοχής συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα δοκίμια, ωστόσο το έβδομο δοκίμιο, το οποίο φέρει και τις περισσότερες ατέλειες, διαρρέει για τάσεις μεγαλύτερης τιμής σε σχέση με το πρώτο. Ακόμη παρατηρείται ότι και για τις δύο τιμές, το τρίτο και πέμπτο εξεταζόμενο κατά σειρά δοκίμιο εμφάνιζαν τιμές μέγιστης αντοχής και άνω ορίου διαρροής μικρότερης από τις αντίστοιχες του δεύτερου δοκιμίου αναφοράς. Παρόλα αυτά ασφαλή συμπεράσματα δε δύναται να εξαχθούν και πάλι, για την επίδραση των ατελειών αυτών, διότι το δείγμα είναι μικρό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της άνωθεν ανάλυσης του πειραματικού σκέλους της παρούσης διπλωματικής εργασίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα, όσον αφορά στην αστοχία των συγκολλήσεων και ειδικότερα στο βαθμό επίδρασης και στο ρόλο που είναι σε θέση να διαδραματίσει μία ατέλεια ή ένα σφάλμα μιας συγκολλητής σύνδεσης στην εν γένει μηχανική συμπεριφορά ενός εκάστοτε δοκιμίου.

Καταρχήν παρατηρούμε ότι η θέση αστοχίας δεν ήταν η ίδια για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, καθώς σε μερικά εξ αυτών παρατηρήθηκε όλκιμη θραύση αυτών σε περιοχή του δοκιμίου μακριά από τη συγκολλητή σύνδεση, ενώ τα υπόλοιπα παρουσίασαν ψαθυρή θραύση στην περιοχή της συγκόλλησης. Η επίδραση του είδους της υπάρχουσας στη συγκολλητή σύνδεση ατέλειας αλλά κυρίως η έκταση αυτής αποτελεί, όπως φαίνεται η βασικότερη αιτία για το είδος της αστοχία που λάβει χώρα στα εξεταζόμενα δοκίμια.

Ακόμη όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η ελαστικότητα των δοκιμίων δε διαφοροποιήθηκε μεταξύ αυτών ανεξαρτήτως της ύπαρξης ή μη συγκολλητής σύνδεσης και σφάλματος στο εσωτερικό αυτής. Από την άλλη μεριά όσον αφορά στην ολκιμότητα και στη δυσθραυστότητα των εξεταζομένων δοκιμίων τα αποτελέσματα ποικίλουν με αποτέλεσμα τα συμπεράσματα τα οποία να εξαχθούν αν είναι αρκετά επισφαλής. Στην άνωθεν ανάλυση διαφαίνεται ότι η ύπαρξη συγκολλητής σύνδεσης αλλά και ο σχηματισμός ατελειών κατά τη δημιουργία αυτής σε σχέση με ένα απόφιο δοκίμιο έχει επηρεάσει σημαντικά την ολκιμότητα αλλά και τη δυσθραυστότητα των χαλύβδινων δοκιμίων.

Τέλος όσον αφορά την μέγιστη αντοχή και το όριο διαρροής των εξεταζομένων δοκιμίων, παρατηρείται ότι οι ληφθείσες μέσω της άνωθεν ανάλυσης τιμές είναι αρκετά μικρότερες από τις θεωρητικές τιμές τάσεων με τις οποίες είναι σε θέση να καταπονηθεί η συγκολλητή σύνδεση μιας κατασκευής που έχει προέλθει από αυτού του είδους το ηλεκτρόδιο. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω στην παρούσα εργασία, οι συγκολλήσεις αυτού του είδους έχουν εύρος μέγιστης αντοχής σε στατικά φορτία 450-550 MPa και όριο διαρροής μεγαλύτερο των 360 MPa.. Ωστόσο, κανένα από τα εξεταζόμενα δοκίμια δεν προσέγγισε τις τιμές αυτές με τις αποκλίσεις να είναι μεγάλες, με τη μεγαλύτερη εξ αυτών να παρατηρείται για το πέμπτο κατά σειρά εξεταζόμενο δοκίμιο, το οποίο έφερε σφάλμα ατελούς διείδυσης. Αυτό, όμως το οποίο αξίζει ιδιαίτερης μνείας αποτελεί το γεγονός ότι ακόμη και το συγκολλημένο δοκίμιο αναφοράς όσον αφορά στην αντοχή του υπό εφελκυστική καταπόνηση παρουσίασε σημαντικές αποκλίσεις, οι οποίες είναι της τάξεως του 17% για τη τιμή του άνω ορίου διαρροής και της τάξεως του 25% για τη μέγιστη αντοχή αυτού.

Έτσι με μια πρώτη ανάλυση συμπεραίνουμε ότι κάθε σφάλμα και ατέλεια συγκόλλησης επιδρά σε διαφορετικό βαθμό και τρόπο σε μια συγκολλητή κατασκευή, δίχως να είναι απαραίτητο ότι θα μειωθεί η αντοχή αυτής

Επομένως συνοψίζοντας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο τέλεια και ορθώς μορφοποιημένη και κατεργασμένη και αν θεωρείται μια συγκολλητή σύνδεση, σχεδόν σε κάθε περίπτωση θα ελλοχεύουν σφάλματα, τα οποία θα επιδρούν στην αντοχή και την εν γένει μηχανική συμπεριφορά αυτής και μπορεί να εμφανίζονται είτε με τη μορφή παραμενουσών τάσεων είτε ως κάποιου είδους από τις προαναφερθείσες και όχι μόνο ατέλειες. Ο βαθμός επίδρασης των σφαλμάτων αυτών εξαρτάται εν πολλοίς από την έκταση της ατέλειας, το είδος αυτής αλλά και τη θέση της. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη μια πρώτη ανάλυση της επίδρασης, που είναι σε θέση να έχει το είδος τους σφάλματος ως προς την αστοχία μιας συγκόλλησης. Ωστόσο ασφαλή συμπεράσματα δεν είναι σε θέση να εξαχθούν, καθώς το δείγμα των εξεταζομένων δοκιμίων είναι αρκετά μικρό. Για πιο ασφαλή συμπεράσματα, και επόμενο στάδιο της παρούσης έρευνας, αποτελεί η διενέργεια παρόμοιων δοκιμών και αναλύσεων για μεγαλύτερο πλήθος εξεταζομένων δοκιμίων, καθώς επίσης και η πραγματοποίηση μη καταστρεπτικών ελέγχων, όπως ραδιογραφίας για τη διερεύνηση της έκτασης και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του εκάστοτε σφάλματος και ατέλειας.

Βιβλιογραφία

1. Γρηγόρης Ν. Χαϊμεδενόπουλος, Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010
2. Ρ.Γραικούση «Στοιχεία μηχανών Ι Στοιχεία συνδέσεως» εκδ. ΠΙΑΧΟΥΔΗ.
3. Θ. Α. Διαμαντούδης «Συγκολλήσεις μετάλλων» Θεσσαλονίκη 2000.
4. Π.Α. Βουθούνης « Τεχνική Μηχανική ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ» Αθήνα 1997.
5. Δ. Ι. Παντελής, «Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών» εκδ. Παπασωτηρίου 1996.
6. Α. Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των υλικών» εκδ. Ε.Μ.Π. 1991.
7. S. Kou, «Welding Metallurgy», εκδ. Wiley – Interscience.
8. Ν. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριαζή, Κ. Λιακόπουλος, «Πειραματική αντοχή των υλικών», εκδ. Συμεών 1991.
9. X. Sun «Failure mechanisms of advanced welding processes» εκδ. CRC 2010.
10. R.L. O'BRIEN «Jefferson's Welding Encyclopedia» εκδ. AWS.
11. Δ. Μανωλάκος «Σημειώσεις μαθήματος Συγκολλήσεων».
12. Σ. Καιρης διπλωματική εργασία με θέμα « Η εφαρμογή της ραδιογραφίας για τον μη καταστροφικό έλεγχο συγκολλητών συνδέσεων στην βιομηχανία: εξέταση των μεταβλητών της μεθόδου και πειραματική επαλήθευση» Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο Αθηνά 2009.
13. Ι. Καταώρας διπλωματική εργασία με θέμα «Αριθμητική και πειραματική μελέτη των παραμένουσων τάσεων κατά την συγκόλληση χαλύβων» Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο Αθηνά 2009