



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ
ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5xxx**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΤΑΥΡΟΣ Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δ. Ι. Παντελής

Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ
ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5xxx**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΤΑΥΡΟΣ Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Δ. Ι. Παντελής, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Β.Ι. Παπάζογλου, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ν. Τσούβαλης, Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Δ. Ι. Παντελής, Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Ν. Τσούβαλης, Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Δ. Μανωλάκος, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Γ. Παπαδημητρίου, Ομοτ. Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Γ. Χαϊδεμενόπουλος, Καθ. Παν. Θεσ.
6. Γ. Φούρλαρης, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, του Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών.

Καθ' όλη τη διάρκειά της και μέχρι και την ολοκλήρωσή της, σημαντικός αριθμός ανθρώπων στάθηκε, με διάφορους τρόπους, δίπλα μου τους οποίους ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης οφείλω να τους ευχαριστήσω.

Αρχικά, τους καθηγητές της τριμελούς επιτροπής που ο καθένας με τον τρόπο του, με το χαρακτήρα του, με τις επιστημονικές του συμβουλές και επισημάνσεις, με το ήθος του, βοήθησε τα μέγιστα ώστε να κάνω τα πρώτα μου βήματα ως μηχανικός, να αποκτήσω επιστημονικό υπόβαθρο και να εξελιχθώ ως ερευνητής.

Φυσικά, τα μόνιμα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για τη φιλική τους διάθεση, το ομαδικό τους πνεύμα και τη βοήθεια αλλά και εμπύχωση που μου παρείχαν, ιδιαίτερα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Ιδιαίτερα, την Δρ. Ιωάννα Κυριοπούλου για τη σημαντική βοήθειά της και τις συμβουλές που μου παρείχε κατά το στάδιο ανέγερσης του μοντέλου.

Πάνω απ' όλα τον Καθηγητή μου Δημήτρη Παντελή που κάθε στιγμή ήταν δίπλα μου και βοήθησε τα μέγιστα σε όλους τους τομείς της ζωής μου.

Την οικογένειά μου που με στήριξε και με βοήθησε να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που συνάντησα.

Τελευταία και σίγουρα όχι έσχατη τη φίλη, συνοδοιπόρο, σύζυγο και μητέρα της υπέροχης κόρης μας, Χαρούλα που προφανώς χωρίς αυτή δεν θα είχα καταφέρει απολύτως τίποτα.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	iii
Περιεχόμενα Εικόνων.....	xii
Περιεχόμενα Πινάκων.....	xxix
Εισαγωγή - Πρόλογος.....	1
Abstract - Preface.....	4
ΕΝΟΤΗΤΑ 1 ^η Βασικές Αρχές που Διέπουν το Αλουμίνιο και τα Κράματα του.....	7
Κεφάλαιο 1 ^ο	8
Το Αλουμίνιο	8
1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	8
1.1.1 Η παραγωγή του αλουμινίου.....	8
1.1.2 Η διαδικασία παραγωγής του	8
1.1.3 Οι ιδιότητες του.....	9
1.1.4 Οι εφαρμογές του αλουμινίου	10
1.1.5 Η παραγωγή του αλουμινίου τον 20 ^ο και 21 ^ο αιώνα.....	11
1.2 Τα κράματα του αλουμινίου.....	12
1.3 Ονοματολογία.....	13
1.4 Κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου ^{[2],[11]}	18
1.4.1 Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.....	18
1.4.1.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1xxx (Al ≥99,0%).....	18
1.4.1.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3xxx (κράματα AlMn)	18
1.4.1.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx (AlMg(Mn)).....	19
1.4.2 Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία ..	20
1.4.2.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx (AlCu)	20
1.4.2.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6xxx (AlMgSi)	21
1.4.2.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7xxx (AlZn(Mg)).....	21
1.5 Κράματα χύτευσης του αλουμινίου ^{[2],[11]}	23
1.6 Ναυπηγικά κράματα του αλουμινίου	24
1.6.1 Σύγκριση των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου με το χάλυβα	25
1.6.2 Κατασκευές από κράματα αλουμινίου στη ναυπηγική.....	29
Κεφάλαιο 2 ^ο	33

Η Συγκολλησιμότητα των Κραμάτων Αλουμινίου	33
2.1 Μέθοδοι συγκόλλησης.....	33
2.1.1 Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW) ^{[6],[7],[8],[12]}	33
2.1.2 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW) ^{[6],[7],[8], [10],[12]} ...	36
2.1.3 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος.....	44
2.1.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding – E.B.W.).....	45
2.1.5 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ.....	46
2.1.6 Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση υλικού (Friction Stir Welding – F.S.W.) ^{[29],[30],[41],[42]}	47
2.1.7 Άλλες τεχνικές συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου	51
2.1.7.1 Σημειακή συγκόλληση αντίστασης	51
2.1.7.2 Λοιπές τεχνικές.....	51
2.2 Χαρακτηριστικά που επιδρούν καταλυτικά στις συγκολλήσεις τους.....	52
2.2.1 Το οξείδιο του αλουμινίου	52
2.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	53
2.2.3 Η διαλυτότητα του υδρογόνου.....	55
2.2.4 Θερμικά χαρακτηριστικά.....	55
2.3 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης.....	57
2.3.1 Κριτήρια επιλογής κραμάτων προσθήκης	57
2.3.1.1 Ευαισθησία στη ρωγμάτωση λόγω συγκόλλησης.....	60
2.3.1.2 Αντοχή συγκόλλησης	63
2.3.1.3 Ολκιμότητα.....	68
2.3.1.4 Θερμοκρασία έναντι απόδοσης.....	69
2.3.1.5 Αντοχή σε διάβρωση	71
2.3.1.6 Εναρμόνιση του χρώματος της συγκόλλησης με αυτό του μετάλλου βάσης μετά από ανοδίωση.....	72
2.3.1.7 Τελική επιλογή κράματος προσθήκης.....	72
2.4 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx	79
2.5 Σφάλματα συγκολλήσεων και τρόποι αποφυγής ^{[11],[29]}	82
2.5.1 Πορώδες	82
2.5.2 Ατελής τήξη.....	84
2.5.3 Ατελής διείδυση	85
2.5.4 Ρωγμές	87
2.5.4.1 Ρωγμές στη ζώνη τήξης	88
2.5.4.2 Ρωγμές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.....	89

2.5.4.3	Ρωγμές κρατήρα.....	90
2.5.5	Στερεά εγκλείσματα.....	90
2.5.6	Υποκοπές.....	91
2.6	Προετοιμασία πριν τη συγκόλληση.....	92
2.6.1	Επιφανειακή προετοιμασία της συγκόλλησης.....	92
2.6.2	Προθέρμανση.....	93
2.7	Πρακτικά στοιχεία και υποδείξεις στις συγκολλήσεις ναυπηγικών αλουμινίων.....	94
2.7.1	Σχετικά με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.....	94
2.7.2	Σχετικά με τη διαδικασία συγκόλλησης ^{[6],[7],[15]}	96
	Βιβλιογραφία.....	101
	ΕΝΟΤΗΤΑ 2 ^η Μεταλλογραφική Μελέτη Συγκολλήσεων GMAW Ναυπηγικών Κραμάτων Αλουμινίου, Σειράς 5xxx.....	105
	Κεφάλαιο 3 ^ο	106
	Βιβλιογραφική επισκόπηση μελέτης μεταλλογραφίας συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου.....	106
	Κεφάλαιο 4 ^ο	122
	Θεωρητική μελέτη στερεοποίησης του Λουτρού Συγκόλλησης.....	122
4.1	Χαρακτηριστικά στερεοποίησης στο κέντρο του λουτρού συγκόλλησης.....	122
4.2	Χαρακτηριστικά στερεοποίησης στα όρια της ζώνης τήξης με το βασικό μέταλλο.....	126
	Κεφάλαιο 5 ^ο	130
	Πειραματική διαδικασία.....	130
5.1	Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.....	130
5.2	Εξοπλισμός και μετρητικές διατάξεις.....	132
5.2.1	Χαρακτηριστικά της συγκολλητικής διάταξης ^[63]	132
5.2.1.1	Το κυρίως σώμα.....	132
5.2.1.2	Η κονσόλα ελέγχου.....	133
5.2.1.3	Η κονσόλα 'playback' (PBC).....	134
5.2.1.4	Η μονάδα προγραμματισμού (PGU).....	134
5.2.1.5	Η μονάδα ελέγχου της συγκόλλησης ή συγκολλητής (welder).....	135
5.2.1.6	Συνεργασία των επιμέρους στοιχείων της ρομποτικής διάταξης.....	136
5.2.2	Μεταλλογραφικός εξοπλισμός.....	137
5.2.3	Εξοπλισμός μέτρησης θερμικών κύκλων συγκόλλησης.....	138
5.3	Προετοιμασία ελασμάτων και δοκιμίων για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων και το μεταλλογραφικό έλεγχο αντίστοιχα.....	139
5.3.1	Προετοιμασία των ελασμάτων για τη διενέργεια των συγκολλήσεων.....	139

5.2.5	Προετοιμασία των δοκιμίων για τη διαδικασία των μετρήσεων.....	139
	Κεφάλαιο 6°.....	141
	Αποτελέσματα και συζήτηση μεταλλογραφικής μελέτης.....	141
6.1	Δοκιμές απόθεσης μετάλλου (Bead on plate) σε δοκίμια πάχους 4mm.....	141
6.2	Επίπεδες συγκολλήσεις ελασμάτων μικρών διαστάσεων.....	147
6.2.1	Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5083-H116 πάχους 4mm.....	147
6.2.1.1	Μακρογραφική μελέτη.....	147
6.2.1.2	Μελέτη μικροδομής.....	148
6.2.1.3	Μετρήσεις μικροσκληρότητας.....	153
6.2.1.4	Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.....	154
6.2.2	Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5083-H111 πάχους 5mm.....	157
6.2.2.1	Μακρογραφική μελέτη.....	158
6.2.2.2	Μελέτη μικροδομής.....	159
6.2.2.3	Μετρήσεις μικροσκληρότητας.....	161
6.2.2.4	Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.....	162
6.2.3	Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5383-H116 πάχους 6mm.....	164
6.2.3.1	Μακρογραφική μελέτη.....	164
6.2.3.2	Μελέτη μικροδομής.....	165
6.2.3.3	Μετρήσεις μικροσκληρότητας.....	168
6.2.3.4	Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.....	169
6.3	Επίπεδες συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων.....	172
6.3.1	Μακρογραφική μελέτη συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm, 5mm και 6mm.....	172
6.3.2	Μελέτη μικροδομής συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm, 5mm και 6mm.....	173
6.3.3	Μετρήσεις μικροσκληρότητας.....	178
6.3.4	Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.....	179
	Βιβλιογραφία.....	184
	ΕΝΟΤΗΤΑ 3 ^η Πειραματική Μελέτη Στρεβλώσεων - Παραμορφώσεων σε Συγκολλήσεις GMAW Ναυπηγικών Κραμάτων Αλουμινίου, Σειράς 5xxx.....	195
	Κεφάλαιο 7°.....	196
	Οι παραμένουσες τάσεις σε συγκολλητές κατασκευές.....	196
7.1	Γενικά.....	196
7.2	Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις.....	196

7.3	Επίδραση διαφόρων παραγόντων στο μέγεθος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων	199
7.3.1	Επίδραση του υλικού.....	199
7.3.2	Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου.....	200
7.3.3	Επίδραση του πάχους των ελασμάτων	201
7.3.4	Επίδραση της μεθόδου συγκόλλησης.....	202
7.3.5	Επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης	203
7.3.6	Επίδραση της εφαρμογής περιορισμών στη μετατόπιση των δοκιμίων	203
7.4	Μέτρηση παραμενουσών τάσεων στις συγκολλήσεις	204
7.4.1	Τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων	205
7.4.1.1	Τεχνικές τεμαχισμού με χρήση επιμηκονομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης.	206
7.4.1.2	Η τεχνική διάτρησης του Gunnert	207
7.4.1.3	Η τεχνική διάνοιξης οπής των Mathar - Soete.....	208
7.4.1.4	Η τεχνική αφαίρεσης υλικού του Stäblein (successive milling technique).....	211
7.4.1.5	Η τεχνική των Heyn - Bauer (machining technique)	212
7.4.1.6	Η τεχνική Mesnager - Sachs (boring out technique).....	212
7.4.1.7	Η τεχνική διάνοιξης οπής του Gunnert.....	212
7.4.1.8	Η τεχνική τεμαχισμού των Rosenthal - Norton	213
7.4.1.9	Η τεχνική των συστημάτων πλέγματος - τεχνική διαχωρισμού.....	214
7.4.1.10	Η τεχνική των ψαθυρών επιστρωμάτων	215
7.4.1.11	Η τεχνική των φωτο-ελαστικών επιστρωμάτων	215
7.4.2	Μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τεχνικές περίθλασης ακτίνων Χ	216
7.4.2.1	Φωτογραφική μέθοδος ή μέθοδος φιλμ ακτίνων Χ.....	218
7.4.2.2	Μέθοδος περιθλασιόμετρου ακτίνων Χ	219
7.4.3	Άλλες τεχνικές μέτρησης των παραμενουσών τάσεων	220
7.4.4	Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.....	220
7.4.5	Επίδραση των παραμενουσών τάσεων	221
	Κεφάλαιο 8 ^ο	223
	Μεταβατικές θερμικές τάσεις, στρεβλώσεις και παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις	223
8.1	Οι μεταβατικές θερμικές τάσεις στις συγκολλήσεις.....	223
8.2	Οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις.....	224
8.3	Ανάλυση των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης	225
8.3.1	Εγκάρσια συστολή.....	225
8.3.1.1	Μετωπικές συγκολλήσεις	225

8.3.1.2	Αυχενικές συγκολλήσεις	227
8.3.2	Γωνιακή μεταβολή	227
8.3.2.1	Μετωπικές συγκολλήσεις	227
8.3.2.2	Αυχενικές συγκολλήσεις	227
8.3.3	Διαμήκης συστολή	231
8.3.3.1	Μετωπικές συγκολλήσεις	231
8.3.3.2	Αυχενικές συγκολλήσεις	231
8.3.4	Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση	231
8.3.5	Παραμόρφωση λυγισμού.....	232
8.4	Γενικοί κανόνες μείωσης των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης και μέθοδοι διόρθωσής τους	232
	Κεφάλαιο 9 ^ο	234
	Βιβλιογραφική επισκόπηση	234
	Κεφάλαιο 10 ^ο	240
	Πειραματική διαδικασία	240
10.1	Εξοπλισμός, τεχνικές και μετρητικές διατάξεις	240
10.1.1	Πειραματική μελέτη παραμενουσών τάσεων	240
10.1.1.1	Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.....	244
10.1.2	Πειραματική μελέτη μεταβατικών θερμικών τάσεων, παραμορφώσεων και στρεβλώσεων	245
	Κεφάλαιο 11 ^ο	247
	Αποτελέσματα και συζήτηση	247
11.1	Μέτρηση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις ελασμάτων μικρών διαστάσεων - Διερεύνηση σφαλμάτων της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής.....	247
11.1.1	Μέτρηση παραμενουσών τάσεων	247
11.1.2	Διερεύνηση σφαλμάτων από τη διαδικασία διάνοιξης της οπής.....	249
11.2	Πειραματική μελέτη μεταβατικών θερμικών τάσεων, παραμορφώσεων στρεβλώσεων και παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων	250
11.2.1	Μεταβατικές θερμικές τάσεις, στρεβλώσεις - παραμορφώσεις	252
11.2.1.1	Καμπύλες Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου.....	258
11.2.1.2	Καμπύλες Μεταβατικών Παραμορφώσεων - Χρόνου	261
11.2.2	Παραμένουσες τάσεις.....	283
11.2.2.1	Τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής.....	283
11.2.2.2	Τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων.....	288

Βιβλιογραφία	294
ΕΝΟΤΗΤΑ 4 ^η Μοντελοποίηση της Συγκόλλησης	303
Κεφάλαιο 12 ^ο	304
Τεχνικές προσομοίωσης συγκολλήσεων – Θεωρητική προσέγγιση	304
12.1 Γενικά	304
12.2 Θερμικά φαινόμενα – Μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας.....	305
12.2.1 Γενικές εξισώσεις	305
12.2.2 Πρώτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας.....	307
12.2.3 Δεύτερη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας.....	317
12.2.4 Τρίτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας	322
12.2.5 Τέταρτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας ^[104]	324
12.2.6 Πέμπτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας ^[104]	325
12.3 Μηχανικά φαινόμενα - Μοντελοποίηση παραμενουσών τάσεων, στρεβλώσεων, παραμορφώσεων.....	325
12.4 Αριθμητική μοντελοποίηση συγκόλλησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	329
12.4.1 Θεωρητική προσέγγιση θερμικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	329
12.4.2 Θεωρητική προσέγγιση μηχανικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων....	331
12.4.2.1 Εξισώσεις ισορροπίας.....	331
12.4.2.2 Δομικές εξισώσεις.....	331
Κεφάλαιο 13 ^ο	336
Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης μέσω λογισμικών που πραγματοποιούν ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	336
13.1 Γενικά	336
13.2 Θερμική, μηχανική και μεταλλουργική ανάλυση.....	336
13.3 Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης	339
13.4 Απόθεση του συγκολλημένου μετάλλου.....	340
13.5 Μοντελοποίηση του υλικού.....	342
13.6 Συνοριακές συνθήκες απώλειας θερμότητας, ακτινοβολίας και συναγωγής	344
13.7 Ενεργειακές και δομικές εξισώσεις στην προσομοίωση συγκολλήσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	345
13.7.1 Ροή θερμότητας στη συγκόλληση	345
13.7.2 Διατήρηση της ενέργειας	345
13.7.3 Ο νόμος Fourier για τη συναγωγή θερμότητας – Αρχικές και συνοριακές συνθήκες.	347
13.7.4 Κινούμενες πηγές θερμότητας και ψευδο – μόνιμη κατάσταση	350

13.7.5	Ανάλυση θερμο - ελαστικών τάσεων	352
13.7.5.1	Θεμελιώδεις παραδοχές	352
13.7.5.2	Θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης των στερεών	353
13.7.5.3	Ιδανικές καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων	353
13.7.5.4	Κριτήριο διαρροής Von Mises.....	354
13.7.5.5	Σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης.....	356
13.8	Επιλογή διδιάστατης ή τριδιάστατης προσομοίωσης.....	358
13.9	Ανέγερση του μοντέλου προσομοίωσης μέσω λογισμικού που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS®)	363
13.9.1	Στοιχεία από την πειραματική διαδικασία.....	363
13.9.2	Πλέγμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS®.....	364
13.9.3	Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο ABAQUS®	367
13.9.4	Οριακές και συνοριακές συνθήκες	371
13.9.5	Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης	373
13.9.6	Εκτέλεση της προσομοίωσης.....	375
	Κεφάλαιο 14 ^ο	377
	Αποτελέσματα και συζήτηση μοντελοποίησης.....	377
14.1	Αρχικές παρατηρήσεις	377
14.2	Σύγκριση μοντέλου με τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης	382
14.2.1	Σύγκριση θερμικών κύκλων	382
14.2.2	Σύγκριση στρεβλώσεων - παραμορφώσεων.....	385
14.2.3	Σύγκριση παραμενουσών τάσεων	389
14.2.4	Σύνοψη.....	390
14.3	Μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων υλικού, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης	393
14.3.1	Σύγκριση μοντέλων T0, T1, T2, T3 (M0[T0], M1[T1], M2[T2], M3[T3])	393
14.3.2	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1], M7[T1].....	400
14.3.3	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M8[T2], M9[T2], M10[T2].....	404
14.3.4	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M11[T3], M12[T3], M13[T3].....	408
14.3.5	Σύνοψη.....	412
14.4	Μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	416
14.4.1	Αποτελέσματα και συζήτηση	420

14.4.1.1	Θερμικοί κύκλοι.....	420
14.4.1.2	Κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης.....	429
14.4.1.3	Παραμένουσες τάσεις.....	436
14.4.2	Σύνοψη.....	444
	Βιβλιογραφία.....	446
	ΕΝΟΤΗΤΑ 5 ^η Γενική σύνοψη, απήχηση και καινοτομία, λοιπές γενικές θεωρήσεις.....	461
	Κεφάλαιο 15 ^ο	462
15.1	Γενικές παρατηρήσεις επί της διατριβής.....	462
15.2	Καινοτομία της παρούσας διδακτορικής διατριβής.....	465
15.3	Απήχηση και μελλοντική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της διατριβής.....	467
	Βιβλιογραφία.....	472
	ΕΝΟΤΗΤΑ 6 ^η Παραρτήματα.....	473
Παράρτημα 1	Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη Διδακτορική Διατριβή.....	474
Παράρτημα 2	Βιογραφικό Σημείωμα.....	475

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Παραγωγή του Αλουμινίου	8
Εικόνα 1.2 Ανακύκλωση του Αλουμινίου	10
Εικόνα 1.3 Εφαρμογές του αλουμινίου	10
Εικόνα 1.4 Η παραγωγή αλουμινίου (σε χιλιάδες τόνους) μεταξύ 1950 και 1999	11
Εικόνα 1.5 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Al-Mn	19
Εικόνα 1.6 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Al-Mg	20
Εικόνα 1.7 Τυπικά διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων κάποιων βασικών ναυπηγικών υλικών	25
Εικόνα 1.8 Αλουμινένια γάστρα μικρού σκάφους	27
Εικόνα 1.9 Σκάφος αναψυχής από αλουμίνιο.....	29
Εικόνα 1.10 Σκάφος αναψυχής τύπου καταμαράν κατασκευασμένο εξολοκλήρου από κράμα αλουμινίου.....	29
Εικόνα 1.11 Επιβατηγό/οχηματαγωγό πλοίο από αλουμίνιο	29
Εικόνα 1.12 Κρουαζιερόπλοια με υπερκατασκευές από κράματα αλουμινίου.....	30
Εικόνα 1.13 Πλοίο τύπου LNG.....	30
Εικόνα 1.14 Εξέδρα εξόρυξης	31
Εικόνα 2.1 Συγκόλληση GTAW	33
Εικόνα 2.2 Δαυλός συγκόλλησης GTAW.....	34
Εικόνα 2.3 Σκαρίφημα της διάταξης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GTAW	34
Εικόνα 2.4 Η επίδραση της σύστασης του αερίου προστασίας στην διεύθυνση της συγκόλλησης. $I = 150 \text{ A}$, απόσταση του ηλεκτροδίου από το έλασμα 4 mm , $U = 15 \text{ cm/min}$	36
Εικόνα 2.5 Σκαρίφημα της διάταξης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο συγκόλλησης G.M.A.W.....	36
Εικόνα 2.6 Βραχεία ηλεκτρικά τόξα. α) Μηχανισμός απόθεσης του μετάλλου προσθήκης β) και οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες εμφανίζονται	37
Εικόνα 2.7 Μεταβολές τάσης και ρεύματος συγκόλλησης σε κύκλο ενός βραχέος τόξου.....	38
Εικόνα 2.8 Ηλεκτρικά τόξα ψεκασμού. α) Μηχανισμός απόθεσης του μετάλλου προσθήκης β) και οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες εμφανίζονται.....	38
Εικόνα 2.9 Μορφή και χαρακτηριστικά παλμικού ρεύματος.....	39
Εικόνα 2.10 Διάγραμμα ηλεκτρικού ρεύματος - χρόνου στο παλμικό ρεύμα και ο μηχανισμός αποκόλλησης σταγόνων κατά τη συγκόλληση.....	40
Εικόνα 2.11 Μορφή μετάλλου συγκόλλησης κατά τη συγκόλληση με αέριο προστασίας Αργό	41
Εικόνα 2.12 Συγκόλληση με αέριο προστασίας ήλιο.....	42

Εικόνα 2.13 Συνδυασμός χαρακτηριστικών αργού και ηλίου.....	42
Εικόνα 2.14 Τυπικές γεωμετρίες συγκόλλησης για τη μέθοδο GMAW	44
Εικόνα 2.15 Αρχή μεθόδου συγκόλλησης με τόξο πλάσματος.....	44
Εικόνα 2.16 Τεχνική Keyhole	45
Εικόνα 2.17 Αρχές μεθόδου συγκόλλησης με τόξο πλάσματος και καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο ...	45
Εικόνα 2.18 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ	46
Εικόνα 2.19 Τομή συγκόλλησης με δέσμη λέιζερ. Τεχνική Keyhole	47
Εικόνα 2.20 Συγκόλληση FSW ελασμάτων αλουμινίου πάχους 50mm	48
Εικόνα 2.21 Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου εφαρμογής της μεθόδου FSW	49
Εικόνα 2.22 Το περιστρεφόμενο εργαλείο της μεθόδου συγκόλλησης FSW	50
Εικόνα 2.23 Κεφαλές μηχανών συγκόλλησης FSW	50
Εικόνα 2.24 Διάγραμμα ταχύτητας τροφοδοσίας σύρματος ως προς το ρεύμα συγκόλλησης για τα κράματα 4043 και 5356 υπό μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm	54
Εικόνα 2.25 Επίδραση του μήκους του τόξου στη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου	54
Εικόνα 2.26 Η διαλυτότητα του υδρογόνου στο καθαρό αλουμίνιο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	55
Εικόνα 2.27 Εκτίμηση ευαισθησίας σε ρωγμάτωση συνδυασμών βασικού μετάλλου / μετάλλου προσθήκης	62
Εικόνα 2.28 Επίδραση του ποσοστού κραμάτωσης στη ρωγμάτωση της συγκόλλησης.....	62
Εικόνα 2.29 Τυπικές ιδιότητες του κράματος AA5083 συγκολλημένο με υλικό προσθήκης 5183.....	69
Εικόνα 2.30 Πορώδες σε τομή συγκόλλησης	82
Εικόνα 2.31 Διαλυτότητα υδρογόνου στο αλουμίνιο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	83
Εικόνα 2.32 Ατελής τήξη (A) στο μέταλλο συγκόλλησης (B) στις παρυφές με το μέταλλο βάσης	85
Εικόνα 2.33 Ατελής διείσδυση	86
Εικόνα 2.34 Μορφές και αιτίες ατελούς διείσδυσης: α) υπερβολικά παχιά μορφή ρίζας, β) πολύ μικρό διάκενο, γ) κακή ευθυγράμμιση συγκόλλησης, δ) & ε) μικρή παροχή θερμότητας, στ) μεγάλη διάμετρος ηλεκτροδίου, ζ) πολύ μικρή διάμετρος ηλεκτροδίου.....	86
Εικόνα 2.35 Ρωγμές στη ζώνη τήξης	88
Εικόνα 2.36 Τρόπος επίδρασης της περιεκτικότητας σε Mg στην ευαισθησία σε ρωγμάτωση.....	89
Εικόνα 2.37 Ρωγμή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη	89
Εικόνα 2.38 Ρωγμή κρατήρα σε συγκόλληση GMAW	90
Εικόνα 2.39 διαχείριση ρεύματος συγκόλλησης για την αποφυγή ρωγμών κρατήρα	90
Εικόνα 2.40 Στερεά εγκλείσματα.....	91
Εικόνα 2.41 Υποκοπές.....	91

Εικόνα 2.42 α) Τυπική διάταξη προώθησης ηλεκτροδίου και β) μορφές κυλίνδρων μεταφοράς	94
Εικόνα 2.43 α) Ακροφύσιο για συγκολλήσεις αλουμινίου, β) ακροφύσιο για συγκολλήσεις χαλύβων, γ) βελτιστοποίηση σχεδιασμού ακροφυσίου για καλύτερη οδήγηση του αερίου προστασίας.....	95
Εικόνα 2.44 Διαμόρφωση ακμών στις συγκολλήσεις ναυπηγικού αλουμινίου	97
Εικόνα 2.45 Θέσεις όπλου συγκόλλησης σε συγκολλήσεις GMAW, GTAW.....	97
Εικόνα 2.46 Εμφάνιση ρωγμών στην αρχή και το τέλος της συγκόλλησης.....	99
Εικόνα 2.47 Επιτρεπόμενες τιμές του μεγέθους των υποκοπών	100
Εικόνα 3.1 Οι διαφορετικές χαρακτηριστικές ζώνες της τεχνικής FSW	107
Εικόνα 3.2 Εγκάρσια τομή της συγκόλλησης κατά τους G.R. Bradley, M.N. James.....	108
Εικόνα 3.3 Εγκάρσια τομή της συγκόλλησης και μικροσκληρομετρήσεις κατά τους M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers	108
Εικόνα 3.4 α) Μικροσκληρομετρήσεις σε συγκόλληση FSW του κράματος 6061, β) Περιοχή σύνδεσης Θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και ζώνης δυναμικής ανακρουστάλλωσης κατά τους K.V. Jata και S.L. Semiatin.....	109
Εικόνα 3.5 Μικρογραφίες συγκόλλησης FSW από τους M. Cabibbo και E. Meccia α) Βασικό μέταλλο, β) Πλαστικά παραμορφωμένοι κόκκοι στη ΘΜΕΖ, γ) Περιοχή ανακρουσταλλωμένων κόκκων (ΘΕΖ)	109
Εικόνα 3.6 Συγκόλληση FSW μεταξύ AA6061 και AISI1018 α) Μικρογραφίες τομής της συγκόλλησης, β) θερμικός κύκλος συγκόλλησης για τα δύο κράματα	111
Εικόνα 3.7 Σύγκριση μικροσκληρομετρήσεων α) Συγκόλλησης FSW και GMAW, β) FSW GMAW και GTAW	112
Εικόνα 3.8 Τομές συγκολλήσεων με δέσμη λέιζερ. α), β) 5754 – Ο, γ), δ) 5182 – Ο, ε), στ) 6111 – T4	114
Εικόνα 3.9 Φωτογραφίες της τομής της συγκόλλησης α) Συγκόλληση με χαμηλό ρεύμα συγκόλλησης β) συγκόλληση με υψηλό ρεύμα συγκόλλησης.....	115
Εικόνα 3.10 Σκαρίφημα της τεχνικής με χρήση διπλού δαυλού συγκόλλησης.....	118
Εικόνα 3.11 Τομές της συγκόλλησης κραμάτων σειράς 6xxx με τη μέθοδο διπλού δαυλού α) Ταχύτητα συγκόλλησης 4.2 mm/s β) Ταχύτητα συγκόλλησης 6 mm/s γ) Ταχύτητα συγκόλλησης 7.5 mm/s	119
Εικόνα 3.12 Τομή συγκόλλησης 5083 (δεξιά) με 6060 (αριστερά) και κράμα προσθήκης το 4043. Πάχος ελάσματος.....	119
Εικόνα 3.13 Προφίλ μικροσκληρότητας συγκόλλησης α) κράματος 5083 με 5754 πάχους 3mm με ταχύτητα συγκόλλησης 315mm/min και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356, β)	

κράματος 6060-T6 με 6082-T6 πάχους 5mm με ταχύτητα συγκόλλησης 400mm/min και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356.....	120
Εικόνα 4.1 Διακύμανση του σχήματος του λουτρού συγκόλλησης σε συνάρτηση με την ταχύτητα της συγκόλλησης.....	122
Εικόνα 4.2 Τυπικές δομές μορφοποίησης κόκκων, λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό στερεοποίησης γύρω από το λουτρό συγκόλλησης.....	124
Εικόνα 4.3 Τύποι μικροδομών μετάλλου συγκόλλησης όπως προκύπτουν από μεταβολές της ταχύτητας συγκόλλησης	125
Εικόνα 4.4 Τύποι ανάπτυξης κόκκων κατά τη στερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης.....	126
Εικόνα 5.1 Όψεις του χώρου λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα.....	133
Εικόνα 5.2 Η κονσόλα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα	133
Εικόνα 5.3 Η κονσόλα “playback” (PBC).....	134
Εικόνα 5.4: Η μονάδα προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα.....	135
Εικόνα 5.5 Ο συγκολλητής του ρομποτικού βραχίονα.....	135
Εικόνα 5.6 Η διάταξη του τρόπου επικοινωνίας των επιμέρους συστημάτων του ρομποτικού βραχίονα.....	136
Εικόνα 5.7 Αποψη του χώρου μεταλλογραφίας του εργαστηρίου ναυπηγικής τεχνολογίας.....	138
Εικόνα 5.8 Γεωμετρίες ακμών συγκόλλησης ανάλογα με το πάχος του ελάσματος όπως ορίζονται από τους κανονισμούς. α) Πάχος ελάσματος 4mm και 5mm, β) πάχος ελάσματος 5mm και 6mm.....	139
Εικόνα 5.9 Το κύκλωμα ηλεκτροχημικής προσβολής που χρησιμοποιήθηκε (ιδιοκατασκευή)......	140
Εικόνα 6.1 Ενδεικτική φωτογραφία δοκιμίου έπειτα από συγκόλληση απόθεσης μετάλλου. α) επιφάνεια συγκόλλησης, β) επιφάνεια ρίζας.....	141
Εικόνα 6.2 Φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων α) ΧΠ1, β) ΧΠ2, γ) ΧΠ3, δ) ΧΠ3.5, ε) ΧΠ4, στ) ΧΠ5, ζ) ΧΠ6, η) ΧΠ7 (Πιν. 6.1)	142
Εικόνα 6.3 Φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων α) ΧΠ7.5, β) ΧΠ8, γ) ΧΠ9, δ) ΧΠ10, ε) ΧΠ11, στ) ΧΠ11.5, ζ) ΧΠ12, η) ΧΠ12 (Πιν. 6.1).....	143
Εικόνα 6.4 Σύγκριση τομών συγκόλλησης ΧΠ και ΜΠ. α) ΧΠ3.5, β) ΜΠ3.5, γ) ΧΠ4, δ) ΜΠ4, ε) ΧΠ7.5, στ) ΜΠ7.5	144
Εικόνα 6.5 Σύγκριση τομών συγκόλλησης ΧΠ και ΜΠ α) ΧΠ8, β) ΜΠ8, γ) ΧΠ11.5, δ) ΜΠ11.5, ε) ΧΠ12, στ) ΜΠ12.....	145
Εικόνα 6.6 Μακροφωτογραφίες τομών των συγκολλήσεων με συνθήκες παροχής αερίου προστασίας 20lit/min. α) 150A, 24V, 65cm/min β) 165A, 24V, 70cm/min.....	146
Εικόνα 6.7 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων.....	148

Εικόνα 6.8 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, γ) παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, δ) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200.....	150
Εικόνα 6.9 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) κοντά στη ζώνη σύνδεσης	150
Εικόνα 6.10 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης. α), β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, γ) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, δ), ε) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100.....	151
Εικόνα 6.11 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης. α), β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, γ), δ) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, ε) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, στ) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, περιοχή ρίζας	152
Εικόνα 6.12 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλησεων ελασμάτων μικρών διαστάσεων, πάχους 4mm	153
Εικόνα 6.13 Συνολική διάταξη θερμοστοιχείων προς μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης	154
Εικόνα 6.14 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης. Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm	155
Εικόνα 6.15 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης.....	157
Εικόνα 6.16 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλησεων.....	158
Εικόνα 6.17 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100.....	159
Εικόνα 6.18 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) πιο κοντά στη ζώνη σύνδεσης	159
Εικόνα 6.19 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης. α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200.....	159
Εικόνα 6.20 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης. α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, γ) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200.....	160
Εικόνα 6.21 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλησεων ελασμάτων μικρών διαστάσεων, πάχους 5mm	161

Εικόνα 6.22 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης. Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm	163
Εικόνα 6.23 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης.....	164
Εικόνα 6.24 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων.....	165
Εικόνα 6.25 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου x200 α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός.....	167
Εικόνα 6.26 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) κοντά στη ζώνη σύνδεσης	167
Εικόνα 6.27 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης σε παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός. α) x100, β) x200, γ) Στην περιοχή της ρίζας x100	167
Εικόνα 6.28 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης με χρήση πολωμένου φωτός α) x100, β) x200 γ) περιοχή σύνδεσης 1 ^{ου} και 2 ^{ου} περάσματος x100	168
Εικόνα 6.29 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης	168
Εικόνα 6.30 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης. Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm	171
Εικόνα 6.31 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης.....	171
Εικόνα 6.32 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων Συγκόλληση ελασμάτων πάχους α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm	173
Εικόνα 6.33 Η μικροδομή του μετάλλου βάσης. α) Οπτικό μικροσκόπιο x200 α), β) Οπτικό μικροσκόπιο x200 με χρήση πολωμένου φωτός, γ), δ) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM - EDS).....	174
Εικόνα 6.34 Θ.Ε.Ζ. x100. Βαθμιαία αύξηση ποσοστού ανακρυστάλλωσης όσο πλησιάζουμε στο Μ.Σ.. (Από εικόνα α προς ε).....	175
Εικόνα 6.35 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός α) x100, β) x200. Χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός γ) x100, δ), ε) x200.....	177
Εικόνα 6.36 Η μικροδομή στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός α) x100, β) x200. Χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός γ) x100, δ) x200.....	178
Εικόνα 6.37 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλήσεων ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων, πάχους 4mm.....	179
Εικόνα 6.38 Διάταξη θερμοστοιχείων προς μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.....	180

Εικόνα 6.39 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm. Απόσταση από άξονα συγκόλλησης α) 10mm, β) 20mm, 40mm, 60mm, 100mm και 150mm	181
Εικόνα 6.40 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 6mm. Απόσταση από άξονα συγκόλλησης α) 10mm, β) 20mm, 40mm, 60mm, 100mm και 150mm	182
Εικόνα 7.1 Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων	197
Εικόνα 7.2 Η δημιουργία των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης.....	199
Εικόνα 7.3 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις διαφόρων μηκών. α) Μέθοδος βυθισμένου τόξου, β) μέθοδος επενδεδυμένων ηλεκτροδίων	201
Εικόνα 7.4 Επίδραση του μήκους συγκόλλησης στη μέγιστη παραμένουσα τάση	201
Εικόνα 7.5 Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους. α) Διαμήκης τάση σ_x , β) εγκάρσια τάση σ_y , γ) κατακόρυφη τάση σ_z	202
Εικόνα 7.6 Τυπικές ακολουθίες Συγκόλλησης. α) Ακολουθία οπισθοδρόμησης, β) ακολουθία κατά τομείς (μη συγκολλημένα τμήματα γεμίζονται μετά την ολοκλήρωση άλλων ενδιάμεσων τμημάτων), γ) ακολουθία συνεχούς προσθήκης, δ) ακολουθία καταρράκτη	203
Εικόνα 7.7 Εγκάρσια κατανομή παραμενουσών τάσεων σε επίπεδη μετωπική συγκόλληση χωρίς (καμπύλη 1) και με (καμπύλη 2). Παρεμπόδιση της πλευρικής συστολής	204
Εικόνα 7.8 Εφαρμογή επιμηκνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης σε έλασμα.....	207
Εικόνα 7.9 Η τεχνική του Gunnert για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων. α) Επιμηκνσιομέτρο, β) μπάλες Brinell στις οπές των επιμηκνσιομέτρων, γ) σχήμα των οπών υποδοχής μπάλας Brinell, δ) επιφάνεια μετρήσεων	207
Εικόνα 7.10 Η τεχνική των Matha – Soete. α) Ακτινικές σ_r και εφαπτομενικές σ_θ παραμένουσες τάσεις στην περιφέρεια μικρού κύκλου με κέντρο το O, β) κατανομή των $\bar{\epsilon}_r$ και $\bar{\epsilon}_\theta$ όταν $\sigma_{x0}=\sigma_{y0}=\sigma_0$ και $\sigma_{xy0}=0$, γ) τοποθέτηση των επιμηκνσιομέτρων σε σχήμα άστρου	209
Εικόνα 7.11 Η τεχνική αφαίρεσης υλικού του Stäublein	211
Εικόνα 7.12 Η τεχνική διάνοιξης οπής του Gunnert.....	213
Εικόνα 7.13 Η τεχνική τεμαχισμού των Rosenthal – Norton.....	214
Εικόνα 7.14 Τυπικές μορφές ρωγμάτωσης υπό διαφορετικές επιφανειακές τασικές συνθήκες	215
Εικόνα 7.15 α) Σχηματική περιγραφή της τεχνικής των φωτο-ελαστικών επιστρώματων, β) Παράδειγμα απεικόνισης φωτο-ελαστικού επιστρώματος.....	216
Εικόνα 7.16 Περίθλαση ακτίνων X σε κρυσταλλικό πλέγμα.....	217
Εικόνα 7.17 Σχηματική παράσταση φωτογραφικής μεθόδου.....	218
Εικόνα 7.18 Σχηματική παράσταση της μεθόδου περιθλασίμετρου	219

Εικόνα 7.19 Κατανομές παραμενουσών τάσεων σε επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων	221
Εικόνα 8.1 Σχηματικό διάγραμμα μέτρησης μεταβατικών θερμικών τάσεων κατά τις συγκολλήσεις.....	223
Εικόνα 8.2 Τυπικές μορφές παραμορφώσεων συγκολλητών κατασκευών	224
Εικόνα 8.3 Γωνιακή μεταβολή ϕ_0 σε α) χαλύβδινα και β) αλουμινένια ελάσματα	228
Εικόνα 8.4 Μέγιστη παραμόρφωση, δ_m , σαν συνάρτηση του πάχους ελάσματος, t , του μήκους ανοίγματος, a , και του μεγέθους της αυχενικής συγκόλλησης, $D_{t,}$, για χάλυβα και αλουμίνιο....	229
Εικόνα 8.5 Μεταβλητές που επιδρούν στη μέγιστη παραμόρφωση δ_m	229
Εικόνα 8.6 Πιθανές αποτυχίες λόγω γωνιακής μεταβολής.....	230
Εικόνα 8.7 α) Πλαστική αρχική κάμψη β) ελαστική προένταση.....	230
Εικόνα 8.8 Σχέση μεταξύ διαμήκους παραμόρφωσης και μεγέθους συγκόλλησης	231
Εικόνα 8.9 Μέθοδοι θέρμανσης με φλόγα. α) Κατά γραμμές, β) κατά βελόνες, γ) σε κάθετες διευθύνσεις, δ) κατά σημεία, ε) τριγωνική, στ) τοπική.....	233
Εικόνα 9.1 Δοκίμιο και θέσεις των μετρητικών της μελέτης ερευνητών του M.I.T.	235
Εικόνα 9.2 Αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης ερευνητών του M.I.T. σε συγκολλήσεις GMAW κράματος 5052-H32, α) Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης, β) Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος της μέσης τομής των δοκιμίων, γ) μεταβατικές θερμικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης αλλά και κατά την απόψυξη του δοκιμίου, δ) μεταβολές της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά τη συγκόλληση και την απόψυξή του	235
Εικ. 9.3 Κατανομή ορίου διαρροής και παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση κράματος αλουμινίου 5456-H321, πάχους $1/2$ in και μήκους 36 in.....	236
Εικ. 9.4 Μετρήσεις παραμενουσών τάσεων με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής	237
Εικόνα 9.5 α) Διάταξη μετρητικών και β) πειραματικές καμπύλες παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης κατά τους G.C. Luh και R.M. Hwang.....	237
Εικόνα 9.6 Πειραματικές καμπύλες παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης κατά τους G.R. Bradley και M.N. James. α) κάθετα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης β) παράλληλα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης.....	238
Εικόνα 10.1 Μεταβολή του ποσοστού της παραμόρφωσης που ανακτάται από τη διάνοιξη της οπής για την περίπτωση όπου οι παραμορφώσεις έχουν πλήρως κανονικοποιηθεί στο 100% για $Z/D=0.4$	242
Εικόνα 10.2 Γραφική αναπαράσταση των συντελεστών \bar{a} και \bar{b} . Οι συνεχείς γραμμές ανταποκρίνονται σε τυφλές οπές πλήρους βάθους και οι διακεκομμένες σε διαμπερείς οπές,	

υποθέτοντας και στις δύο περιπτώσεις ότι η αρχική παραμένουσα τάση είναι ομοιόμορφη με το βάθος	243
Εικόνα 10.3 α) Ροζέτα επιμηκνυομέτρων, β) ο οδηγός διάτρησης RS-200	244
Εικόνα 10.4 Διατάξεις μέτρησης των θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης...	246
Εικόνα 11.1 Θέσεις μέτρησης των παραμενουσών τάσεων και αποστάσεις από τον άξονα συγκόλλησης	248
Εικόνα 11.2 Γενική σχηματική η διάταξη επιμηκνυομέτρων, γραμμικών αισθητήρων μετατόπισης και θερμοστοιχείων	251
Εικόνα 11.3 Γενική άποψη του χώρου διεξαγωγής των πειραμάτων	252
Εικόνα 11.4 Ελάσματα πάχους 6mm με εγκατεστημένα τα επιμηκνυομέτρα και τα θερμοστοιχεία.....	253
Εικόνα 11.5 Άποψη της περιοχής των εγκατεστημένων επιμηκνυομέτρων	253
Εικόνα 11.6 Άποψη του συνόλου των διατάξεων λίγο πριν τη δοκιμή συγκόλλησης	254
Εικόνα 11.7 Άποψη του χωρίς περιορισμούς ελάσματος	254
Εικόνα 11.8 Άποψη του ελάσματος με τα εγκατεστημένα θερμοστοιχεία λίγο πριν την εφαρμογή των περιορισμών και τη δοκιμή συγκόλλησης.....	255
Εικόνα 11.9 Άποψη του ελάσματος με τα εγκατεστημένα θερμοστοιχεία αμέσως μετά τη δοκιμή συγκόλλησης	255
Εικόνα 11.10 Γωνιακή μετατόπιση σε συγκολλημένα ελάσματα α) πάχους 4mm, β) πάχους 6mm. Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση σε συγκολλημένα ελάσματα γ) πάχους 4mm, δ) πάχους 6mm.....	257
Εικόνα 11.11 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 4mm	258
Εικόνα 11.12 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 5mm	258
Εικόνα 11.13 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 6mm. Όπως προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα	259
Εικόνα 11.14 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 6mm. Μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.....	259
Εικόνα 11.15 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Χ στην επάνω επιφάνεια (U).....	262
Εικόνα 11.16 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Χ στην επιφάνεια ρίζας (D).....	262
Εικόνα 11.17 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Χ	263
Εικόνα 11.18 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Χ.....	263
Εικόνα 11.19 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επάνω επιφάνεια (U).....	264
Εικόνα 11.20 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επιφάνεια ρίζας (D).....	264
Εικόνα 11.21 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Υ	265

Εικόνα 11.22 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Υ.....	265
Εικόνα 11.23 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης	266
Εικόνα 11.24 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης	266
Εικόνα 11.25 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης	267
Εικόνα 11.26 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης	267
Εικόνα 11.27 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης	268
Εικόνα 11.28 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης	269
Εικόνα 11.29 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης	269
Εικόνα 11.30 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης	270
Εικόνα 11.31 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης	270
Εικόνα 11.32 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης	271
Εικόνα 11.33 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Χ στην επάνω επιφάνεια (U).....	274
Εικόνα 11.34 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Χ στην επιφάνεια ρίζας (D).....	274
Εικόνα 11.35 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Χ	275
Εικόνα 11.36 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Χ.....	275
Εικόνα 11.37 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επάνω επιφάνεια (U).....	276
Εικόνα 11.38 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επιφάνεια ρίζας (D).....	276
Εικόνα 11.39 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Υ	277
Εικόνα 11.40 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Υ.....	277
Εικόνα 11.41 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης	278
Εικόνα 11.42 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης	278

Εικόνα 11.43 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης	279
Εικόνα 11.44 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης	279
Εικόνα 11.45 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης	280
Εικόνα 11.46 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης	280
Εικόνα 11.47 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης	281
Εικόνα 11.48 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης	281
Εικόνα 11.49 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης	282
Εικόνα 11.50 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης	282
Εικόνα 11.51 Εγκατεστημένες ροζέτες, στα συγκολλημένα ελάσματα, για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων. Ελάσματα πάχους α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm.....	284
Εικόνα 11.52 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)	285
Εικόνα 11.53 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)	286
Εικόνα 11.54 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)	286
Εικόνα 11.55 α) Μετρητική διάταξη μέτρησης παραμενουσών τάσεων με την τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων, β) το έλασμα με εγκατεστημένα τα επιμηκυνσιόμετρα λίγο πριν την κοπή στην κοπτική κορδέλα,	288
Εικόνα 11.56 Επιμηκυνσιόμετρα κοντά στην περιοχή συγκόλλησης.....	288
Εικόνα 11.57 Δοκίμια μετά την εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού. Ελάσματα πάχους α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm	289

Εικόνα 11.58 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού).....	290
Εικόνα 11.59 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού).....	291
Εικόνα 11.60 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 6mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού).....	291
Εικόνα 12.1 Σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής καμπύλης ως συνάρτηση του χρόνου για μια συγκόλληση χαλύβδινου ελάσματος. Σχετική θέση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της συγκόλλησης	307
Εικόνα 12.2 Τα τρία στάδια του χρόνου συγκόλλησης.....	309
Εικόνα 12.3 Κινούμενη σημειακή πηγή σε ημι - άπειρη πλάκα	311
Εικόνα 12.4 Τρισδιάστατη παρουσίαση της λύσης του Rosenthal για μεγάλου πάχους πλάκα.....	312
Εικόνα 12.5 Κινούμενη πηγή γραμμής σε λεπτό έλασμα, Grong.....	314
Εικόνα 12.6 Γραφική αναπαράσταση της λύσης Rosenthal για λεπτή πλάκα	315
Εικόνα 12.7 Κατανομή της διπλής ελλειψοειδούς εισερχόμενης θερμότητας, $\left(\frac{W}{m^3} \right)$	318
Εικόνα 12.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπλής ελλειψοειδούς.....	320
Εικόνα 12.9 Συνοριακές συνθήκες για τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου και του πεδίου ταχύτητας κατά τους I.S. Kim και A Basu	323
Εικόνα 12.10 Αποτελέσματα μοντέλου των I.S. Kim και A Basu. α) Πορεία διεπιφάνειά υγρού - στερεού κατά την εφαρμογή της τεχνικής GMAW σε διαφορετικούς χρόνους, β) σύγκριση των τεχνικών GMAW και GTAW.....	323
Εικόνα 12.11 Τα φυσικά φαινόμενα και οι δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση του ρευστού μετάλλου εντός της λίμνης συγκόλλησης.....	324
Εικόνα 12.12 Σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής κατανομής σε πλάκα όταν στρώση συγκόλλησης αποτίθεται στην επιφάνειά της.....	326
Εικόνα 12.13 Διακριτοποίηση τασικού πεδίου σε εγκάρσιες ζώνες για τον υπολογισμό των θερμικών και παραμενουσών τάσεων	326
Εικόνα 12.14 Αποτελέσματα αναλυτικής μοντελοποίησης από ερευνητές του M.I.T. α) Μεταβολή θερμοκρασίας κατά μήκος του διαμήκους άξονα, β) Ισόθερμες καμπύλες γύρω από το τόξο	

συγκόλλησης, γ) μεταβολή τάσεων κατά μήκος τριών διαμηκών γραμμών, δ) Ισόθερμες καμπύλες γύρω από το τόξο συγκόλλησης	327
Εικόνα 12.15 α) Ισοτροπική ενδοτράχυνση, β) Κινηματική ενδοτράχυνση, γ) Καμπύλες ενδοτράχυνσης εξαρτώμενες από τις πλαστικές παραμορφώσεις και τη θερμοκρασία.....	334
Εικόνα 13.1 Μοντέλο διπλής ελλειψοειδούς πηγής θερμότητας του Goldak	339
Εικόνα 13.2 Επιφάνεια διαρροής Von Mises	342
Εικόνα 13.3 Σχηματική αναπαράσταση «κινούμενου πλαισίου αναφοράς».....	352
Εικόνα 13.4 Μονοαξονική ελαστο - πλαστική φόρτιση και ελαστική αποφόρτιση υλικού	353
Εικόνα 13.5 Ιδανικές καμπύλες για δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού	354
Εικόνα 13.6 Επιφάνεια διαρροής von Mises δύο διαστάσεων	355
Εικόνα 13.7 Φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση στερεού ισοτροπικής σκλήρυνσης	356
Εικόνα 13.8 Επιφάνειες διαξονικής φόρτισης για στερεά ισοτροπικής σκλήρυνσης	357
Εικόνα 13.9 Μονοαξονική φόρτιση ράβδου υπό πλαστική παραμόρφωση λόγω κινηματικής σκλήρυνσης	357
Εικόνα 13.10 Μετατόπιση της επιφάνειας διαρροής με τον κανόνα της κινηματικής σκλήρυνσης υπό διαξονική φόρτιση.....	358
Εικόνα 13.11 Σχηματική παράσταση της ροής θερμότητας. α) τρισδιάστατη, β) διοδιάστατη	360
Εικόνα 13.12 Αδιάστατοι ρυθμοί απόψυξης σαν συνάρτηση του αδιάστατου πάχους της πλάκας \bar{g}	361
Εικόνα 13.13 Καμπύλη επιλογής διοδιάστατης ή τρισδιάστατης ανάλυσης για την περίπτωση του	362
Εικόνα 13.14 Γεωμετρία των ακμών συγκόλλησης για πάχος ελάσματος 4mm.....	364
Εικόνα 13.15 Διαστάσεις του ενός από τα δύο υπό προσομοίωση συγκόλλησης ελάσματα	366
Εικόνα 13.16 Επιφάνεια διαρροής von Mises δύο διαστάσεων	368
Εικόνα 13.17 Οι βασικές τιμές θερμικών ιδιοτήτων του υπό μελέτη κράματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όπως εισήχθησαν ως δεδομένα στο ABACUS®	369
Εικόνα 13.18 Η τιμές του μέτρου ελαστικότητας του υπό μελέτη κράματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όπως εισήχθησαν ως δεδομένα στο ABACUS®	370
Εικόνα 13.19 Η εμπειρική καμπύλη του ορίου διαρροής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, των Χ. Κ. Zhu και Υ. J. Chao, προσαρμοσμένη για το AA5083-H116.....	371
Εικόνα 13.20 Σκαριφηματική απεικόνιση των μηχανικών συνοριακών συνθηκών που υιοθετήθηκαν κατά την ανέγερση του μοντέλου	372
Εικόνα 13.21 Οι θερμικές και μηχανικές συνοριακές συνθήκες του μοντέλου	373
Εικόνα 13.22 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπλής ελλειψοειδούς.....	374
Εικόνα 13.23 Η κατανομή της πηγής θερμότητας στο μοντέλο.....	374

Εικόνα 14.1	Η κατανομή των θερμοκρασιών όταν το τόξο βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής του .	377
Εικόνα 14.2	Μια πιο κοντινή παρατήρηση της κατανομής των θερμοκρασιών όταν το τόξο βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής του.....	378
Εικόνα 14.3	Κατανομή θερμοκρασιών στις τρεις διαστάσεις, στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης, σε τυχαίο σημείο της διαδρομής του τόξου	378
Εικόνα 14.4	Κατανομή θερμοκρασιών στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης, στη μέση της διαδρομής του τόξου και σε εγκάρσια τομή yz.....	379
Εικόνα 14.5	Όψεις της τελικής κατάστασης (μετά την απόψυξη) των στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με καταγραφή των παραμορφώσεων κατά z	379
Εικόνα 14.6	Όψη της τελικής κατάστασης (μετά την απόψυξη) των στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με καταγραφή των παραμορφώσεων κατά z	380
Εικόνα 14.7	κατανομή των τελικών παραμορφώσεων κατά z	380
Εικόνα 14.8	Κατανομή των τελικών μέγιστων κύριων τάσεων	381
Εικόνα 14.9	Κοντινή άποψη της κατανομής των τελικών μέγιστων κύριων τάσεων σε περιοχή της συγκόλλησης στο μέσο μήκος	381
Εικόνα 14.10	Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από την προσομοίωση (μοντέλο M0[T0]).....	383
Εικόνα 14.11	Σύγκριση των πειραματικών στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση	385
Εικόνα 14.12	Σύγκριση των πειραματικών στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	388
Εικόνα 14.13	Σύγκριση των πειραματικών μέγιστων κύριων παραμενουσών τάσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση.....	389
Εικόνα 14.14	Σύγκριση μοντέλων T0 και T1 (Παράγραφος 13.6.9).....	394
Εικόνα 14.15	Σύγκριση μοντέλων T0 και T2 και T3 (Παράγραφος 13.6.9).....	395
Εικόνα 14.16	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις	397
Εικόνα 14.17	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση	397
Εικόνα 14.18	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις.....	400
Εικόνα 14.19	Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση.....	401

Εικόνα 14.20 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις	404
Εικόνα 14.21 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση	405
Εικόνα 14.22 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις.....	408
Εικόνα 14.23 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση.....	409
Εικόνα 14.24 Σχηματική παράσταση των έξι διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης που προσομοιώθηκαν. Με βέλη η φορά συγκόλλησης.....	417
Εικόνα 14.25 Κατανομή θερμοκρασιών σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρωθεί για το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος για τις περιπτώσεις α) Seq-1 και β) Seq-2.....	420
Εικόνα 14.26 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-3, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος	420
Εικόνα 14.27 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-4, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος	421
Εικόνα 14.28 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-5, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος	421
Εικόνα 14.29 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-6, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος	422

Εικόνα 14.30	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-1'. Σύγκριση με το M[0]	423
Εικόνα 14.31	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-2'. Σύγκριση με το M[0]	424
Εικόνα 14.32	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-3'. Σύγκριση με το M[0]	425
Εικόνα 14.33	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-4'. Σύγκριση με το M[0]	426
Εικόνα 14.34	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-5'. Σύγκριση με το M[0]	427
Εικόνα 14.35	Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-6'. Σύγκριση με το M[0]	428
Εικόνα 14.36	Συνολική παραμόρφωση λόγω συγκόλλησης. α) Seq-1, β) Seq-2, γ) Seq-3, δ) Seq-4, ε) Seq-5, στ) Seq-6.....	429
Εικόνα 14.37	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-1' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	431
Εικόνα 14.38	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-2' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	431
Εικόνα 14.39	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-3' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	432
Εικόνα 14. 40	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-4' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	432
Εικόνα 14.41	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-5' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	433
Εικόνα 14.42	Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-6' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.....	433
Εικόνα 14.43	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-1'.....	436
Εικόνα 14.44	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-2'.....	436
Εικόνα 14.45	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-3'.....	437
Εικόνα 14.46	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-4'.....	437

Εικόνα 14.47	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-5'	438
Εικόνα 14.48	Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-6'	438
Εικόνα 14.49	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-1', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	440
Εικόνα 14.50	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-2', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	441
Εικόνα 14.51	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-3', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	441
Εικόνα 14.52	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-4', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	442
Εικόνα 14.53	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-5', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	442
Εικόνα 14.54	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-6', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων	443
Εικόνα 15.1	Πρόβλεψη παραμορφώσεων σε μοντέλο προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων προκατασκευασμένου στοιχείου μεταλλικής κατασκευής ^[4]	469
Εικόνα 15.2	Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες ^[3]	469
Εικόνα 15.3	Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες ^[3]	470
Εικόνα 15.4	Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες ^[3]	471

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Φυσικές ιδιότητες καθαρού αλουμινίου	9
Πίνακας 1.2 Παραγωγή Αλουμινίου (σε χιλιάδες τόνους) για τα έτη 1995 - 2010.....	11
Πίνακας 1.3 Οι κύριες προσθήκες κραμάτωσης του αλουμινίου.....	12
Πίνακας 1.4 Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου	13
Πίνακας 1.5 Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου	14
Πίνακας 1.6 Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου, με βάση την κατεργασία που έχουν υποστεί	14
Πίνακας 1.7 Ονοματολογίες που ακολουθούνται από διάφορες χώρες για τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου	17
Πίνακας 1.8 Εξέλιξη των ναυπηγικών υλικών και τρόποι σύνδεσής τους	24
Πίνακας 1.9 Χαρακτηριστικά αλουμινίου και σιδήρου.....	25
Πίνακας 1.10 Σύγκριση βάρους και αντοχής για κάποια ναυπηγικά κατασκευαστικά υλικά	26
Πίνακας 1.11 βασικά κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική	31
Πίνακας 1.12 Χημική σύσταση κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγικές εφαρμογές.....	31
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά της συγκόλλησης GTAW, με βάση τον τύπο ρεύματος που χρησιμοποιείται 35	
Πίνακας 2.2 Ιδιότητες βασικών αερίων προστασίας συγκόλλησης αλουμινίου.....	41
Πίνακας 2.3 Επίδραση στη συγκόλληση, της αύξησης του ποσοστού του ηλίου σε μείγμα Αργού / Ηλίου	43
Πίνακας 2.4 Θερμοκρασίες και χρόνοι προθέρμανσης για ορισμένα κράματα αλουμινίου	43
Πίνακας 2.5 Σύγκριση ταχύτητας τροφοδοσίας σύρματος με το ρεύμα συγκόλλησης για τα κράματα 4043 και 5356 υπό μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm	54
Πίνακας 2.6 Χημική σύσταση, φυσικές ιδιότητες και συγκολλησιμότητα επιλεγμένων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου	58
Πίνακας 2.7 Χημική σύσταση, φυσικές ιδιότητες και συγκολλησιμότητα επιλεγμένων θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου	59
Πίνακας 2.8 Ονομαστική σύσταση και εύρος τήξης των βασικών κραμάτων προσθήκης αλουμινίου	61
Πίνακας 2.9 Μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων τόξου με αέριο προστασίας επιλεγμένων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου	65
Πίνακας 2.10 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων τόξου με αέριο προστασίας.....	66

Πίνακας 2.11 Επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στην αντοχή της συγκόλλησης του κράματος 6061	67
Πίνακας 2.12 Ελάχιστη αντοχή σε διάτμηση ορισμένων συνηθισμένων κραμάτων προσθήκης	68
Πίνακας 2.13 Αντοχή σε εφελκυσμό σε επιλεγμένες θερμοκρασίες για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου με τεχνική συγκόλλησης τόξου με αέριο προστασίας	70
Πίνακας 2.14 Κράματα προσθήκης για συγκόλληση επιλεγμένων κραμάτων αλουμινίου τα οποία χρησιμοποιούνται σε λειτουργίες όπου υφίστανται αύξηση θερμοκρασίας	71
Πίνακας 2.15 Συνδυασμοί διαφόρων κραμάτων προσθήκης σε συγκολλήσεις και βασικών υλικών που αποδίδουν καλό εναρμονισμό χρώματος	72
Πίνακας 2.16 Σχετικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων κραμάτων αλουμινίου προσθήκης που χρησιμοποιούνται σε GMAW και GTAW	73
Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά διάφορων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου	80
Πίνακας 2.18 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλημένων τυπικών μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx	81
Πίνακας 2.19 Επίπεδα πορώδους σε ραδιογραφίες μήκους συγκόλλησης 76,2mm	84
Πίνακας 2.20 Θερμοκρασίες και χρόνοι προθέρμανσης κραμάτων αλουμινίου	93
Πίνακας 5.1 Η χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν	131
Πίνακας 5.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων των δύο βασικών μετάλλων	131
Πίνακας 5.3 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν	132
Πίνακας 6.1 Οι παράμετροι συγκόλλησης για τις δοκιμές απόθεσης μετάλλου, για παροχή του αερίου προστασίας περίπου 16 - 18 lit/min	142
Πίνακας 6.2 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης ως προς τη γεωμετρία της ραφής για τις δοκιμές απόθεσης μετάλλου ΧΠ και ΜΠ	146
Πίνακας 6.3 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη όπως προέκυψαν από τις προκαταρκτικές δοκιμές bead on plate	147
Πίνακας 6.4 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης	148
Πίνακας 6.5 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης	158
Πίνακας 6.6 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης	165
Πίνακας 6.7 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη	172
Πίνακας 6.8 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης	173
Πίνακας 9.1 Συνθήκες συγκόλλησης GMAW κράματος 5052-H32 που πραγματοποιήθηκε στο M.I.T.	234
Πίνακας 10.1 Συντελεστές \bar{a} και \bar{b} για τους κύριους τύπους ροζετών	244

Πίνακας 11.1 Βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm διαστάσεων 700x300mm ²	247
Πίνακας 11.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων των δύο βασικών μετάλλων.....	247
Πίνακας 11.3 Τα χαρακτηριστικά της ροζέτας επιμηκυνσιομέτρων τύπου EA-13062RE-120	248
Πίνακας 11.4 Μετρήσεις παραμενουσών τάσεων μη συγκολλημένου δοκιμίου	248
Πίνακας 11.5 Παραμένουσες τάσεις συγκολλημένου δοκιμίου	249
Πίνακας 11.6 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη.....	250
Πίνακας 11.7 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των διατιθέμενων κραμάτων αλουμινίου	250
Πίνακα 11.8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων παραμενουσών τάσεων με χρήση της τεχνικής τεμαχισμού	285
Πίνακα 11.9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων παραμενουσών τάσεων με χρήση της τεχνικής τεμαχισμού	290
Πίνακας 13.1 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη.....	364
Πίνακας 13.2 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης.....	364
Πίνακας 13.3 Βασικές ιδιότητες σε συνθήκες περιβάλλοντος, φυσικές και μηχανικές, του κράματος αλουμινίου 5083-H116	367
Πίνακας 14.1 Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0] σε ότι αφορά στους	384
Πίνακας 14.2 Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0] σε ότι αφορά στη συνολική γωνιακή μετατόπιση	386
Πίνακας 14.3 Σύγκριση μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0] σε ότι αφορά στις κατά τον άξονα συγκόλλησης σ_x παραμένουσες τάσεις	390
Πίνακας 14.4 Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιών για καθένα από τα μοντέλα T0 – T3 καθώς και το σφάλμα των T1 – T3 ως προς το T0. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το T0	396
Πίνακας 14.5 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] καθώς και το σφάλμα των M1[T1], M2[T2] και M3[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0].....	398
Πίνακας 14.6 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων γωνιακών παραμορφώσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] καθώς και το σφάλμα των M1[T1], M2[T2] και M3[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	399
Πίνακας 14.7 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] καθώς και το σφάλμα των M4[T1], M5[T1], M6[T1] και	

M7[T1] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	402
Πίνακας 14.8 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων γωνιακών παραμορφώσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] καθώς και το σφάλμα των M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	403
Πίνακας 14.9 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] καθώς και το σφάλμα των M8[T2], M9[T2] και M10[T2] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	406
Πίνακας 14.10 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων γωνιακών παραμορφώσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] καθώς και το σφάλμα των M8[T2], M9[T2] και M10[T2] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	407
Πίνακας 14.11 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] καθώς και το σφάλμα των M11[T3], M12[T3] και M13[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	410
Πίνακας 14.12 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων γωνιακών παραμορφώσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] καθώς και το σφάλμα των M11[T3], M12[T3] και M13[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	411
Πίνακας 14.13 Σφάλματα θερμικών κύκλων των T1 – T3 ως προς το T0. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το T0	414
Πίνακας 14.14 Σφάλματα των M1[T1], M2[T2], M3[T3], M4[T1], M5[T1], M7[T1], M8[T2], M9[T2], M10[T2], M11[T3], M12[T3], M13[T3] ως προς το M0[T0] σε ότι αφορά στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	414
Πίνακας 14.15 Σφάλματα των M1[T1], M2[T2], M3[T3], M4[T1], M5[T1], M7[T1], M8[T2], M9[T2], M10[T2], M11[T3], M12[T3], M13[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]	415
Πίνακας 14.16 Κωδική ονομασία και σύμβολα για καθεμιά από τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης που μελετήθηκαν	419

Πίνακας 14.17 Συγκριτικός πίνακας ελάχιστων και μέγιστων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης λόγω γωνιακής παραμόρφωσης των Seq-1 - Seq-6 με το M0[0] σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης	434
--	-----

Εισαγωγή - Πρόλογος

Η σχεδίαση μιας μεταλλικής κατασκευής που περιλαμβάνει συγκολλητά μέρη παρουσιάζει ξεχωριστές και ιδιαίτερες δυσκολίες. Η ύπαρξη συγκεντρωμένης πηγής θερμότητας, η οποία κατά βάση απαιτείται για τη συγκόλληση μεταλλικών υλικών, έχει ως συνέπεια την εμφάνιση δυσμενών φαινομένων όπως είναι για παράδειγμα οι παραμένουσες τάσεις, οι στρεβλώσεις ή οι μεταλλουργικές μεταβολές στην περιοχή της συγκόλλησης.

Καθώς τα φαινόμενα αυτά, δημιουργούν προβλήματα όχι μόνο κατά το στάδιο ανέγερσης της κατασκευής αλλά κυρίως ίσως κατά τη λειτουργία της, είναι βασικό, από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, να έχουν καθοριστεί όλοι οι παράμετροι που επιδρούν στη συγκόλληση όπως, ο τύπος του υλικού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, η τεχνική και η ακολουθία συγκόλλησης, οι μηχανικοί περιορισμοί κ.λπ.

Προκειμένου λοιπόν να διασφαλιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα σε ότι αφορά στην αξιοπιστία, το οποίο ωστόσο δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητο του τελικού κόστους και του χρόνου αποπεράτωσης, απαιτείται βαθειά γνώση των μεταβατικών θερμικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, των θερμικών κύκλων, των τελικών παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται, καθώς και των παραμορφώσεων που προκύπτουν. Επιπλέον, η εμβάθυνση στη μεταλλουργία της συγκόλλησης συμβάλλει ουσιαστικά στην επίτευξη του στόχου αυτού.

Μεταβαίνοντας στο χώρο της ναυπηγικής, όπου μιλώντας για σχεδιασμό και ανέγερση μεταλλικής συγκολλητής κατασκευής κυρίως εννοείται ή ο σχεδιασμός και ανέγερση ενός πλοίου ή έστω μιας υπερκατασκευής αυτού, στο συνολικό πρόβλημα πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπλέον απαιτήσεις, όπως αυτές επιβάλλονται από τη φύση της κατασκευής και το περιβάλλον λειτουργίας της. Η πολυπλοκότητα της μορφής των φορτίσεων που δέχεται ένα πλοίο εξαιτίας των κυματισμών, το θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον με το οποίο είναι συνεχώς σε επαφή, η ποικιλία στη μορφή και τη φύση του φορτίου που μεταφέρει, είναι παράγοντες που σαφώς καθορίζουν τη συμπεριφορά των συγκολλητών τμημάτων του.

Πιθανότατα, το ιδανικό θα ήταν η δημιουργία ενός συνολικού, ολοκληρωμένου συστήματος το οποίο λαμβάνει υπόψη και αναλύει όλους τους παράγοντες που αναφέρθηκαν και που υπεισέρχονται κατά το σχεδιασμό και την ανέγερση μιας συγκολλητής ναυπηγικής κατασκευής. Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα αφενός προϋποθέτει ακόμα αρκετά υψηλό κόστος για τη δημιουργία του, αφετέρου απαιτεί εξαιρετικά σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, πραγματοποιείται πειραματική και αριθμητική μελέτη ρομποτικών συγκολλήσεων λεπτών ελασμάτων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000. Η Διατριβή διαιρείται σε τέσσερις κύριες ενότητες και μια πέμπτη στην οποία συμπεριλαμβάνονται γενικά συμπεράσματα και άλλες γενικές θεωρήσεις επί της διατριβής.

Καθώς τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική μόλις τα τελευταία περίπου 40 χρόνια, στην πρώτη ενότητα, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του αλουμινίου και των κραμάτων του, με σκοπό να τονιστούν και να κατανοηθούν οι ξεχωριστές ιδιότητές του, καθώς και διαφορές του από το βασικό ναυπηγικό υλικό, το χάλυβα, ο οποίος και κυριαρχεί από τον 16^ο - 17^ο αιώνα (εποχή μετάβασης από τα ξύλινα στα μεταλλικά πλοία) μέχρι τις μέρες μας. Στη συνέχεια, στην ίδια ενότητα, επιδιώκεται η ανάλυση της συγκολλησιμότητας των κραμάτων αλουμινίου, με έμφαση φυσικά σε εκείνα που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική. Τονίζονται τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τις συγκολλήσεις τους και οι τρόποι αποφυγής αυτών, με επισημάνσεις τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε πρακτικό (π.χ. διαδικασία προετοιμασίας πριν τη συγκόλληση ή χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού κ.λπ.).

Ακολουθούν τρεις ενότητες μελέτης, οι οποίες κατά σειρά έχουν να κάνουν, με τη μεταλλουργία της συγκόλλησης και τους θερμικούς κύκλους αυτής - Ενότητα 2, τη μελέτη σε πραγματικό χρόνο των στρεβλώσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης όπως και της κατανομής των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από αυτή - Ενότητα 3 - και τέλος την μοντελοποίηση της συγκόλλησης - Ενότητα 4, που περιλαμβάνει τη θερμομηχανική αριθμητική μοντελοποίηση της συγκόλλησης, μέσω προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS®). Τα εξαγόμενα από την προσομοίωση δεδομένα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά ενώ, πραγματοποιείται και παραμετρική διερεύνηση αφενός της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων του υλικού και αφετέρου της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης στα εξαγόμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Σε καθεμία από τις τρεις τελευταίες ενότητες, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που τις διέπει σε συνδυασμό με τις σύγχρονες εξελίξεις της επιστημονικής κοινότητας που αντιστοιχούν σε αυτές, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση της μελέτης, τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε, στην Πέμπτη ενότητα γίνεται σύνθεση των αποτελεσμάτων και από τις τρεις ανωτέρω ενότητες μελέτης, με σκοπό την εξαγωγή τελικών συνδυαστικών συμπερασμάτων ενώ παρουσιάζονται και άλλες γενικές θεωρήσεις επί της διατριβής.

Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μελέτη που αφορά στις συγκολλήσεις των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, η οποία περιλαμβάνει τις σύγχρονες τάσεις προσέγγισης του

προβλήματος. Μέσω αυτής, προκύπτουν σημαντικά στοιχεία, που κάνουν περισσότερο κατανοητή τη συμπεριφορά του υπό μελέτη υλικού έναντι της συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αξιοποιηθούν κατά το σχεδιασμό μιας ναυπηγικής κατασκευής, οδηγώντας σε αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Λόγω των ξεχωριστών παραμέτρων συγκόλλησης που αφορούν στην πειραματική μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων από κράμα αλουμινίου (μεγάλη εισερχόμενη θερμότητα και ταχύτητα συγκόλλησης, σημαντικές και διαφορετικού είδους παραμορφώσεις, δυσκολίες στον τρόπο συγκράτησης των δοκιμίων) οι δυσκολίες στον τρόπο εγκατάστασης μετρητικών διατάξεων και αισθητήρων μέτρησης μεγεθών κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι εξαιρετικά μεγάλες με αποτέλεσμα σπάνια να συναντώνται βιβλιογραφικά αποτελέσματα ανάλογα με αυτά της παρούσας διατριβής. Έτσι, σε σχέση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αφενός καλύπτεται ένα κενό που αφορά στη μεταλλογραφική μελέτη συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5xxx για ελάσματα πάχους μικρότερο από 6 mm αφετέρου, παρουσιάζεται για πρώτη φορά σε τέτοια πάχη ελασμάτων, μελέτη μεταβατικών θερμικών και μηχανικών φαινομένων, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια πραγματικών συγκολλήσεων σύνδεσης κι όχι απόθεσης υλικού¹. Παράλληλα, και πάλι για τέτοια πάχη ελασμάτων από κράμα αλουμινίου όπως αυτά που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, είναι η πρώτη φορά που συγκρίνονται πειραματικά αποτελέσματα με αποτελέσματα προσομοίωσης και κυρίως, που μελετάται η επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης, μέσω προσομοίωσης, τόσο στις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης όσο, περισσότερο ίσως, στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης.

¹ K. Masubuchi, 'Analysis of welded structures', Pergamon Press, Oxford, 1980

Abstract - Preface

The design of a metallic construction that includes welding parts introduces special and specific difficulties. The presence of concentrated heat source, basically demanded for the welding of metallic elements, result adverse effects such as residual stresses, deformations, or metallurgical changes in the area of the welding seams.

While these effects introduces major problems not only during the erection of the construction but also and mainly perhaps, during its function, it is essential all parameters that affect the welding, like the type of the material and its geometrical characteristics, the welding technique, the welding sequence, the mechanical constrains etc. to be defined, from the first steps of the design.

Preparative to secure the best result, concerning reliability, which however can't be independent from the final cost and time of completion, comprehensive knowledge of the transient thermal stresses, the thermal cycles, the final residual stresses and deformations, because of welding, is required. Furthermore, gaining deeper insight into the welding metallurgy, contributes towards the accomplishment of this target.

Concerning marine and/or naval architecture, where talking about design and erection of a metallic construction that includes welding parts, primarily is meant the design and the construction of a ship or at least a ship's superstructure, further demands like these enforced by the type of such a construction and the nature of the environment that functions must be take into account in the total puzzle. The complexity of the stresses formed on a ship because of the waves, the saltwater corrosive environment in which is exposed, the diversity in the form and nature of the carrying loads are factors that affect indeed its welding sections.

Likely, the ideal status would be the creation of a total integrated system that includes and analyses all the parameters affect the behavior of the welded metallic construction. However, such a system demands significant cost and computational time.

In the present Ph.D. thesis an experimental and numerical study of robotic welding of thin plates of aluminum alloys of 5000 series is carried out. The thesis is divided in four primal parts and a fifth which include general conclusions and other general approaches.

While aluminum alloys are widely applied in marine and/or naval constructions just during the last 40 years, in the first part of the thesis, a brief presentation of the aluminum and its alloys is taking place in order to understand and underline its discrete properties as well as its differences from the primal marine alloy, the steel, which is dominating from the 16th - 17th century (transformation age from wooden to metallic ships) until today. Continuing to the same part of the thesis a study on the weldability of the aluminum alloys is taking place emphasizing to those

techniques used in marine and/or naval constructions. Furthermore, welding problems and ways to avoid them, both in theoretical and empirical level, are underlined (i.e. edge preparation sequence before welding, welding equipment apparatus used etc.).

Other three parts of the thesis are following which, in the order of presentation, dealing with the welding metallurgy and the welding thermal cycles – Part 2, the transient phenomena occurring during welding and the formation of residual stresses – Part 3 and finally welding simulation through thermo-mechanical finite element analysis via ABAQUS®. Simulated results are compared to the corresponding experimental data while a study on the effects on one hand of temperature-dependent material properties and on the other hand of the welding sequence on welding simulation results is also introduced.

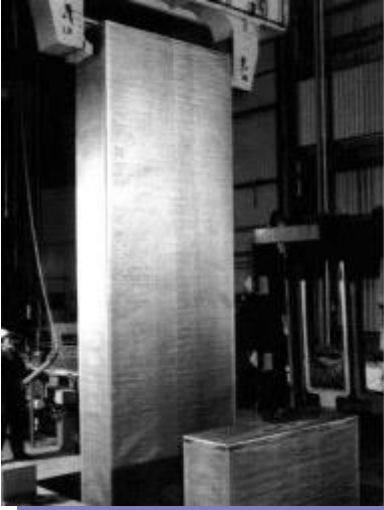
In each of the aforementioned three parts the theoretical background, the recent developments, the tools used, the results and of course the conclusions are introduced.

Finally, as mentioned before in the fifth part, general conclusions and other general approaches concerning the thesis are introduced.

In general, an integrated study concerning arc welding of marine aluminum alloys is introduced which is taking into account all the modern scientific approaches. Through this study, significant results come about that helps to fully understand the behavior of the marine aluminum alloys in arc welding while, can be used in the design of marine constructions leading to more reliable results.

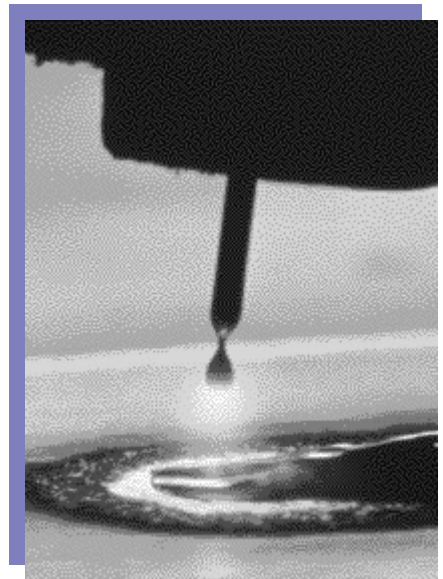
Due to particular and special welding parameters, concerning the experimental investigation of welding thin-walled aluminium alloys (high heat input and welding speed, large amount of different kind of distortions, difficulties in clamping the welding samples) the difficulties in the installation of sensors and measurement apparatus, recording different kind of data during welding, are significant resulting rarely encountered literature results similar to those of the present study. Thus, compared to the existing literature, a metallographic study of aluminium alloys of the 5xxx series welds, of thickness less than 6 mm, has been presented though, for the first time in such thicknesses, a study of transient thermal and mechanical phenomena occurring during welding of actual joints and not on bead-on-plate welds². Furthermore, for such thicknesses concerning aluminium alloy plates like those studied in this thesis, it is the first time that experimental results are compared to simulation results and mainly, it is the first time that the effect of welding sequence, on the deformation as even more in the distribution of the residual stresses due to welding is investigated through simulation procedure.

² K. Masubuchi, 'Analysis of welded structures', Pergamon Press, Oxford, 1980



ΕΝΟΤΗΤΑ 1η

Βασικές Αρχές που Διέπουν το Αλουμίνιο και τα Κράματα του



Κεφάλαιο 1^ο

Το Αλουμίνιο

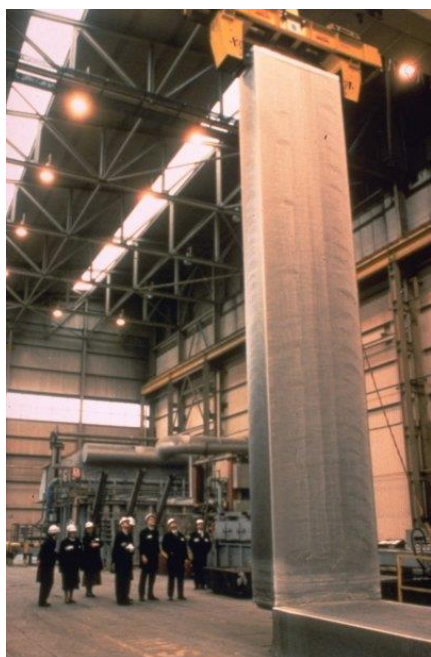
1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το αλουμίνιο, σύμβολο Al, είναι το μεταλλικό εκείνο στοιχείο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στο φλοιό της γης. Ο ατομικός του αριθμός είναι 13 και βρίσκεται στη στήλη ΙΙΙΑ του Περιοδικού Πίνακα.

13	←	Atomic Number
Al	←	Symbol
Aluminium		
26.98154	←	Atomic Weight
2 - 8 - 3	←	Electron Configuration

1.1.1 Η παραγωγή του αλουμινίου

Είναι το πιο άφθονο στοιχείο στον πλανήτη μετά τα μη μεταλλικά οξυγόνο και πυρίτιο. Δεν συναντάται ποτέ ως ελεύθερο μέταλλο αλλά συνήθως σε μορφές αλάτων αναμεμιγμένο με άλλα μέταλλα όπως το νάτριο, το σίδηρο, το μαγνήσιο κ.α. Τα ορυκτά στα οποία συναντάται, υφίστανται διαδικασία χημικού καθαρισμού, οπότε και προκύπτει ο βωξίτης, ένα ένυδρο μη καθαρό οξείδιο του αλουμινίου, το οποίο αποτελεί και την εμπορική πηγή του καθαρού αλουμινίου και των κραμάτων του.



Εικόνα 1.1 Παραγωγή του Αλουμινίου
διαδικασία για την εμπορική παραγωγή του αλουμινίου. Περίπου δύο με τρεις τόνοι βωξίτη

1.1.2 Η διαδικασία παραγωγής του

Το 1886 οι Charles Martin Hall στις Η.Π.Α. και Paul L. T. Héroult στη Γαλλία, σχεδόν ταυτόχρονα ανακάλυψαν ότι η αλούμινα (ή οξείδιο του αλουμινίου), διαλύεται σε τηγμένο κρυσθλίθο (Na_3AlF_6) και στη συνέχεια, ηλεκτρολυτικά δίνει ένα ακατέργαστο τηγμένο καθαρό μέταλλο, το αλουμίνιο^[27]. Η χαμηλού κόστους τεχνική αυτή, αναφέρεται ως Hall-Héroult και παρόλο που νέες τεχνικές βρίσκονται συνεχώς υπό μελέτη, αποτελεί μέχρι σήμερα την κυρίαρχη

απαιτούνται για την παραγωγή ενός τόνου αλούμινας (Al_2O_3) και από δύο περίπου τόνους αλούμινας προκύπτει ένας τόνος καθαρού μετάλλου. Η καθαρότητα του προϊόντος μπορεί να φτάσει το 99,5%, ενώ με περαιτέρω διεργασίες μπορεί να φτάσει και το 99,9%.

1.1.3 Οι ιδιότητες του

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ αργυρόχρωμο μέταλλο. Το ατομικό του βάρος είναι 26,9815, κρυσταλλώνεται σε δομή κυβικού εδροκεντρωμένου, λιώνει σε θερμοκρασία 660°C (1.220°F), εξαχνώνεται σε θερμοκρασία 2.467°C (4.473°F), και έχει ειδικό βάρος $2,7\text{g}/\text{cm}^3$.

Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά δραστικό. Στην επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό συνεχές επιφανειακό στρώμα Al_2O_3 το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό.

Επιπλέον, είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας αλλά ταυτόχρονα έχει και μεγάλη ανακλαστικότητα. Στον Πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται μερικές από τις φυσικές ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου.

Πίνακας 1.1 Φυσικές ιδιότητες καθαρού αλουμινίου^[5]

Πυκνότητα / ειδικό βάρος (g/cm^3 στους 20°C)	2,70
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής, ($1/^\circ\text{K}$)	$24 \cdot 10^{-6}$
Σημείο τήξης, ($^\circ\text{C}$)	660
Ειδική θερμότητα στους 100°C , cal/g (J/kg)	0,2241 (938)
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης, cal/g (kJ/kg)	400.0 (1.67)
Ηλεκτρική αγωγιμότητα στους 20°C , $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	38
Θερμική αγωγιμότητα, ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{K}$)	235
Θερμική απορρόφηση στους 100°F , %	3.0
Ανακλαστικότητα φωτός, %	90.0

Μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ μορφοποιείται χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Κράματα αυτού με μικρά ποσοστά χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου και πυριτίου αλλά και άλλων κραματικών στοιχείων, του προσδίδουν ιδιαίτερα ξεχωριστές και χρήσιμες ιδιότητες.

Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Έτσι, καθαρό αλουμίνιο σε ποσοστό 99,996% έχει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 49 MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

1.1.4 Οι εφαρμογές του αλουμινίου

Μια συγκεκριμένη ποσότητα μάζας αλουμινίου, ζυγίζει περίπου το 1/3 της ίδιας μάζας από σίδηρο.

Μόνο το λίθιο, το μαγνήσιο και το βηρύλλιο είναι πιο ελαφριά μέταλλα από το αλουμίνιο. Ο



Εικόνα 1.2 Ανακύκλωση του Αλουμινίου

συνδυασμός του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος με την υψηλή αντιδιαβρωτική αντοχή του, το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δομική και αρχιτεκτονική (τόσο ως δομικό όσο και ως διακοσμητικό υλικό), αλλά και στην κατασκευή αυτοκινήτων, τρένων, αεροπλάνων, πλοίων και γενικότερα σε εφαρμογές, όπου απαιτείται μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και ταυτόχρονα



Εικόνα 1.3 Εφαρμογές του αλουμινίου

εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. μεταφορά εμπορευμάτων, υγρών καυσίμων κ.λπ.).

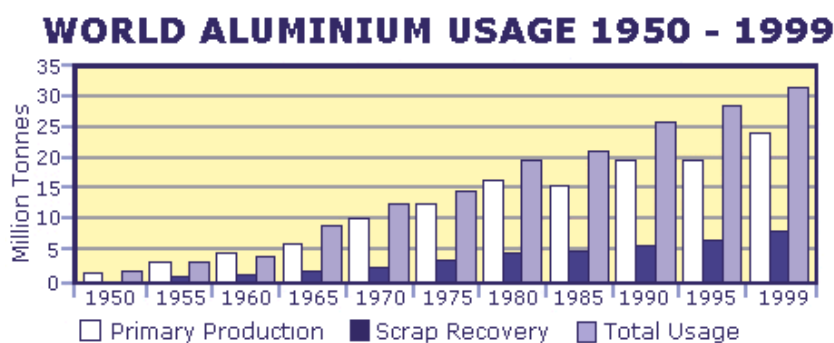
Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς του, χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκευών μαγειρικής, ως περιτύλιγμα τροφίμων, αλλά και στην κατασκευή πιστονίων για κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Έχει το 63% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού, αλλά μόνο το μισό βάρος ενός ίδιου αγωγού. Κατά συνέπεια, ένας αγωγός αλουμινίου είναι πιο μεγάλος σε διάμετρο από έναν αντίστοιχο από χαλκό, αλλά εξακολουθεί να είναι πιο ελαφρής και θεωρείται καταλληλότερος για μεγάλου μήκους γραμμές μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης (αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται πλέον για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχης των 700,000V ή και περισσότερο).

Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (εξαιτίας του γεγονότος ότι απορροφά σχετικά λίγα νετρόνια) και σε κρυογονικές θερμοκρασίες επειδή διατηρεί την αντοχή του και αυξάνει τη σκληρότητα του όσο μειώνεται η θερμοκρασία.

1.1.5. Η παραγωγή του αλουμινίου τον 20^ο και 21^ο αιώνα

Από το 1888 όπου προσδιορίζεται η ίδρυση των πρώτων εταιριών παραγωγής αλουμινίου στη Γαλλία, την Ελβετία και τις Η.Π.Α. και το 1900 όπου η ετήσια παραγωγή έφτανε τους 8.000 τόνους, τριάντα οκτώ μόλις χρόνια αργότερα, το 1938, η ετήσια παραγωγή αλουμινίου εκτινασσόταν στους 537.000 τόνους, δείχνοντας την ευρεία αποδοχή αυτού του «νέου» υλικού σε κάθε είδους εφαρμογή. Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.4 και τον Πίνακα 1.2, φαίνονται η ιστορική εξέλιξη της ετήσιας παραγωγής αλουμινίου από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ως τις μέρες μας^[28].



Εικόνα 1.4 Η παραγωγή αλουμινίου (σε χιλιάδες τόνους) μεταξύ 1950 και 1999^[28]

Πίνακας 1.2 Παραγωγή Αλουμινίου (σε χιλιάδες τόνους) για τα έτη 1998 – 2013^[28]

Έτος	Παραγωγή Αλουμινίου (Σε χιλιάδες τόνους)								Ημερήσιο Μ.Ο.
	Αφρική	Βόρειος Αμερική	Λατινική Αμερική	Ασία (ex. China)	Δυτική Ευρώπη	Ανατολική Ευρώπη	Ωκεανία	Σύνολο	
1998	1,043	6,086	2,075	1,843	3,549	3,419	1,934	19,949	54.7
1999	1,095	6,169	2,093	1,966	3,720	3,584	2,028	20,655	56.6
2000	1,178	6,041	2,167	2,221	3,801	3,689	2,094	21,191	57.9
2001	1,369	5,222	1,991	2,234	3,885	3,728	2,122	20,551	56.3
2002	1,372	5,413	2,230	2,261	3,928	3,825	2,170	21,199	58.1
2003	1,428	5,495	2,275	2,475	4,068	3,996	2,198	21,935	60.1
2004	1,711	5,110	2,356	2,735	4,295	4,139	2,246	22,592	61.7
2005	1,753	5,382	2,391	3,139	4,352	4,194	2,252	23,463	64.3
2006	1,864	5,333	2,493	3,493	4,182	4,230	2,274	23,869	65.4
2007	1,815	5,642	2,558	3,717	4,305	4,460	2,315	24,812	68.0
2008	1,715	5,783	2,660	3,923	4,618	4,658	2,297	25,654	70.1
2009	1,681	4,759	2,508	4,400	3,722	4,117	2,211	23,398	64.1
2010	1,728	4,671	2,297	2,479	3,749	4,217	2,265	21,407	60.0
2011	1,805	4,969	2,185	2,533	4,027	4,319	2,306	22,144	61.3
2012	1,639	4,851	2,052	2,535	3,605	4,323	2,186	21,191	58.1
2013	1,810	4,918	1,920	2,439	3,525	3,995	2,105	20,712	56.4

1.2 Τα κράματα του αλουμινίου

Όπως ακριβώς συμβαίνει και με κάθε μέταλλο, έτσι και στην περίπτωση του καθαρού αλουμινίου, η χρησιμότητά του διευρύνεται σημαντικά έπειτα από την κραμάτωση του με άλλα στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται «νέα μέταλλα» που έχουν ως βάση το αλουμίνιο και που οι εφαρμογές τους είναι περισσότερες από αυτές του καθαρού αλουμινίου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την κραμάτωση του αλουμινίου είναι, η αύξηση της αντοχής και η βελτίωση της κατεργασιμότητας και συγκολλησιμότητας. Ταυτόχρονα, καίριες ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου όπως η χαμηλή πυκνότητα, η καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και η υψηλή αντοχή σε διάβρωση, διατηρούνται.

Τα βασικότερα κραματικά στοιχεία του αλουμινίου είναι ο σίδηρος, το πυρίτιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το μαγγάνιο και μαγνήσιο, ενώ υπάρχουν και άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται. Στον παρακάτω Πίνακα (Πιν. 1.3) φαίνονται οι κύριες προσθήκες κραμάτωσης του αλουμινίου και η επίδραση που έχουν αυτές, σε βασικές του ιδιότητες.

Πίνακας 1.3 Οι κύριες προσθήκες κραμάτωσης του αλουμινίου^[3]

Προσθήκη	Επίδραση στις ιδιότητες του αλουμινίου
Χαλκός	Σε ποσοστό ως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
Σίδηρος	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα και ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα
Μαγνήσιο	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
Πυρίτιο	Βελτιώνει κατά πολύ τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μειώνει τη χυτευσιμότητα αλλά, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από τη θερμική κατεργασία που ακολουθείται, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

1.3 Ονοματολογία

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με τον Οργανισμό Αλουμινίου των Η.Π.Α. και κατά DIN EN 573 - 1, αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα.

Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης:

(α) Στην πρώτη περίπτωση (κράμα διαμόρφωσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίν. 1.4). Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις στα όρια περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1xxx, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

Πίνακας 1.4 Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου

Βασικό Μέταλλο	Κυρίαρχο κραματικό στοιχείο	Κωδικός
Αλουμίνιο	Καθαρότητα από 99,00% και πάνω	1xxx
Αλουμίνιο	Χαλκός (Cu)	2xxx
Αλουμίνιο	Μαγγάνιο (Mn)	3xxx
Αλουμίνιο	Πυρίτιο (Si)	4xxx
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο (Mg)	5xxx
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο και Πυρίτιο (Mg, Si)	6xxx
Αλουμίνιο	Ψευδάργυρος (Zn)	7xxx
Αλουμίνιο	Άλλα κραματικά στοιχεία π.χ. ως 2,5% Li	8xxx
Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	-	9xxx

(β) Στη δεύτερη περίπτωση, (κράματα χύτευσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, επίσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίν. 1.5). Ο δεύτερος και ο τρίτος δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0), υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό το οποίο έχει αποκτήσει την τελική μορφολογία του με κατευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1), υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

Πίνακας 1.5 Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου

Βασικό Μέταλλο	Κυρίαρχο κραματικό στοιχείο	Κωδικός
Αλουμίνιο	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%	1xx.x
Αλουμίνιο	Χαλκός (Cu)	2xx.x
Αλουμίνιο	Πυρίτιο και χαλκός ή Μαγνήσιο (Si και Cu ή Mg)	3xx.x
Αλουμίνιο	Πυρίτιο (Si)	4xx.x
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο (Mg)	5xx.x
Μη χρησ/νη σειρά	-	6xx.x
Αλουμίνιο	Ψευδάργυρος (Zn)	7xx.x
Αλουμίνιο	Κασσίτερος (Sn)	8xx.x
Αλουμίνιο	Άλλα στοιχεία	9xx.x

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης όσο και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί. Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 1.6), φαίνεται η κωδικοποίηση, των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με τον Οργανισμό Αλουμινίου των Η.Π.Α., ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.

Πίνακας 1.6 Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου, με βάση την κατεργασία που έχουν υποστεί

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης
H1X	Μόνο ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης): H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας (σκληρυμένο κατά 12,5%) H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25% H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50% H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75% H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100% H19: Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά από ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση, ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης

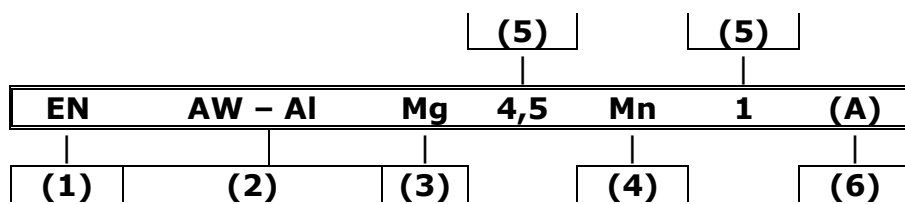
ΚΩΔΙΚΟΣ (συνέχεια)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ (συνέχεια)
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

Σημειώνεται ότι για την ονοματολογία των κραμάτων διαμόρφωσης που έχουν υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση (HXX), συχνά χρησιμοποιείται και τρίτο ψηφίο κωδικοποίησης (HXXX). Αυτό συμβαίνει όταν ο βαθμός ενδοτράχυνσης ή οι μηχανικές ιδιότητες ή και οι δύο αυτοί παράμετροι ταυτόχρονα ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό του τελικού προϊόντος που επηρεάζεται σημαντικά από αυτές, διαφέρει, αλλά βρίσκονται κοντά, σε ότι υποδεικνύουν τα δύο πρώτα ψηφία κωδικοποίησης. Έτσι, για παράδειγμα:

- Ο κωδικός H111, δίνεται σε προϊόντα όπου σαφώς έχουν υποστεί ενδοτράχυνση σε βαθμό όμως μικρότερο από αυτό που απαιτείται ώστε να χαρακτηριστούν από την τυποποιημένη κωδικοποίηση της ονοματολογίας ως H11.
- Ο κωδικός H112 δίνεται σε προϊόντα με ορισμένους περιορισμούς στις μηχανικές τους ιδιότητες εξαιτίας της σκλήρυνσης που έχουν αποκτήσει από περαιτέρω κατεργασίες σχηματοποίησης.
- Ο κωδικός H116 και H117 δίνεται σε προϊόντα από κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx όπου η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι $\geq 4\%$ οπότε και υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στις μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένη αντοχή σε διακρυσταλλική διάβρωση υπό τη μορφή επιφανειακής απολέπισης (exfoliation corrosion).
- Ο κωδικός HXX4 αναφέρεται σε ειδικώς σχηματοποιημένα λεπτά φύλλα αλουμινίου όπου παράγονται σύμφωνα με την κατεργασία που υποδεικνύει το αντίστοιχο HXX με τις μηχανικές τους ιδιότητες όμως να διαφέρουν από αυτές του αρχικού προϊόντος.
- Ο κωδικός HXX5 χαρακτηρίζει συγκολλητούς σωλήνες. Ανάλογα με το κράμα και τη γεωμετρία του σωλήνα, τα όρια των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να διαφέρουν από τα αντίστοιχα του αρχικά σκληρυμένου προϊόντος.

Καθώς πλέον, ολοένα και περισσότερο τείνει να καθιερωθεί διεθνώς ο συμβολισμός των κραμάτων αλουμινίου κατά το πρότυπο DIN EN 573-2 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για λόγους πληρότητας, δίνεται παρακάτω παράδειγμα ενός τέτοιου συμβολισμού, για ένα κράμα διαμόρφωσης αλουμινίου, και εξηγούνται τα τμήματα τα οποία τον αποτελούν.

Παράδειγμα: EN AW-AlMg4,5Mn1(A)



Όπου:

- 1) Σύμβολο προτύπου
- 2) Βασικό μέταλλο και κατάσταση προμήθειας
- 3) Κύριο στοιχείο κραμάτωσης
- 4) Επιπλέον βασικό στοιχείο κραμάτωσης
- 5) Ονομαστική περιεκτικότητα κύριου στοιχείου κραμάτωσης
- 6) Κατεργασία

Αναφέρεται ότι το κράμα του παραπάνω παραδείγματος, κατά Α.Α. (Η.Π.Α.) ή DIN EN 573 - 1, συμβολίζεται ως EN AW-5083.

Στη συνέχεια, δίνεται Πίνακας αντιστοιχιών ονοματολογίας που ακολουθούν διάφορες χώρες ανά τον κόσμο για μερικά από τα βασικά κράματα του αλουμινίου (Πιν. 1.7).

Πίνακας 1.7 Ονοματολογίες που ακολουθούνται από διάφορες χώρες για τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

Διεθνής Συμβολισμός	Αυστραλία	Καναδάς	Γαλλία	Γερμανία	Ιταλία	Ιαπωνία	Ολλανδία	Ισπανία	Ελβετία	Βρετανία πριν το 1983	Παλιότερη χρήση στη Ν. Αφρική
Μη κράμ. Al.											
1050A	....	....	A5	Al 99,5	1050A	....	Al 99,5	L-3051	Al 99,5	1B	1S
1070A	....	....	A7	Al 99,7	1070A	1070	....	L-3071	Al 99,7	....	HP
1145	A1145	....	....	....	....	....	....	....	....	....	E1S
1200	B1200	1200	A4	Al 99	1200	1200	Al 99,0	L-3001	Al 99	1C	2S
1350	....	1350	A5/L	E Al 99,5	....	....	....	Al 99,5E	....	1E	C1S
Al-Cu											
2011	A2011	2011	A-U5PbBi	AlCuBiPb	2011	2011	....	L-3192	AlCu6BiPb	FC1	28S
2014A	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	B26S
2017A	....	....	A-U4G	AlCuMg1	2017A	....	....	L-3120	....	....	17S
2024	A2024	2024	A-U4G1	AlCuMg2	2024	2024	AlCu4Mg1	L-3140	AlCu4Mg1,5	2L97L98	24S
2030	....	....	A-U4Pb	....	....	....	....	....	....	....	T1701
Al-Mn											
3003	A3003	3003	A-M1	AlMnCu	3003	3003	AlMn1	L-3810	AlMn	....	D3S
3004	A3004	....	A-M1G	AlMn1Mg1	3004	....	....	L-3820	....	....	D4S
3103	....	....	....	AlMn	3103	....	....	L-3811	....	N3	3S
3105	....	....	....	AlMn0,5Mg0,5	....	....	....	....	....	N31	E4S
Al-Mg											
5005	....	....	A-G0,6	....	5764	....	....	L-3350	....	N41	B57S
5042	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
5050	....	....	A-G1	....	....	....	....	L-3380	AlMg1,5	....	A57S
5052	A5052	5052	A-G2,5C	AlMg2,5	P-AlMg2,5	5052	....	L-3360	....	....	57S
5083	B5083	5083	A-G4,5MC	AlMg4,5Mn	P-AlMg4,5	5083	AlMg4,5Mn	L-3321	AlMg4,5Mn	N8	D54S
5182	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	F54S
5251	C5251	....	A-G2M	AlMg2Mn0,3	P-AlMg2Mn	....	AlMg2	L-3361	AlMg2,5	N4	M57S
5454	A5454	5454	A-G2,5MC	AlMg2,7Mn	P-AlMg2,7Mn	5454	....	L-3391	AlMg2,7Mn	N51	B53S
5754	....	....	A-G3	AlMg3	....	....	....	L-3390	AlMg3	....	53S
Al-Mg-Si											
6005	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	C51S
6060	....	....	A-G5	....	3569	....	....	....	AlMg	....	....
6063	B6063	6063	A-GS	AlMgSi0,5	P-AlMgSi	6063	AlMgSi	L-3441	....	H9	50S
6070	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	6070
6082	....	....	A-SGM0,7	AlMgSi1	P-AlSi1MgMn	....	AlSi1Mg	L-3453	AlMgSi1Mn	H30	B51S
6101A	....	....	A-GSL	....	....	....	....	....	AlMgSi	91E	D50S
6261	....	6261	....	....	....	....	....	....	....	....	D65S
6463	....	....	....	....	....	....	....	....	....	E6	C50S
Al-Zn											
7017	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
7020	....	....	A-Z5G	....	P-AlZn4,5Mg	....	....	L-3741	AlZn4,5Mg1	H17	D74S
7075	A7075	7075	A-Z5Gu	AlZnMgCu1,5	7075	7075	....	L-3710	AlZn6MgCu1,5	2L88	T7502
Al-Άλλο											
8006	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	8006
8011	D8011	....	A-FeS	AlFeSi	....	....	....	....	....	....	98S

1.4 Κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου^{[2],[11]}

1.4.1 Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για κράματα των σειρών 1xxx, 3xxx και 5xxx. Είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μεσομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως, με ενδοτράχυνση.

1.4.1.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1xxx (Al \geq 99,0%)

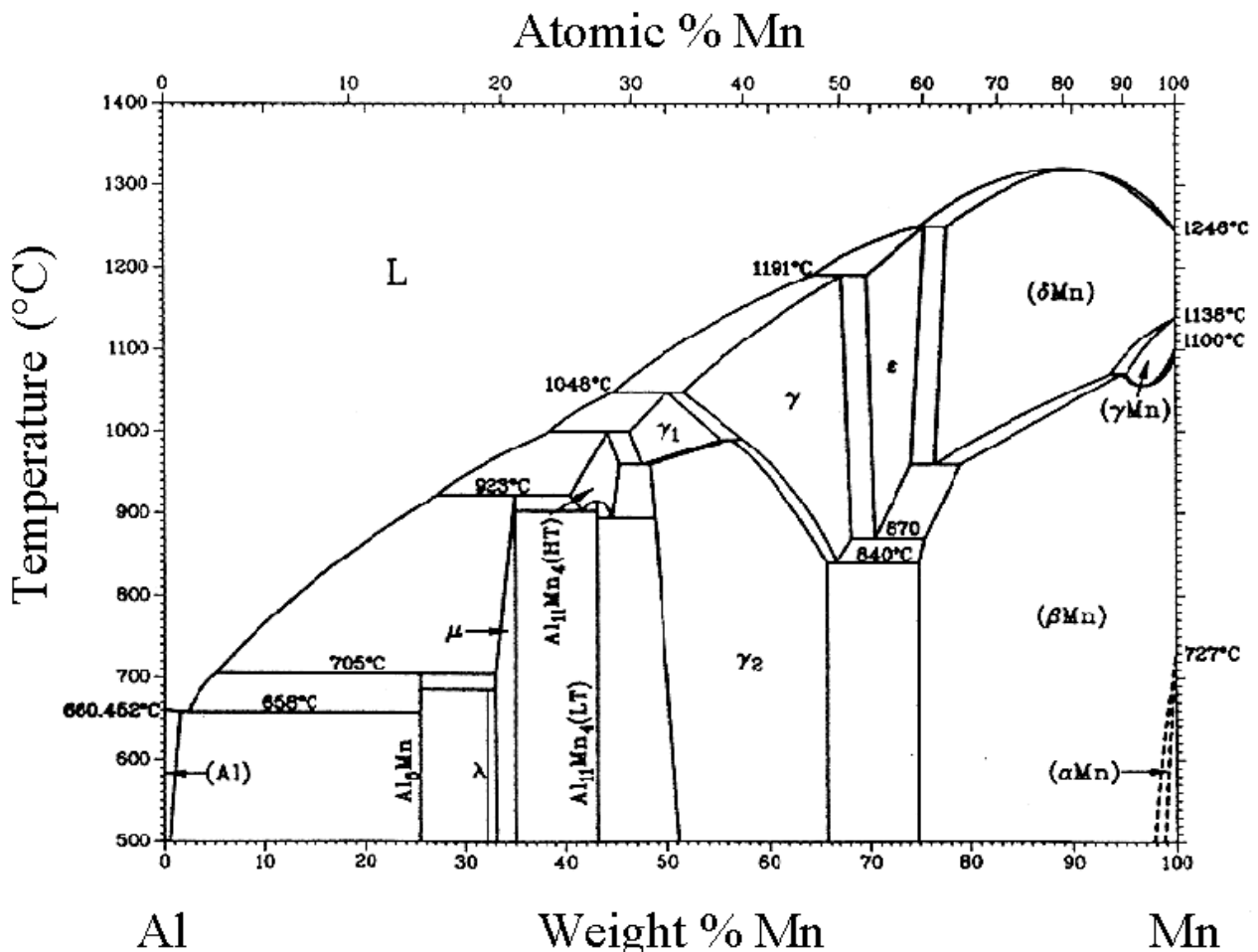
Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστο 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν άριστη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται στα κράματα αυτά είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό 1% (κράμα 1100). Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι: η κατασκευή συρμάτων και αγωγών ηλεκτρικού ρεύματος, η κατασκευή θερμαντικών σωμάτων κ.α.

1.4.1.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3xxx (κράματα AlMn)

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγγάνιο. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al, που είναι 1,8% στους 659° C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία (Εικ. 1.5).

Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση Al₆Mn. Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία Al₆Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος.

Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλούνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1xxx, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.



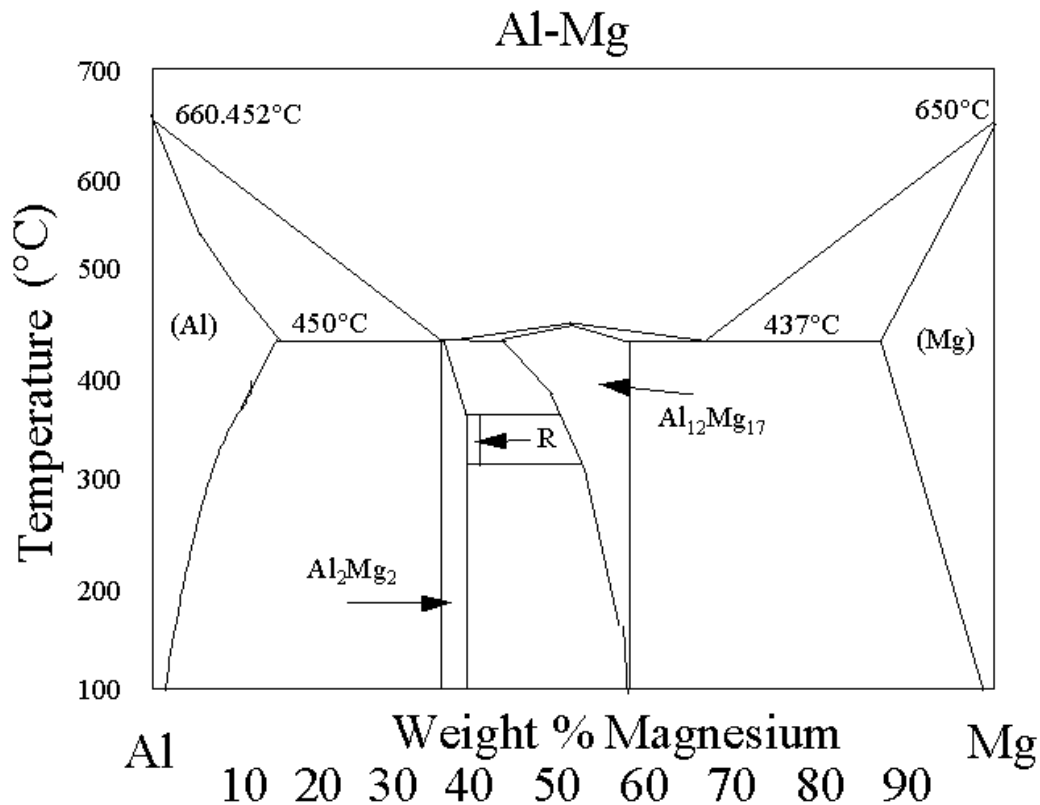
Εικόνα 1.5 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράτους Al-Mn

1.4.1.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx (AlMg(Mn))

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο. Σε αυτά (σχήμα που ακολουθεί), το μεγαλύτερο μέρος του Mg βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 (φάση β), η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.

Τα κράματα της σειράς 5xxx, παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που όμως βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως, της ολκιμότητας.

Παρόλη την καλή αντοχή σε διάβρωση των κραμάτων της σειράς αυτής, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα, κατά τη διαδικασία παραγωγής τους, ώστε να αποφεύγεται η μορφοποίηση συνεχών β - $MgAl_2$ κατακρημνισμάτων στα όρια των κόκκων, που μπορούν να οδηγήσουν σε περικρυσταλλική διάβρωση. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί, με έκθεση του υλικού σε θερμοκρασίες από 120 ως 200°C.



Εικόνα 1.6 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Al-Mg

1.4.2 Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2xxx, 6xxx και 7xxx.

1.4.2.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx (AlCu)

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6 - 6,3% και για κράματα Al - Cu - Mg, και Al - Cu - Zn όπου το μαγνήσιο και ψευδάργυρος αντίστοιχα κομαινούνται σε ποσοστά μεταξύ 0,5 - 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής στα κράματα αυτά επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl₂, CuMgAl₂ και CuZnAl₂ αντίστοιχα, οι οποίες προσδίδουν στα κράματα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ενοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή, εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu₂FeAl₇, η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Ωστόσο, αν προστεθεί συγχρόνως και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al₉FeNi, που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230° C.

Τα κράματα της σειράς 2xxx, μετά από υπερβαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλούνται δύσκολα διότι, οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης ζώνες, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα, οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου).

1.4.2.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6xxx (AlMgSi)

Πρόκειται για κράματα Al - Mg - Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στο σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία, συνήθως μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si βελτιώνει σε μερικά κράματα της σειράς τις μηχανικές τους ιδιότητες, σε βάρος όμως της αντοχής τους σε διάβρωση.

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες, συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων.

Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμείνει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση που προκαλεί.

Τα κράματα της σειράς 6xxx μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλούνται εύκολα, συγχρόνως δε παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150°C. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

1.4.2.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7xxx (AlZn(Mg))

Πρόκειται για κράματα Al - Zn - Mg και για κράματα Al - Zn - Mg - Cu. Αυτά, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Το ποσοστό του Zn κυμαίνεται από 4 - 8% και αυτό του Mg από 1 - 3%.

Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού, μειώνει την εμβαιπτότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al - Mg - Zn. Παρουσία χρωμίου, σε

ποσοστό μικρότερο του 0,3% βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ η παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητά τους.

Τα κράματα της σειράς 7xxx υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησής τους, της καλής τους εμβαπτότητας - ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα - και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης, - από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 160°C. Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς 7xxx δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλλησή τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητά τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή (έως 120°C).

Τα κράματα του αλουμινίου της σειράς 7xxx χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή σε διάβρωση.

1.5 Κράματα χύτευσης του αλουμινίου^{[2],[11]}

Καθώς η παρούσα διατριβή μελετά τη βελτιστοποίηση της συγκόλλησης ενός κράματος διαμόρφωσης αλουμινίου συγκεκριμένης σειράς, η αναλυτική παρουσίαση των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου κρίνεται ότι ξεφεύγει από τους σκοπούς της μελέτης και γι' αυτό αποφεύγεται. Για λόγους πληρότητας, ωστόσο, περιγράφονται επιγραμματικά ορισμένα βασικά και χρήσιμα στοιχεία των κραμάτων αυτών.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίσει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι η καλή χυτευσιμότητα, η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιογενής κατανομή του πορώδους. Επίσης, η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων, η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Τρεις είναι οι βασικές μέθοδοι χύτευσης κραμάτων αλουμινίου: η χύτευση σε άμμο, η χύτευση σε μεταλλικό τύπο και η χύτευση υπό πίεση. Χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων αυτών επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης.

Οι επιτογχανόμενες μικροδομές, και κατ' επέκταση οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών, εξαρτώνται, κυρίως, από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα και από τη μέθοδο χύτευσης.

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης από ότι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικές ενώσεις, μειώνοντας έτσι τις θερμοκρασίες χύτευσης.

Τα κυριότερα κράματα χύτευσης του αλουμινίου είναι τα:

- κράματα αλουμινίου της σειράς 2xx.x (κράματα Al - Cu).
- κράματα αλουμινίου της σειράς 3xx.x (κράματα Al - Si)
- κράματα αλουμινίου της σειράς 5xx.x (κράματα Al - Mg)
- κράματα αλουμινίου της σειράς 7xx.x (κράματα Al - Zn και Al - Zn - Mg)

Στοιχεία χυτών κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως:

- Στη βιομηχανία μεταφορών (αυτοκίνητα, πλοία, τρένα, ακόμα και διαστημικά σκάφη)
- Στην αρχιτεκτονική (όπου απαιτείται μικρό βάρος και καλή εμφάνιση)
- Σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας
- Σε εφαρμογές που απαιτείται μικρό βάρος και καλή διαβρωτική αντοχή

1.6 Ναυπηγικά κράματα του αλουμινίου

Κατά το σχεδιασμό μιας ναυπηγικής κατασκευής, στο βασικό στάδιο της επιλογής του υλικού, κυρίαρχο ρόλο παίζουν ιδιότητες όπως ο λόγος αντοχής προς βάρος, η αντοχή σε θραύση, η αντίσταση έναντι της διάβρωσης και έναντι της διαβρωτικής ρωγμάτωσης υπό μηχανική καταπόνηση, η αντοχή σε κόπωση αλλά και άλλοι παράγοντες όπως η ευχέρεια στη μορφοποίηση, ο βαθμός συγκολλησιμότητας, η διαθεσιμότητα, φυσικά το κόστος κ.α..

Από τα κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου, αυτά των σειρών 5xxx (Al-Mg) και 6xxx (Al-Mg-Si), ανταποκρίνονται πλήρως στις παραπάνω απαιτήσεις δίνοντας μια επιπλέον, ιδιαίτερα ελκυστική, επιλογή σε ότι αφορά το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί.

Η πρώτη χρήση τέτοιων κραμάτων αλουμινίου στη ναυπηγική τοποθετείται στη δεκαετία του 1890, την ίδια περίπου χρονική περίοδο κατά την οποία παρουσιάστηκε και ο χάλυβας το βασικό υλικό που κυριαρχεί στην κατασκευή πλοίων ως σήμερα. Ωστόσο, η χρήση τους παγιώθηκε αρκετά αργότερα, στη δεκαετία του 1960, όπου και άρχισαν να εμφανίζονται τα πρώτα πλοία με υπερκατασκευές από κράματα αλουμινίου, ενώ στη δεκαετία του 1970 εμφανίστηκαν και πλοία κατασκευασμένα εξολοκλήρου από τέτοια κράματα.

Πίνακας 1.8 Εξέλιξη των ναυπηγικών υλικών και τρόποι σύνδεσής τους^[30]

Έτος	Ναυπηγικό Υλικό	Μέθοδος Σύνδεσης
1776	Ξύλινες Κατασκευές	
1800		Brazing Forging
1850	Κατασκευές Σιδήρου	
1900	Σίδηρος Χαλύβδινες Κατασκευές	Ανακάλυψη σύγχρονων τεχνικών συγκόλλησης Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια
1950	Αλουμίνιο Χάλυβας Ti	MIG, TIG, SAW EBW, LW
1976		
2000		

1.6.1 Σύγκριση των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου με το χάλυβα

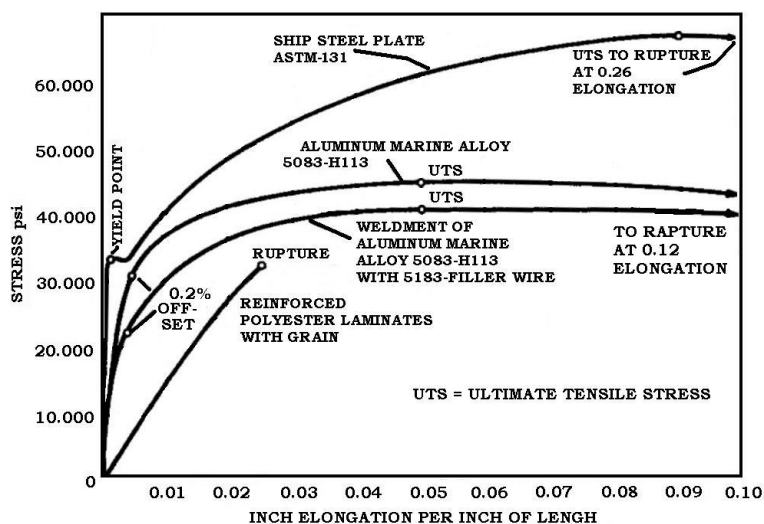
Η σύγχρονη τεχνολογία των υλικών έχει αναπτύξει πλέον νέα κράματα αλουμινίου με μοναδικές ιδιότητες, άμεσα συγκρίσιμες με αυτές κάποιων αντίστοιχων χαλύβων που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική.

Η αναλυτική σύγκριση των δύο αυτών ναυπηγικών υλικών περνά αναπόφευκτα μέσα από τη σύγκριση των φυσικών ιδιοτήτων των δύο βασικών χημικών στοιχείων τους, όπως αυτή φαίνεται στον Πίνακα 1.9.

Πίνακας 1.9 Χαρακτηριστικά αλουμινίου και σιδήρου

Χαρακτηριστικά	Al	Fe
Ατομικό βάρος [g/mole]	26,98	55,84
Κρυσταλλική δομή	εδροκεντρωμένη κυβική δομή	χωροκεντρωμένη κυβική μορφή
Πυκνότητα [g/cm ³]	2,7	7,87
E-modulus [MPa]	67 * 10 ³	210 * 10 ³
Συντελεστής θερμικής διαστολής [1/°K]	24 * 10 ⁻⁶	12 * 10 ⁻⁶
Θερμότητα τήξης [j/q]	390	272
Θερμοκρασία τήξης [°C]	660	1536
Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	235	75
Ηλεκτρική αγωγιμότητα [m/Ωmm ²]	38	10
Οξειδία → Θερμοκρασία τήξης [°C]	Al ₂ O ₃ 2050	FeO/Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ 1400/1455/1600

Έτσι, η αντίστοιχη σύγκριση για κάποια από τα βασικά κράματα που προκύπτουν από τα δύο αυτά μέταλλα, συνοψίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.7 και τον Πίνακα 1.10 που ακολουθούν.



Εικόνα 1.7 Τυπικά διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων κάποιων βασικών ναυπηγικών υλικών^[30]

Πίνακας 1.10 Σύγκριση βάρους και αντοχής για κάποια ναυπηγικά κατασκευαστικά υλικά^[30]

Υλικό	Πυκνότητα (g/cc)	Τυπική αντοχή (MPa)			Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	Λόγος αντοχής προς βάρος (x1000)
		Αντοχή σε εφελκυσμό	Τάση Διαρροής	Αντοχή σε διάτμηση		
Κράμα αλουμινίου:						
5083 – H113	2,657	317	227	186	71	480
5086 – H34	2,657	324	255	186	71	490
6061 – T6	2,712	310	275	206	69	460
Χάλυβας:						
ASTM – A131	8,027	355	227		200	230
ASTM – A100	7,750	386	206	289	200	200
Χαλκός (σκληρό φύλλο)	8,857	317	275		117	140

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 1.7 καθώς και από τους Πίνακες 1.9 και 1.10, εκτός από την καλή έως εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση έναντι του θαλάσσιου περιβάλλοντος που έχουν τα κράματα αλουμινίου των σειρών 5xxx και 6xxx, το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι η μείωση του βάρους που επιτυγχάνεται στην κατασκευή που χρησιμοποιούνται, σε σχέση με μια αντίστοιχη από χάλυβα, κάτι βέβαια που καθορίζεται από την πυκνότητά τους η οποία είναι ίση προς το ένα τρίτο εκείνης του χάλυβα. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι μια κατασκευή από αλουμίνιο που εκπληρώνει τους ίδιους σκοπούς μιας αντίστοιχης χαλύβδινης θα έχει βάρος τρεις φορές μικρότερο. Συνήθως παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 30-40% και ο λόγος εξηγείται στην Παράγραφο που ακολουθεί.

Βασικό πλεονέκτημα των χαλύβων αποτελεί το γεγονός ότι μεταξύ του ορίου διαρροής τους (π.χ. 250MPa - χάλυβας μέσης κραμάτωσης) και την τάση αστοχίας του (420MPa) υπάρχει μια αρκετά ευρεία πλαστική περιοχή (της τάξης των 170MPa) επιτρέποντας για παράδειγμα σε ένα χαλύβδινο πλοίο να δέχεται πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αστοχίας. Σχεδιάζοντας μια ισοδύναμη κατασκευή από κράμα αλουμινίου (π.χ. 5083 - H116) με τις ίδιες απαιτήσεις ακαμψίας, αποδεικνύεται ότι το όριο διαρροής και το όριο αντοχής της είναι συνολικά μεγαλύτερο για δύο κυρίως λόγους: **1)** Το κράμα 5083 - H116 έχει όριο διαρροής περίπου 240MPa και αντοχή περίπου 310MPa. Έχει δηλαδή μικρότερη πλαστική περιοχή (περίπου 70 MPa) σε σχέση με το χάλυβα. **2)** Καθώς η αλουμινένια κατασκευή σχεδιάζεται με κριτήριο τη συνολική ακαμψία, όλα τα μεγέθη είναι κατά 50% περίπου προσαυξημένα σε σχέση με την αντίστοιχη χαλύβδινη. Για παράδειγμα, πάχος ελάσματος 20mm για τη χαλύβδινη κατασκευή αντιστοιχεί σε πάχος ελάσματος 30mm για την αλουμινένια, προκειμένου να επιτευχθούν οι ίδιες προδιαγραφές ακαμψίας.

Τελικά, η αλουμινένια κατασκευή, από ελάσματα πάχους 150% του πάχους της αντίστοιχης χαλύβδινης, θα έχει όριο διαρροής κατά 29% (350MPa) και αντοχή 12,5% (465MPa) περίπου μεγαλύτερα από αυτή.

Από τις γενικές αυτές εκτιμήσεις και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κράματα της σειράς 5xxx, όπως αυτό του παραδείγματος, παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους περίπου 20% κατά τη συγκόλλησή τους, προκύπτει ότι ένα πλοίο από κράμα αλουμινίου θα έχει παρόμοια αντοχή με ένα χαλύβδινο πλοίο, μιλώντας πάντα ανά τετραγωνικό χιλιοστό επιφάνειας ελάσματος, και θα έχει περίπου 30% μικρότερο βάρος.

Προκειμένου να κατασκευαστεί μια «γυμνή» γάστρα από ναυπηγικό αλουμίνιο, το κόστος του υλικού είναι περίπου διπλάσιο από το να κατασκευαστεί η ίδια γάστρα από χάλυβα. Ωστόσο,



Εικόνα 1.8 Αλουμινένια γάστρα μικρού σκάφους

«δουλεύοντας» με αλουμίνιο που είναι ελαφρύτερο από το χάλυβα και περισσότερο όλκιμο, υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου προς όφελος του κόστους. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο μπορεί να κοπεί ακόμα και με απλά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κοπή ξύλου ενώ και η συγκόλλησή του, παρόλο που πραγματοποιείται σε μεγαλύτερη ισχύ ρεύματος (έχει την τριπλάσια

θερμική αγωγιμότητα), είναι ταχύτερη (χαμηλότερο σημείο τήξης) σε σχέση με του χάλυβα^{[23],[24],[25],[26]}.

Ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα με τα ναυπηγικά κράματα αλουμινίου είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται αμμοβολή ή προστασία της επιφάνειας ολόκληρης της κατασκευής. Η προστασία της γάστρας είναι βέβαια επιβεβλημένη σε ευαίσθητες περιοχές. Το οξείδιο του αλουμινίου που δημιουργείται στις ελεύθερες επιφάνειες της κατασκευής, παρέχει την απαιτούμενη αντιδιαβρωτική προστασία. Ωστόσο, σε περιοχές όπου υπάρχει στεγανή επαφή ή/και επαφή με στοιχεία που προκαλούν γαλβανική διάβρωση, επιβάλλεται η προστασία της επιφάνειας με οργανική επικάλυψη. Επιπλέον, το αλουμίνιο αποτελεί εξαιρετικά ενεργό γαλβανικό στοιχείο και «θυσιάζει» τον εαυτό του στην άμεση ή έμμεση επαφή του με οποιοδήποτε μέταλλο. Είναι

ανοδικό σε οτιδήποτε εκτός του μαγνησίου και του ψευδαργύρου και επιβάλλεται να μονωθεί ηλεκτρικά από άλλα μέταλλα.

Ωστόσο, σε πολλά εσωτερικά, αλλά και εξωτερικά μέρη μιας αλουμινένιας γάστρας η αμμοβολή και η προστασία της επιφάνειας τους είναι προαιρετική, δίνοντας ακόμα έναν παράγοντα μείωσης του κόστους.

Ακόμα και μετά την κατασκευή του, ένα πλοίο από αλουμίνιο έχει μικρότερο κόστος συντήρησης σε σχέση με ένα χαλύβδινο, ενώ και το κόστος τυχόν μεταπώλησής του είναι υψηλό. Η πραγματικότητα αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και αντίβαρο έναντι του μειονεκτήματος των ναυπηγικών κατασκευών αλουμινίου να υποφέρουν από κόπωση και να έχουν πεπερασμένο χρόνο ωφέλιμης ζωής, πάντα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες χαλύβδινες^[21].

Σε συντομία, μερικά επιπλέον πλεονεκτήματα των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου σε σύγκριση με το χάλυβα είναι:

- Ταχύτερη συναρμολόγηση μερών κατασκευής εξαιτίας του μικρότερου βάρους (διαχείριση μεγαλύτερων ελασμάτων, πιο απλές συνδέσεις, λιγότερες κατασκευές υποστήριξης κατά την ανέγερσή της)
- Ανακυκλώσιμα υπόλοιπα υλικού (ρετάλια - scrap)
- Καλύτερη ευστάθεια πλοίου
- Πιο εύκολο φινίρισμα επιφανειών
- Καλύτερη εμφάνιση κατασκευής

Από τα μειονεκτήματα, εκτός από αυτό του υψηλού κόστους αγοράς του που αναφέρθηκε, ιδιαίτερα βασικό και μη ανατρέψιμο είναι αυτό του χαμηλού σημείου τήξης του σε συνδυασμό με την μεγάλη θερμική του αγωγιμότητα. Σε περίπτωση πυρκαγιάς το αλουμίνιο καίγεται και η κατάσβεση είναι δύσκολη. Ταυτόχρονα η θερμότητα διαδίδεται ταχύτατα και η ολική κατάρρευση της κατασκευής γίνεται πιθανή. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην απόρριψή του από μια σειρά εφαρμογών που έχουν να κάνουν κυρίως με τη στρατιωτική βιομηχανία.

Βέβαια, στην πραγματικότητα δεν τίθεται θέμα σύγκρισης των δύο υλικών. Η μόνη διαφορά που έχει υπεισέλθει από την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και της ευρείας πλέον εφαρμογής των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, είναι ότι, όχι απλά υπάρχει δυνατότητα επιλογής υλικού κατά το σχεδιασμό, αλλά η επιλογή αυτή τελικά αποτελεί ίσως το βασικότερο στάδιο που θα οδηγήσει στη βέλτιστη κατασκευή.

1.6.2 Κατασκευές από κράματα αλουμινίου στη ναυπηγική

Με κυρίαρχο στόχο το κέρδος, ναυπηγία και ναυτιλιακές εταιρίες υιοθέτησαν το ναυπηγικό



Εικόνα 1.9 Σκάφος αναψυχής από αλουμίνιο

αλουμίνιο για τη κατασκευή ταχύτερων επιβατηγών πλοίων (fast ferries) ως μέσα που παρέχουν ταχύτητα στις μετακινήσεις, αξιοπιστία, χαμηλό κόστος συντήρησης και συνεπώς μεγάλη αποδοτικότητα. Τέτοια σκάφη, μονόγαστρα, δίγαστρα ή πολύγαστρα έχουν μέσο μήκος 30-50m και ταξιδεύουν με ταχύτητες 35-40mph. Συναντώνται όμως και ογκώδη πλοία μήκους πάνω από 80m που έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν περισσότερους από 700 επιβάτες και πλέον των 150 οχημάτων.



Εικόνα 1.10 Σκάφος αναψυχής τύπου καταμαράν κατασκευασμένο εξολοκλήρου από κράμα αλουμινίου

Με τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου έχουμε αύξηση του μεταφερόμενου φορτίου.

Η κατασκευή πλοίων από αλουμίνιο έγινε κανόνας, ειδικά σε επιβατηγά και επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία λόγω της αύξησης του μεταφερόμενου φορτίου, της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και της κατασκευής μεγάλων σκαφών ημι-εκτοπίσματος.

Ακόμη έχουμε βελτίωση της ευστάθειας σε πλοία που χρησιμοποιούν και χάλυβα και αλουμίνιο στην κατασκευή τους. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται κυρίως στις υπερκατασκευές και στα



Εικόνα 1.11 Επιβατηγό/οχηματαγωγό πλοίο από αλουμίνιο

υπερστεγάσματα εμπορικών πλοίων.

Έτσι, χάλυβας και αλουμίνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή μεγάλων κρουαζιερόπλοιων. Αυτό του τύπου τα πλοία χρειάζονται μεγάλους χώρους λόγω της φύσης λειτουργίας τους. Εξαιτίας των πολλών υπερκατασκευών και του μεγάλου ύψους η ευστάθεια τους είναι κρίσιμη. Έτσι οι υπερκατασκευές είναι από αλουμίνιο (σειράς 5xxx), με αποτέλεσμα το κέντρο βάρους να βρίσκεται όσο το δυνατόν



Εικόνα 1.12 Κρουαζιερόπλοια με υπερκατασκευές από κράματα αλουμινίου

χαμηλότερα και κατά συνέπεια να βελτιώνεται η ευστάθεια.

Σε κατασκευές όπου η συμπεριφορά του υλικού σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι κρίσιμη, π.χ. στην περίπτωση πλοίων μεταφοράς υγροποιημένων αερίων LNG - tankers (liquid natural gas - tanker), όπου το μεταφερόμενο υλικό βρίσκεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία (κίνδυνος ψαθυρής θραύσης), τα κράματα των σειρών 5xxx και 6xxx κυριαρχούν. Λόγω των πολύ αυστηρών κανονισμών ασφαλείας για αυτού του τύπου τα πλοία μόνο νικελιούχοι χάλυβες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντικατάσταση του αλουμινίου, υλικό δύσκολο στην κατεργασία και συντήρηση. Οι μεγάλες δεξαμενές των πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια (LNG - tankers) είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο, ενώ το υπόλοιπο πλοίο από χάλυβα. Οι δεξαμενές αυτές

δεν συμμετέχουν στη δομική αντοχή του πλοίου. Το μεθάνιο, για παράδειγμα, μεταφέρεται σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία -163°C σε δεξαμενές αλουμινίου χωρητικότητας από 40.000 έως 135.000 m^3 . Οι κύριες διαστάσεις ενός LNG - tanker είναι για παράδειγμα : μήκος $L = 293,7 \text{ m}$, πλάτος $B = 41,6 \text{ m}$, ταχύτητα $u = 20 \text{ kn}$, load capacity = 73.000 t. Η διάμετρος των δεξαμενών φτάνει τα 35 m.



Εικόνα 1.13 Πλοίο τύπου LNG

Συνολικά κατασκευές από κράματα αλουμινίου των σειρών 5xxx και 6xxx χρησιμοποιούνται σε:

- Γρήγορα μονόαστρα σκάφη
- Δίγαστρα σκάφη (Catamaran)
- Πλοία μικρής ισάλου επιφάνειας (SWATH)
- Πλοία τύπου LNG



Εικόνα 1.14 Εξέδρα εξόρυξης

- Υδροπύργα
- Hovercrafts
- Πλοία επίδρασης επιφάνειας
- Ιστιοφόρα

Ναυπηγικό αλουμίνιο χρησιμοποιείται ακόμα στις υπερκατασκευές θαλάσσιων εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου αλλά και σε πολλές λιμενικές μεταλλικές κατασκευές.

Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 1.11) παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική.

Πίνακας 1.11 βασικά κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική

Όνομασία κατά EN 573 - 1	Όνομασία κατά EN 573 - 2	Ένδειξη χημικής σύστασης κράματος	Κατάσταση - Κατεργασία
EN AW - 5083	AlMg4.5Mn	AlMg4.5Mn0.7	O, H111, H112, H116, H32, H321
EN AW - 5086	AlMg4Mn	AlMg4	H112, H116
EN AW - 5754	AlMg3	AlMg3	H32, H321
EN AW - 6005	AlMgSi0.7	AlSiMg(A)	T4, T5, T6
EN AW - 6061	AlMg1SiCu	AlMg1SiCu	
EN AW - 6082	AlMgSi1	AlSi1MgMn	

Πίνακας 1.11 βασικά κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική

Η χημική σύσταση ορισμένων κραμάτων των σειρών 5xxx και 6xxx που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές δίνεται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 1.12 Χημική σύσταση κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγικές εφαρμογές

Κράμα	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2 - 2,8	0,15 - 0,35	0,1	-----
5083	0,4	0,4	0,1	0,40 - 1,0	4,0 - 4,9	0,05 - 0,25	0,25	0,15
5086	0,4	0,5	0,1	0,20 - 0,7	3,5 - 4,5	0,05 - 0,25	0,25	0,15
5454	0,25	0,4	0,1	0,5 - 1,0	2,4 - 3,0	0,05 - 0,20	0,25	0,2
5456	0,25	0,4	0,1	0,5 - 1,0	4,7 - 5,5	0,05 - 0,20	0,25	0,2
5383	0,1	0,2	0,1	0,8	4,91	0,12	0,04	0,014
6061	0,40 - 0,80	0,7	0,15 - 0,40	0,15	0,8 - 1,2	0,04 - 0,35	0,25	0,15
6063	0,20 - 0,60	0,35	0,1	0,1	0,45 - 0,9	0,1	0,1	0,1
6351	0,70 - 1,3	0,5	0,1	0,40 - 0,80	0,40 - 0,80	---	0,2	0,2

Για κατασκευές που θα αντιμετωπίσουν θερμοκρασίες λειτουργίας μεγαλύτερες των 65°C χρησιμοποιείται το κράμα 5454, το οποίο είναι ανθεκτικό στη διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση. Τέλος, τα κράματα 5086, 5083 και 5456 στην κατεργασία H-116 χρησιμοποιούνται εκεί που απαιτούνται υψηλές αντοχές, καλή συγκολλησιμότητα και εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Τυπικές εφαρμογές είναι γάστρες πλοίων, καταστρώματα, φρακτές, ιστοί, πύργοι, δεξαμενές, αμφίβια σκάφη κτλ.

Από τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως στη ναυπηγική είναι τα 6061, 6082, 6069, 6111 κ.α., σε κατεργασίες κυρίως T4 και T6.

Κεφάλαιο 2°

Η Συγκολλησιμότητα των Κραμάτων Αλουμινίου

2.1 Μέθοδοι συγκόλλησης

Οι κυριότερες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου, ξεκινώντας από τη χρονικά παλαιότερη, είναι^[29]:

- Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (G.T.A.W.)
- Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (G.M.A.W.)
- Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (P.A.W.)
- Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (E.B.W.)
- Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (L.B.W.)
- Συγκόλληση με τριβή (F.S.W.)

2.1.1 Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW) ^{[6],[7],[8],[12]}

Κατά τη μέθοδο συγκόλλησης GTAW χρησιμοποιείται μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο από



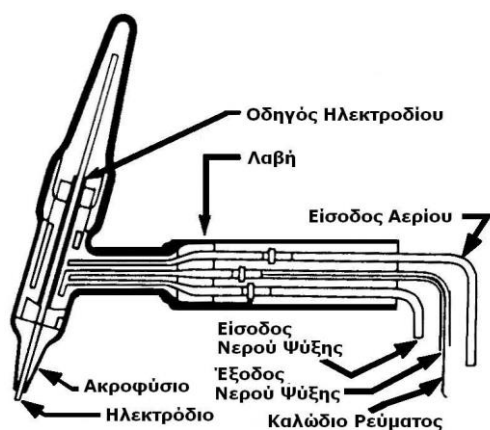
Εικόνα 2.1 Συγκόλληση GTAW

βολφράμιο, ενώ τόσο ο δαυλός συγκόλλησης όσο και η τηγμένη λίμνη συγκόλλησης προστατεύονται από αδρανές αέριο, η σύσταση του οποίου εξαρτάται από το προς συγκόλληση υλικό.

Η μέθοδος εφαρμόζεται για συγκολλήσεις ελασμάτων ή αγωγών αλουμινίου λεπτού πάχους (3 - 4mm) όπου και δεν χρησιμοποιείται υλικό προσθήκης. Ωστόσο, μπορούν να πραγματοποιηθούν και

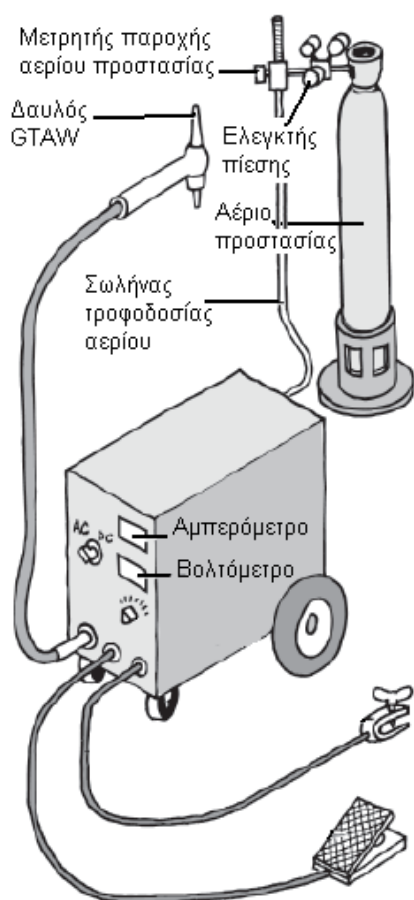
συγκολλήσεις μεγάλου πάχους (>10mm) όμως τότε η χρήση υλικού προσθήκης είναι απαραίτητη ενώ απαιτείται και υψηλός δείκτης εμπειρίας από το συγκολλητή.

Παρόλο που το ηλεκτρόδιο είναι μη καταναλισκόμενο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, το μέταλλο συγκόλλησης μπορεί να «μολυνθεί» με βολφράμιο, στην περίπτωση που έρθει σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης ή όταν το ρεύμα είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που επιτρέπει το μέγεθος του ηλεκτροδίου.



Εικόνα 2.2 Δαυλός συγκόλλησης GTAW

Η μέθοδος GTAW μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις θέσεις συγκόλλησης και αποδίδει ραφές με ιδιαίτερα ομαλή μορφή. Οι δαυλοί συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται ποικίλουν καθώς υπάρχουν αερόψυκτοι και υδρόψυκτοι, άλλοι που διαθέτουν ρυθμιστή της παροχής του αερίου προστασίας ενώ και το μέγεθός τους μπορεί να είναι ως και πολύ μικρό, δίνοντας την ευχέρεια στην πραγματοποίηση συγκολλήσεων σε περιοχές που η πρόσβαση είναι δύσκολη.



Εικόνα 2.3 Σκαρίφημα της διάταξης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GTAW

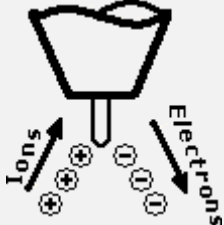
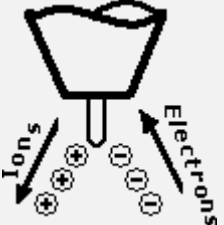
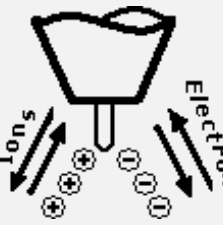



Η συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές (ορθής και ανάστροφης πολικότητας), όσο και με συνεχές παλμικό ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Όταν το συνεχές ρεύμα είναι παλμικό, υπάρχει καλός έλεγχος της ρευστής λίμνης συγκόλλησης κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε θέσεις συγκόλλησης διαφορετικές από την επίπεδη. Επιφανειακός καθαρισμός του αλουμινίου πραγματοποιείται όταν το ηλεκτρόδιο αποτελεί το θετικό πόλο, αλλά τότε η διείσδυση είναι φτωχή. Αντίθετα, η διείσδυση είναι καλή όταν το ηλεκτρόδιο είναι ο αρνητικός πόλος. Τότε όμως δεν υπάρχει επιφανειακός καθαρισμός. Η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος δίνει καλό επιφανειακό καθαρισμό και ικανοποιητική διείσδυση σε αντίθεση με τη χρήση συνεχούς που υποχρεωτικά δίνει τη μια από τις δυο καταστάσεις (ορθή ή ανάστροφη πολικότητα) και ποτέ και τις δυο ταυτόχρονα. Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης ανάλογα με τους

βασικούς τύπους ρεύματος που χρησιμοποιούνται.

Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου βολφραμίου εξαρτάται από τον τύπο του ρεύματος που χρησιμοποιείται. Με εναλλασσόμενο ρεύμα το τόξο έχει καλύτερη δράση όταν το ηλεκτρόδιο έχει ημισφαιρικό τραχύ άκρο. Ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου ή βολφραμίου - ζirkονίας

διατηρούν ικανοποιητικά αυτή τη μορφή του άκρου ενώ και ηλεκτρόδια βολφραμίου - θορίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συχνά στη άκρη του ηλεκτροδίου δίνεται κωνική μορφή ώστε να διευκολυνθεί η τήξη του και να αποκτήσει το επιθυμητό ημισφαιρικό τραχύ σχήμα.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά της συγκόλλησης GTAW, με βάση τον τύπο ρεύματος που χρησιμοποιείται

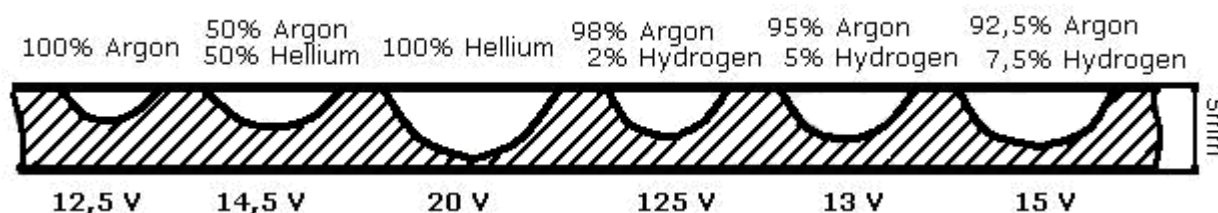
Ρεύμα	Συνεχές	Συνεχές	Εναλλασσόμενο
Πολικότητα ηλεκτροδίου	Αρνητικό	Θετικό	Εναλλασσόμενο
Ροή ηλεκτρονίων και ιόντων			
Διείσδυση			
Καθοδικός Καθαρισμός	ΌΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ αλλά στη διάρκεια του μισού κύκλου
Θερμοκρασιακή Κατανομή	70% στο έλασμα 30% στο ηλεκτρόδιο	30% στο έλασμα 70% στο ηλεκτρόδιο	50% στο έλασμα 50% στο ηλεκτρόδιο
Διείσδυση	Βαθιά - Στενή	Ρηχή - Πλατιά	Μέση
Χωρητικότητα Ηλεκτροδίου	Εξαιρετική (3mm) - 400A	Φτωχή (6mm) - 120A	Καλή (3mm) - 225A

Άλλα ηλεκτρόδια βολφραμίου - θορίου είναι περισσότερο κατάλληλα για συνεχές ή παλμικό ρεύμα. Τέτοια ηλεκτρόδια έχουν υψηλότερη προσφορά ηλεκτρονίων, καλύτερη ικανότητα μεταφοράς ρεύματος και μεγαλύτερο χρόνο ζωής από τα ηλεκτρόδια GTAW εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνολικά έχουν καλύτερη συμπεριφορά κατά την έναρξη του τόξου στο οποίο προσδίδουν και μεγαλύτερη σταθερότητα^{[8],[10]}.

Τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GTAW είναι τα αδρανή αργό και ήλιο. Το αργό (ατομικό βάρος 40), χρησιμοποιείται ευρέως, λόγω και του χαμηλότερου κόστους του σε σχέση με το ήλιο, ιδιαίτερα στις μη αυτόματες συγκολλήσεις. Αποδίδει καλύτερα χαρακτηριστικά στο τόξο συγκόλλησης, με αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις του μήκους του να έχουν ελάχιστη επίδραση στην ισχύ του. Επιπλέον, το αργό παρέχει καλύτερο καθαρισμό της περιοχής της συγκόλλησης, ειδικά όταν χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα.

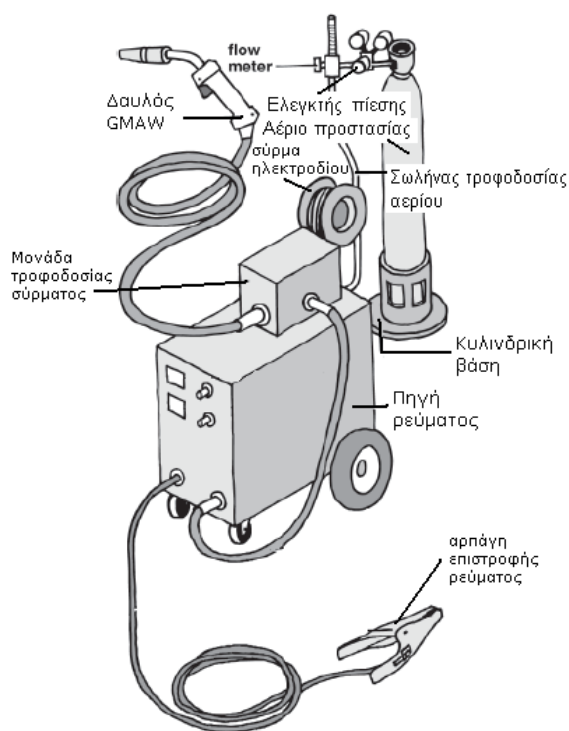
Το ήλιο (ατομικό βάρος 4), χρησιμοποιείται κυρίως για μηχανικές συγκολλήσεις συνεχούς ρεύματος. Απαιτεί μεγαλύτερες παροχές μια και είναι πιο ελαφρύ από το αργό ενώ και το κόστος του είναι μεγαλύτερο. Ωστόσο, επιτρέπει μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης με καλύτερη διείσδυση σε σχέση με το αργό γι' αυτό και ενδείκνυται για συγκολλήσεις μεγάλου πάχους ελασμάτων ή αγωγών .

Για πάχη μεγαλύτερα των 10 mm χρησιμοποιούνται και μείγματα αργού - ήλιου, τόσο μόνα τους όσο και σε συνδυασμό με υδρογόνο. Η επίδραση της σύστασης του μίγματος του αερίου προστασίας στη διείσδυση της συγκόλλησης, φαίνεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 Η επίδραση της σύστασης του αερίου προστασίας στην διείσδυση της συγκόλλησης. $I = 150 \text{ A}$, απόσταση του ηλεκτροδίου από το έλασμα 4mm, $U = 15 \text{ cm/min}$.

2.1.2 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW) [6],[7],[8], [10],[12]



Εικόνα 2.5 Σκαρίφημα της διάταξης που χρησιμοποιείται στη μέθοδο συγκόλλησης GMAW^{[14],[17]}

Η μέθοδος χρησιμοποιεί αέριο για την προστασία της συγκόλλησης και η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Το τηκόμενο ηλεκτρόδιο, του οποίου η τροφοδοσία είναι συνεχής ώστε το μήκος του ηλεκτρικού τόξου να διατηρείται σταθερό, αποτίθεται στο επίσης τηγμένο βασικό μέταλλο και με τη στερεοποίηση δημιουργείται το τελικό μέταλλο συγκόλλησης.

Αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1920, ωστόσο εφαρμόστηκε ευρύτατα από τη δεκαετία του 1950 και μετά. Από την αρχή εφαρμόστηκε σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, γι' αυτό και η αρχική διεθνής ονομασία της ήταν MIG (Metal Inert Gas - Συγκόλληση μετάλλου με αδρανές αέριο). Ο διεθνής

όρος GMAW (Gas Metal Arc Welding) υιοθετήθηκε αρκετά αργότερα, όταν η εξέλιξη της, επέτρεψε τη συγκόλληση και άλλων μετάλλων που απαιτούσαν δραστικά αέρια προστασίας.

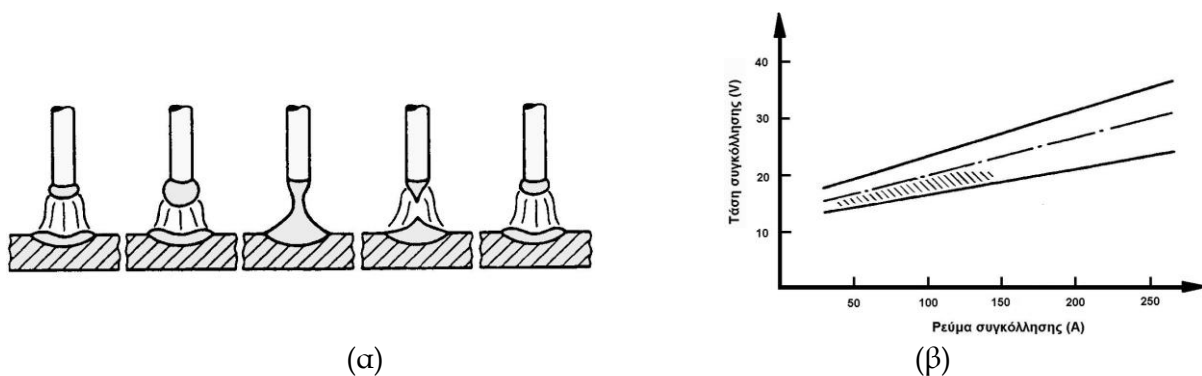
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι και φορητός ενώ η συγκόλληση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλες τις θέσεις.

Χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα με θετικό πόλο αυτόν του ηλεκτροδίου, προσφέροντας συνεχή δράση καθαρισμού στη λίμνη συγκόλλησης και παρέχοντας ταχεία τήξη. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και εναλλασσόμενο ρεύμα ενώ και η χρήση συνεχούς παλμικού ρεύματος διαδίδεται ολοένα και περισσότερο.

Υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι συγκόλλησης οι οποίες βελτιώνονται με τη χρήση συνεχούς παλμικού ρεύματος. Έτσι, η προσδιδόμενη θερμότητα είναι μικρότερη, ενώ παρατηρείται και μικρότερη συστολή, ελάχιστοι εγχυτήρες (spattering) σε ολόκληρο τον κύκλο λειτουργίας, μείωση του πορώδους, και καλύτερη προσαρμογή στις εκάστοτε εφαρμοζόμενες συνθήκες συγκόλλησης. Όμως, παρουσιάζει και μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος του εξοπλισμού, τη δυσκολία προσαρμογής των παραμέτρων του παλμού στις εκάστοτε συνθήκες, και ότι μόνο υψηλής καθαρότητας αργό ή μείγματα αργού-ηλίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

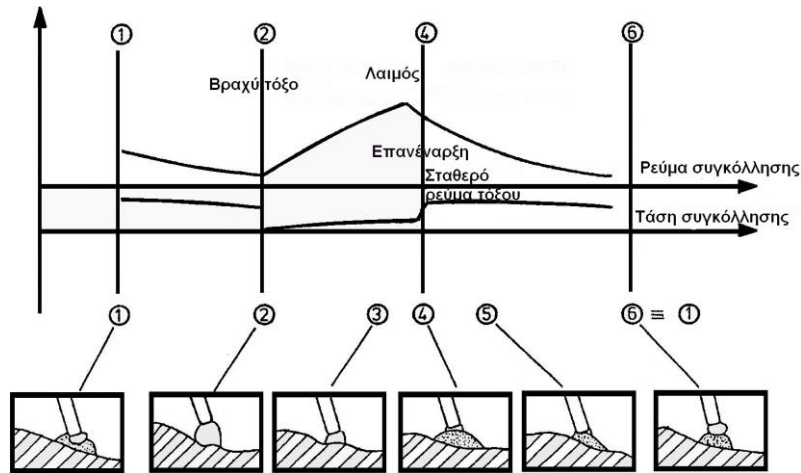
Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται υπό μορφή σύρματος τροφοδοτείται αυτόματα μέσω του πιστολιού συγκόλλησης, τήκεται μέσα στο ηλεκτρικό τόξο και εναποτίθεται στα προς συγκόλληση μέταλλα. Έτσι, διακρίνονται τρεις βασικές μορφές ηλεκτρικών τόξων:

➤ Τα βραχεία ηλεκτρικά τόξα. Αυτά συναντιούνται σε χαμηλές τάσης συγκόλλησης ενδεικνύονται για συγκολλήσεις λεπτών φύλλων αλουμινίου, έχουν καλή συμπεριφορά σε θέσεις συγκόλλησης διαφορετικές από την επίπεδη ενώ μειονεκτήματα αποτελούν το γεγονός ότι επιτρέπουν το σχηματισμό πορώδους και ότι εμφανίζεται έντονος σχηματισμός εγχυτήρων (spattering) κατά την εφαρμογή τους. Ο ρυθμός απόθεσης είναι της τάξης των 70 σταγόνων/sec Στην Εικόνα 2.6 φαίνεται ο μηχανισμός απόθεσης του μετάλλου προσθήκης στα βραχεία ηλεκτρικά τόξα (Εικ. 2.6α) και οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες εμφανίζονται (Εικ. 2.6β).



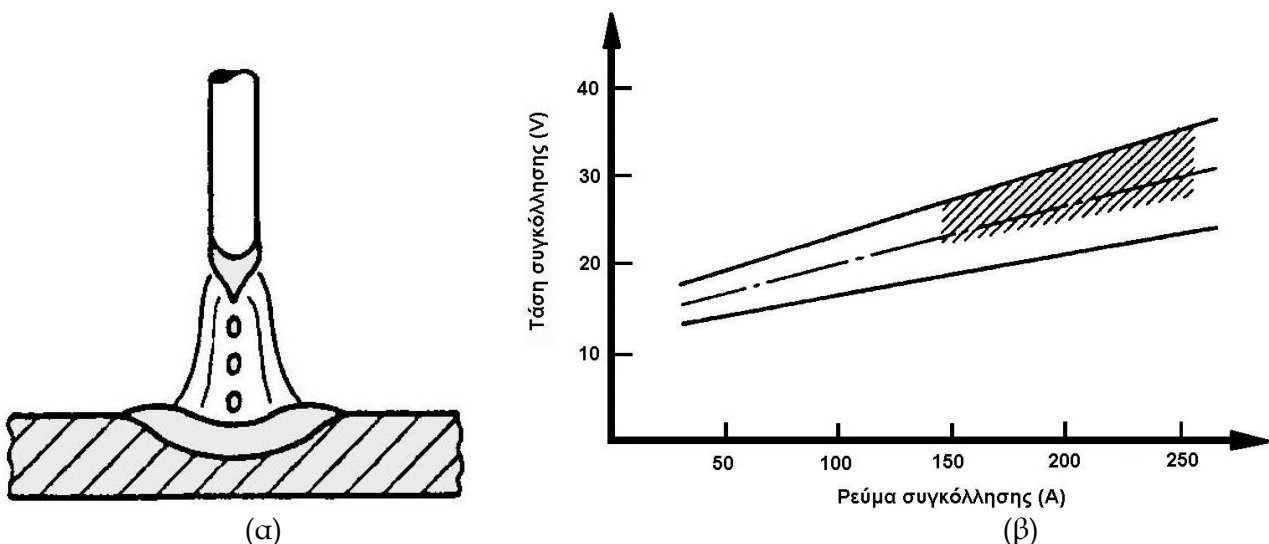
Εικόνα 2.6 Βραχεία ηλεκτρικά τόξα. α) Μηχανισμός απόθεσης του μετάλλου προσθήκης β) και οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες εμφανίζονται^{[6],[7]}

Επιπλέον, στην Εικόνα 2.7 δίνονται οι μεταβολές της τάσης και της έντασης της συγκόλλησης σε ένα κύκλο βραχέος τόξου με τα αντίστοιχα σκαριφήματα των σταδίων απόθεσης του μετάλλου στον κύκλο αυτό.



Εικόνα 2.7 Μεταβολές τάσης και ρεύματος συγκόλλησης σε κύκλο ενός βραχέος τόξου^{[6],[7]}

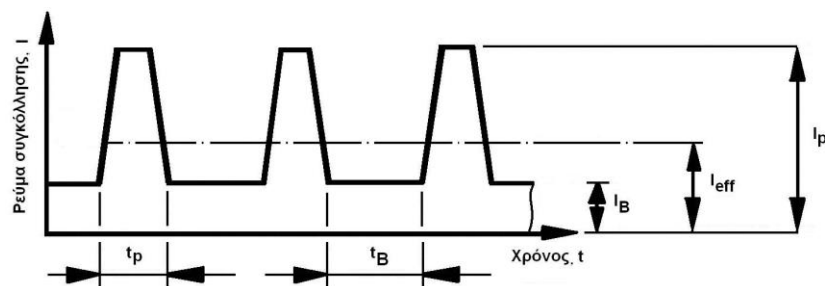
☞ Τα ηλεκτρικά τόξα ψεκασμού δεν εμφανίζουν βραχεία τόξα κατά την απόθεση του μετάλλου προσθήκης το οποίο είναι υπό μορφή σταγονιδίων μικρών διαστάσεων (Εικ. 2.8α.) Εμφανίζεται για τάσεις μεγαλύτερες από 25V (Εικ. 2.8β) ενώ ο ρυθμός μεταφοράς των σταγόνων είναι της τάξης των 100 - 300/sec.



Εικόνα 2.8 Ηλεκτρικά τόξα ψεκασμού. α) Μηχανισμός απόθεσης του μετάλλου προσθήκης β) και οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες εμφανίζονται^{[6],[7]}

Με τα ηλεκτρικά τόξα ψεκασμού υπάρχουν καλύτερες συνθήκες τόξου, η διαχείριση του μετάλλου προσθήκης είναι καλύτερη και συνεπώς πιο οικονομική ενώ οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες και ελάχιστο σχηματισμό εγχυτήρων. Με αυτή τη μορφή ηλεκτρικού τόξου μπορούν να συγκολληθούν τόσο λεπτά ελάσματα όσο και ελάσματα μεγαλύτερου πάχους.

➡ Στα ηλεκτρικά τόξα παλμών, το ρεύμα συγκόλλησης έχει παλμική μορφή κύματος και σύμφωνα και με την Εικόνα 2.9 μπορεί να περιγραφεί με τους ακόλουθους όρους:

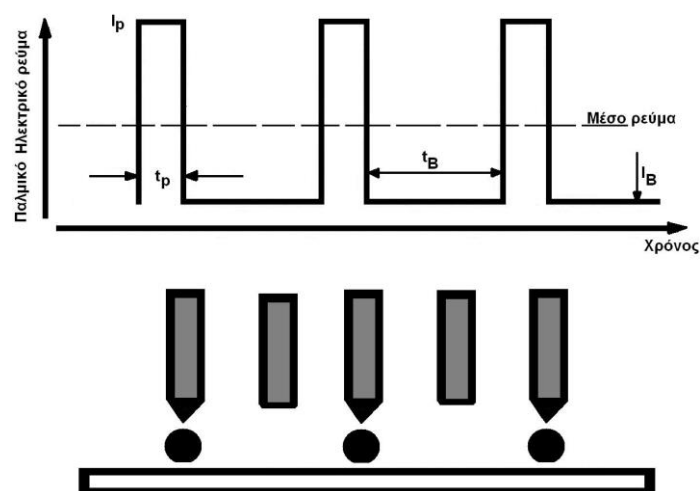


Εικόνα 2.9 Μορφή και χαρακτηριστικά παλμικού ρεύματος

- I_B : Ένταση ρεύματος Background
- I_p : Ένταση ρεύματος παλμού
- t_p : Χρόνος - διάρκεια παλμού
- t_B : Χρόνος - διάρκεια Background ρεύματος παλμού
- I_{eff} : Ενεργή ένταση ρεύματος (μέση ένταση)
- f : Συχνότητα παλμού

Η διαδικασία συγκόλλησης με παλμικό ρεύμα έχει ως εξής (Εικ. 2.10):

1. Το τόξο συντηρείται με το ρεύμα 'background' και το άκρο του ηλεκτροδίου τήκεται ελαφρώς στην άκρη του.
2. Το παλμικό ρεύμα προκαλεί μεγαλύτερη τήξη στο άκρο του ηλεκτροδίου, το οποίο μορφοποιείται σε μορφή σταγόνας.
3. Η σταγόνα αποκολλάται από το ηλεκτρόδιο και μεταφέρεται στο λουτρό συγκόλλησης χωρίς τη δημιουργία βραχέος τόξου.
4. Το ρεύμα μειώνεται στο ρεύμα 'background'.
5. Το τόξο συντηρείται με το ρεύμα 'background' μέχρι τον επόμενο παλμό. Η άκρη του ηλεκτροδίου αρχίζει να τήκεται χωρίς όμως να αποκολλάται κάποια σταγόνα.



Εικόνα 2.10 Διάγραμμα ηλεκτρικού ρεύματος - χρόνου στο παλμικό ρεύμα και ο μηχανισμός αποκόλλησης σταγόνων κατά τη συγκόλληση

Σε μερικές περιπτώσεις παλμικού ρεύματος τόσο το background ρεύμα όσο και το ρεύμα παλμού είναι προκαθορισμένα και η ισχύς του τόξου μπορεί να μεταβληθεί επεμβαίνοντας μόνο στη συχνότητα του παλμού (f). Η αύξηση της συχνότητας, αυξάνει τη δραστική ένταση του ρεύματος (I_{eff}) αλλά και το ρυθμό απόθεσης του μετάλλου προσθήκης.

Πλεονεκτήματα της μορφής αυτής ηλεκτρικού τόξου είναι:

- Οι σταγόνες μεταφέρονται στο λουτρό συγκόλλησης χωρίς βραχεία τόξα και συνεπώς με ελάχιστους εγχυτήρες ακόμα και σε χαμηλή ισχύ τόξου
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια μεγαλύτερης διαμέτρου τα οποία είναι μικρότερου κόστους και περισσότερο εύκολα στη διαχείριση.
- Η εισερχόμενη θερμότητα είναι μικρότερη
- Υπάρχει μικρότερη συστολή στη συγκόλληση
- Μπορούν να συγκολληθούν λεπτά ελάσματα με ηλεκτρόδια μεγαλύτερης από το επιτρεπόμενο διαμέτρου.
- Η συγκόλληση προστατεύεται καλύτερα και το πορώδες είναι μικρότερο.

Μειονεκτήματα αποτελούν:

- Το μεγαλύτερο κόστος του εξοπλισμού
- Η μεγαλύτερη δυσκολία στη ρύθμιση των παραμέτρων του παλμού
- Η δυσκολία στην εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης

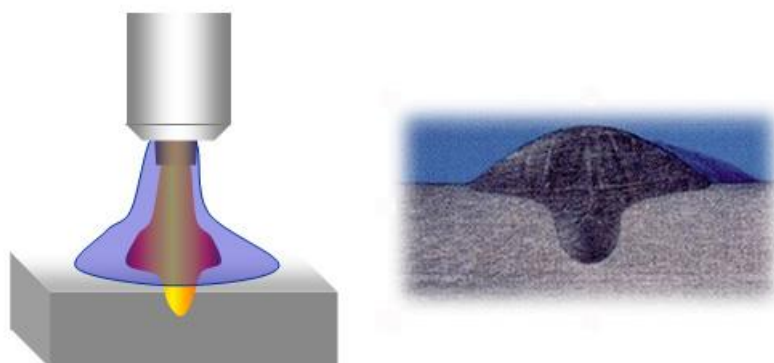
Στις συγκολλήσεις GMAW, επειδή το ηλεκτρόδιο και το μέταλλο προσθήκης ταυτίζονται, δεν απαιτείται ιδιαίτερη δεξιότητα κατά την εφαρμογή της μεθόδου κι έτσι αυτή μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί ή να προσαρμοστεί σε ρομποτικούς βραχίονες.

Για συγκολλήσεις αλουμινίου, το αέριο προστασίας είναι το ίδιο με τις συγκολλήσεις GTAW (αργό, ήλιο ή μείγμα των δύο). Παρουσία ηλίου, η ισχύς του τόξου, και κατά συνέπεια η διείδυση, είναι μεγαλύτερη για την ίδια ένταση ρεύματος. Παρουσία αργού έχουμε ως αποτέλεσμα πολύ σταθερό τόξο. Προσθέτοντας ήλιο σε αέριο προστασίας αργού, έχει παρατηρηθεί, λόγω του μικρότερου ατομικού του βάρους, ότι περισσότερος όγκος αερίου πρέπει να διοχετευτεί ώστε να υπάρχει αντίστοιχη προστασία όπως στην περίπτωση χρήσης καθαρού αργού.

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες βασικών αερίων προστασίας συγκόλλησης αλουμινίου

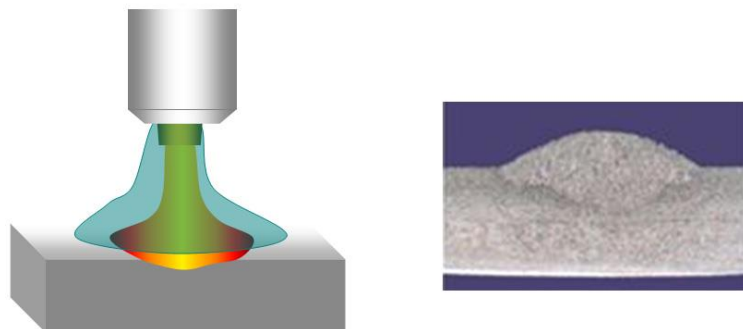
Αέριο	Χημικό σύμβολο	Μοριακό βάρος	Πυκνότητα [kg/m ³]	Ενέργεια ιονισμού [eV]	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m.K)]
Αργό	Ar	39,95	1,650	15,7	0,016
Ήλιο	He	4,00	0,165	24,5	0,142

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.2., το αργό ιονίζεται σχετικά εύκολα, γεγονός που συμβάλλει στη σταθερότητα του τόξου και στην εύκολη έναυση (και επανέναυση) του (αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο αποτελεί και τη βάση για τα αέρια που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις). Το τόξο που παράγει το αργό είναι «ήπιο» και αρκετά σταθερό. Η σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητά του, έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία θερμού πυρήνα στο πλάσμα του τόξου, που οδηγεί σε ισχυρή διείδυση, ιδιαίτερης μορφής (“argon finger shape”), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11. Κατά τις συγκολλήσεις με Αργό, προκύπτει χαμηλή τιμή διαλυτότητας (dilution).



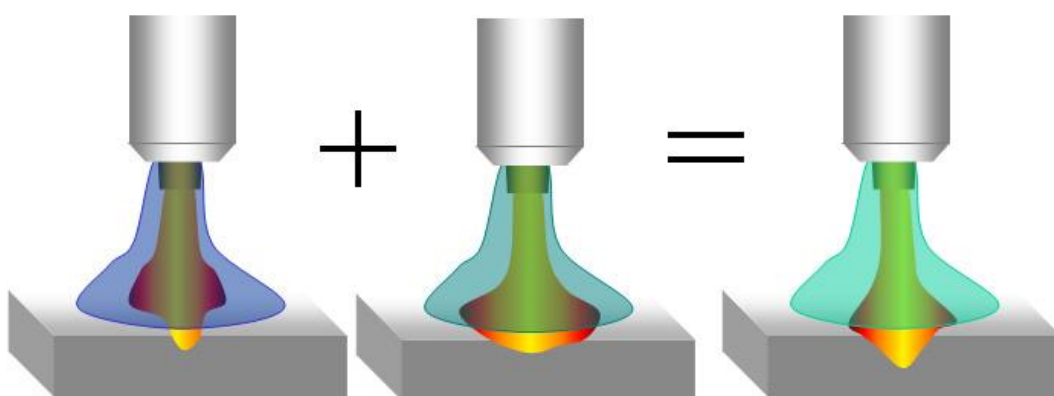
Εικόνα 2.11 Μορφή μετάλλου συγκόλλησης κατά τη συγκόλληση με αέριο προστασίας Αργό

Αντίστοιχα, από τον Πίνακα 2.2 προκύπτει για το Ήλιο, σε σύγκριση με το αργό, ότι αυτό έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα κι έτσι η μεταφορά θερμότητας μέσω του τόξου του είναι πιο ομαλή. Το δυναμικό ιονισμού του είναι μεγαλύτερο, κάτι που συνεπάγεται τη χρήση υψηλότερων τιμών τάσης από τη πηγή. Το λουτρό τήξης είναι έτσι πλατύτερο (Εικόνα 2.12), θερμότερο και «ρευστότερο», επιτρέποντας καλύτερη απομάκρυνση των όποιων ποσοτήτων αερίου έχουν διαλυθεί μέσα σε αυτό. Ακόμα, το τόξο είναι πιο ασταθές και δύσκολο στο χειρισμό του. Με βάση τα παραπάνω το ήλιο προτείνεται (καθαρό ή ως πρόσμιξη στο αργό) για τη συγκόλληση υλικών με μεγάλη θερμική διαχυτότητα όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός.



Εικόνα 2.12 Συγκόλληση με αέριο προστασίας ήλιο

Προσθέτοντας Ήλιο στο Αργό συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα και των δύο και το αποτέλεσμα είναι συγκολλήσεις τόξου μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας, ομαλής θερμοκρασιακής κατανομής, αυξημένης παραγωγικότητας, καλής διείδυσης αλλά και πλάτους λουτρού (μειωμένη πιθανότητα σφαλμάτων). Στην Εικόνα 2.13, εμφανίζονται σχηματικά τα παραπάνω.



Εικόνα 2.13 Συνδυασμός χαρακτηριστικών αργού και ηλίου

Στον Πίνακα 2.3 φαίνεται η επίδραση στη συγκόλληση της αύξησης του ποσοστού του ηλίου σε μείγμα Αργού / Ηλίου.

Πίνακας 2.3 Επίδραση στη συγκόλληση, της αύξησης του ποσοστού του ηλίου σε μείγμα Αργού / Ηλίου

Ποσοστό Αερίου Προστασίας	100%Ar → 100%He
Συμπεριφορά τόξου	Λιγότερο ασταθές
Πλάτος ραφής	Αυξάνεται, γίνεται πιο επίπεδη
Εμφάνιση ραφής	Γίνεται κυματοειδής
Διείσδυση	Γίνεται βαθύτερη
Ταχύτητα συγκόλλησης	Μπορεί να αυξηθεί
Τάση για ατελή τήξη	Μειώνεται
Ευαισθησία για σχηματισμό πόρων	Μειώνεται
Προθέρμανση	Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή να μην γίνει καθόλου
Θερμοκρασίες	Θερμαίνεται περισσότερο → μπορεί να αποφευχθεί εφαρμόζοντας μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης
Κόστος αερίου προστασίας	Αυξάνεται

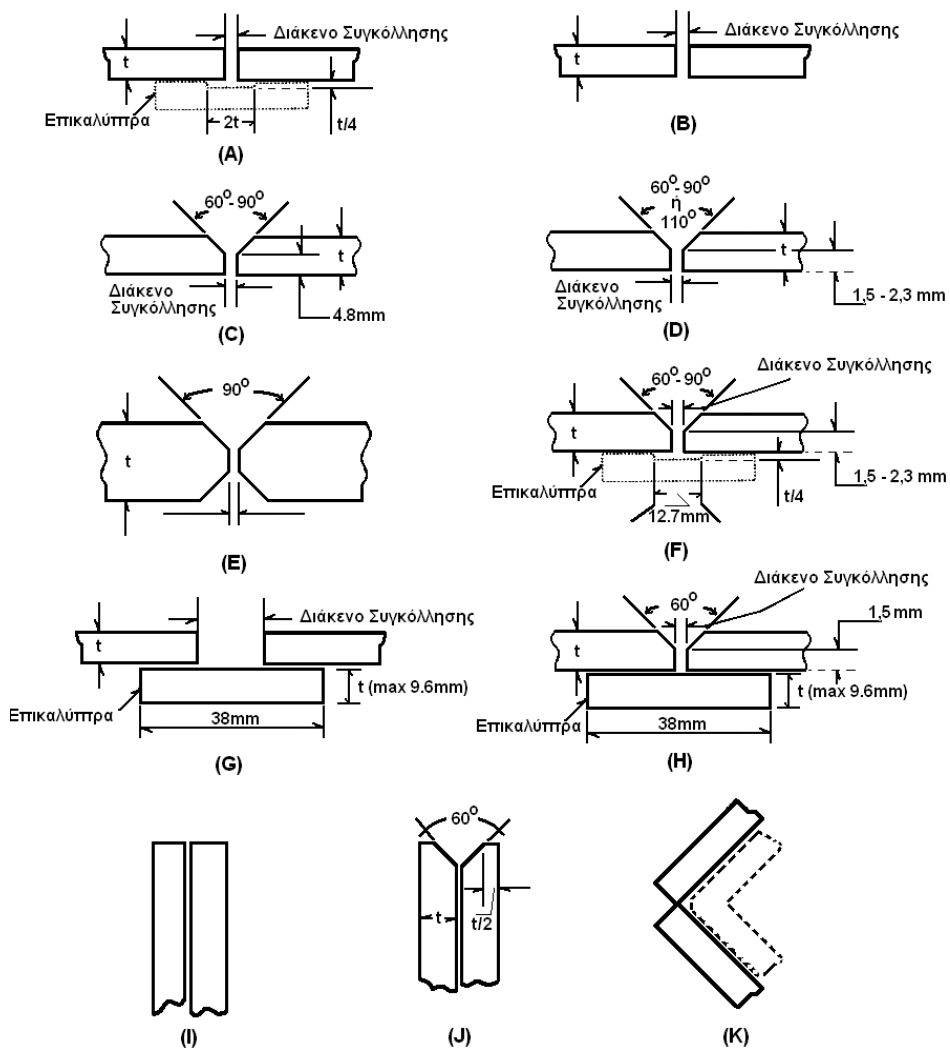
Για την προετοιμασία των ακμών της συγκόλλησης για τη μέθοδο GMAW (όπως και για την GTAW) υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Σε συγκολλήσεις μιας στρώσης, για καλύτερο σχηματισμό της ρίζας της συγκόλλησης θα πρέπει να γίνεται διαμόρφωση της ακμής, εάν αυτό είναι δυνατό.

Ακόμα, οι ακμές της συγκόλλησης θα πρέπει να είναι απαλλαγμένες από λάδια, γράσα ή άλλα λιπαντικά, ενώ το στρώμα οξειδίου του αλουμινίου θα πρέπει να αφαιρείται ακριβώς πριν τη διενέργεια της συγκόλλησης, κυρίως μηχανικά, με χρήση μεταλλικής βούρτσας από λευκό μέταλλο (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας).

Στον Πίνακα 2.4 δίδονται θερμοκρασίες και χρόνοι προθέρμανσης για ορισμένα κράματα αλουμινίου ενώ στην Εικόνα 2.14 δίνονται οι τυπικές γεωμετρίες συγκόλλησης για τη μέθοδο GMAW.

Πίνακας 2.4 Θερμοκρασίες και χρόνοι προθέρμανσης για ορισμένα κράματα αλουμινίου

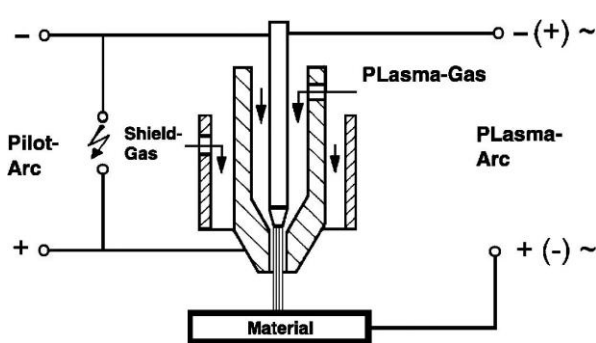
Κράμα	Πάχος (mm)	Μέγιστη Θερμοκρασία προθέρμανσης (°C)	Μέγιστος Χρόνος προθέρμανσης(min)
AlMgSi0,5	>20	180	60
AlMgSi0,7	>20	200	30
AlMgSi1	>20	200	20
AlZn4,5Mg1	>16	140	30
AlMg4,5Mn	>16	150	20
AlMg 3	>16	150	10



Εικόνα 2.14 Τυπικές γεωμετρίες συγκόλλησης για τη μέθοδο GMAW^[11]

2.1.3 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος

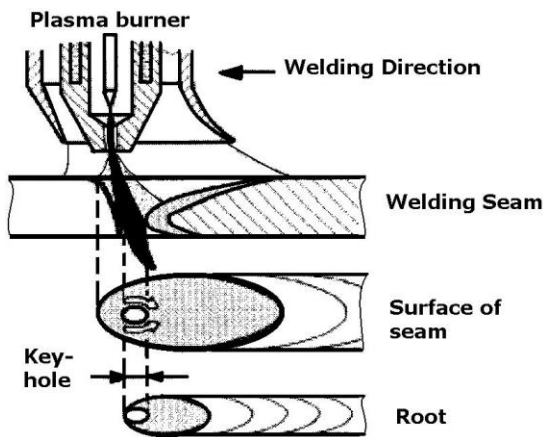
Η συγκόλληση με τόξο πλάσματος αποτελεί εξέλιξη της συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου. Στην συγκόλληση με τόξο πλάσματος, το τόξο δεν



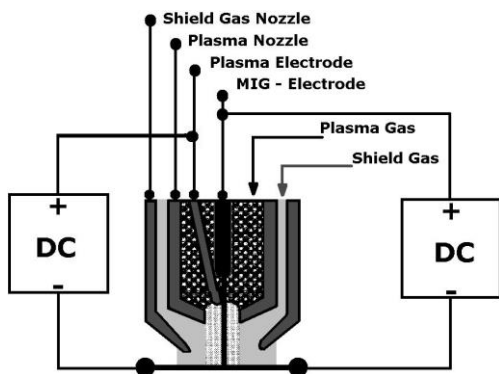
Εικόνα 2.15 Αρχή μεθόδου συγκόλλησης με τόξο πλάσματος

δημιουργείται ελεύθερα μεταξύ κάποιου μη τηκόμενου ηλεκτροδίου και του υπό συγκόλληση μετάλλου, αλλά περιορίζεται από μια επιπρόσθετη ροή ενός άλλου αερίου. Το αέριο αυτό ονομάζεται πλάσμα ή κεντρικό αέριο, είναι πλήρως ιονισμένο και έχει πολύ μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι της τάξης των 15.000 -

20.000°C.



Εικόνα 2.16 Τεχνική Keyhole



Εικόνα 2.17 Αρχές μεθόδου συγκόλλησης με τόξο πλάσματος και καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο

Η δέσμη του πλάσματος είναι αρκετά συγκεντρωμένη κι έτσι οι περιοχές του μετάλλου που τήκεται και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης είναι σχετικά μικρές, οδηγώντας σε συγκολλήσεις με μικρές παραμορφώσεις. Για τις συγκολλήσεις πλάσματος, χρησιμοποιείται τόσο συνεχές (ορθής και ανάστροφης πολικότητας) όσο και εναλλασσόμενο ρεύμα.

Σημειώνεται ακόμα ότι κατά τη δεκαετία του 1970 εμφανίστηκε μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε και καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο. Σήμερα συναντάται πλέον σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές καθώς έχουν ξεπεραστεί αρχικά προβλήματα, όπως το μεγάλο μέγεθος του όπλου συγκόλλησης, η παροχή των αερίων και η τροφοδοσία του μετάλλου συγκόλλησης καθώς και η βελτιστοποίηση των συνθηκών της όλης ακολουθίας.

2.1.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding – E.B.W.)

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding – E.B.W.) είναι μια μέθοδος τήξης που χρησιμοποιεί μια υψηλά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας.

Συνήθως, τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από μια θερμή κάθοδο επιταχύνονται από την επίδραση υψηλού δυναμικού (της τάξης των 30.000 – 200.000V) και εστιάζονται μαγνητικά σε μια περιοχή με πυκνότητα ενέργειας που μπορεί να φτάσει και τα 30.000W/mm². Αυτό προκαλεί σχεδόν άμεση τοπική τήξη αλλά και εξαχνωση των υπό συγκόλληση τεμαχίων. Έτσι, κατά την εφαρμογή της μεθόδου μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις τύπου keyhole, δίνοντας ζώνες τήξης ιδιαίτερα περιορισμένου εύρους, σε πάχη υλικού από 0,1mm μέχρι και 200mm.

Η μέθοδος εμφανίστηκε στη Γερμανία και τη Γαλλία στη δεκαετία του 1950, και αρχικά αξιοποιήθηκε από την πυρηνική βιομηχανία. Σήμερα χρησιμοποιείται πλέον στην

αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην βιομηχανία ηλεκτρονικών αλλά και σε άλλους τομείς.

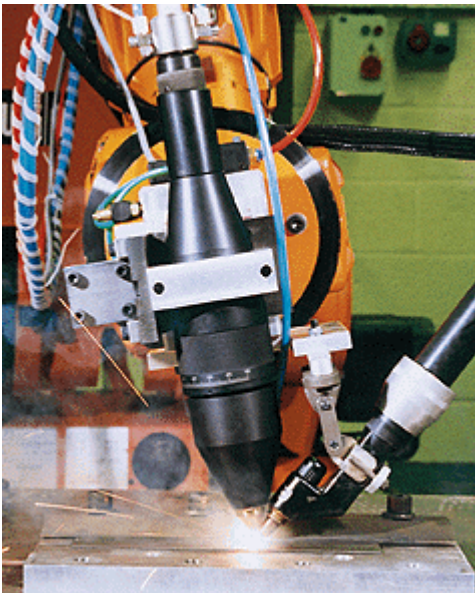
Οι συγκολλήσεις συνήθως παράγονται σε θάλαμο κενού (συνήθως σε ατμόσφαιρα $5 \times 10^{-5} \text{mbar}$), συχνά όμως τα δοκίμια που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται σε θάλαμο με επίπεδα κενού της τάξης των 5×10^{-3} ως 10mbar . Συγκολλήσεις E.B. μπορούν να γίνουν και σε κανονικές συνθήκες αλλά τότε το πλάτος της ζώνης τήξης είναι σαφώς μεγαλύτερο.

Ο εξοπλισμός μιας συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων περιλαμβάνει την πηγή υψηλού δυναμικού, το όπλο ηλεκτρονίων, το θάλαμο κενού, εξοπλισμό δημιουργίας κενού και κάποιο κέντρο ελέγχου. Δείχνει πολύπλοκος ωστόσο είναι ευέλικτος και παρόλο που το κόστος του είναι σχετικά μεγαλύτερο σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους, είναι ικανός να αποδώσει οικονομική παραγωγή υψηλής ποιότητας.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται ικανοποιητικά για τη συγκόλληση του συνόλου των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου. Το βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται έχει να κάνει με την εξάχνωση πτητικών συστατικών, ιδιαίτερα στις συγκολλήσεις κραμάτων της σειράς 5xxx και 7xxx, που οδηγούν σε μείωση της αντοχής των συγκολλήσεων. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η διαδικασία καθαρισμού η οποία πρέπει να είναι επιμελής.

2.1.5 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ

Η συγκόλληση με δέσμη λέιζερ γίνεται με τη βοήθεια της θερμότητας που παράγεται από μια



Εικόνα 2.18 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ

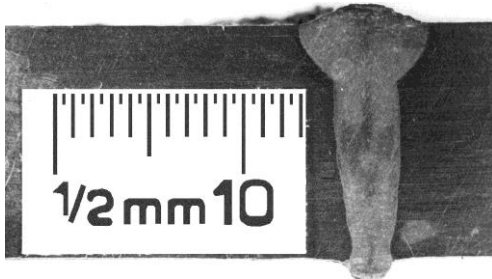
ισχυρή δέσμη φωτονίων που προσκρούει πάνω στις επιφάνειες των υπό συγκόλληση μετάλλων.

Κατά την πρόσκρουση, μέρος της ενέργειας της δέσμης απορροφάται από το υλικό και μέρος της ανακλάται. Το ποσοστό της ενέργειας που θα απορροφηθεί, εξαρτάται από τα αντανακλαστικά χαρακτηριστικά του προς συγκόλληση μέταλλου, την κατάσταση και προετοιμασία της επιφάνειας του και τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης. Τα κράματα αλουμινίου έχουν υψηλή ανακλαστικότητα (περίπου 90%) στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία. Χρησιμοποιώντας φακούς πόλωσης, δίνοντας μικρές κλίσεις (της τάξης των 10°) στα υπό συγκόλληση μέταλλα ή συγκολλώντας με δέσμες υψηλής συχνότητας, μπορεί να βελτιωθεί η απορροφητικότητα. Γενικότερα, η απορρόφηση ενέργειας

είναι μεγαλύτερη όταν η συγκόλληση γίνεται με την τεχνική που αναφέρεται με το διεθνή όρο ως

‘keyhole welding’. Μάλιστα, στα κράματα αλουμινίου παρατηρείται αύξηση μεγαλύτερη του 50%.

Το αλουμίνιο παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στη συγκόλληση του με δέσμη λέιζερ σε σύγκριση με τα άλλα μέταλλα. Για παράδειγμα, κατά την εφαρμογή της τεχνικής keyhole, για τη



Εικόνα 2.19 Τομή συγκόλλησης με δέσμη λέιζερ. Τεχνική Keyhole

συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx προκαλείται υπερθέρμανση του μετάλλου που τήκεται η οποία οδηγεί σε εξαχνωση του μαγνησίου, με συνέπεια την πτώση της αντοχής στην περιοχή της συγκόλλησης^{[19],[20]}.

Ωστόσο, λόγω της υψηλής ενέργειας της δέσμης του λέιζερ, όταν αυτή εφαρμόζεται σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, δίνει ραφές με σχετικά μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δηλαδή με μικρότερη περιοχή πτώσης της αντοχής του υλικού.

Από τις διάφορες παραλλαγές της εφαρμογής της δέσμης λέιζερ στις συγκολλήσεις, αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη ναυπηγική είναι το λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και το λέιζερ τύπου Nd:YAG. Η έρευνα για τη βελτίωση του εξοπλισμού και των τεχνικών συγκόλλησης με δέσμη λέιζερ συνεχίζεται, παρόλο που ως και σήμερα προτιμάται η εφαρμογή της σε λεπτά ελάσματα κραμάτων αλουμινίου (κάτω από 5 mm).

2.1.6 Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση υλικού (Friction Stir Welding – F.S.W.)^{[29],[30],[41],[42]}

Πρόκειται για μέθοδο η οποία πρόσφατα αναπτύχθηκε (1991) από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute - T.W.I.). Είναι τεχνική στερεής κατάστασης, κατά την οποία συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών αλλά σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο τήξης τους^[29].

Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο περνά κατά μήκος των ακμών των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν (Εικ. 2.21-2.23). Η θερμότητα, που αναπτύσσεται λόγω τριβής, «μαλακώνει» το υλικό των ακμών του κάθε τεμαχίου το οποίο παρασύρεται από το περιστρεφόμενο εργαλείο, στροβιλίζεται, αναμιγνύεται και τελικά δημιουργεί τη ραφή μεταξύ των δύο κομματιών.

Η μέθοδος αυτή γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, καθώς δίνει συγκολλήσεις με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις συγκολλήσεις που υπάρχει τήξη. Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου (0,6 – 0,8 του σημείου τήξης του υλικού) και ο σχετικά μικρός θερμικός της κύκλος, οδηγούν σε συγκολλήσεις^[18]:

- ο με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη, αλλά και κόπωση
- ο με ελάχιστο πορώδες
- ο χωρίς στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις
- ο με βελτιωμένη εμφάνιση ραφής

Επιπλέον, πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ο Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης
- ο Μπορούν να συγκολληθούν ελασμάτα πάχους από 1,2 ως 50 ή ακόμα και 100mm
- ο Δεν χρησιμοποιεί καταναλισκόμενα στοιχεία οπότε δεν υπάρχει κόστος αναλωσίμων
- ο Αυξάνει την ασφάλεια της συγκόλλησης, καθώς δεν υπάρχουν υψηλές τάσεις ή εντάσεις

ρεύματος, τηγμένα μέταλλα, ακτινοβολία, αναθυμιάσεις κ.λπ.

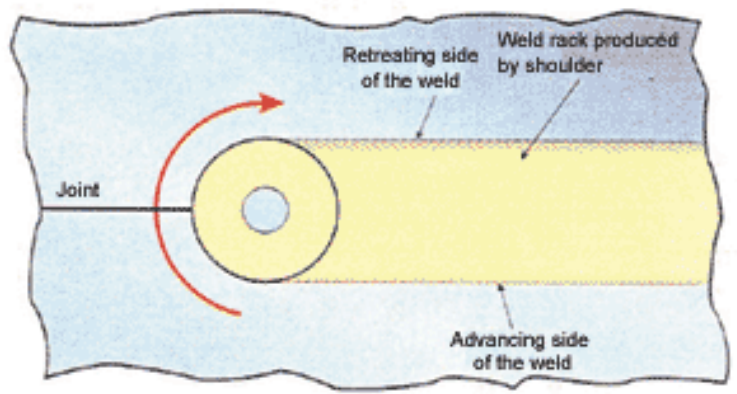
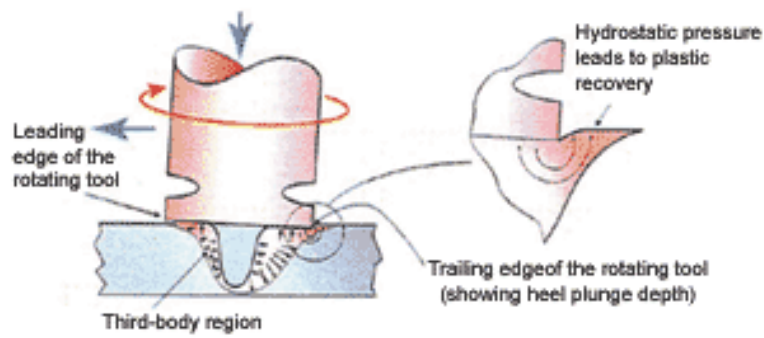
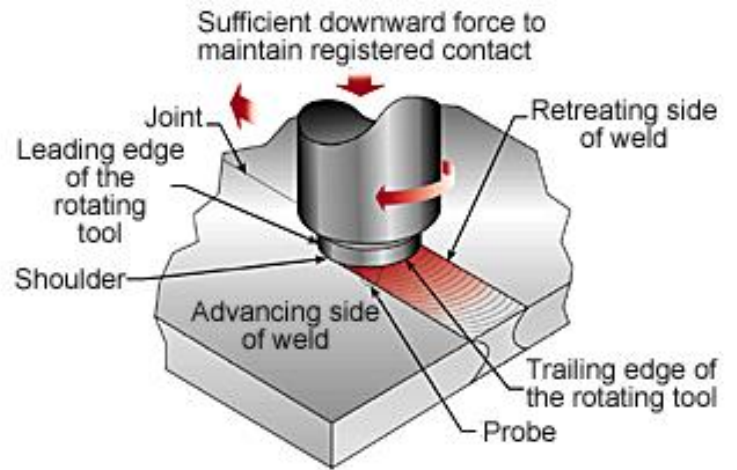
- ο Δεν χρησιμοποιεί αέρια προστασίας
- ο Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις συγκολλήσεις

κραμάτων αλουμινίου που ανήκουν σε διαφορετική σειρά.

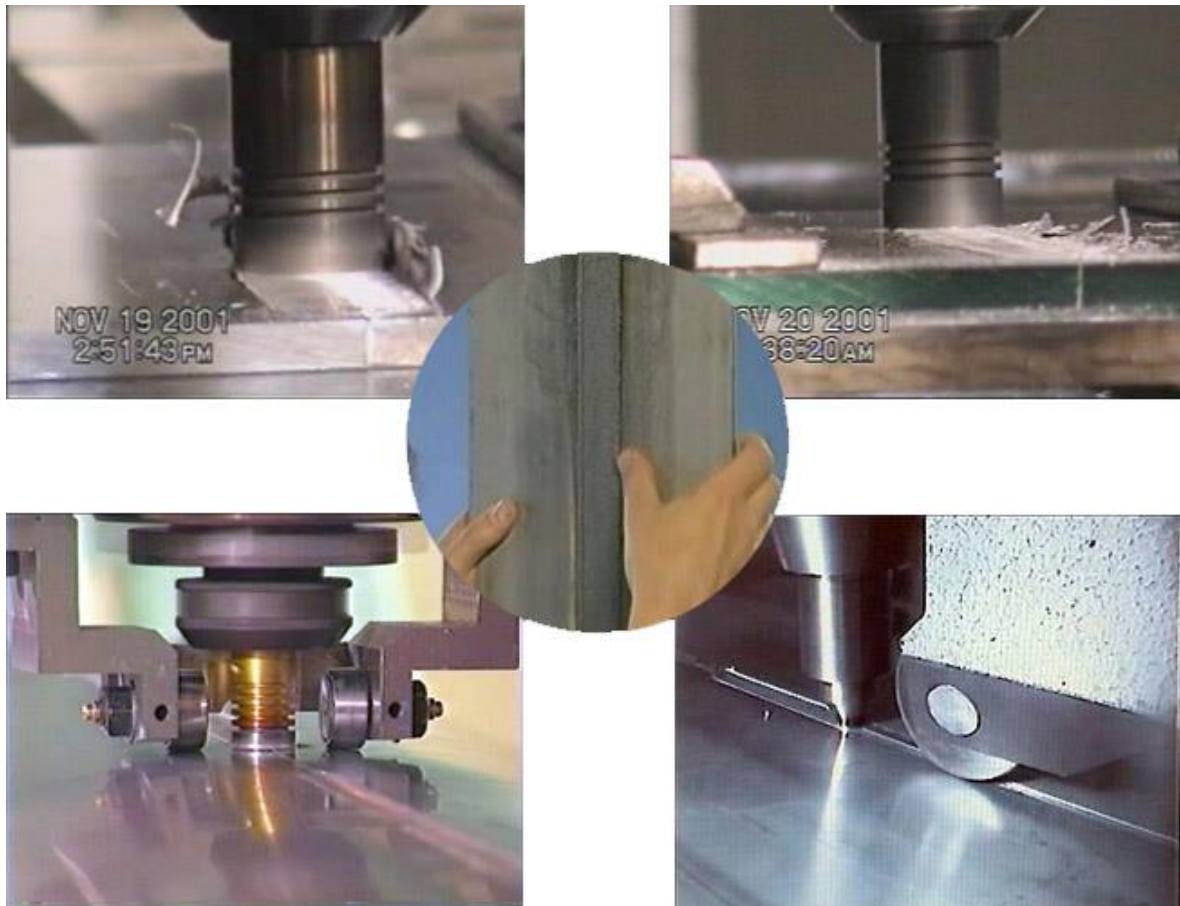


Εικόνα 2.20 Συγκόλληση FSW ελασμάτων αλουμινίου πάχους 50mm

Κατά τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου με χρήση της μεθόδου αυτής, η μόνη ισχυρή απαίτηση που υπάρχει, έχει να κάνει με την – όπως είναι φυσικό – ισχυρή συγκράτηση των υπό ένωση τεμαχίων, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, προβλήματα όπως αυτό αλλά και άλλα, όπως για παράδειγμα το υψηλό, ως τώρα, κόστος του υπάρχοντος εξοπλισμού, ενδέχεται να ξεπεραστούν στην περίπτωση που η μέθοδος συνεχίσει να γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής^[20].



Εικόνα 2.21 Σκαριφηματική απόδοση του τρόπου εφαρμογής της μεθόδου FSW^[29]



Εικόνα 2.22 Το περιστρεφόμενο εργαλείο της μεθόδου συγκόλλησης FSW



Εικόνα 2.23 Κεφαλές μηχανών συγκόλλησης FSW

2.1.7 Άλλες τεχνικές συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου

2.1.7.1 Σημειακή συγκόλληση αντίστασης

Με τη μέθοδο αυτή συγκολλούνται τόσο τα μη θερμικά όσο και τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου. Οι σημειακές συγκολλήσεις αντίστασης χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οικιακών μαγειρικών σκευών, δεξαμενών, καταστρωμάτων γεφυρών και αρκετών εξαρτημάτων αεροπλάνων και αυτοκινήτων. Ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροπορική βιομηχανία όπου απαιτούνται υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις και πολύπλοκοι και ακριβοί εξοπλισμοί για καθαρισμό, ένωση και έλεγχο της ποιότητας της ένωσης των υλικών, χρησιμοποιείται ευρέως η τεχνική αυτή. Πλεονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί και να προσαρμοστεί σε ρομποτικούς βραχίονες, γεγονός που την κάνει ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογή σε αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής.

2.1.7.2 Λοιπές τεχνικές

Από τις λοιπές υπάρχουσες τεχνικές συγκόλλησης, οι μέθοδοι γνωστές ως Electroslag (ESW) και Electrogas (EGW) έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικά αλλά όχι εμπορικά για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Η μέθοδος SMAW, με επενδυμένα ηλεκτρόδια (flux-coated rods), έχει αντικατασταθεί σε σημαντικό βαθμό από την GMAW, ενώ συγκολλήσεις με χρήση φλόγας καύσης αερίου μείγματος οξυγόνου – ακετυλενίου ή αερίου μείγματος οξυγόνου – υδρογόνου (OFW), έχει αντικατασταθεί από την GTAW για τις συγκολλήσεις αλουμινίου.

2.2 Χαρακτηριστικά που επιδρούν καταλυτικά στις συγκολλήσεις τους

2.2.1 Το οξείδιο του αλουμινίου

Το αλουμίνιο παρουσιάζει ισχυρή χημική έλξη για το οξυγόνο και οξειδώνεται αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα σχηματίζοντας επιφανειακό στρώμα Al_2O_3 .

Οι θερμικές κατεργασίες και οι συνθήκες αποθήκευσης παρουσία υγρασίας αυξάνουν το πάχος του στρώματος οξειδίου. Αυτό οδηγεί σε επιπλέον απορρόφηση υγρασίας η οποία αποτελεί και τη βασική πηγή υδρογόνου, βασικού παράγοντα δημιουργίας πορώδους στις συγκολλήσεις αλουμινίου, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

Στην περίπτωση των συγκολλήσεων, το φυσικό οξείδιο όταν είναι αρκετά λεπτό σε πάχος μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα, επιλέγοντας ανάστροφη πολικότητα (τεχνικές GMAW και GTAW). Σε άλλες τεχνικές συγκόλλησης, χρησιμοποιούνται ικανοποιητικά διάφορα χλωρίδια και φθορίδια τα οποία όμως θα πρέπει να απομακρυνθούν μετά τη συγκόλληση διότι μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση.

Πιο παχιά στρώματα οξειδίου, αφαιρούνται με μηχανικές, χημικές, ή ηλεκτρικές μεθόδους πριν τη διενέργεια της συγκόλλησης. Καθώς μετά τον καθαρισμό δημιουργείται αμέσως νέο λεπτό στρώμα Al_2O_3 , στην περίπτωση των συγκολλήσεων, αυτή πρέπει να εφαρμόζεται κατά μέγιστο οκτώ ώρες μετά τον καθαρισμό.

Το οξείδιο του αλουμινίου τήκεται στους $2.050^{\circ}C$ περίπου (βλ. Πιν. 1.9), θερμοκρασία η οποία είναι κατά πολύ υψηλότερη από το σημείο τήξης του καθαρού αλουμινίου ($>600^{\circ}C$ - Πιν. 1.9). Εάν το στρώμα οξειδίου δεν αφαιρεθεί σωστά, τότε μικρά σωματίδια από αυτό μπορούν να εγκλωβιστούν στο μέταλλο συγκόλλησης προκαλώντας μείωση της ολκιμότητας. Επιπλέον, το τυχόν υδρογόνο που έχει συγκρατηθεί από αυτό, εισέρχεται στη λίμνη συγκόλλησης και διαλυτοποιείται στο ρευστό αλουμίνιο. Με τη στερεοποίηση όμως το υδρογόνο εγκλωβίζεται και δημιουργείται πορώδες.

Το στρώμα οξειδίου του αλουμινίου είναι επίσης και ηλεκτρικός μονωτής. Εάν είναι αρκετά παχύ τότε εμποδίζει τη δημιουργία τόξου. Σε αυτή την περίπτωση η μείωση του στρώματος του οξειδίου είναι απαραίτητη όχι μόνο στην περιοχή συγκόλλησης αλλά και σε περιοχές μακριά από αυτή. Αν υπάρχει και στην περιοχή της γείωσης (π.χ. συγκόλληση GMAW ή GTAW), πρέπει επίσης να αφαιρεθεί, καθώς δημιουργεί ακανόνιστη ηλεκτρική επικοινωνία με τον πόλο του ηλεκτροδίου και συνεπώς κακή ποιότητα ηλεκτρικού τόξου.

2.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα να είναι εφικτή η συγκόλληση των κραμάτων αυτών έχοντας σχετικά μεγάλο μήκος τόξου (σημαντική απόσταση μεταξύ του υλικού και του ακροφυσίου συγκόλλησης). Έτσι, επιτρέπεται η χρήση δαυλών με σχετικά μακρύ ακροφύσιο, που οδηγεί καλύτερα το αέριο προστασίας στην περιοχή της συγκόλλησης. Οι μη μαγνητικές ιδιότητες του αλουμινίου ελαχιστοποιούν προβλήματα όπως το «φύσημα τόξου» και κάνουν το αλουμίνιο ιδανικό υλικό για σφικτήρες και εργαλεία όταν γίνονται συγκολλήσεις άλλων υλικών.

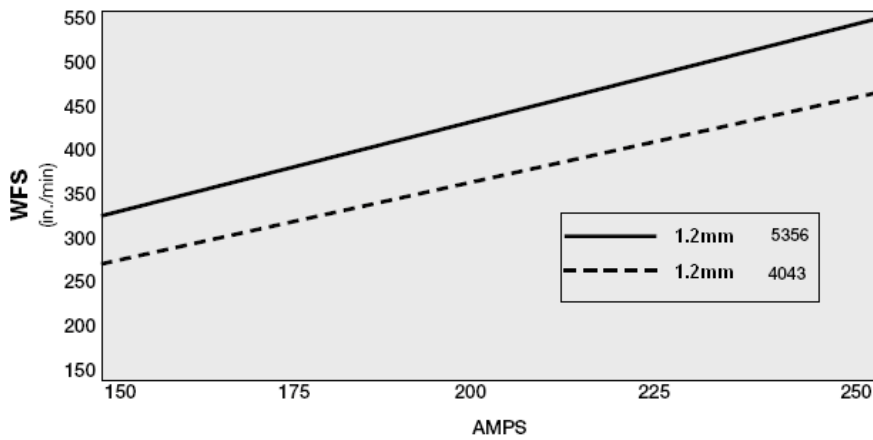
Στις συγκολλήσεις τόξου, η γείωση μπορεί να συνδεθεί σε οποιοδήποτε σημείο του μετάλλου και αυτό προτιμάται καθώς για παράδειγμα η σύνδεσή της σε χαλύβδινη τράπεζα εργασίας μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή μετάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η δημιουργία τόξου σε κοντούς αγωγούς επαφής (γειώσεις) είναι συνηθισμένο φαινόμενο στο αλουμίνιο, λόγω του ζημιογόνου οξειδίου του (§ 2.2.1), όταν μόνο ένα ζεύγος επαφών είναι διαθέσιμο. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα κατά την έναρξη του τόξου χρησιμοποιώντας σταθερή παροχή ηλεκτρικής τάσης και γρήγορη ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου, οπότε και δημιουργείται απότομη άνοδος του ρεύματος. Η δημιουργία ηλεκτρικού τόξου στα σημεία επαφής καταστρέφει την επιφάνεια του αλουμινίου και προφανώς πρέπει να αποφεύγεται.

Τα κράματα αλουμινίου κατέχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και το καθαρό αλουμίνιο κατέχει το 62% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του καθαρού χαλκού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου, κάτι που δε συμβαίνει σε τόσο μεγάλη έκταση σε άλλα μέταλλα. Έτσι για παράδειγμα, το καθαρό αλουμίνιο έχει το 62% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού ενώ στα κράματα αλουμινίου 4043 (AlSi) και 5356 (AlMg) το ποσοστό αυτό πέφτει στο 40% και 30% αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές παίζουν βέβαια σημαντικό ρόλο στις συγκολλήσεις με προστασία αερίου (GMAW και GTAW). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 2.24 αλλά και στον Πίνακα 2.5, όταν τα δύο αυτά κράματα χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια (μέταλλο προσθήκης σε μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm) σε συγκόλληση GMAW με ίδιες συνθήκες τάσης και έντασης ρεύματος, η ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος (Wire Feed Speed – W.F.S.) είναι κατά 17% μικρότερη στην περίπτωση του κράματος 4043.

Ωστόσο, παραμένει γεγονός ότι τα κράματα αλουμινίου έχουν σαφώς μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σύγκριση με το χάλυβα. Μεταβολές στο μήκος του τόξου κατά τη συγκόλληση έχουν ελάχιστη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα (Εικ. 2.25). Έτσι, πρακτικές τεχνικές όπως η απομάκρυνση του δαυλού από το σημείο συγκόλλησης, που εφαρμόζεται στις συγκολλήσεις

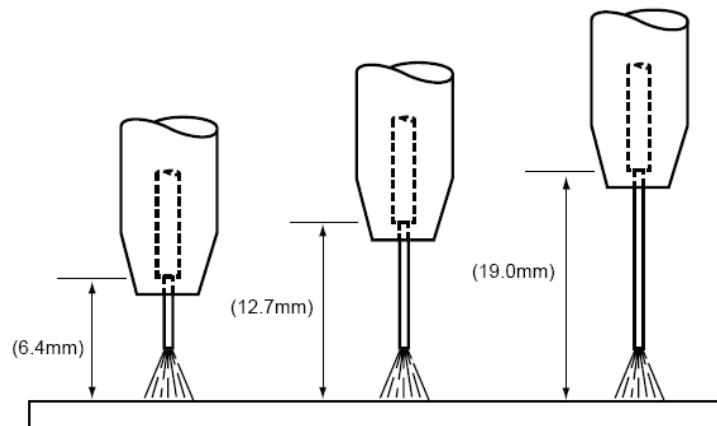
χαλύβων και έχει σαν στόχο την ψύξη του τόξου είναι ουσιαστικά περιττές. Βέβαια, το κοντό μήκος τόξου προτιμάται καθώς δημιουργεί καλύτερο περιβάλλον προστασίας αδρανούς αερίου.



Εικόνα 2.24 Διάγραμμα ταχύτητας τροφοδοσίας σύρματος ως προς το ρεύμα συγκόλλησης για τα κράματα 4043 και 5356 υπό μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm

Πίνακας 2.5 Σύγκριση ταχύτητας τροφοδοσίας σύρματος με το ρεύμα συγκόλλησης για τα κράματα 4043 και 5356 υπό μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm

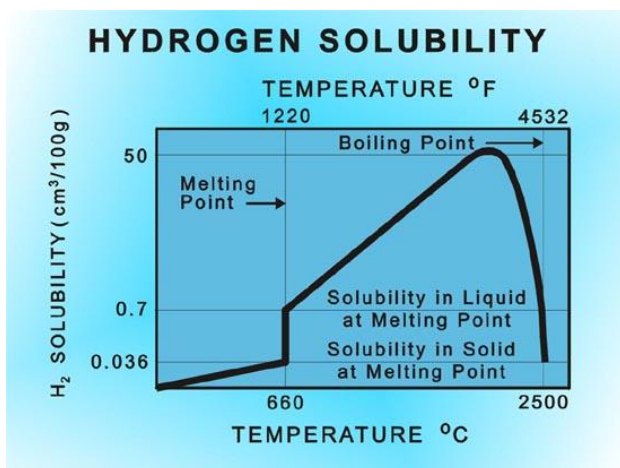
Ρεύμα συγκόλλησης (A)	5356 Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (mm/min)	4043 Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (mm/min)
150	8.255	6.858
175	9.779	8.001
200	11.176	9.144
225	12.573	10.414
250	13.843	11.684



Εικόνα 2.25 Επίδραση του μήκους του τόξου στη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου^[17]

2.2.3 Η διαλυτότητα του υδρογόνου

Το υδρογόνο διαλύεται ταχύτατα στο τηγμένο αλουμίνιο. Ωστόσο η διαλυτότητά του μειώνεται δραστικά όσο μειώνεται η θερμοκρασία και τελικά σχεδόν μηδενίζεται στο στερεό αλουμίνιο (Εικ. 2.26). Για το λόγο αυτό έχει καθορισθεί ως ο βασικός παράγοντας της δημιουργίας πορώδους στις



Εικόνα 2.26 Η διαλυτότητα του υδρογόνου στο καθαρό αλουμίνιο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

στο υλικό προσθήκης, υγρασία στην επιφάνεια είτε με τη μορφή ένυδρου οξειδίου στο μέταλλο βάσης είτε στο μέταλλο προσθήκης, τυχόν συγκέντρωση υγρασίας στο χώρο αποθήκευσης, διαρροές υγρασίας στο ακροφύσιο από τον αγωγό ψύξης του ή υγρασία στο αέριο προστασίας, πρέπει να απαλείφονται για να επιτευχθεί σωστή συγκόλληση.

Τα κράματα της σειράς 5xxx (AlMg), είναι τα πιο ευαίσθητα σε ότι αφορά στο σχηματισμό ένυδρων οξειδίων και τα ηλεκτρόδια των συγκολλήσεων με αδρανές αέριο πρέπει να αποθηκεύονται σε ξηρό και θερμαινόμενο χώρο καθώς όταν τα ένυδρα αυτά οξείδια σχηματιστούν δεν μπορούν να αφαιρεθούν με τεχνικές που εφαρμόζονται στα επικαλυμμένα ηλεκτρόδια των συγκολλήσεων χαλύβων.

2.2.4 Θερμικά χαρακτηριστικά

Η θερμική αγωγιμότητα αλουμινίου είναι τρεις ως έξι φορές υψηλότερη από αυτήν του χάλυβα. Παρόλο που η θερμοκρασία τήξης των κραμάτων αλουμινίου είναι χαμηλότερη των σιδηρούχων κραμάτων, υψηλότερες θερμικές παροχές είναι απαραίτητες ώστε να πραγματοποιηθούν οι συγκολλήσεις του, εξαιτίας της μεγάλης θερμικής του διαχυτότητας. Εάν οι συγκολλήσεις αλουμινίου πραγματοποιηθούν με χαμηλό ρυθμό προχώρησης του τόξου, τότε η θερμότητα θα διαχυθεί μπροστά από το τόξο με αποτέλεσμα να απαιτείται συνεχής αλλαγή των παραμέτρων

συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.

Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη λίμνη συγκόλλησης επιτρέπουν την απορρόφηση ακόμα και μεγάλης ποσότητας υδρογόνου. Καθώς η λίμνη συγκόλλησης στερεοποιείται η ποσότητα του υδρογόνου που ξεπερνά το όριο διαλυτότητας και δεν καταφέρνει να διαφύγει από το σχηματιζόμενο μέταλλο συγκόλλησης, δημιουργεί πορώδες.

Κάθε πηγή υδρογόνου, όπως για παράδειγμα λίπανση στο βασικό μέταλλο ή

συγκόλλησης. Οι περισσότερες συγκολλήσεις αλουμινίου απαιτούν υψηλή θερμική παροχή με μεγαλύτερη ταχύτητα προχώρησης.

Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα κάνει το αλουμίνιο εξαιρετικά ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της θερμικής παροχής κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Απαιτείται μια ιδιαίτερα σταθερή θερμική παροχή σε συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με γρήγορο ρυθμό, όπως η GMAW, ώστε να αποφευχθούν διακυμάνσεις στη διείσδυση και την τήξη. Για παράδειγμα, ατέλειες από ελλιπή διείσδυση ή τήξη προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της έντασης του ρεύματος σε συγκολλήσεις GMAW με μηχανή σταθερής τάσης. Με την ραδιογραφική εξέταση συγκολλήσεων, η χρησιμοποίηση μηχανής συγκόλλησης σταθερού ρεύματος με τη μέθοδο GMAW είναι προτιμητέα ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συγκολλήσεις.

Η θερμική διαστολή των κραμάτων αλουμινίου είναι περίπου διπλάσια από αυτήν του χάλυβα και κατά συνέπεια οι συγκολλήσεις αλουμινίου συρρικνώνονται περίπου 6% κατ' όγκο κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Λεπτά ελάσματα θα πρέπει να πακτώνονται ή να ποντάρονται ώστε να διατηρούνται οι ακμές στις αρχικές αποστάσεις. Ακόμη θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή δημιουργίας κρατήρα στο πέρας της συγκόλλησης ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία ρωγμών κρατήρα.

Τέλος το αλουμίνιο δεν αλλάζει το χρώμα του κατά τη διάρκεια της θέρμανσής του. Έτσι ο συγκολλητής θα πρέπει να έχει την ικανότητα να παρατηρεί την τήξη που δημιουργείται από το τόξο και να ελέγχει το βαθμό τήξης και τη διάρκεια της συγκόλλησης.

2.3 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης

Όλες οι μορφές των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου αλλά και των περισσότερων χυτών του μπορούν να συγκολληθούν. Φύλλα, πλάκες, αλουμίνιο διέλασης, σφυρηλάτησης και ράβδοι συγκολλούνται με τις περισσότερες από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν. Ακόμα και χυτά κράματα που έχουν παραχθεί με χύτευση υπό κενό συγκολλούνται με άριστα αποτελέσματα ενώ σημαντικά προβλήματα παρουσιάζουν μόνο αυτά που έχουν παραχθεί με τεχνική συμβατικής χύτευσης υπό πίεση οπότε και παρουσιάζουν σημαντικά υψηλό πορώδες, τόσο στο συγκολλημένο μέταλλο όσο και στο μέταλλο βάσης παραπλεύρως της συγκόλλησης, λόγω των εσωτερικών αερίων που υπάρχουν σε αυτά.

Ωστόσο, σε ότι αφορά στη συγκολλησιμότητα, η χημική σύσταση του κράματος αλλά και η κατεργασία που αυτό έχει υποστεί αποτελούν περισσότερο σημαντικούς παράγοντες από τη μορφή στην οποία αυτό βρίσκεται. Οι χημικές συστάσεις των πιο σημαντικών κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης καθώς και οι σχετικοί βαθμοί συγκολλησιμότητάς τους δίνονται στους Πίνακες 2.6 και 2.7.

2.3.1 Κριτήρια επιλογής κραμάτων προσθήκης

Κατά την επιλογή του βέλτιστου κράματος προσθήκης, η τελική χρήση της συγκόλλησης και η επιθυμητή του επίδοση πρέπει να είναι πρωταρχικής θεώρησης. Αρκετά κράματα και συνδυασμοί κραμάτων μπορούν να συγκολληθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα κράματα προσθήκης, αλλά μόνο ένα κράμα προσθήκης είναι το κατάλληλο για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι Πίνακες 2.6 και 2.7 παρουσιάζουν τη χημική σύσταση και άλλα βασικά χαρακτηριστικά κραμάτων προσθήκης αλουμινίου.

Οι κύριοι παράγοντες που συνήθως λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή ενός κράματος προσθήκης για συγκόλληση είναι:

- Ευκολία στη συγκόλληση (ευαισθησία της συγκόλλησης σε ρωγμάτωση)
- Αντοχή σε εφελκυσμό ή διάτμηση της συγκόλλησης
- Ολκιμότητα της συγκόλλησης
- Θερμοκρασία λειτουργίας
- Αντοχή σε διάβρωση
- Εναρμόνιση του χρώματος της συγκόλλησης με αυτό του μετάλλου βάσης μετά την αναγωγή

Πίνακας 2.6 Χημική σύσταση, φυσικές ιδιότητες και συγκολλησιμότητα επιλεγμένων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου^[11]

Κράμα βάσης	Ονομαστική σύσταση, wt%					Προσεγγιστικό εύρος τήξης		Θερμική αγωγιμότητα στους 25°C (77°F)		Ηλεκτρική αγωγιμότητα (α) %IACS	Συγκολλησιμότητα (β)				
	Al	Cu	Mn	Mg	Cr	°C	°F	W/mK	Btu/ft·h·°F		Αερίου	Τόξου με πηγή	Τόξου με αδρανές αέριο	Αντίστασης	Πίεσης
1060	≥99.6	...	...	...	...	646-657	1195-1215	234	135	62	A	A	A	B	A
1100	≥99.6	...	...	...	...	643-657	1190-1215	222	128	59	A	A	A	A	A
1350	≥99.6	...	...	...	...	646-657	1195-1215	234	135	62	A	A	A	B	A
3003	rem	0.12	1.2	...	...	643-654	1190-1210	193	112	50	A	A	A	A	A
3004	rem	...	1.2	1.0	...	629-654	1165-1210	163	94	42	B	A	A	A	B
5005	rem	...	...	0.8	...	632-654	1170-1210	200	116	52	A	A	A	A	A
5050	rem	...	...	1.4	...	624-652	1155-1205	193	112	50	A	A	A	A	A
5052, 5652	rem	...	...	2.5	...	607-649	1125-1200	138	80	35	A	A	A	A	B
5083	rem	...	0.7	4.4	0.15	574-638	1065-1180	117	67.5	29	C	C	A	A	C
5086	rem	...	0.45	4.0	0.15	585-641	1085-1185	125	72.5	31	C	C	A	A	B
5154, 5254	rem	...	...	3.5	0.25	593-643	1100-1190	125	72.5	32	C	C	A	A	B
5454	rem	...	0.8	2.7	0.12	602-646	1115-1195	134	77.5	34	B	B	A	A	B
5456	rem	...	0.8	5.1	0.12	568-638	1055-1180	117	67.5	29	C	C	A	A	C

(α) Ίδια τιμή στους 20 °C (68°F), (β) Εκτίμηση συγκολλησιμότητας: A, εύκολα συγκολλησιμο; B, συγκολλησιμο στις περισσότερες εφαρμογές, αλλά μπορεί να απαιτεί ειδική τεχνική ή κράμα προσθήκης; C, περιορισμένη συγκολλησιμότητα; X, δεν συνιστάται

Πίνακας 2.7 Χημική σύσταση, φυσικές ιδιότητες και συγκολλησιμότητα επιλεγμένων θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου^[11]

Κράμα βάσης	Ονομαστική σύσταση, wt%							Προσεγγιστικό εύρος τήξης		Θερμική αγωγιμότητα στους 25°C (77°F)		Ηλεκτρική αγωγιμότητα (α) %IACS	Συγκολλησιμότητα (β)				
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Others	°C	°F	W/mK	Btu/ft·h·°F		Αερίου	Τόξου με πηγή	Τόξου με αδρανές αέριο	Αντίστασης	Πίεσης
2014	4.4	0.8	0.8	0.5	...	...	...	507-593	945-1100	154	89	40	X	C	B	B	C
2024	4.4	...	0.6	1.5	...	...	...	502-638	935-1180	121	70	30	X	C	C	B	C
2090	2.7	...	...	...	...	...	2.2 Li; 0.12Zr	560-643	1040-1190	88	51	17	X	X	B	B	C
2219	6.3	...	0.3	...	...	...	0.6 Ti; 0.1 V; 0.18 Zr	543-643	1010-1190	121	70	30	X	C	A	B	C
2618	2.3	0.18	...	1.6	...	...	1.1 Fe; 1.0 Ni; 0.07 Ti	549-638	1020-1180	161	93	37	X	C	B	B	C
6009	0.40	0.8	0.5	0.6	0.25	0.1	...	560-649	1040-1200	167	97	44	C	C	B	B	B
6013	0.9	0.25	0.35	0.95	...	...	...	579-649	1075-1200	150	87	38	C	C	B	A	B
6061	0.28	0.6	...	1.0	...	0.2	...	582-652	1080-1205	167	97	43	A	A	A	A	B
6063	...	0.4	...	0.7	...	...	...	616-654	1140-1210	200	116	53	A	A	A	A	B
6101	...	0.5	...	0.6	...	...	...	621-654	1150-1210	218	126	57	A	A	A	A	B
6262	0.28	0.6	...	1.0	...	0.09	0.6 Pb; 0.6 Bi	582-652	1080-1205	172	99	44	C	C	B	A	B
6351	...	1.0	0.6	1.0	...	...	...	596-652	1105-1205	176	102	46	A	A	A	A	B
6951	0.28	0.35	...	0.6	...	...	...	616-654	1140-1210	198	114	52	A	A	A	A	A
7005	...	...	0.45	1.4	4.5	0.13	0.15 Zr; 0.04 Ti	607-646	1125-1195	...	...	...	X	X	A	A	B
7039	...	...	0.3	2.8	4.0	0.2	...	577-638	1070-1180	154	89	34	X	X	A		B
7075	1.6	...	...	2.5	5.6	0.23	...	477-635	890-1175	130	75	33	X	X	C	B	C
7079	0.6	...	0.2	3.3	4.3	0.2	...	482-638	900-1180	125	72	32	X	X	C	B	C
7178	2.0	...	...	2.8	6.8	0.23	...	477-629	890-1165	125	72	31	X	X	C	B	C

(α) Ίδια τιμή στους 20 °C (68°F), (β) Εκτίμηση συγκολλησιμότητας: A, εύκολα συγκολλησιμο; B, συγκολλησιμο στις περισσότερες εφαρμογές, αλλά μπορεί να απαιτεί ειδική τεχνική ή κράμα προσθήκης; C, περιορισμένη συγκολλησιμότητα; X, δεν συνιστάται

Κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς αναλύεται παρακάτω:

2.3.1.1 Ευαισθησία στη ρωγμάτωση λόγω συγκόλλησης

Η ευκολία της συγκόλλησης είναι η βασική μέριμνα για σχεδόν όλες τις τεχνικές συγκόλλησης. Γενικά, τα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου μπορούν να συγκολληθούν με ένα κράμα προσθήκης ίδιας σύστασης με το μέταλλο βάσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8, μια μικρή ποσότητα μετάλλων που βελτιώνουν την κρυσταλλική δομή, όπως είναι το τιτάνιο, προστίθενται στο κράμα προσθήκης, ελαχιστοποιώντας τη ρωγμάτωση κατά τη συγκόλληση. Έτσι για παράδειγμα τα κράματα προσθήκης 5554 και 5556 είναι ίδια με τα κράματα βάσης 5454 και 5456 αντίστοιχα, με τη διαφορά ότι στα κράματα προσθήκης υπάρχει και τιτάνιο.

Τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου είναι πιο περίπλοκα μεταλλουργικά και πιο ευπαθή σε θερμή ρωγμάτωση. Γενικά, σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται διαφορετικά κράματα προσθήκης που έχουν υψηλότερα επίπεδα διαλυτότητας, όπως για παράδειγμα κράματα χαλκού ή πυριτίου. Σε υψηλά επίπεδα διαλυτότητας, το ευτηκτικό ρευστό είναι ικανοποιητικής ποσότητας ώστε να καλύψει τα κενά που δημιουργούνται κατά τη στερεοποίηση.

Τυπικά, τα κράματα που χρησιμοποιούνται ως υλικά προσθήκης σε συγκολλήσεις θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου έχουν χαμηλότερο σημείο τήξης σε σχέση με το κράμα βάσης.

Επιτρέποντας στα συστατικά του κράματος που υπόκειται σε συγκόλληση, να στερεοποιηθούν πριν από το μέταλλο συγκόλλησης, οι τάσεις μέσα στο μέταλλο βάσης ελαχιστοποιούνται και η τάση για περικρυσταλλική ρωγμάτωση μειώνεται δραστικά.

Στις Εικόνες 2.27 και 2.28 υπάρχουν χαρακτηριστικά στοιχεία που συνδυάζουν την επιλογή του μετάλλου προσθήκης με την ευαισθησία της συγκόλλησης σε ρωγμάτωση. Από αυτά αλλά και από την πειραματική εμπειρία προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα όπως:

☞ Τα υψηλής καθαρότητας κράματα της σειράς 1xxx και το 3003 συγκολλούνται εύκολα με κράματα προσθήκης όπως το 1100 (κράμα βάσης) ή με κράμα αλουμινίου - πυριτίου όπως το 4043.

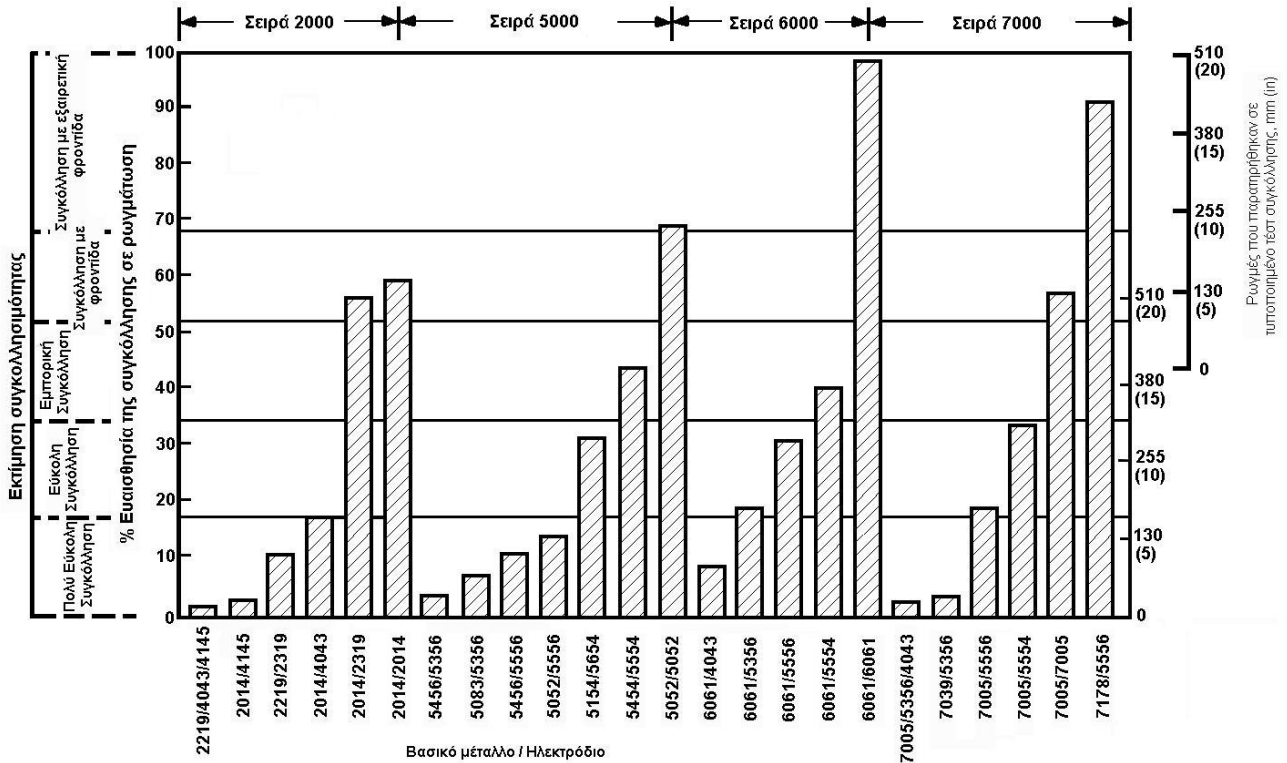
☞ Το κράμα 2219 επιδεικνύει την καλύτερη συγκολλησιμότητα από τα κράματα της σειράς 2xxx και είναι εύκολα συγκολλησιμο με τα κράματα 2319, 4043 και 4145.

Πίνακας 2.8 Ονομαστική σύσταση και εύρος τήξης των βασικών κραμάτων προσθήκης αλουμινίου^[11]

Κράμα αλουμινίου	Ονομαστική σύσταση των κραματικών στοιχείων, wt%								Προσεγγιστικό εύρος τήξης	
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al	Άλλα Στοιχεία	°C	°F
1100	...	0.12	...	...	...	...	≥99.00	...	643-657	1190-1215
1188	...	...	...	...	...	...	≥99.88	...	657-660	1215-1220
2319	...	6.3	0.30	...	...	0.15	rem	0.18 Zr; 0.10 V	543-643	1010-1190
4009 (α)	5.0	1.25	...	0.5	...	...	rem	...	546-621	1015-1150
4010 (β)	7.0	...	...	0.35	...	...	rem	...	557-613	1035-1135
4011 (γ)	7.0	...	...	0.58	...	0.12	rem	0.55 Be	557-613	1035-1135
4043	5.25	...	...	...	...	...	rem	...	574-632	1065-1170
4047	12.0	...	...	...	...	...	rem	...	577-582	1070-1080
4145	10.0	4.0	...	...	...	...	rem	...	521-585	970-1085
4643	4.1	...	...	0.2	...	...	rem	...	574-635	1065-1175
5183	...	...	0.75	4.75	0.15	...	rem	...	579-638	1075-1180
5356	...	...	0.12	5.0	0.12	0.13	rem	...	571-635	1060-1175
5554	...	...	0.75	2.7	0.12	0.12	rem	...	602-646	1115-1195
5556	...	...	0.75	5.1	0.12	0.12	rem	...	568-635	1055-1175
5654	...	...	...	3.5	0.25	0.1	rem	...	593-643	1100-1190

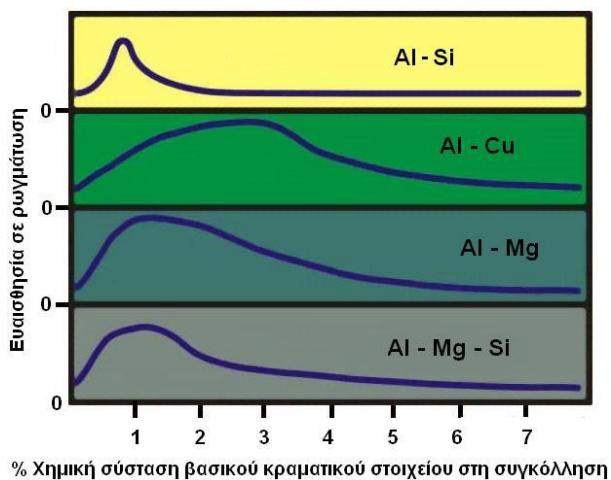
(α) Κράμα διαμόρφωσης με σύσταση ίδια με αυτήν του χυτού κράματος C355.0, (β) Κράμα διαμόρφωσης με σύσταση ίδια με αυτήν του χυτού κράματος A356.0, (γ) Κράμα διαμόρφωσης με σύσταση ίδια με αυτήν του χυτού κράματος A357.0.

☞ Το κράμα 4145 ως μέταλλο προσθήκης παρέχει τη χαμηλότερη ευπάθεια σε ρωγμάτωση λόγω συγκόλλησης, όταν συγκολλά κράματα της σειράς 2xxx καθώς και τα χυτά κράματα AlCu και AlSiCu.



Εικόνα 2.27 Εκτίμηση ευαισθησίας σε ρωγμάτωση συνδυασμών βασικού μετάλλου / μετάλλου προσθήκης

☞ Η ευαισθησία σε ρωγμάτωση των συγκολλήσεων κραμάτων AlMg μειώνεται όταν η περιεκτικότητα του μαγνησίου της συγκόλλησης αυξάνει πάνω από το 2%.



Εικόνα 2.28 Επίδραση του ποσοστού κραμάτωσης στη ρωγμάτωση της συγκόλλησης

☞ Τα υψηλής περιεκτικότητας κράματα προσθήκης 5356, 5183 και 5556 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκόλληση κραμάτων διαμόρφωσης AlMg και χυτών κραμάτων αλουμινίου, με τις μεθόδους GMAW και GTAW.

☞ Τα κράματα της σειράς 6xxx συγκολλούνται με κράματα προσθήκης αλουμινίου - πυριτίου, όπως τα 4043 και 4047. Ωστόσο και τα κράματα προσθήκης αλουμινίου

- μαγνησίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για τη συγκόλληση των, χαμηλής περιεκτικότητας σε χαλκό, κραμάτων της σειράς αυτής, όταν απαιτείται υψηλότερη αντοχή σε διάτμηση και ολκιμότητα. Τα κράματα της σειράς 6xxx δεν πρέπει να συγκολλούνται με κράματα προσθήκης ίδια με το βασικό υλικό ούτε χωρίς καθόλου προσθήκη υλικού, διότι οδηγούν σε ρωγμάτωση. Όταν χρησιμοποιείται το 4043 ως κράμα προσθήκης, το συγκολλημένο μέταλλο πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον 50% του 4043. Με κράμα προσθήκης το 5356 το συγκολλημένο μέταλλο πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον 70% του 5356. Στις συνδέσεις των κραμάτων της σειράς 6xxx συχνά στα επιμέρους τμήματα διαμορφώνεται λοξοτομή ή διάκενο ώστε να επιτρέπεται η διαλυτοποίηση του περισσεύοντος κράματος προσθήκης.

☞ Τα κράματα της σειράς 7xxx (AlZnMg) παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος ευαισθησίας στη ρωγμάτωση κατά τη συγκόλληση. Τα κράματα 7005 και 7039, τα οποία έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε χαλκό (<0.1%), παρουσιάζουν περιορισμένο πεδίο τήξης και μπορούν να συγκολληθούν με κράματα προσθήκης υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο, όπως τα 5356, 5183 και 5556. Τα κράματα της σειράς 7xxx που περιέχουν ένα ικανοποιητικό ποσοστό χαλκού, όπως τα 7075 και 7178, παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τήξης με χαμηλή θερμοκρασία στερεοποίησης και είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στη ρωγμάτωση κατά τη διαδικασία συγκόλλησης με τόξο.

☞ Τα πρόσφατα εμφανιζόμενα κράματα αλουμινίου - λιθίου είναι συγκολλησίμα όταν το κατάλληλο κράμα προσθήκης επιλεγεί. Τα κράματα 2090 και 2095 μπορούν εύκολα να συγκολληθούν με το κράμα προσθήκης 2319.

2.3.1.2 Αντοχή συγκόλλησης

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται το κατάλληλο κράμα προσθήκης είναι η επιθυμητή αντοχή της συγκόλλησης. Η θερμότητα της συγκόλλησης «μαλακώνει» τα κράματα αλουμινίου, αν αυτά είναι σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση εκτός από αυτή της ανακρυστάλλωσης. Στις περισσότερες συγκολλήσεις η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος θα ρυθμίσει και την αντοχή της σύνδεσης.

Για τα μη κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, η ζώνη που υπόκειται σε συγκόλληση θα ανακρυσταλλωθεί πλήρως. Σε αυτά τα κράματα, μερικά δευτερόλεπτα σε θερμοκρασία πάνω από τους 345°C (650°F) απαλείφει πλήρως οποιοδήποτε αποτέλεσμα κατεργασίας σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, που έχει προηγηθεί. Η διαδικασία συγκόλλησης έχει πολύ μικρή επίδραση στην εγκάρσια αντοχή της ραφής της συγκόλλησης, ωστόσο επιδρά στο πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων ορισμένων συνηθισμένων μη κατεργάσιμων κραμάτων.

Τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα απαιτούν 2 με 3 ώρες στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, σε συνδυασμό με αργή ψύξη, για πλήρη ανακρυστάλλωση. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη αποτελείται από διάφορα στάδια διαλυτοποίησης και ποικίλους βαθμούς κατακρημνίσεων, ανάλογα με τις συνθήκες θέρμανσης. Ο βαθμός «μαλάκωσης» της θερμικά επηρεασμένης ζώνης είναι αρκετά ευαίσθητος στη μέγιστη θερμοκρασία που παρουσιάζεται καθώς και στο χρόνο που απαιτείται για να φτάσει σε αυτή τη θερμοκρασία.

Παράγοντες όπως η θερμοκρασία προθέρμανσης, η ψύξη μεταξύ των στρώσεων (interpass cooling), η τεχνική συγκόλλησης και ο ρυθμός ψύξης, επηρεάζουν το βαθμό «μαλάκωσης» των κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου. Η προθέρμανση, η έλλειψη ψύξης μεταξύ των στρώσεων καθώς και αργά περάσματα τύπου ζιγκ-ζαγκ, αυξάνουν τις μέγιστες τιμές της θερμοκρασιακής κατανομής και επεκτείνουν τις υψηλές θερμοκρασίες πιο μακριά από τη συγκόλληση. Επιπλέον, αυξάνουν το χρόνο παραμονής στις θερμοκρασίες αυτές μειώνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ). Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθώς και η χρήση πολύ μικρών δοκιμίων, τα οποία δεν επιτρέπουν τον σχηματισμό επαρκούς λουτρού συγκόλλησης, οδηγούν σε υπερθέρμανση.

Τυπικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων τόξου θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.10.

Όταν σε συγκολλήσεις θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων εφαρμόζεται περαιτέρω θερμική κατεργασία και τεχνητή γήρανση, η επιλογή του υλικού προσθήκης περιορίζεται ακόμα περισσότερο.

Το κράμα προσθήκης 4043 (5% Si) είναι μη θερμικά κατεργάσιμο. Όταν χρησιμοποιείται για να συγκολλήσει το κράμα 6061, ορισμένη ποσότητα μαγνησίου από το κράμα βάσης πρέπει να κραματοποιηθεί με το κράμα προσθήκης παρέχοντας ένα μίγμα AlSiMg μέσα στο μέταλλο συγκόλλησης. Αυτό το νέο μίγμα θα ανταποκριθεί σε μια δευτερογενή θερμική κατεργασία, παράγοντας τελικά μια συγκόλληση τόξου με αντοχή σε εφελκυσμό ίση με αυτήν του αρχικού 6061-T6. Όταν τμήματα με μεγάλο πάχος, της τάξης των 19 mm ή και παχύτερα, συγκολλούνται, η λοξοτομή είναι αρκετά φαρδιά ώστε η επίδραση της διαλυτοποίησης να μην φτάνει μέχρι το κέντρο της συγκόλλησης.

Ο Πίνακας 2.11 παρουσιάζει ορισμένες περιπτώσεις συγκολλήσεων, όπου χρησιμοποιήθηκε το κράμα προσθήκης 4643, το οποίο περιέχει ορισμένη ποσότητα μαγνησίου που οδηγεί σε υψηλή αντοχή. Το κράμα αυτό είναι κατάλληλο και για συγκολλήσεις λεπτότερων μετάλλων.

Πίνακας 2.9 Μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων τόξου με αέριο προστασίας επιλεγμένων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου^[8]

Κράμα βάσης	Κράμα προσθήκης	Ολική αντοχή σε εφελκυσμό				Ελάχιστη ολική τάση διαρροής (α)		Εφελκυστική επιμήκυνση, % σε 50.8 mm (2in.)	Επιμήκυνση ελεύθερης κάμψης, %
		Τυπική		Ελάχιστη		MPa	ksi		
		MPa	ksi	MPa	ksi				
1060	1188	69	10	55	8	17.2	2.5	29	63
1100	1100	90	13	75.8	11	31	4.5	29	55
1350	1188	69	10	55	8	17.2	2.5	29	63
3003	1100	110	16	96.5	14	48.3	7	24	54
5005	1100	110	16	96.5	14	48.3	7	15	32
5050	5356	159	23	124	18	55.2	8	18	36
5052	5356	193	28	172	25	90	13	19	39
5083	5183	296	43	276 (β)	40 (β)	165	24	16	34
5086	5356	262	38	241 (γ)	35 (γ)	117	17	17	38
5154	5654	228	33	207	30	103	15	17	39
5454	5554	234	34	214	31	110	16	17	40
5456	5556	317	46	290 (β)	42 (β)	179	26	14	28

(α) 0.2% μετατόπιση στα 254 mm (10 in.) του μήκους του gage,

(β) Για πάχος πλάκας έως 38 mm (1.5 in.), (γ) Για πάχος πλάκας έως 51 mm (2 in.)

Πίνακας 2.10 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων τόξου με αέριο προστασίας επιλεγμένων θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης.

Κράμα βάσης και κατεργασία	Κράμα προσθήκης	Μετά τη συγκόλληση (as welded)						Δευτερογενής θερμική κατεργασία και γήρανση					
		Αντοχή σε εφελκυσμό		Όριο διαρροής (α)		Επιμήκυνση		Αντοχή σε εφελκυσμό		Όριο διαρροής (α)		Επιμήκυνση	
		MPa	ksi	MPa	ksi	Εφελκυστική, % σε 50.8 mm (2in.)	Ελεύθερης κάμψης, %	MPa	ksi	MPa	ksi	Εφελκυστική, % σε 50.8 mm (2in.)	Ελεύθερης κάμψης, %
2014-T6	4043	234	34	193	28	4	9	345	50	...	...	2	5
2014-T6	2319	241	35	193	28	5	...	414	60	317	46	5	...
2219-T81, T87	2319	241	35	179	26	3	15	379	55	262	38	7	5
2219-T31, T37	2319	241	35	179	26	3	15	276 (β)	40 (β)	228 (β)	33 (β)	2 (β)	12 (β)
6009-T4	4043	221	32	138	20	9	...	303 (β)	44 (β)	...	...	...	...
6061-T6	4043	186	27	124	18	8	16	303 (γ)	44 (g)	276 (γ)	40 (γ)	5 (γ)	11 (γ)
6061-T6	5356	207	30	131	19	11	25	...	...	...	...	...	...
6061-T4	4043	186	27	124	18	8	16	241 (β)	35 (β)	165 (β)	24 (β)	3 (β)	...
6063-T6	4043	138	20	83	12	8	16	207	30	...	...	13	11
6063-T6	5356	138	20	83	12	12	25	...	...	...	...	...	...
7005-T53	5356	317 (δ)	46 (δ)	207 (δ)	30 (δ)	10 (δ)	33 (δ)	...	...	...	...	...	...
7039-T61	5556	324 (δ)	47 (δ)	221 (δ)	32 (δ)	10 (δ)	21 (δ)	...	...	...	...	...	...

(α) 0.2% μετατόπιση στα 50.8 mm (2 in.) του μήκους του gage, (β) δευτερογενώς τεχνητή γήρανση,

(γ) Για πάχος πλάκας μεγαλύτερο από 19 mm (3/4 in.) απαιτείται το κράμα προσθήκης 4643,

(δ) δευτερογενώς γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου για 30 ημέρες.

Πίνακας 2.11 Επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στην αντοχή της συγκόλλησης του κράματος 6061^[11]

Κράμα βάσης και κατεργασία	Πάχος mm In.		Μέθοδος συγκόλλησης και συνθήκες	Μετά τη συγκόλληση (as welded)				Μόνο γήρανση μετά τη συγκόλληση				Δευτερογενής θερμική κατεργασία και γήρανση						
				Αντοχή σε εφελκυσμό		Όριο διαρροής (a)		Επιμήκυνση σε 51 mm (2in.) , %	Αντοχή σε εφελκυσμό		Όριο διαρροής (a)		Επιμήκυνση σε 51 mm (2in.) , %	Αντοχή σε εφελκυσμό		Όριο διαρροής (a)		Επιμήκυνση σε 51 mm (2in.) , %
				MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi	
6061-T6 (β)	3.2	1/8	DCEN-GTAW, 15 mm/s (35 in./min)	248	36	165	24	6	...	...	...	...	...	303	44	276	40	5
6061-T4 (β)	3.2	1/8	DCEN-GTAW, 8.5 mm/s (20 in./min)	234	34	145	21	8	283	41	179	26	3	303	44	276	40	5
6061-T6 (β)	6.4	1/4	Automatic GTAW, ένα πάσο σε κάθε πλευρά, 17 mm/s (40 in./min)	255	37	138	20	6	...	...	...	...	...	296	43	276	40	5
6061-T4 (β)	76	3	Automatic GTAW, πολλαπλά πάσα διπλό V	172	25	90	13	10	...	...	...	...	...	234	34	...	...	4
6061-T6 (γ)	76	3	Automatic GTAW, πολλαπλά πάσα διπλό V	186	27	97	14	13	...	...	...	...	...	310	45	276	40	4

(a) 0.2% μετατόπιση στα 254 mm (10 in.) του μήκους του gage,

(β) χρησιμοποιήθηκε κράμα προσθήκης 4043, (γ) χρησιμοποιήθηκε κράμα προσθήκης 4643

Τα κράματα προσθήκης 5183, 5356, 5556 και 5654, τα οποία περιέχουν πάνω από 3% Mg, συνήθως δεν συνιστώνται για χρήση όταν τα συγκολλημένα τμήματα πρόκειται να υποστούν γήρανση μετά τη συγκόλληση. Αυτά, τα υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο κράματα, μπορεί να γίνουν ευαίσθητα σε ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση, όταν υπόκεινται σε σχετικά μεγάλης διάρκειας θερμική κατεργασία (τεχνητή γήρανση) υπό συνθήκες υψηλών παραμενουσών τάσεων.

Στον Πίνακα 2.12 παρουσιάζονται οι ελάχιστες τιμές για την αντοχή σε διάτμηση ορισμένων συνηθισμένων κραμάτων προσθήκης.

Πίνακας 2.12 Ελάχιστη αντοχή σε διάτμηση ορισμένων συνηθισμένων κραμάτων προσθήκης

Κράμα προσθήκης	Αντοχή σε διάτμηση			
	Διαμήκης		Εγκάρσια	
	MPa	ksi	MPa	ksi
1100	51.7	7.5	51.7	7.5
2319 (α) (β)	110	16.0	110	16.0
2319 (γ)	152	22.0	200	29.0
4043	79.3	11.5	103	15.0
4643	93.1	13.5	138	20.0
5183	128	18.5	193	28.0
5356	117	17.0	179	26.0
5556	117	17.0	159	23.0
5556	138	20.0	207	30.0
5654	82.7	12.0	124	18.0

(α) Μετά τη συγκόλληση,

(β) τεχνητή γήρανση μετά τη συγκόλληση,

(γ) δευτερογενώς θερμική κατεργασία (solution) και γήρανση

2.3.1.3 Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα των συγκολλήσεων αλουμινίου είναι εξαιρετική για τα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα όταν όμοια κράματα προσθήκης χρησιμοποιούνται. Χρησιμοποιώντας τις τιμές της επιμήκυνσης από την ελεύθερη κάμψη σαν ολκιμότητα του συγκολλημένου μετάλλου, παρατηρείται ότι η υψηλότερη ολκιμότητα παρουσιάζεται στα καθαρά κράματα αλουμινίου.

Εξαιρετική ολκιμότητα παρουσιάζουν και τα κράματα της σειράς 5xxx που συγκολλούνται με κράματα προσθήκης της ίδιας σειράς. Οι Πίνακες 2.9 και 2.10 παρουσιάζουν την επιμήκυνση ελεύθερης κάμψης μετωπικών συγκολλήσεων ορισμένων συνηθισμένων συγκολλημένων κραμάτων βάσης.

Οι συγκολλήσεις των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων δεν παρουσιάζουν τιμές ολκιμότητας τόσο υψηλές όσο τα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα. Επιπλέον, οι δευτερογενείς θερμικές κατεργασίες γενικά μειώνουν την ολκιμότητα, σε σχέση με την ολκιμότητα που κατέχουν τα συγκολλημένα υλικά αμέσως μετά τη συγκόλληση. Όταν ένα κράμα προσθήκης της σειράς 5xxx

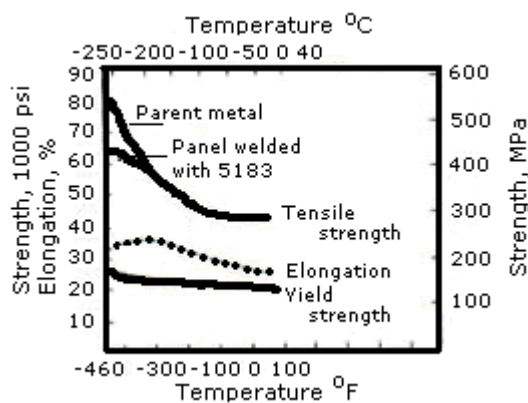
χρησιμοποιείται με τα κράματα 6061 και 6063, η ολκιμότητα είναι 50% υψηλότερη από ότι αν χρησιμοποιούνταν με ένα κράμα προσθήκης AlSi, όπως για παράδειγμα το 4043.

Η χαμηλή ολκιμότητα της συγκόλλησης προκύπτει όταν συγκολλάται ένα κράμα AlCu με κράμα προσθήκης το 4043 ή το 4145. Ωστόσο, μέτρια ολκιμότητα μπορεί να επιτευχθεί όταν τα κράματα AlMg συγκολλούνται με το κράμα προσθήκης 2319. Επιπρόσθετα, το 2319 με κράμα βάσης AlCu, παράγει μέταλλο συγκόλλησης με την υψηλότερη ολκιμότητα όταν κατεργασθεί θερμικά μετά τη συγκόλληση.

Οι συγκολλήσεις των κραμάτων Al-Zn-Mg-Cu, όπως είναι τα 7075 και 7178, κατέχουν πολύ χαμηλή ολκιμότητα (0.1% ή λιγότερο). Αυτό, σε συνδυασμό και με την υψηλή ευαισθησία που έχουν για ρωγμάτωση όταν συγκολλούνται με τεχνικές τόξου, αποθαρρύνει την ένωση τους με τις τεχνικές αυτές. Τα χαμηλής περιεκτικότητας σε χαλκό κράματα της σειράς 7xxx, 7005 και 7039, παρουσιάζουν καλή ολκιμότητα στη συγκόλληση όταν συγκολλούνται με τα κράματα προσθήκης 5153, 5356 και 5556.

2.3.1.4 Θερμοκρασία έναντι απόδοσης

Τα κράματα αλουμινίου χάνουν ένα σημαντικό μέρος της αντοχής τους όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 200°C (390°F). Αυτά της σειράς 2xxx παρουσιάζουν τις καλύτερες ιδιότητες σε συνάρτηση με την αυξανόμενη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Πίνακα 2.13.



Εικόνα 2.29 Τυπικές ιδιότητες του κράματος AA5083 συγκολλημένο με υλικό προσθήκης 5183

Το κράμα βάσης 5454 και το αντίστοιχο του κράμα προσθήκης 5554, αναπτύχθηκαν ειδικά για να παρέχουν την υψηλότερη αντοχή ανάμεσα στα κράματα της σειράς 5xxx, για λειτουργία σε αυξανόμενες θερμοκρασίες. Στον Πίνακα 2.14 παρουσιάζονται κράματα προσθήκης για συγκόλληση επιλεγμένων κραμάτων αλουμινίου,

χύτευσης και διαμόρφωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου υφίστανται αύξηση θερμοκρασίας.

Πίνακας 2.13 Αντοχή σε εφελκυσμό σε επιλεγμένες θερμοκρασίες για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου με τεχνική συγκόλλησης τόξου με αέριο προστασίας^[11]

		Ολική αντοχή σε εφελκυσμό σε επιλεγμένες θερμοκρασίες											
		-184 °C (-300 °F)		-129 °C (-200 °F)		-73 °C (-100 °F)		38 °C (100 °F)		149 °C (300 °F)		260 °C (500 °F)	
Κράμα και κατεργασία	Κράμα προσθήκης	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
2219-T37 (α)	2319	334	48.5	276	40.0	248	36.0	241	35.0	214	31.0	131	19.0
2219 (β)	2319	445	64.5	410	59.5	379	55.0	345	50.0	262	38.0	152	22.0
3003	1100	190	27.5	148	21.5	121	17.5	97	14.0	66	9.5	34	5.0
5052	5356 (γ)	262	38.0	214	31.0	183	26.5	172	25.0	145	21.0	72	10.5
5083	5183	376	54.5	317	46.0	279	40.5	276	40.0	(δ)	(δ)	(δ)	(δ)
5086	5356	331	48.0	279	40.5	245	35.5	241	35.0	(δ)	(δ)	(δ)	(δ)
5454	5554	303	44.0	255	37.0	221	32.0	214	31.0	179	26.0	103	15.0
5456	5556	386	56.0	328	47.5	293	42.5	290	42.0	(δ)	(δ)	(δ)	(δ)
6061-T6 (α)	4043	238	34.5	207	30.0	183	26.5	165	24.0	138	20.0	41	6.0
6061-T6 (β)	4043 (ε)	379	55.0	341	49.5	317	46.0	290	42.0	217	31.5	48	7.0

(α) Μετά τη συγκόλληση, (β) δευτερογενώς θερμική κατεργασία (solution) και τεχνητή γήρανση, (γ) χρησιμοποιήθηκε το κράμα προσθήκης 5554 σε θερμοκρασία >38 °C (>100 °F), (δ) δεν συνιστάται για χρήση στις επιλεγμένες θερμοκρασίες πάνω από 66 °C (150 °F), (ε) για πάχος μετάλλου βάσης ≥19 mm (≥3/4 in.) χρησιμοποιείται το κράμα προσθήκης 4643.

Πίνακας 2.14 Κράματα προσθήκης για συγκόλληση επιλεγμένων κραμάτων αλουμινίου τα οποία χρησιμοποιούνται σε λειτουργίες όπου υφίστανται αύξηση θερμοκρασίας.

Κράματα αλουμινίου		Αποδεκτά κράματα προσθήκης
Διαμόρφωσης	Χύτευσης	
Της σειράς 1xxx	...	κράμα βάσης, 1100, 1188, 4043, 4047
2014, 2219	222.0, 295.0, 319.0, 333.0	2319, 4043, 4145
3003, 5005, 5050 5052, 5454, 6061,	...	1100, 4043, 4047
6063, 7005	...	4043, 4047, 5554
...	354.0, 355.0, C355.0 356.0, A356.0,	4409, 4145, C355.0 4010, 4011, 4043, 4047, 4643, A356.0,
...	A357.0, 359.0	A357.0
...	413.0, 443.0, A444.0	4043, 4047

Με μείωση της θερμοκρασίας τα κράματα αλουμινίου και οι συγκολλήσεις τους κερδίζουν σε αντοχή (Πίν. 2.12). Αντί να γίνονται ψαθυρά, είτε διατηρούν είτε αυξάνουν την ολκιμότητα τους καθώς η θερμοκρασία μειώνεται κάτω από τους 0°C (32 °F). Τυπικές ιδιότητες για πλάκα κράματος 5083 συγκολλημένο με κράμα προσθήκης το 5183, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.29. Τα υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο κράματα της σειράς 5xxx έχουν πολύ καλές κρυογονικές ιδιότητες και λόγω της εξαιρετικής συγκολλησιμότητάς τους, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην αποθήκευση και μεταφορά υγρού οξυγόνου και υγρού φυσικού αερίου (§ 1.6.2)

2.3.1.5 Αντοχή σε διάβρωση

Καθώς στην παρούσα διατριβή η διάβρωση των συγκολλήσεων δεν αποτελεί πεδίο μελέτης, αναφέρονται συνοπτικά τα εξής:

- Η αντοχή σε διάβρωση των μη θερμικά κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου ελάχιστα επηρεάζεται από την θερμότητα της συγκόλλησης.
- Τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα AlMgSi όπως τα 6061 και 6063 παρουσιάζουν επίσης υψηλή αντοχή σε διάβρωση κατά τη συγκόλληση τους.
- Αντίθετα, τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα των σειρών 2xxx και 7xxx που περιέχουν ποσότητες χαλκού και ψευδαργύρου παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στη διαβρωτική αντοχή τους με τη θερμοκρασία της συγκόλλησης.
- Στις συγκολλήσεις μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και βασικού μετάλλου, αυτό με το περισσότερο αρνητικό δυναμικό προστατεύει το άλλο. Έτσι, αν το μέταλλο συγκόλλησης είναι

ανοδικότερο από το βασικό μέταλλο, θα δεχθεί μεγαλύτερη διαβρωτική καταπόνηση προστατεύοντας έμμεσα την μεγαλύτερη επιφάνεια του βασικού κράματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια που πρέπει να προστατευθεί και όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στο δυναμικό, τόσο ταχύτερα θα προχωρήσει η διάβρωση.

- ο Βέλτιστη διαβρωτική προστασία στη συγκόλληση παρέχεται όταν το υλικό προσθήκης και το υπό συγκόλληση κράμα έχουν το ίδιο δυναμικό

2.3.1.6 Εναρμόνιση του χρώματος της συγκόλλησης με αυτό του μετάλλου βάσης μετά από ανοδίωση

Κυρίως απαιτείται σε εφαρμογές της διακοσμητικής και στην αρχιτεκτονική όπου γίνεται χημικό ή ηλεκτροχημικό φινίρισμα και συνεπώς ξεφεύγει από τις απαιτήσεις της παρούσας διατριβής. Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι το τελικό χρώμα του κράματος εξαρτάται από τη χημική σύσταση του κράματος ενώ στον Πίνακα 2.15 παρουσιάζονται συνδυασμοί διαφόρων κραμάτων προσθήκης σε συγκολλήσεις και βασικών υλικών που αποδίδουν καλό εναρμονισμό χρώματος.

Πίνακας 2.15 Συνδυασμοί διαφόρων κραμάτων προσθήκης σε συγκολλήσεις και βασικών υλικών που αποδίδουν καλό εναρμονισμό χρώματος

Κράμα αλουμινίου	Κράμα προσθήκης
1100, 3003, 5005, 5050	1188
5052, 5154	5654
6061, 6063, 511.0, 514.0, 535.0	5356
5083, 5086, 5454, 5456	5183 και 5556
356.0, A356.0, A357.0, 443.0, A444.0	4010, 4043 και 4047

2.3.1.7 Τελική επιλογή κράματος προσθήκης

Η τελική επιλογή του βέλτιστου κατά περίπτωση υλικού προσθήκης, συγκολλήσεων τόξου με προστασία αερίου κραμάτων αλουμινίου, γίνεται έπειτα από σχολαστική μελέτη. Καθώς συχνά περισσότερα από ένα υλικά δείχνουν να είναι κατάλληλα, γίνονται συμβιβασμοί έτσι ώστε η επιθυμητή λειτουργική απόδοση της συγκόλλησης να βρίσκεται κοντά στα χαρακτηριστικά μιας εύκολα πραγματοποιήσιμης συγκόλλησης με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Ο Πίνακας 2.16 βασίζεται στις διάφορες απαιτήσεις που ήδη παρουσιάστηκαν για την τελική επιλογή του μετάλλου προσθήκης σε συγκολλήσεις GMAW και GTAW ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου.

Πίνακας 2.16 Σχετικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων κραμάτων αλουμινίου προσθήκης που χρησιμοποιούνται σε GMAW και GTAW^[11]

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)						
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M	
6061, 6070	1060, 1350	4043	A	A	C	A	A	...	
		4145	A	A	D	B	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	A	C	A	A	...	
		4145	A	A	D	B	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		2014, 2036	4043	B	B	A	A	A	...
		4145	A	A	B	A	A	...	
	2219	4043	B	B	A	A	A	...	
		4145	A	A	B	A	A	...	
		4043	A	B	C	A	A	...	
	3003, Alclad. 3003	4145	A	A	D	B	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	D	C	A	A	...	
		4145	B	C	D	B	A	...	
		3004	5183	B	A	B	A
			5356	B	B	A	A
			5556	B	A	B	A
		Alclad. 3004	4043	A	D	C	A	A	...
			4145	B	C	D	B	A	...
			5183	B	A	B	A
	5356		B	B	A	...	...	A
	5556		B	A	B	...	...	A
	4043		A	B	C	A	A	...	
	4145		A	B	D	B	A	...	
	5005, 5050		5183	B	A	B	A
			5356	B	A	A	A
			5556	B	A	B	A
	5052, 5652		4043	A	D	C	A	A	...
			5183	B	A	B	C	...	B
		5356	B	B	A	C	...	A	
		5554	C	C	A	B	A	B	
		5556	B	A	B	C	...	B	
		5654	C	C	A	B	...	A	
		4043	A	D	C	A	...	...
	5083, 5456	5183	A	A	B	A	...	A	
		5356	A	B	A	A	...	A	
		5554	B	C	A	A	...	A	
		5556	A	A	B	A	...	A	
		5654	B	C	A	A	...	B	
		4043	A	D	C	A	...	...
	5086, 5356	5183	A	A	B	A	...	A	
5356		A	B	A	A	...	A		
5554		B	C	A	A	...	A		
5556		A	A	B	A	...	A		

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)					
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M
		5654	B	C	A	A	...	B
		4043	A	D	C	B	A	...
		5183	B	A	B	C	...	A
	5454	5356	B	B	A	C	...	A
		5554	C	C	A	A	A	A
		5556	B	A	B	C	...	A
		5654	C	C	A	B	...	B
		4043	A	C	B	A	A	...
	6005, 6063, 6106, 6151, 6201, 6351,, 6951	5183	B	A	A	C	...	A
		5356	B	A	A	C	...	A
		5554	C	B	A	B	B	A
		5556	B	A	A	C	...	A
		5654	C	B	A	B	...	B
	6061, 6070	4043	A	C	B	A	A	...
		5183	B	A	A	C	...	B
		5356	B	B	A	C	...	A
		5554	C	B	A	B	B	B
		5556	B	A	A	C	...	B
		5654	C	B	A	B	...	B
		4043	A	A	C	A	A	...
	1060, 1350	4145	A	A	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	A	C	A	A	...
	1100	4145	A	A	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
	2014, 2036	4043	B	B	A	A	A	...
		4145	A	A	B	A	A	...
	2219	4043	B	B	A	A	A	...
		4145	A	A	B	A	A	...
		4043	A	B	C	A	A	...
6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	3003, Alclad. 3003	4145	A	A	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	D	C	A	A	...
	3004	4145	B	C	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	B	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	D	C	A	A	...
	Alclad. 3004	4145	B	C	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	B	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	B	C	A	A	...
	5005, 5050	4145	A	B	D	B	A	...
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)						
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M	
	5052, 5652	4043	A	D	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	C	...	B	
		5356	B	B	A	C	...	A	
		5554	C	C	A	B	A	B	
		5556	B	A	B	C	...	B	
		5654	C	C	A	B	...	A	
		4043	A	B	C	A	
		5183	A	A	B	A	...	A	
		5354	A	A	A	A	...	A	
		5556	B	A	A	A	...	A	
	5083, 5456	5556	A	A	B	A	...	A	
		5654	B	A	A	A	...	B	
		4043	A	B	C	A	
		5183	A	A	B	A	...	A	
		5356	A	A	A	A	...	A	
		5554	B	A	A	A	...	A	
		5556	A	A	B	A	...	A	
		5654	B	A	A	A	...	B	
		4043	A	B	C	B	A	...	
		5183	B	A	B	C	...	A	
	5086, 5356	5356	B	A	A	A	...	A	
		5554	A	A	B	A	...	A	
		5556	A	A	A	A	...	A	
		5654	B	A	A	A	...	B	
		4043	A	B	C	B	A	...	
		5183	B	A	B	C	...	A	
		5356	B	A	A	C	...	A	
		5554	C	A	A	A	A	A	
		5556	B	A	B	C	...	A	
		5654	C	A	A	B	...	B	
	5454	4043	A	C	B	A	A	...	
		5183	B	A	A	C	...	A	
		5356	B	A	A	C	...	A	
		5554	C	B	A	B	B	A	
		5556	B	A	A	C	...	A	
		5654	C	B	A	B	...	B	
		6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	4043	A	B	C	C	A	...
			5183	B	A	B	B	...	A
			5356	B	A	A	B	...	A
			5554	C	A	A	A	A	A
5556	B		A	B	B	...	A		
4043	A		B	C	C	A	...		
5183	B		A	B	B	...	A		
5356	B		A	A	B	...	A		
5554	C		A	A	A	A	A		
5556	B		A	B	B	...	A		
5454	2014, 2036 2219	(β)	...	...	...	...	...
	4043	A	A	A	A	A	...		
	4043	A	B	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	A	A	B	...	A		
	5554	C	A	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
3003, Alclad. 3003	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
3004	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
Alclad. 3004	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		
	5554	C	C	A	A	A	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	4043	A	D	C	C	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	B	A	B	...	A		

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)					
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M
	5005, 5050	5356	B	B	A	B	...	A
		5554	C	C	A	A	A	A
		5556	B	A	B	B	...	A
		4043	A	B	C	C	A	...
		5183	B	A	B	B	...	A
		5356	B	A	A	B	...	A
		5554	C	A	A	A	A	A
		5556	B	A	B	B	...	A
		4043	A	D	C	C	A	...
		5183	A	A	A	B	...	A
		5356	A	B	A	B	...	A
		5554	C	C	A	A	A	A
		5556	A	A	B	B	...	A
		5654	B	C	A	B	...	B
	5183	A	A	B	B	...	A	
	5356	A	B	A	B	...	A	
	5083, 5456	5554	B	C	A	A	...	A
		5556	A	A	B	B	...	A
		5183	A	A	B	B	...	A
		5356	A	B	A	B	...	A
		5554	B	C	A	A	...	A
		5556	A	A	B	B	...	A
	5086, 5356	5183	A	A	B	B	...	A
		5356	A	B	A	B	...	A
		5554	B	C	A	A	...	A
		5556	A	A	B	B	...	B
		5183	A	A	B	B	...	A
		5356	A	B	A	B	...	A
5454	5554	B	C	A	A	A	A	
	5556	A	A	B	B	...	A	
	5183	A	A	B	B	...	A	
	5356	A	B	A	B	...	A	
	5554	B	C	A	A	A	A	
	5654	B	C	A	B	...	B	
5086, 5356	1060, 1350	4043	A	B	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
	1100	5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
	2014, 2036 2219	(β)	...	...	...	...	...	...
		4043	A	A	A	A	...	...
	3003, Alclad. 3003	4043	A	B	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	C	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
	3004	5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	C	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
	Alclad. 3004	4043	A	C	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	B	...	...
		5183	A	A	B	A	...	A
5005, 5050	5356	A	A	A	A	...	A	
	5556	A	A	B	A	...	A	
	5183	A	A	B	A	...	A	
5052, 5652	5356	A	A	B	A	...	A	
	5183	A	A	B	A	...	A	

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)					
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M
		5356	A	B	A	A	...	A
		5554	C	C	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		5654	B	C	A	A	...	B
		5183	A	A	B	A	...	A
	5083, 5456	5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		5183	A	A	B	A	...	A
	5086, 5356	5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	B	...	...
	1060, 1350	5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	B	...	...
	1100	5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
	2014, 2036	(β)	...	...	...	...	...	...
	2219	4043	A	A	A	A	...	...
		4043	A	B	C	B	...	...
	3003, Alclad. 3003	5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	C	C	B	...	...
	3004	5183	A	A	B	A	...	A
5083, 5456		5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	C	C	B	...	...
	Alclad. 3004	5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	B	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	B	...	...
	5005, 5050	5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	A	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		5183	A	A	B	A	...	A
		5356	A	B	A	A	...	A
	5052, 5352	5554	C	C	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		5654	B	C	A	A	...	B
		5183	A	A	B	A	...	A
	5083, 5456	5356	A	...	A	A	...	A
		5556	A	A	B	A	...	A
		4043	A	B	C	A	A	...
	1060, 1350	5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
5052, 5652		4043	A	B	C	A	A	...
	1100	5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
	2014, 2036	4043	A	A	A	A	A	...
	2219	4043	A	A	A	A	A	...

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)						
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M	
	3003, Alclad. 3003	4043	A	B	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	C	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
	3004	5356	B	B	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	C	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	B	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
	Alclad. 3004	4043	A	B	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
		5356	B	B	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
		4043	A	B	C	A	A	...	
		5183	B	A	B	...	...	A
	5005, 5050	5356	B	A	A	...	...	A
		5556	B	A	B	...	...	A
4043		A	D	C	B	A	...		
5183		A	A	B	C	...	B		
5356		A	B	A	C	...	A		
5554		C	C	A	A	A	B		
5052, 5652	5556	A	A	B	C	...	B		
	5654	B	C	A	B	...	A		
	1100	C	B	A	A	A	A		
	4043	A	A	C	A	A	...		
5005, 5050	1060, 1350	4145	B	A	D	B	A	...	
		5183	C	A	B	...	...	B
		5356	C	A	B	...	...	B
		5556	C	A	B	...	...	B
		1100	C	B	A	A	A	A	
		4043	A	A	C	A	A	...	
	1100	4145	B	A	D	B	A	...	
		5183	C	A	B	...	...	B
		5356	C	A	B	...	...	B
		5556	C	A	B	...	...	B
		2014,2036	4043	B	B	A	A	A	...
		4145	A	A	B	A	A	...	
2219	4043	B	B	A	A	A	...		
	4145	A	A	B	A	A	...		
	1100	C	C	A	A	A	A		
	4043	A	B	C	A	A	...		
	3003, Alclad. 3003	4145	B	B	D	B	A	...	
	5183	C	A	B	C	...	B		
3004	5356	C	A	B	C	...	B		
	5556	C	A	B	C	...	B		
	4043	A	B	C	A	A	...		
	5183	B	A	B	...	...	A	
	5356	B	A	A	...	...	A	
	5556	B	A	B	...	...	A	
	4043	A	B	C	A	A	...		
	5183	B	A	B	B	...	A		
	5356	B	A	A	B	...	A		
	5556	B	A	B	B	...	A		
	Alclad. 3004	1100	B	...	A	A	A	A	
		4043	A	B	D	A	A	...	

Κράματα βάσης που πρόκειται να συγκολληθούν		Κράματα προσθήκης	Χαρακτηριστικά του κράματος προσθήκης (α)					
Κράμα 1	Κράμα 2		W	S	D	C	T	M
		5183	B	A	C	...	...	B
		5356	B	A	B	...	...	B
		5556	B	A	C	...	...	B

(α) τα A, B, C και D αντιπροσωπεύουν διαβάθμιση κατά την οποία το A είναι το βέλτιστο και το D είναι το χειρίστο. W: ευκολία στη συγκόλληση (ελευθερία από ρωγμές), S: αντοχή συγκόλλησης, D: Ολκιμότητα, C: Αντοχή σε διάβρωση, T: Αποδοτικότητα σε συνθήκες λειτουργίας, M: εναρμόνιση χρώματος μετά από ανοδίωση.

(β) Δεν υπάρχει κατάλληλο υλικό προσθήκης. Μη αξιολογημένοι συνδυασμοί δεν συνίστανται.

2.4 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx

Τα κράματα της σειράς 5xxx χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή. Η αντοχή αυτή επιτυγχάνεται χάρη στην ποσότητα μαγνησίου που υπάρχει στη στερεά κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, το μαγνήσιο προάγει την κατεργασία της ενδοτράχυνσης μειώνοντας την τάση για δυναμική ανακρυστάλλωση.

Κατά τη συγκόλλησή τους, συμβαίνουν μεταλλουργικές αλλαγές κυρίως στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη αλλά και στο μέταλλο συγκόλλησης, οι οποίες περιλαμβάνουν ανόπτηση, ανακρυστάλλωση και μεγέθυνση των κόκκων που έχει σαν συνέπεια, την πτώση της αντοχής κατά ένα ποσοστό περίπου 20% ή και περισσότερο.

Αντίθετα με τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, όπου το πιο ευαίσθητο τμήμα στις συγκολλήσεις είναι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, στα κράματα της σειράς 5xxx (όπως και στα άλλα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα), το πιο ευαίσθητο τμήμα είναι το μέταλλο συγκόλλησης. Εκεί εντοπίζεται για παράδειγμα η περιοχή αστοχίας όταν υπάρξει εφελκυστική φόρτιση στα όρια αντοχής του μετάλλου.

Μεταλλουργικά, τα κράματα της σειράς 5xxx εκτός από αυτά που βρίσκονται στην πλήρως ανοιπημένη κατάσταση (κατάσταση - O), παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση του ποσοστού ανακρυστάλλωσης στη ΘΕΖ, καθώς η απόσταση από το μέταλλο συγκόλλησης μειώνεται. Επειδή οι μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί που συμβαίνουν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία, η διαδικασία συγκόλλησης και οι παράμετροι συγκόλλησης καθορίζουν άμεσα το εύρος εμφάνισης της περιοχής αυτής. Υψηλές θερμικές παροχές, αυξάνουν τόσο το βαθμό όσο και το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Η μικροδομή του μετάλλου

συγκόλλησης αποτελείται από μεγεθυνόμενους κόκκους με κυψελοειδή ή/και κιονοειδή δενδριτική δομή, που έχει ενδιάμεσα στους δενδρίτες ευηλεκτικά κατακρημνίσματα, κυρίως Mg_3Al_2 .

Η αποδοτικότητα των συγκολλήσεων διαφόρων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου φαίνεται στον Πίνακα 2.17.

Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά διάφορων μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου

Βασικό Μέταλλο	Όριο Διαρροής (MPa)	Όριο Ελαστικότητας (MPa)	Επιμήκυνση σε 50mm (%)	Υλικό προσθήκης	Όριο Διαρροής (MPa)	Όριο Ελαστικότητας (MPa)	Επιμήκυνση σε 50mm (%)	Αποδοτικότητα συγκόλλησης
1100-0	34	90	35	1100	41	93	23	100
				4043	41	90	21	100
3003-0	41	110	30	1100	41	90	20	81
				4043	48	91	17	83
3003-H18	186	200	4	1100	59	110	15	55
5050-0	55	145	24	5356	55	45	20	100
5050-H32	145	172	9	5356	97	159	15,5	92
				4043	90	152	15	88
5050-H38	200	221	6	5356	97	162	14,5	73
5083-0	145	290	22	5356	145	283	17	98
5083-H32	228	317	16	5356	145	276	16	87
				5183	152	300	12	95

Από τον Πίνακα 2.17, φαίνεται ότι τα δυο κράματα της σειράς 5xxx παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε σχέση με τα κράματα των σειρών 1xxx και 3xxx, χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης του μαγνησίου. Επιπρόσθετα, τα κράματα της σειράς 5xxx με υψηλότερο ποσοστό μαγνησίου έχουν και υψηλότερη αντοχή (για παράδειγμα το κράμα 5083 σε σχέση με το κράμα 5050). Ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για τα αντίστοιχα συγκολλημένα κράματα. Για παράδειγμα, η συγκόλληση ενός υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο κράματος όπως είναι το κράμα 5083 (4% Mg), είναι ανθεκτικότερη από τη συγκόλληση ενός άλλου κράματος της ίδιας σειράς, όπως το 5050 (1% Mg). Επιπλέον, η τυχόν κατεργασία που έχει υποστεί το βασικό μέταλλο δεν σχετίζεται με την αντοχή της συγκόλλησης. Έτσι, για παράδειγμα το κράμα 5083 παρουσιάζει την ίδια αντοχή στη συγκόλληση, είτε βρίσκεται σε ανοιπημένη κατάσταση είτε έχει υποστεί σκλήρυνση με κατεργασία ψυχρής έλασης (κατεργασία -H). Συνεπώς και η επιλογή του μετάλλου προσθήκης δεν έχει να κάνει αποκλειστικά με την αντοχή της συγκόλλησης. Βέβαια, η χρήση κραμάτων της σειράς 4xxx ως υλικά προσθήκης έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ολκιμότητας, ενώ υλικά προσθήκης πλούσια σε Fe, Si ή Mg (όπως πχ το κράμα 5183) δίνουν μέταλλο

συγκόλλησης με μεγάλο ποσοστό ευτηκτικών κατακρημνισμάτων και κατά συνέπεια μεγαλύτερη ολκιμότητα.

Ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες συγκολλημένων τυπικών μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων της σειράς 5xxx παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.18.

Πίνακας 2.18 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλημένων τυπικών μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx

Βασικό Κράμα	Υλικό προσθήκης	Αντοχή σε εφελκυσμό		Επιμήκυνση σε 50,8mm %
		Τυπική (MPa)	Ελάχιστη (MPa)	
5005	1100	110	96,5	15
5050	5356	159	124	18
5052	5356	193	172	19
5083	5183	296	276	16
5086	5356	262	241	17
5154	5654	228	207	17
5454	5554	234	214	17
5456	5556	319	290	14

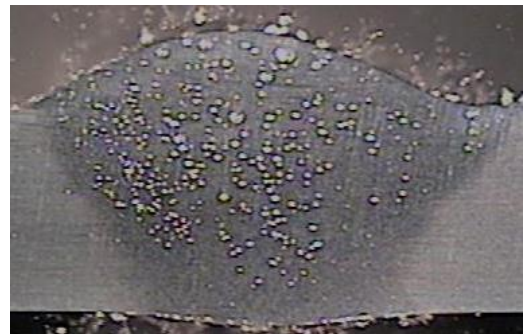
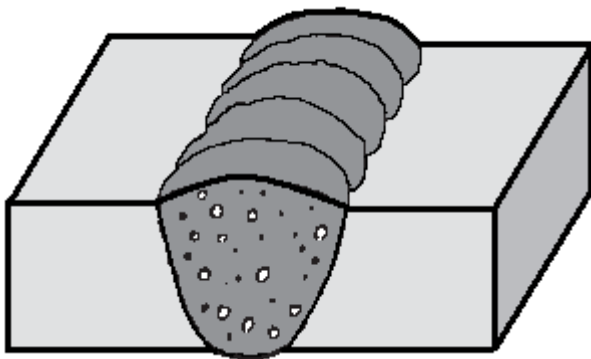
2.5 Σφάλματα συγκολλήσεων και τρόποι αποφυγής^{[11],[29]}

Τα κυριότερα σφάλματα που παρατηρούνται στην περιοχή της συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου είναι επιγραμματικά τα παρακάτω:

- Πορώδες (porosity)
- Ατελής τήξη (lack of fusion)
- Ατελής διείσδυση (incomplete penetration)
- Ρωγμές (cracks)
- Στερεά εγκλείσματα (inclusions)
- Υποκοπές (undercut)

2.5.1 Πορώδες

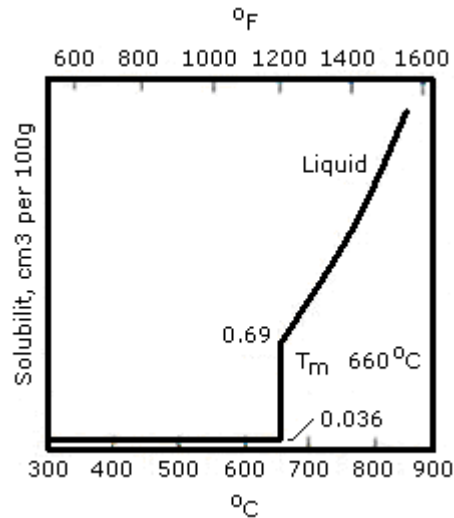
Το πορώδες είναι ένα από τα πιο κοινά προβλήματα στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου. Η κυριότερη αιτία εμφάνισης πορώδους είναι η εισχώρηση υδρογόνου στο τηγμένο μέταλλο.



Εικόνα 2.30 Πορώδες σε τομή συγκόλλησης

Καθώς το μέταλλο στερεοποιείται, πόροι δημιουργούνται όταν διαλυμένα αέρια εξακολουθούν να υπάρχουν σε ποσότητες μεγαλύτερες από αυτές που τους επιτρέπει η διαλυτότητά τους στο στερεό πια μέταλλο. Μάλιστα η διαλυτότητα του υδρογόνου στο στερεό μέταλλο μειώνεται δραστικά σε σχέση με τη διαλυτότητά του στο τηγμένο.

Το υδρογόνο προέρχεται από ακαθαρσίες (λάδια ή γράσο) ή υγρασία κοντά ή μέσα στη ζώνη συγκόλλησης κατά τη διάρκεια αυτής. Υδρογόνο μπορεί να υπάρχει και σε ακαθαρσίες του προστιθέμενου μετάλλου, εάν αυτό δεν έχει καθαριστεί επιμελώς πριν από τη συγκόλληση. Στην Εικόνα 2.31 φαίνεται η διαλυτότητα του υδρογόνου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Εικόνα 2.31 Διαλυτότητα υδρογόνου στο αλουμίνιο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Για να αποφευχθεί το πορώδες σε μια συγκόλληση θα πρέπει:

- ☞ Να γίνει επιμελής καθαρισμός των προς συγκόλληση επιφανειών με αλκοόλη ή άλλο μέσο (μηχανικό ή χημικό) πριν τη διενέργεια της συγκόλλησης.
- ☞ Να χρησιμοποιηθεί αέριο προστασίας υψηλής καθαρότητας.

Το πορώδες μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το μέγεθος του πόρου και την περιοχή της συγκόλλησης που βρίσκεται. Μικροί και διασκορπισμένοι πόροι είναι λιγότερο επιβλαβείς από μεγάλους σε μέγεθος πόρους που βρίσκονται συγκεντρωμένοι ή ευθυγραμμισμένοι. Οι συγκεντρωμένοι πόροι οφείλουν την ύπαρξη τους, κατά κύριο λόγο, σε μεταβολές στις παραμέτρους συγκόλλησης. Οι ευθυγραμμισμένοι πόροι συνδέονται κυρίως με άλλα προβλήματα, όπως την ατελή διείσδυση και την ατελή τήξη.

Συνολικά το πορώδες δεν μπορεί να ξεπερνά το 20% της επιφάνειας του μετάλλου συγκόλλησης σε μια εγκάρσια τομή αυτού. Πιο εξειδικευμένα, πρέπει να περιορίζεται στους 0,51 πόρους/mm² στην επιφάνεια της συγκόλλησης, από τους οποίους μέχρι τέσσερις μπορούν να έχουν διάμετρο από 0,8128 mm μέχρι 2,3876 mm, ενώ κανένας πόρος δεν μπορεί να ξεπερνά τα 2,413mm σε διάμετρο. Το συνολικό πορώδες δεν μπορεί να ξεπερνά τους τριάντα πόρους διαμέτρου το πολύ 2,3876 mm σε μια επιφάνεια 6451,6 mm².

Στον Πίνακα 2.19 φαίνονται τα επιτρεπτά επίπεδα πορώδους σε ραδιογραφικούς ελέγχους μήκους συγκόλλησης 76,2 mm. Σημειώνεται ότι για συγκολλήσεις μεγαλύτερες από αυτές που

περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.19, το συνολικό πορώδες δεν θα πρέπει να ξεπερνά τις $(2,57 \times E)$ mm² όπου E το ορισμένο μέγεθος συγκόλλησης. Αντίστοιχα, αν το εξεταζόμενο μήκος συγκόλλησης είναι μικρότερο από 76,2 mm τότε το επιτρεπόμενο πορώδες θα πρέπει να μειωθεί κατά αναλογία. Η μέγιστη διάσταση πορώδους πρέπει να είναι E/2 ή 6,35 mm (όποιο από τα δυο είναι μικρότερο). Ευθυγραμμισμένο πορώδες ορίζεται μια ακολουθία από τέσσερις ή περισσότερους πόρους στη ρίζα της συγκόλλησης, τα κέντρα των οποίων βρίσκονται σε ευθεία γραμμή παράλληλη με τον άξονα της συγκόλλησης. Μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό όταν ο μέσος όρος των διαμέτρων δεν ξεπερνά τις E/38,1 mm στη ρίζα, σε μήκος 6E ή 76,2 mm (ανάλογα με το ποια είναι μικρότερη).

Πίνακας 2.19 Επίπεδα πορώδους σε ραδιογραφίες μήκους συγκόλλησης 76,2mm

Μέγεθος συγκόλλησης - E - (mm)	Μέγιστη επιτρεπόμενη επιφάνεια (mm ²)	Μεγάλοι πόροι		Μεσαίοι πόροι		Μικροί πόροι	
		Μέγιστη διάμετρος (mm)	Μέγιστος αριθμός (Αρ.)	Μέγιστη διάμετρος (mm)	Μέγιστος αριθμός (Αρ.)	Μέγιστη διάμετρος (mm)	Μέγιστος αριθμός (Αρ.)
3,175	7,742			1,57	3	0,79	15
6,35	16,129	3,175	2	1,57	8	0,79	31
9,525	24,516	3,175	3	1,57	12	0,79	47
12,7	32,258	3,175	4	1,57	16	0,79	62
15,875	40,645	3,175	5	1,57	20	0,79	78
19,05	49,032	3,175	6	1,57	25	0,79	95
22,225	56,774	3,175	7	1,57	28	0,79	110
25,4	65,161	3,175	8	1,57	32	0,79	126

Το πορώδες μπορεί εύκολα να εντοπιστεί με καταστροφικές και μη μεθόδους. Κυρίως χρησιμοποιείται ο ραδιογραφικός έλεγχος.

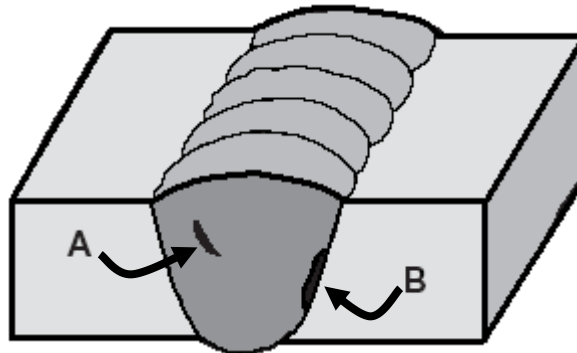
2.5.2 Ατελής τήξη

Μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε σημείο της συγκόλλησης και πρακτικά σημαίνει ότι δεν υπάρχει επαρκής πλήρωση του χώρου μεταξύ των διαμορφωμένων ακμών των υπό συγκόλληση τεμαχίων, στη ρίζα της συγκόλλησης ή των κενών μεταξύ αποθεμάτων ή στρώσεων.

Ατελής τήξη μπορεί να προκληθεί από:

- Ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας λόγω χαμηλής έντασης ρεύματος
- Ανεπαρκή προετοιμασία ακμών
- Λανθασμένη τοποθέτηση του δαυλού συγκόλλησης

- Προσπάθεια συγκόλλησης πάνω σε υπερβολικά οξειδωμένες επιφάνειες
- Συγκόλληση όπου οι ακμές έχουν πολύ μικρό διάκενο
- Ανεπαρκή αφαίρεση του στρώματος οξειδίου
- Ανεπαρκή προστασία με αέριο
- Ροή τηγμένου μετάλλου μπροστά από τη συγκόλληση
- Κακή τοποθέτηση των προς συγκόλληση τεμαχίων



Εικόνα 2.32 Ατελής τήξη (A) στο μέταλλο συγκόλλησης (B) στις παρυφές με το μέταλλο βάσης

Η αποφυγή ατελούς τήξης μπορεί να γίνει με:

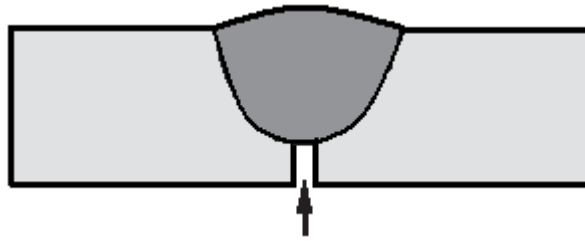
- Πολύ καλό καθαρισμό των επιφανειών που θα συγκολληθούν
- Μηχανουργική κατεργασία των επιφανειών που θα συγκολληθούν πριν τη συγκόλληση
- Αύξηση της γωνίας κατά το φρεζάρισμα των ακμών

Με τη σημερινή εξέλιξη της θεωρίας της θραύσης είναι δυνατή η αξιολόγηση της σημασίας και της έκτασης της ατελούς τήξης σε συγκολλητές κατασκευές.

Η ατελής τήξη δεν μπορεί να ανιχνευτεί με ραδιογραφικό έλεγχο και πολλές φορές είναι δύσκολο να ανιχνευθεί και με τους υπερήχους, επειδή οι δυο επιφάνειες βρίσκονται πολύ κοντά η μια στην άλλη και αντανακλούν πολύ μικρό ποσοστό των κυμάτων.

2.5.3 Ατελής διείσδυση

Ατελής διείσδυση σημαίνει ότι η διείσδυση που επιτεύχθηκε είναι μικρότερη από την απαιτούμενη και επομένως η συγκόλληση δεν ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές της εφαρμογής για την οποία προορίζεται.

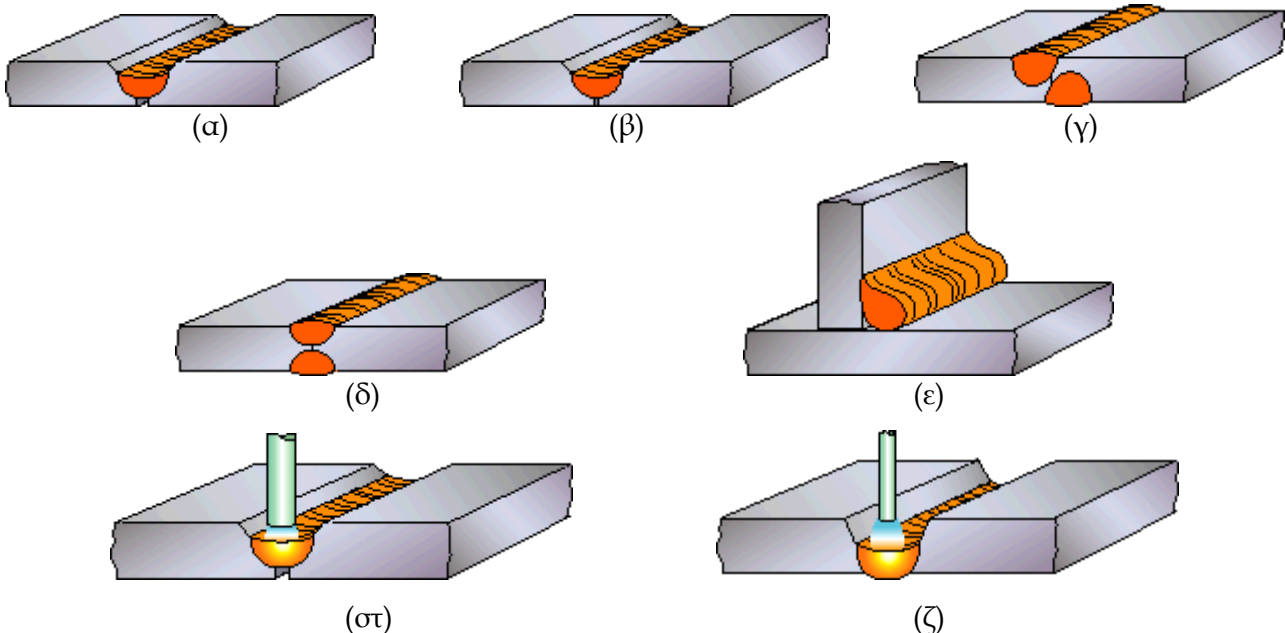


Εικόνα 2.33 Ατελής διείσδυση

Από καθαρά σχεδιαστική σκοπιά, το σφάλμα αυτό μπορεί να συμβεί μόνο στην περίπτωση που η προδιαγραφή της συγκόλλησης απαιτεί διείσδυση του μετάλλου συγκόλλησης πέραν της αρχικής διαμόρφωσης των ακμών των υπό συγκόλληση ελασμάτων. Όταν η συγκόλληση αποτύχει στο να διεισδύσει σε ολόκληρη την περιοχή της ένωσης, τότε η περιοχή αυτή υπόκειται σε ατελή διείσδυση.

Η ατελής διείσδυση μπορεί να προκληθεί από:

- Λανθασμένη γεωμετρία συγκόλλησης
- Ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας, λόγω χαμηλής έντασης ρεύματος ή υψηλής ταχύτητας συγκόλλησης



Εικόνα 2.34 Μορφές και αιτίες ατελούς διείσδυσης: α) υπερβολικά παχιά μορφή ρίζας, β) πολύ μικρό διάκενο, γ) κακή ευθυγράμμιση συγκόλλησης, δ) & ε) μικρή παροχή θερμότητας, στ) μεγάλη διάμετρος ηλεκτροδίου, ζ) πολύ μικρή διάμετρος ηλεκτροδίου

- Λανθασμένη διάμετρο ηλεκτροδίου
- Μη ευθυγράμμιση στη συγκόλληση της δεύτερης πλευράς

Η αποφυγή ατελούς διείσδυσης μπορεί να γίνει με:

- Αύξηση της έντασης του ρεύματος
- Μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης
- Μείωση του πάχους της διαμόρφωσης της ρίζας και, εάν είναι αναγκαίο, χρήση επικαλύπτρας.

Το φαινόμενο της ατελούς διείσδυσης είναι πολύ σημαντικό σε περιοχές όπως η ρίζα. Στη ρίζα δημιουργούνται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο στην περίπτωση που η συγκόλληση πρόκειται να καταπονηθεί με εναλλασσόμενα φορτία, γιατί έτσι μπορεί να προκληθεί ρωγμή που να οδηγήσει σε ταχεία αστοχία.

Η ατελής διείσδυση μπορεί να ανιχνευθεί με ραδιογραφικό έλεγχο. Επιπλέον, μπορεί να ανιχνευθεί με υπερήχους, αρκεί το πάχος του ελάσματος να είναι μικρότερο από 10 mm.

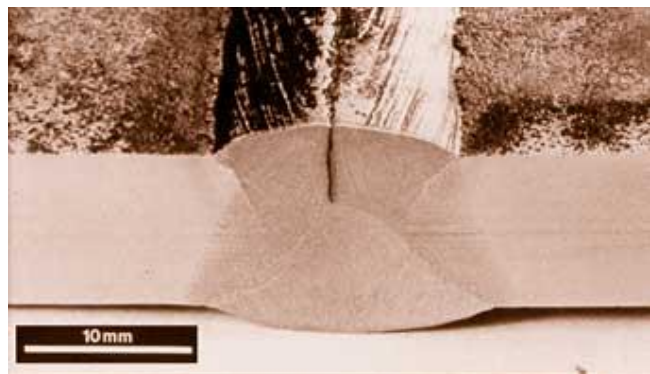
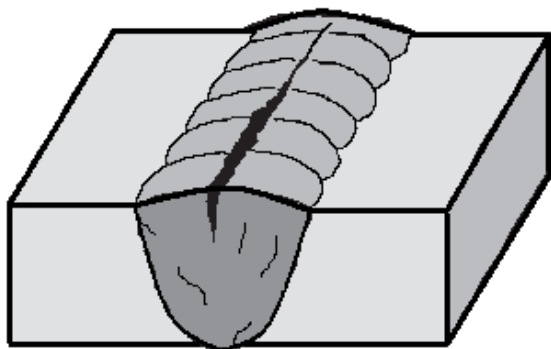
2.5.4 Ρωγμές

Η ρωγμή ορίζεται ως μια ασυνέχεια υλικού οφειλόμενη σε θραύση και χαρακτηριζόμενη από οξύ άκρο και μεγάλους λόγους μήκους και πλάτους προς το άνοιγμα της. Οι ρωγμές αποτελούν την πιο επικίνδυνη μορφή σφάλματος στις συγκολλήσεις αλουμινίου αλλά και γενικότερα, γιατί κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να επεκταθούν με μεγάλη ταχύτητα και να προκαλέσουν κατάρρευση της κατασκευής. Οι περισσότερες ρωγμές δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης και ψύξης. Κάποιες μπορεί να δημιουργηθούν σε μεταγενέστερο στάδιο, συνήθως όταν εφελκυστικές τάσεις (παροδικές ή μόνιμες) υψηλής έντασης είναι παρούσες. Ανάλογα με την περιοχή όπου τα διάφορα είδη ρωγμών εμφανίζονται, διακρίνονται σε:

- Ρωγμές στη ζώνη τήξης
- Ρωγμές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη
- Ρωγμές στον κρατήρα

2.5.4.1 Ρωγμές στη ζώνη τήξης

Οι ρωγμές στη ζώνη τήξης οφείλονται σε ένα συνδυασμό υψηλών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης και μεταλλουργικών αδυναμιών του προστιθέμενου μετάλλου. Προστιθέμενο μέταλλο με χαμηλό ποσοστό κραματικών στοιχείων (π.χ. Mg μικρότερο από 3% και Si μικρότερο από 2%) οδηγεί σε ρωγμή πιο εύκολα από προστιθέμενο μέταλλο με υψηλότερα ποσοστά κραματικών στοιχείων. Ρωγμές στη ζώνη τήξης είναι δυνατό να εμφανιστούν και σε κράματα της σειράς 6xxx όταν συγκολλούνται χωρίς προσθήκη υλικού και η ζώνη τήξης έχει περιεκτικότητα σε Si και Mg μικρότερη από 2%.



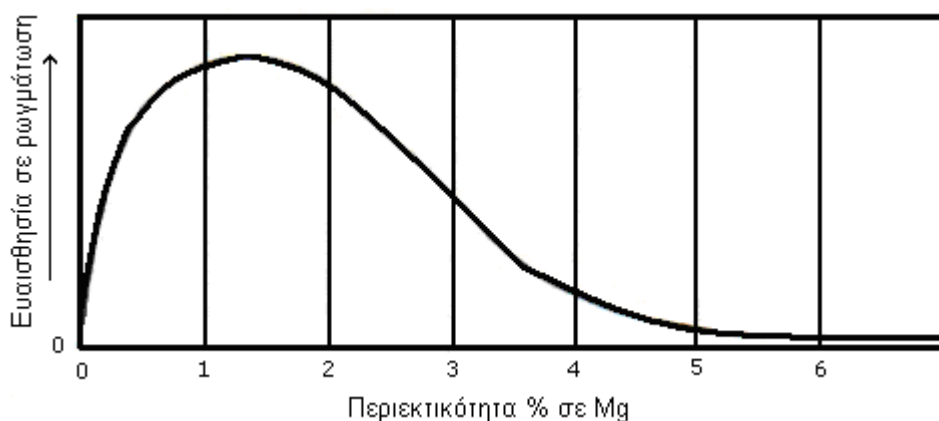
Εικόνα 2.35 Ρωγμές στη ζώνη τήξης

Οι ρωγμές στη ζώνη τήξης μπορούν να αποφευχθούν με:

- Επιλογή προστιθέμενου μετάλλου με υψηλότερα ποσοστά κραματικών στοιχείων.
- Με χρήση πάντοτε υλικών προσθήκης σε συγκολλήσεις κραμάτων της σειράς 6xxx

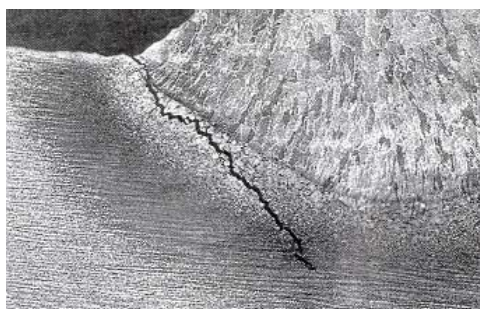
Γενικά, προβλήματα θερμής ρωγμάτωσης (όπως αλλιώς ονομάζονται) παρουσιάζονται όταν η συγκόλληση γίνεται κάτω από ισχυρό περιορισμό ή όταν συγκολλώνται κράματα τα οποία παρουσιάζουν προφανή ευαισθησία σε αυτή. Στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, για να αποφεύγεται η δημιουργία ρωγμών, συνιστάται να χρησιμοποιούνται κράματα προσθήκης υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο.

Στην Εικόνα 2.36 φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του κράματος σε μαγνήσιο στην ευαισθησία σε ρωγμάτωση.



Εικόνα 2.36 Τρόπος επίδρασης της περιεκτικότητας σε Mg στην ευαισθησία σε ρωγμάτωση

2.5.4.2 Ρωγμές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 2.37 Ρωγμή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Οι ρωγμές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) επηρεάζουν κυρίως τα κράματα της σειράς 6xxx. Οι ρωγμές δημιουργούνται από την παρουσία φάσεων χαμηλού σημείου τήξης στα όρια των κόκκων. Εξαιτίας του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης, οι θερμοκρασίες μπορεί να ανέβουν σε σημείο τέτοιο ώστε αυτές οι φάσεις να τακούν. Στη διάρκεια της ψύξης το υλικό που δεν έχει τηχθεί συστέλλεται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις. Η παρουσία ρωγμής στη θερμικά

επηρεασμένη ζώνη δεν έχει άμεση συνέπεια στη μηχανική αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης όμως μειώνει, φυσικά, την αντοχή σε κόπωση του συγκολλημένου στοιχείου.

Παράγοντες, που επηρεάζουν τη δημιουργία τους είναι:

- Υλικό προσθήκης Al_2Si_5 , μειώνει την τάση για δημιουργία ρωγμών στη ΘΕΖ, σε σύγκριση με το υλικό προσθήκης $AlMg_5$ ή όμοιό του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης του συγκεκριμένου κράματος.
- Χονδροκόκκα κράματα έχουν αυξημένη τάση για δημιουργία ρωγμών στη ΘΕΖ.
- Η διαδικασία όσο και οι παράμετροι συγκόλλησης επηρεάζουν την τάση δημιουργίας ρωγμών στη ΘΕΖ. Υψηλά ποσοστά προσδιδόμενης θερμότητας αυξάνουν το εύρος της ΘΕΖ αυξάνοντας παράλληλα και το εύρος της ζώνης που είναι ευαίσθητη στο να δώσει ρωγμές.

2.5.4.3 Ρωγμές κρατήρα

Οι ρωγμές κρατήρα εμφανίζονται στο τελείωμα της συγκόλλησης ή όταν γίνει λανθασμένη διακοπή της διαδικασίας συγκόλλησης. Οφείλονται στον ίδιο μηχανισμό δημιουργίας ρωγμών όπως οι ρωγμές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 2.38 Ρωγμή κρατήρα σε συγκόλληση GMAW

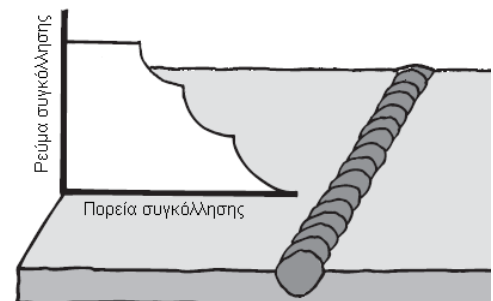
Οι ρωγμές κρατήρα μπορούν να αποφευχθούν με κατάλληλες διαδικασίες κατά το τελείωμα μιας ραφής, όπως:

- Στην τεχνική με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW) γίνονται επανεκκινήσεις του τόξου, όπου προστίθεται και υλικό προσθήκης στον κρατήρα.

○ Στην τεχνική με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW) αυξάνεται η ταχύτητα συγκόλλησης λίγο πριν σταματήσει η συγκόλληση.

○ Γίνεται διαχείριση του ρεύματος συγκόλλησης, αυτόματα ή χειροκίνητα, ώστε προς το τέλος της συγκόλλησης η ισχύς να μειώνεται κι έτσι η ραφή να γίνεται πιο ομαλή και χωρίς προβλήματα (Εικ. 2.39).

○ Συνιστάται η χρησιμοποίηση διατάξεων επιμήκυνσης της ραφής, εάν είναι αυτό εφικτό, σε περιοχή έξω από τα εκάστοτε προς συγκόλληση τεμάχια, με χρήση ράβδων, μπαρών, πλακών κ.λπ. που βρίσκονται σε συνέχεια αυτών και πάνω στον άξονα συγκόλλησης. Η απαίτηση που υπάρχει είναι να μπορούν τα πρόσθετα αυτά στοιχεία, τα οποία μπορούν να υπάρχουν και στην έναρξη της συγκόλλησης, να αφαιρεθούν εύκολα με μηχανικό τρόπο.



Εικόνα 2.39 διαχείριση ρεύματος συγκόλλησης για την αποφυγή ρωγμών κρατήρα

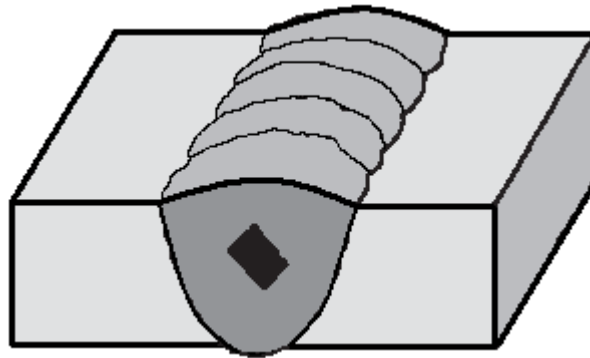
2.5.5 Στερεά εγκλείσματα

Στερεά εγκλείσματα μπορεί να εμφανιστούν σε συγκολλήσεις αλουμινίου. Στη μέθοδο GTAW το πιο κοινό στερεό έγκλεισμα είναι του βολφραμίου, που προέρχεται από το ηλεκτρόδιο του πιστολιού συγκόλλησης. Τα εγκλείσματα βολφραμίου οφείλονται σε:

- Πολύ υψηλή ένταση ρεύματος για το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο

- Ασταθές τόξο
- Επαφή του ηλεκτροδίου με το τηγμένο λουτρό ή με το μέταλλο προσθήκης

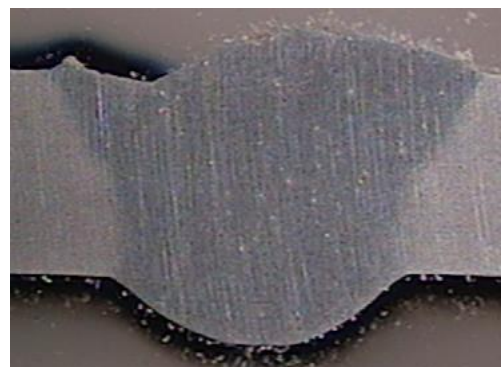
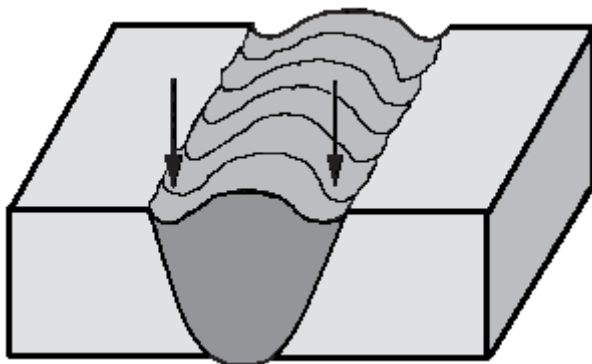
Στη μέθοδο GMAW εγκλείσματα χαλκού μπορεί να βρεθούν στη ζώνη τήξης από το ακροφύσιο της συγκόλλησης. Τέλος, εγκλείσματα σιδήρου εμφανίζονται όταν κομμάτια από μεταλλικές βούρτσες, που χρησιμοποιούνται κατά τον καθαρισμό των ακμών, σπάσουν και εγκλωβιστούν στο μέταλλο συγκόλλησης. Τα στέρεα εγκλείσματα εντοπίζονται εύκολα με ραδιογραφία.



Εικόνα 2.40 Στερεά εγκλείσματα

2.5.6 Υποκοπές

Οι υποκοπές είναι ο σχηματισμός αυλακώσεων στη μια ή και στις δυο πλευρές της συγκόλλησης παράλληλα προς την ένωση του μετάλλου συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου.



Εικόνα 2.41 Υποκοπές

Οι λόγοι δημιουργίας υποκοπών είναι οι:

- Λανθασμένη τεχνική συγκόλλησης
- Υπερβολικά χαμηλή ένταση ρεύματος ή πολύ χαμηλή ταχύτητα συγκόλλησης

Το σφάλμα της υποκοπής δημιουργεί οξείες εγκοπές στην επιφάνεια των συγκολλήσεων. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, με αποτέλεσμα την πιθανότητα έναρξης ρωγματώσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία της συγκόλλησης.

2.6 Προετοιμασία πριν τη συγκόλληση

2.6.1 Επιφανειακή προετοιμασία της συγκόλλησης

Όλα τα επιφανειακά λάδια και λιπαντικά θα πρέπει να αφαιρεθούν από την επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία πορώδους.

Οι χλωριούχοι διαλύτες και τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση των λιπαντικών με εξάχνωση, πρέπει να απομονώνονται από την περιοχή της συγκόλλησης, επειδή η ακτινοβολία του τόξου μπορεί να τα μεταβάλει χημικά προκαλώντας τη δημιουργία τοξικών αερίων.

Διαλύτες βάσης πετρελαίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά στην περιοχή της συγκόλλησης.

Βούρτσες από ανοξείδωτο χάλυβα είναι προτιμητέες για τον καθαρισμό του επιφανειακού οξειδίου του αλουμινίου, διότι αποφεύγεται η εισχώρηση σκουριάς στο υλικό.

Εάν χρησιμοποιηθεί μηχανική βούρτσα, θα πρέπει η πίεση που ασκείται να είναι πολύ μικρή, διότι με υπερβολική πίεση το οξείδιο δεν αφαιρείται αλλά εισχωρεί στο μέταλλο περισσότερο, αυξάνοντας τις ατέλειες της συγκόλλησης.

Η επιφανειακή υγρασία μπορεί να απομακρυνθεί με ελαφρά θέρμανση πριν τη συγκόλληση. Η βέλτιστη συγκόλληση συναντάται όταν το βασικό μέταλλο είναι καθαρό και στεγνό και το πάχος του οξειδίου είναι το ελάχιστο δυνατό.

Τέλος, σε συγκολλήσεις με πολλαπλές στρώσεις συνιστάται να καθαρίζεται επιφανειακά η συγκόλληση μετά από κάθε στρώση, με βούρτσα ανοξείδωτου χάλυβα, ώστε να απομακρύνονται όλες οι ακαθαρσίες πριν από την επόμενη στρώση.

2.6.2 Προθέρμανση

Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Για την αποφυγή λαθών στη συγκόλληση ή/και εμφάνιση πορώδους, εξαιτίας της έντονης διαρροής θερμότητας κατά τη συγκόλληση, απαιτείται ενδεχομένως προθέρμανση – κατά κανόνα με φλόγα ακετυλενίου και οξυγόνου ή ακετυλενίου - πεπιεσμένου αέρα.

Η θερμότητα και ο χρόνος προθέρμανσης εξαρτώνται από το κράμα και το πάχος του υλικού, καθώς και από το είδος του αερίου προστασίας. Η πολύ υψηλή θερμοκρασία και ο πολύ μεγάλος χρόνος προθέρμανσης μπορούν να οδηγήσουν, στην αλλοίωση των ιδιοτήτων του υλικού.

Οι ανώτατες τιμές για τη θερμοκρασία και τον χρόνο προθέρμανσης βρίσκονται στον Πίνακα 2.20. Λεπτομερή στοιχεία πρέπει να ζητηθούν από τον κατασκευαστή του ημικατεργασμένου υλικού.

Πίνακας 2.20 Θερμοκρασίες και χρόνοι προθέρμανσης κραμάτων αλουμινίου

Υλικό	Πάχος υλικού (mm)	Ανώτατη θερμοκρασία προθέρμανσης (°C)	Ανώτατος χρόνος προθέρμανσης (min)
AlMgSi 0,5	>20	180	60
AlMgSi 0,7	>20	200	30
AlMgSi 1	>20	200	20
AlZn 4,5 Mg 1	>16	140	30
AlMg 4,5 Mn	>16	150	10
AlMg 3	>16	150	10

Κατά την προθέρμανση σε αυτογενή καυστήρα πρέπει να διακοπεί το πλεόνασμα ακετυλενίου. Οι δυνατοί καυστήρες μειώνουν το χρόνο προθέρμανσης. Ο μεγάλος χρόνος προθέρμανσης και το πλεόνασμα οξυγόνου οδηγούν στο σχηματισμό στρωμάτων οξειδίου.

Κατά τη χρησιμοποίηση προπανίου ή φυσικού αερίου πρέπει να προσεχθούν τα ακόλουθα:

1. Λόγω της περιορισμένης περιεκτικότητας της φλόγας σε θερμότητα, σε σύγκριση με το ακετυλένιο, ο χρόνος προθέρμανσης είναι μεγαλύτερος .
2. Επειδή κατά τη χρησιμοποίηση προπανίου ή φυσικού αερίου παρατηρείται σχετικά υψηλή υγρασία, ο κίνδυνος σχηματισμού πόρων είναι μεγάλος.

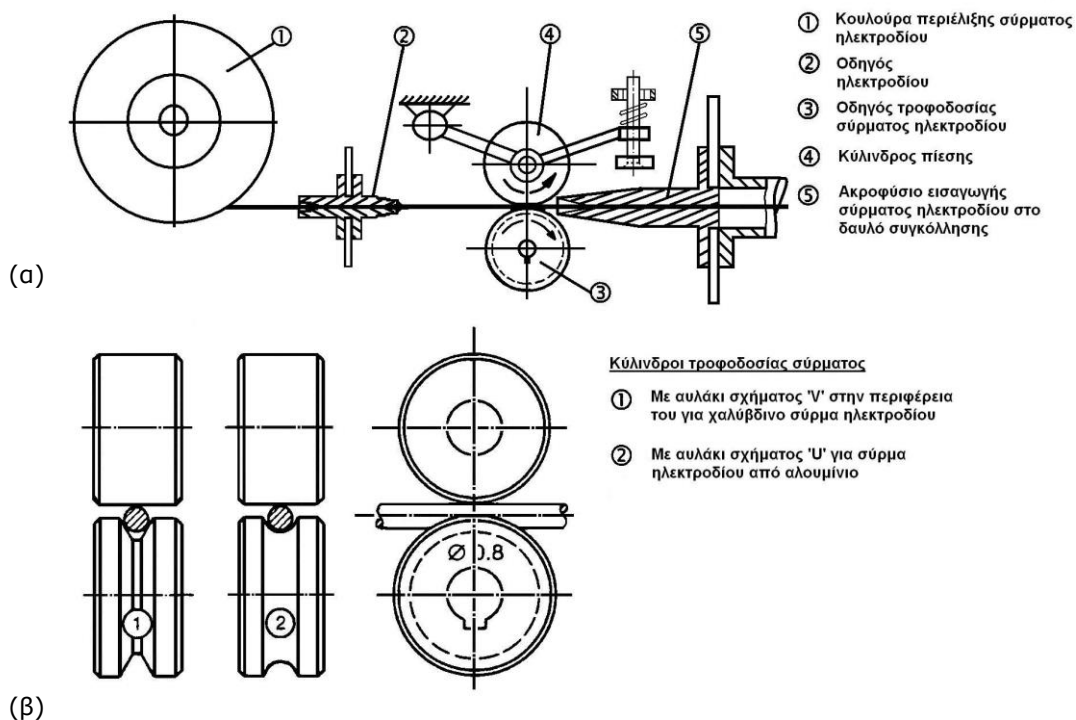
Ο έλεγχος της θερμοκρασίας προθέρμανσης επιτυγχάνεται κατάλληλα με αισθητήρες θερμότητας ή έγχρωμα μολυβδοκόνδυλα, με έγχρωμα καλύμματα σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

2.7 Πρακτικά στοιχεία και υποδείξεις στις συγκολλήσεις ναυπηγικών αλουμινίων

2.7.1 Σχετικά με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό

Στις συγκολλήσεις GMAW ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη Παράγραφο, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια ίδιας ή παρόμοιας σύστασης με το βασικό υλικό. Έτσι, η μεγάλη ολκιμότητά τους όπως και το γεγονός ότι οι συνήθεις διαμέτροι που χρησιμοποιούνται είναι 0,8 - 1,2 mm, κάνει τη μεταφορά του ηλεκτροδίου προς το ακροφύσιο του όπλου συγκόλλησης μια ιδιαίτερα ευαίσθητη διαδικασία.

Οι κύλινδροι μεταφοράς που διαθέτουν οι διατάξεις προώθησης του σύρματος των μηχανών συγκόλλησης, έχουν διαφορετική γεωμετρία στην περιφέρειά τους, σε σχέση με τους αντίστοιχους που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρόδια συγκόλλησης χάλυβα (Εικ. 2.42α). Για τα κράματα αλουμινίου, προτείνονται αυτοί οι οποίοι στην περιφέρειά τους φέρουν αυλάκωση ημικυκλικού σχήματος 'U' (Εικ. 2.42β). Η αυλάκωση πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη διάμετρο του σύρματος και οι ακμές πρέπει να λειανθούν πριν τη χρήση. Αν χρησιμοποιηθεί αυλάκωση σε σχήμα 'V', αυτή πρέπει να έχει γωνία μεγαλύτερη από 90°. Προφανώς όταν χρησιμοποιούνται διπλοί κύλινδροι μεταφοράς σύρματος, αυτοί πρέπει να έχουν την ίδια διάμετρο ώστε να αποφεύγεται παραμόρφωση του σύρματος από διαφορετικές περιφερειακές ταχύτητες.



Εικόνα 2.42 α) Τυπική διάταξη προώθησης ηλεκτροδίου και β) μορφές κυλινδρων μεταφοράς^{[6],[7]}

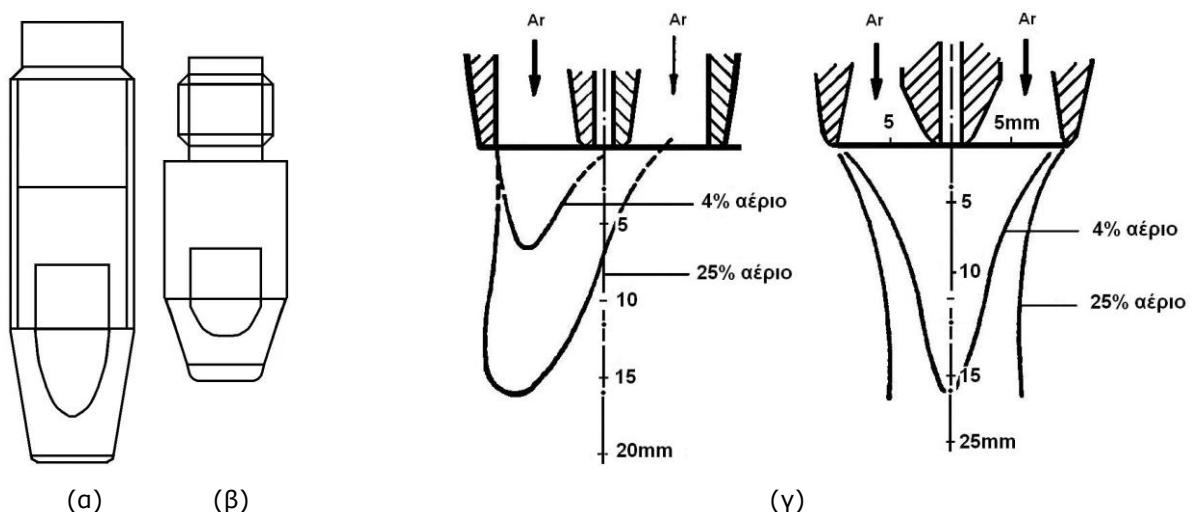
Επιπλέον, οι βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή μεταφορά του σύρματος ηλεκτροδίου είναι:

- ο Ο αγωγός μεταφοράς να είναι όσο το δυνατόν κοντύτερος και πάντως όχι μεγαλύτερος από 3m.
- ο Θα πρέπει να παρουσιάζει όσο το δυνατό μικρότερη καμπυλότητα.

Αν τα παραπάνω δεν μπορούν να εξασφαλιστούν, προτείνεται η χρήση επιπλέον συστημάτων μεταφοράς του ηλεκτροδίου στο ακροφύσιο της συγκόλλησης (π.χ. push-pull ή push-push συστήματα).

Στην εκπλήρωση των παραπάνω προϋποθέσεων, συντελεί και η κατάλληλη επιλογή πυρήνα του αγωγού μεταφοράς. Έτσι, καθώς αυτός θα πρέπει να είναι από υλικό χαμηλής τριβής, συνήθως χρησιμοποιούνται πολυαμίδια, τεφλόν ή τελευταία, βάσης γραφίτη.

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη Παράγραφο, λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, το μήκος του ηλεκτρικού τόξου σε συγκολλήσεις GMAW δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της συγκόλλησης. Το πλεονέκτημα αυτό, αξιοποιείται με την κατασκευή μακρύτερων ακροφυσίων, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις χαλύβων (Εικ. 2.43α και 2.43β), τα οποία έχουν ξεχωριστό σχεδιασμό (Εικ. 2.43γ), που επιτρέπει την καλύτερη οδήγηση του αερίου προστασίας στην περιοχή του λουτρού συγκόλλησης. Έτσι, η συγκόλληση προστατεύεται καλύτερα ενώ βελτιώνεται και η ποιότητα του ηλεκτρικού τόξου.



Εικόνα 2.43 α) Ακροφύσιο για συγκολλήσεις αλουμινίου, β) ακροφύσιο για συγκολλήσεις χαλύβων, γ) βελτιστοποίηση σχεδιασμού ακροφυσίου για καλύτερη οδήγηση του αερίου προστασίας

Η δημιουργία στρώματος μεγάλου πάχους οξειδίου του αλουμινίου πρέπει να αποφεύγεται κατά την αποθήκευση ή/και τη μεταφορά. Για να αποφευχθεί η έντονη αύξηση του πάχους του στρώματος αυτού, πρέπει να τηρούνται ανάλογες συνθήκες αποθήκευσης, αλλά και κατάλληλοι χρόνοι αποθήκευσης και παραγωγής.

Το αλουμίνιο, πρέπει να αποθηκεύεται σε καθαρό και ξηρό περιβάλλον προς αποφυγή δημιουργίας εφίδρωσης. Επιπλέον, καθώς οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές είναι δυνατό να οδηγήσουν στη μορφοποίηση υδρατμών στην επιφάνεια του μετάλλου, θα πρέπει όσο το δυνατό, η θερμοκρασία αποθήκευσης να είναι κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά την αποθήκευση, τα ενδιάμεσα στρώματα, που υπάρχουν μεταξύ των ελασμάτων αλουμινίου, μπορεί να είναι ξύλο, πλαστικό ή χάλυβας CrNi. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ενδιάμεσα στρώματα που έχουν σαν βάση το χαρτί, καθώς αυτό είναι υδροσκοπικό. Επιπλέον, και τα αναλώσιμα της συγκόλλησης πρέπει να αποθηκεύονται σε καθαρό και ξηρό περιβάλλον όπως και να διατηρούνται στην κατάλληλη θερμοκρασία.

Όπως φάνηκε και σε προηγούμενη Παράγραφο, το αλουμίνιο σε επαφή με άλλα μέταλλα δρα ως άνοδος (παρουσία ηλεκτρολύτη) συνεπώς, κατά την ταυτόχρονη επεξεργασία του με χάλυβα, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθεί γαλβανική διάβρωση.

2.7.2 Σχετικά με τη διαδικασία συγκόλλησης^{[6],[7],[15]}

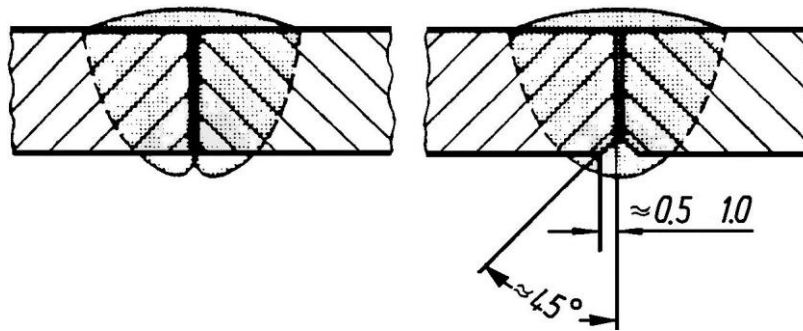
Το στρώμα του οξειδίου αλουμινίου δεν θα πρέπει να αφαιρείται πλήρως πριν τη συγκόλληση όταν αυτό είναι διαπιστωμένα, μικρού πάχους και χωρίς υγρασία. Σε συγκολλήσεις τόξου αναστροφής πολικότητας, το οξείδιο του αλουμινίου, όταν βρίσκεται στην κατάσταση που περιγράφηκε λίγο πριν, προσφέρει ευκολότερα ηλεκτρόνια σε σχέση με το βασικό μέταλλο κι έτσι συμβάλει στη σταθερότητα του ηλεκτρικού τόξου. Συνεπώς,, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα ομοιογενές συμπαγές και λεπτό στρώμα Al_2O_3 στην επιφάνεια του μετάλλου καθώς αφενός παρέχει μια πολύ καλή αντιδιαβρωτική προστασία, αφετέρου, παράγει κατά τη συγκόλληση ένα χρήσιμο αδρανές ηλεκτρικό τόξο.

Η συγκόλληση δεν θα πρέπει να πραγματοποιείται αν η θερμοκρασία των υπό συγκόλληση τμημάτων είναι χαμηλότερη από 12°C. Αυτό βέβαια δεν είναι περιοριστικό για την περιβάλλουσα θερμοκρασία παρά μόνο για αυτή της γειτονικής περιοχής της συγκόλλησης. Ωστόσο, αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι κοντά στους 0°C, τότε πιθανότατα να χρειαστούν μέτρα

ώστε η θερμοκρασία του μετάλλου στην περιοχή της συγκόλλησης να διατηρηθεί πάνω από τους 12°C.

Η προετοιμασία των ακμών μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση μηχανικών ψαλιδιών, μηχανικών πριονιών, κοπή με δέσμη πλάσματος, φρεζάρισμα ή πλανάρισμα. Η χρήση λειαντικών μέσων για τη διαμόρφωση των ακμών δεν ενδείκνυται, ωστόσο αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το τελικό φινιρίσμα της περιοχής της συγκόλλησης. Βέβαια, ακόμα και τότε δεν πρέπει να ασκείται φορτίο κατά τη χρήση τους και βέβαια δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται λιπαντικά μέσα.

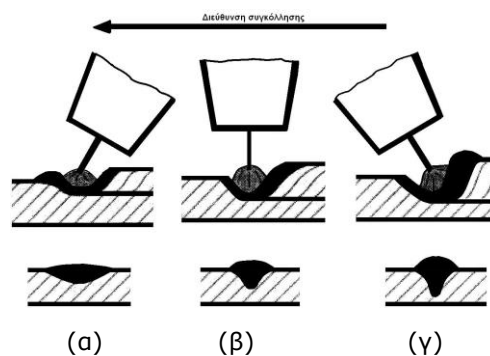
Στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, συχνά εφαρμόζονται παραλλαγές των κανονισμών σε ότι αφορά τη διαμόρφωση των ακμών, σαν και αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 2.44.



Εικόνα 2.44 Διαμόρφωση ακμών στις συγκολλήσεις ναυπηγικού αλουμινίου

Καθώς το αλουμίνιο είναι μαλακό υλικό η αποδοτικότητα τέτοιων παραλλαγών μπορεί να διερευνηθεί, καθώς η προετοιμασία τους δεν είναι χρονοβόρα και δεν επιφέρει φθορά στα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Με τη γεωμετρία της Εικόνας 2.44, κατά τη συγκόλληση, το τηγμένο μέταλλο ρέει καλύτερα προς την ρίζα της συγκόλλησης η οποία αποκτά ομαλότερη μορφή.

Σε ότι αφορά στη φορά του όπλου σε συγκολλήσεις GMAW και GTAW αυτή ακολουθεί την κατεύθυνση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.45α.



Εικόνα 2.45 Θέσεις όπλου συγκόλλησης σε συγκολλήσεις GMAW, GTAW

Το αέριο προστασίας δηλαδή, προηγείται του λουτρού συγκόλλησης έτσι ώστε να παρέχεται καλύτερη προστασία.

Σε συγκολλήσεις μεγάλου μήκους πρέπει να πραγματοποιούνται πονταρίσματα. Το μήκος κάθε πόντας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10mm ενώ η απόσταση μεταξύ τους θα πρέπει να είναι ανάλογη του συνολικού μήκους της συγκόλλησης. Έτσι για παράδειγμα, σε συγκόλληση συνολικού μήκους μεγαλύτερο από 700 mm κάθε ποντάρισμα θα πρέπει να απέχει από το προηγούμενο απόσταση περίπου 200 mm.

Προβλήματα δημιουργίας κρατήρα σε πονταρίσματα πρέπει να αφαιρούνται με μηχανικό τρόπο (τρόχιμα) πριν τη διενέργεια της συγκόλλησης.

Οι συγκολλήσεις, μετά την ολοκλήρωσή τους, δεν θα πρέπει να επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες παρά μόνο αφού αυτές ελεγχθούν και κριθούν αποδεκτές.

Εμφάνιση εγχυτήρων πρέπει να αφαιρούνται (με μηχανικά μέσα - τροχούς) μόνο όταν η παρουσία τους δημιουργεί πρόβλημα στην προσαρμογή του συγκολλημένου στοιχείου στην κατασκευή ή υπάρχουν τυχόν λόγοι ασφάλειας (π.χ. τραυματισμοί).

Συγκολλήσεις με υπερμεγέθη μορφή ρίζας δεν θα πρέπει να απορρίπτονται εφόσον δεν δημιουργούν πρόβλημα σε συναρμογές της κατασκευής στην οποία τυχόν ανήκουν

Οπές εξαιτίας της διαδικασίας συγκόλλησης δεν είναι αποδεκτές και πρέπει να διορθώνονται.

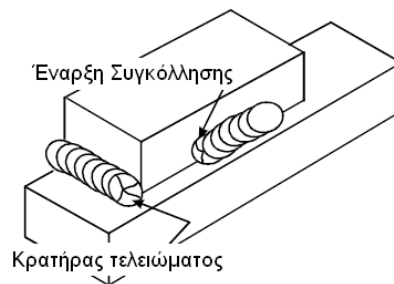
Στο τελείωμα της συγκόλλησης και προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα ρωγμών κρατήρα, είναι δυνατό να αντιστραφεί στο τελείωμα της η φορά συγκόλλησης για μια απόσταση ως 50mm περίπου.

Μετά το τέλος της συγκόλλησης η οπτική τους επιθεώρηση μπορεί να δώσει μια καλή εκτίμηση για την ποιότητά τους. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγεθυντικοί φακοί, διεισδυτικά υγρά, πρότυπα δοκίμια ή κλίμακες. Μακρο-χημική προσβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης για επιθεώρηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

Κριτήρια για την αποδοχή της συγκόλλησης, έπειτα από οπτικό έλεγχο, αποτελούν τα παρακάτω:

- 1) Το «πρόσωπο» και η ρίζα της συγκόλλησης δεν πρέπει να έχουν ρωγμές
- 2) Όλοι οι κρατήρες πρέπει να είναι γεμισμένοι με υλικό προσθήκης.
- 3) Οι ακμές της συγκόλλησης πρέπει να παρουσιάζουν μια ομαλή συνέχεια με το βασικό μέταλλο.
- 4) Οι υποκοπές δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 0,254 mm.
- 5) Η ρίζα πρέπει να υποδεικνύει πλήρη διείσδυση ή ικανοποιητική διείσδυση ανάλογα με την περίπτωση.

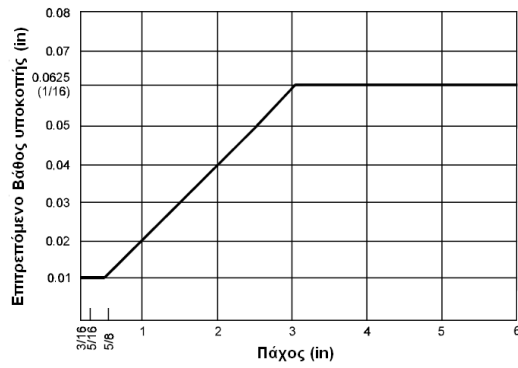
Εκτός κι αν υπάρχει κάποια ειδική οδηγία ή προδιαγραφή, η συγκόλληση δεν θα πρέπει να περιλαμβάνει ρωγμές εκτός από την αρχή και το τέλος της. Η ρωγμάτωση στην αρχή της συγκόλλησης επιτρέπεται εφόσον το συνολικό της μήκος δεν υπερβαίνει τα 6,35 mm ή το 20% του μήκους συγκόλλησης, όποιο μέγεθος από τα δύο είναι μικρότερο (Εικ. 2.46).



Εικόνα 2.46 Εμφάνιση ρωγμών στην αρχή και το τέλος της συγκόλλησης

Η ατελής τήξη οποιασδήποτε φύσης και μορφής δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10% - 20% του πάχους του μετάλλου ή τα 1,27 - 1,524 mm, όποιο μέγεθος από τα δύο είναι μικρότερο, για κρίσιμες και όχι ιδιαίτερα κρίσιμες συγκολλήσεις αντίστοιχα.

Οι επιτρεπόμενες τιμές του μεγέθους των υποκοπών δίνονται και στο διάγραμμα της Εικόνας 2.47. Ωστόσο, αυτές εξαρτώνται από το συνολικό μήκος της εκάστοτε ραφής και προσαρμόζονται ανάλογα. Σε κάθε περίπτωση οι υποκοπές δεν θα πρέπει να εμφανίζονται από τη μία μόνο πλευρά της συγκόλλησης.



Εικόνα 2.47 Επιτρεπόμενες τιμές του μεγέθους των υποκοπών

Για την ελαχιστοποίηση φαινομένων συστολής, στρέβλωσης ή/και παραμόρφωσης συνηθίζεται η προφόρτιση των υπό συγκόλληση τεμαχίων ώστε να αντισταθμιστεί η στρέβλωση και τελικά να μειωθεί ή και να εξαλειφθεί.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μηχανικοί περιορισμοί για τον περιορισμό της συστολής, θα πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε αυτοί να αφαιρούνται πριν την τελική ψύξη του συγκολλημένου μετάλλου για να εξασφαλίζεται η αποφυγή ρωγμάτων.

Βιβλιογραφία

- 1.** Β.Ι.Παπάζογλου, 'Ναυπηγική Τεχνολογία', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995
- 2.** Β.Ι.Παπάζογλου, Γ.Παπαδημητρίου, 'Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1994
- 3.** Δ. Ι. Παντελής, Γ. Χρυσουλάκης, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996
- 4.** Θ.Α.Διαμαντούδης, 'Συγκολλήσεις Μετάλλων', Θεσσαλονίκη, 2000
- 5.** 'Χρήση και εφαρμογή αλουμινίου στην σύγχρονη Ναυπηγική Βιομηχανία', Σεμιναριακές Σημειώσεις υπό την αιγίδα του Ελληνικού Ινστιτούτου Ναυτικής Τεχνολογίας, Πειραιάς, 11-12 Οκτωβρίου, 2000
- 6.** Πληροφοριακό Δελτίο Γερμανικού Οργανισμού Συγκολλήσεων και συναφών δραστηριοτήτων, 'Συγκόλληση MIG Αλουμινίου - Βάσεις ανάλογα με τα υλικά', DVS0961, Απρίλιος, 1999
- 7.** Πληροφοριακό Δελτίο Γερμανικού Οργανισμού Συγκολλήσεων και συναφών δραστηριοτήτων, 'Συγκόλληση MIG Αλουμινίου - Υλικά, και παράμετροι συγκόλλησης', DVS0933, Σεπτέμβριος, 1991
- 8.** ANSI/AWS D3.7-83, 'Guide for Aluminum hull welding', ANSI/AWS, 1983
- 9.** ANSI/AWS D1.2-83, 'Structural Welding Code - Aluminum', ANSI/AWS, 1983
- 10.** AWS, Welding Handbook, 'Metals and their weldability', Seventh Edition, Vol. 4, 1984
- 11.** ASM Handbook, Vol. 2, 'Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials', ASM, 10th Edition Vol. 2, November 1990
- 12.** ASM Handbook, Vol 6, 'Welding, brazing, and Soldering', ASM, 10th Edition, Vol. 6, January, 1994
- 13.** R. J. Sacks, 'Essentials of Welding', Glencoe/McGraw-Hill, 1984

- 14.** Air products PLC, 'Welder's Handbook', Air products PLC, 3rd Edition, 1999
- 15.** 'Aluminum Welding Code for Ground Combat Vehicle. Based on the American Welding Society's ANSI/AWS D1.2 Structural Welding Code - Aluminum', U.S. Army's Armament Research, Development and Engineering Center in Dover, NJ, U.S. Army's Tank-Automotive and Armament Research, Development and Engineering Center, Warren, MI, United Defense, L.P.'s Ground Systems Division's, Aiken, SC, San Jose, CA, York, PA sites, Rev. C - 15 February, 2000
- 16.** The Aluminum Association, 'Aluminum Standards and Data', The Aluminum Association, Eighth edition, December 1984
- 17.** Lincoln electric, 'Aluminum MIG Welding Guide' The Lincoln Electric CoMPany, 2000
- 18.** W. M. Thomas, E. D. Nicholas, E. R. Watts, D. G. Staines, 'Friction based welding technology for aluminium', Paper presented at The 8th International Conference on Aluminium Alloys, Cambridge, UK, 2 - 5 July, 2002
- 19.** R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, 'Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties' Progress in Materials Science, Vol. 53 (2008), pp. 980–1023
- 20.** J. C. Ion, 'Laser beam welding of wrought aluminium alloys', Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 5, 2000, No. 5, pp. 265 - 276
- 21.** Z. Li, S. L. Gobbi, 'Laser welding of Lightweight structures', Journal of Materials Processing Technology, Vol. 70, 1997, pp. 137 - 144
- 22.** Frank Armao, 'The "ins and outs" of Welding Aluminum', The Lincoln Electric CoMPany, FAB - Canada, January, 2001
- 23.** ALCOTEC wire corporation, 'Repairing aluminum structures, welding tip web page', ALCOTEC wire corporation, 2001
- 24.** SeaArk Marine, 'Why Aluminum?', SeaArk Marine, Inc., Monticello, 2000
- 25.** Michael Kasten, 'Metal Boats For Blue Water' Kasten Marine Design Inc., 2001
- 26.** Michael Kasten, 'Aluminum For Boats', Kasten Marine Design Inc., 2001

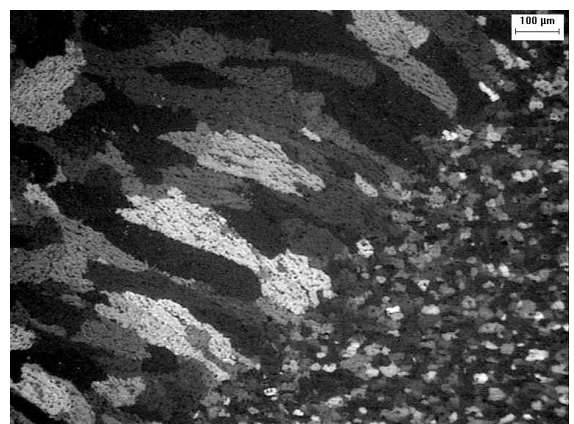
- 27.** Michael Kasten, 'Strength of Aluminum vs Strength of Steel', Kasten Marine Design Inc., 2001
- 28.** Ιστοσελίδα Διεθνούς Ινστιτούτου Αλουμινίου (I.A.I.): <http://www.world-Aluminium.org>
- 29.** Ιστοσελίδα της βιομηχανίας αλουμινίου της Δανίας, εγχειρίδιο ενημέρωσης σχετικά με το αλουμίνιο και τα κράματα του: <http://www.alu-info.dk/Html/alulib/modul/albook40.htm> (Alubook-Lexical knowledge about Aluminium)
- 30.** Ιστοσελίδα του Βρετανικού Ινστιτούτου συγκολλήσεων: <http://www.twi.co.uk>
- 31.** Masubuchi, K., Analysis of welded structures, Pergamon Press, Oxford, 1980
- 32.** F.C. Liu, Z.Y. Ma, 'Achieving exceptionally high superplasticity at high strain rates in a micrograined Al-Mg-Sc alloy produced by friction stir processing' Scripta Materialia, Vol. 59 (2008), pp. 882-885
- 33.** J. Montalvo-Urquizo, Z. Akbay, A. Schmidt, 'Adaptive finite element models applied to the laser welding problem' Computational Materials Science, Vol. 46 (2009), pp. 245-254
- 34.** P. Praveen, P.K.D.V. Yarlagadda, M.J. Kang, 'Advancements in pulse gas metal arc welding' Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165 (2005), pp. 1113-1119
- 35.** Chao-Ting Chi, Chuen-Guang Chao, Tzeng-Feng Liu, and Chuan-Hua Lee, 'Aluminum element effect for electron beam welding of similar and dissimilar magnesium-aluminum-zinc alloys' Scripta Materialia, Vol. 56 (2007), pp. 733-736
- 36.** I. Magnabosco, P. Ferro, F. Bonollo, L. Arnberg, 'An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel' Materials Science and Engineering A, Vol. 424 (2006), pp. 163-173
- 37.** A. Ancona, T. Sibillano, L. Tricarico, R. Spina, P.M. Lugara, G. Basile, S. Schiavone, 'CoMPArison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy' Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165 (2005), pp. 971-977
- 38.** T.Y. Kuo, H.C. Lin, 'Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys' Materials Science and Engineering A, Vol. 416 (2006), pp. 281-289

- 39.** G. CaMPana, A. Ascari, A. Fortunato, G. Tani, 'Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 5588–5590
- 40.** J.M. Sanchez-Amaya, T. Delgado, L. Gonzalez-Rovira, F.J. Botana, 'Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 9512–9521
- 41.** R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, 'Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties' *Progress in Materials Science*, Vol. 53 (2008), pp. 980–1023
- 42.** Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, 'Friction Stir Welding and Processing', ASM International, 2007



ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η

**Μεταλλογραφική Μελέτη Συγκολλήσεων GMAW
Ναυπηγικών Κραμάτων Αλουμινίου, Σειράς 5xxx**



Κεφάλαιο 3°

Βιβλιογραφική επισκόπηση μελέτης μεταλλογραφίας συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου

Ο Dickerson^[1] αναφέρει ότι το αλουμίνιο, αν και μπορεί να συγκολληθεί με τις περισσότερες μεθόδους από οποιοδήποτε άλλο μέταλλο, έχει αρκετές φυσικές και χημικές ιδιότητες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησής του. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους οι κυριότερες από τις ιδιότητες αυτές είναι τα χαρακτηριστικά των οξειδίων του, η διαλυτότητα του υδρογόνου στο τηγμένο αλουμίνιο, τα θερμικά, ηλεκτρικά και μη μαγνητικά χαρακτηριστικά του, το μειονέκτημα της μη αλλαγής του χρώματός του όταν θερμαίνεται και το μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων και σημείων τήξης που έχουν τα κράματα του.

Σε ότι αφορά τις τελικές μηχανικές ιδιότητες αλλά και συνολικά τη συμπεριφορά μιας αλουμινένιας συγκολλητής κατασκευής, σπουδαιότατο ρόλο παίζουν η μακροδομή και μικροδομή του βασικού μετάλλου και φυσικά των συγκολλήσεων που προκύπτουν.

Πολλοί ερευνητές έχουν διερευνήσει τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των κραμάτων διαμόρφωσης τα οποία παίζουν πρωταρχικό ρόλο στις συγκολλήσεις τους. Έτσι, έχουν μελετηθεί τόσο οι αλλαγές της μικροδομής των κραμάτων αυτών υπό τις διαφορετικές κατεργασίες αύξησης της αντοχής τους^[2-5], όσο και η επίδραση των διαφόρων κατακρημνισμάτων που υπάρχουν στο εσωτερικό τους^[6-7] στις μηχανικές ιδιότητες τους.

Οι μεταβολές στη μικροδομή που συμβαίνουν κατά τις συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου, συχνά δημιουργούν περιοχές που αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων αυξάνοντας την πιθανότητα έναρξης ρωγμών. Η μορφή της ραφής και η τοπογραφία της επιφάνειας της, δρουν επίσης ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων και επομένως επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες και κυρίως στην έναρξη ρωγμών. Η θερμότητα που παράγεται από τις μεθόδους τήξης επηρεάζει τη μικροδομή του υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης αλλά και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Ο συνολικός θερμικός κύκλος της συγκόλλησης επιδρά στη μορφή, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των κόκκων σε ολόκληρη την περιοχή της συγκόλλησης.

Έρευνες ανά τον κόσμο έχουν επικεντρωθεί στο χαρακτηρισμό της μικροδομής των κραμάτων αλουμινίου έπειτα από τη συγκόλληση τους με τις διάφορες γνωστές τεχνικές. Έχουν μελετηθεί συγκολλήσεις τόσο μεταξύ όμοιων, όσο και μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου αλλά και αυτών με άλλα μέταλλα.

Η μέθοδος συγκόλλησης FSW βρίσκει ολοένα και ευρύτερη εφαρμογή και οι ανακοινώσεις που αφορούν τη διερεύνηση της μικροδομής των συγκολλήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή της είναι πολλές. Στην Εικόνα 3.1 φαίνονται οι διαφορετικές ζώνες συγκόλλησης της τεχνικής FSW όπως έχουν αντληθεί από τις διάφορες δημοσιεύσεις^[8-26].



Εικόνα 3.1 Οι διαφορετικές χαρακτηριστικές ζώνες τις τεχνικής FSW

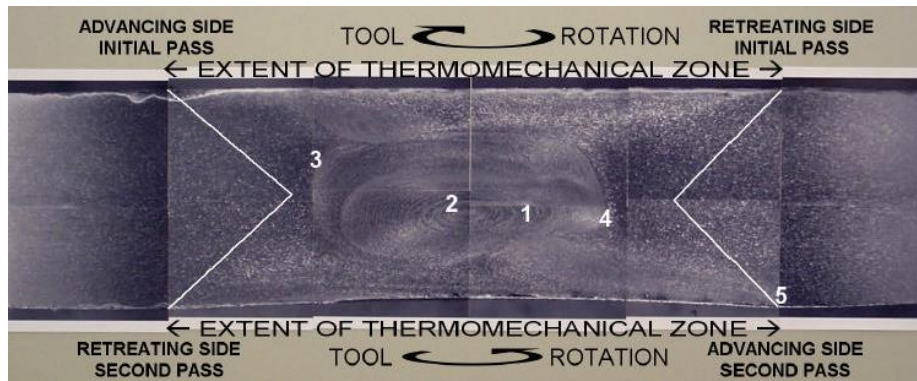
Όπου, A: Το ανεπηρέαστο βασικό μέταλλο

B: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.), με κύριο χαρακτηριστικό την ανακρυστάλλωση των κόκκων εξαιτίας της θερμότητας που αναπτύσσεται από τη μέθοδο και κανένα σημάδι πλαστικής τους παραμόρφωσης

C: Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Μ.Ε.Ζ.), με έντονα σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης των κόκκων εξαιτίας της ανάδευσης που προκαλείται στο υλικό από την κεφαλή της συγκόλλησης. Δεν παρατηρούνται σημάδια τήξης.

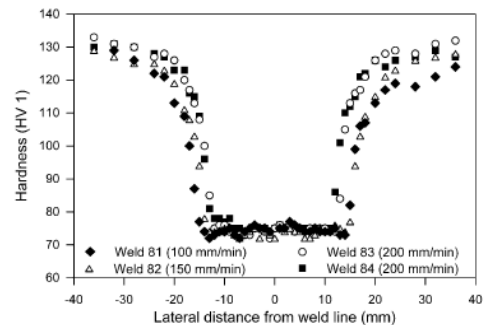
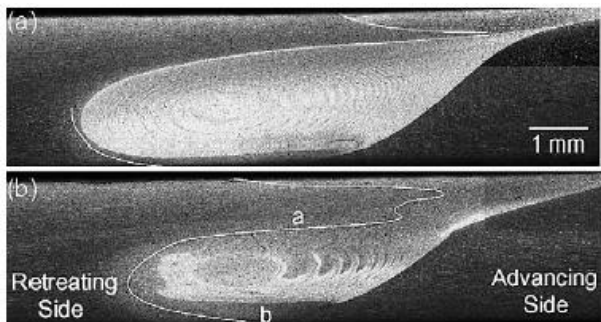
D: Ζώνη ανάδευσης στο κέντρο της συγκόλλησης (υπο-τμήμα της ΘΜΕΖ), όπου κοντά στο άκρο παρατηρούνται σημάδια δυναμικής ανακρυστάλλωσης εξαιτίας της θερμότητας από την τριβή του μετάλλου με το άκρο της κεφαλής της συγκόλλησης.

Οι G.R. Bradley, M.N. James^[8] μελέτησαν τη γεωμετρία και τη μικροδομή της περιοχής της συγκόλλησης FSW ελασμάτων από κράμα αλουμινίου 5383-H321, διαστάσεων 100x500x8mm³. Πραγματοποίησαν δοκιμές με ένα και δύο περάσματα της κεφαλής ανάδευσης και στη συνέχεια, σε τομές των συγκολλήσεων, προχώρησαν σε χαρακτηρισμό και προσδιορισμό του μεγέθους της κάθε ζώνης συγκόλλησης, ενώ πραγματοποίησαν και μετρήσεις του μεγέθους των κόκκων σε καθεμία από τις ζώνες αυτές (Εικ. 3.2).



Εικόνα 3.2 Εγκάρσια τομή της συγκόλλησης κατά τους G.R. Bradley, M.N. James^[8]

Σε μια παρόμοια έρευνα αλλά με μελετώμενο κράμα το 5083 σε πάχος 3mm, οι M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers^[13], εξέτασαν τη μικροδομή με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Παρατήρησαν ότι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, της οποίας το πλάτος μετρήθηκε στα 30mm, αποτελείται από ισοαξονικούς κόκκους. Μετρήσεις μικροσκληρότητας όπως και στην περίπτωση των G.R. Bradley, M.N. James^[8] έδωσαν τιμές χαμηλότερες από το μέταλλο βάσης εξαιτίας της ανακρυστάλλωσης που έχει συμβεί.



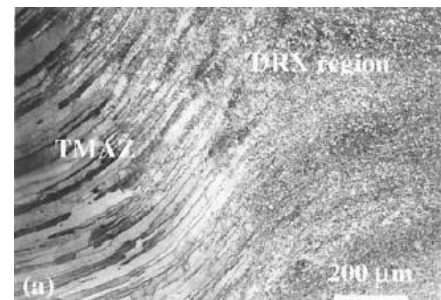
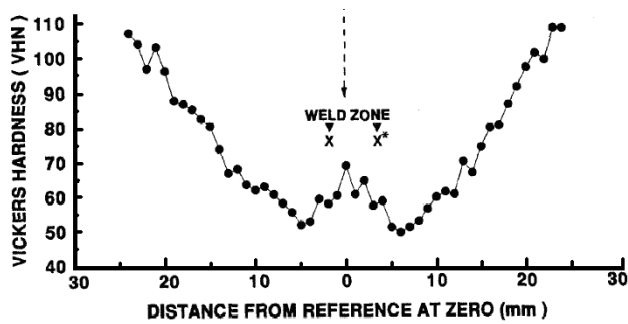
Εικόνα 3.3 Εγκάρσια τομή της συγκόλλησης και μικροσκληρομετρήσεις κατά τους M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers^[13]

Ερευνητές που επίσης χρησιμοποίησαν το κράμα αλουμινίου 5083 αλλά υπό κατεργασία H321 ήταν οι M.N James, D.G. Hattingh, G.R. Bradley^[15], οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης FSW, στη συχνότητα εμφάνισης εσωτερικών ατελειών. Επιπλέον αντικείμενο μελέτης ήταν ο προσδιορισμός της μορφής αυτών των ατελειών. Το πάχος των ελασμάτων που μελετήθηκαν ήταν 8mm και οι διαστάσεις 500×100mm². Οι μετρήσεις σκληρότητας κατά Vickers έδειξαν μείωση των τιμών από 105 HV στο μέταλλο βάσης, σε 81-85 HV στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, της οποίας το εύρος βρέθηκε να εκτείνεται σε απόσταση περίπου 15mm εκατέρωθεν της κεντρικής γραμμής της συγκόλλησης. Η μέση τιμή της σκληρότητας

στο συγκολλημένο μέταλλο βρέθηκε για την μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης, 90 HV ενώ για την μικρότερη ταχύτητα 87,5 HV.

Συγκολλήσεις FSW έχουν φυσικά πραγματοποιηθεί και σε θερμικώς κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου. Ο Κ. Colligan^[9], προχώρησε σε μελέτη δύο διαφορετικών θερμικώς κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου, των 6061 και 7075 και οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι καθένα από τα δύο αυτά κράματα, έχει διαφορετικό μηχανισμό ροής γύρω από την κεφαλή ανάδευσης και τελικής απόθεσης. Στο ίδιο συμπέρασμα είχε φτάσει λίγο νωρίτερα και ο Ι.Ε. Murr μαζί με άλλους ερευνητές^[12], μελετώντας τις συγκολλήσεις FSW κραμάτων αλουμινίου σειράς 1xxx (1100) και 6xxx (6061).

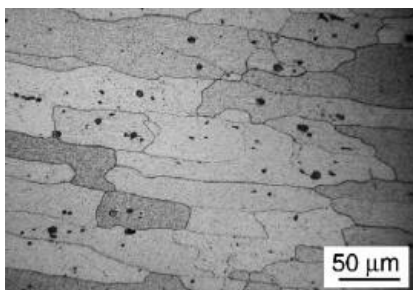
Παρόμοιες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε κράματα όπως το 6061^[26] και το 6082^[27], το 2024^{[14], [20]} και το 2095^[22], αλλά και άλλες πάνω στα κράματα 6xxx^[24] και 7xxx^[23].



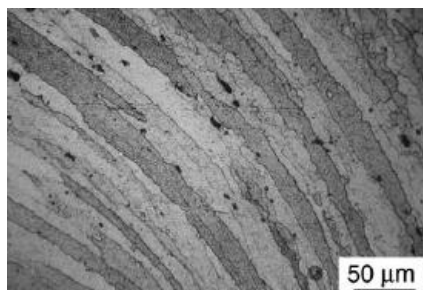
(α)

(β)

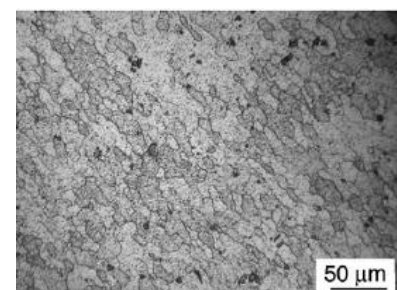
Εικόνα 3.4 α) Μικροσκληρομετρήσεις σε συγκόλληση FSW του κράματος 6061^[26], β) Περιοχή σύνδεσης Θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και ζώνης δυναμικής ανακρυστάλλωσης κατά τους Κ.Υ. Jata και S.L. Semiatin^[23]



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 3.5 Μικρογραφίες συγκόλλησης FSW από τους Μ. Cabibbo και Ε. Meccia^[24] α) Βασικό μέταλλο, β) Πλαστικά παραμορφωμένοι κόκκοι στη ΘΜΕΖ, γ) Περιοχή ανακρυσταλλωμένων κόκκων (ΘΕΖ)

Μεταλλογραφική μελέτη συγκολλήσεων FSW έχει πραγματοποιηθεί και σε συγκολλήσεις μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου ακόμα και μεταξύ κραμάτων διαμόρφωσης με κράματα χύτευσης αλουμινίου^[19]. Οι L.E. Murr, Ying Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, και J.C. McClure^[12], μελέτησαν τη μικροδομή σε συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου 6061 και 2024. Κατά τη μελέτη που πραγματοποίησαν, παρατηρήθηκαν τα συνήθη χαρακτηριστικά στις διάφορες ζώνες συγκόλλησης όπως, δυναμική ανακρυστάλλωση και περιορισμένη μεγέθυνση κόκκων. Συνολικά, αποκάλυψαν δομή παρόμοια με μορφή μη-γραμμικών δυναμικών φαινομένων που παρουσιάζουν τα ρευστά, η οποία όμως ήταν εξολοκλήρου αποτέλεσμα της διαδικασίας συγκόλλησης και αντιστοιχεί σε ακραία πλαστική ροή στερεάς κατάστασης. Μέσα στη ζώνη συγκόλλησης δεν παρατήρησαν ίχνη τήξης.

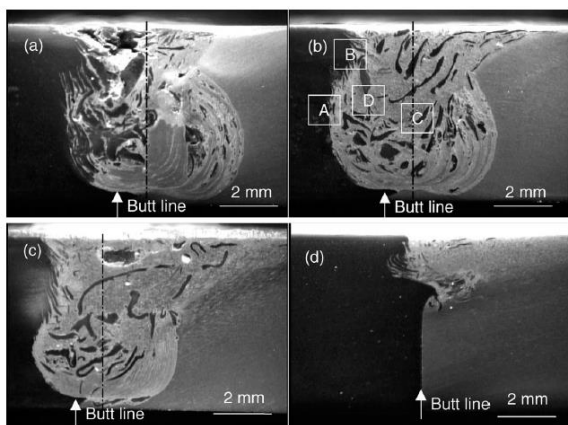
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα του I. Shigematsu όπου μαζί με ομάδα άλλων ερευνητών^[16], πραγματοποίησαν με επιτυχία συγκολλήσεις με διάφορους συνδυασμούς των κραμάτων 5083 και 6061. Τα συγκολλημένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μεταλλογραφική μελέτη με χρήση οπτικού μικροσκοπίου, ενώ το προφίλ της μικροσκληρότητας κατά Vickers εξετάστηκε σε άξονα κάθετο στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι ερευνητές, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ιδιότητες της συγκόλλησης, όπως το προφίλ της σκληρότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό, επηρεάζονται σημαντικά από το συνδυασμό των υλικών. Στη συγκόλληση του 5083 με το 6061 οι τιμές της σκληρότητας ήταν ελαφρώς υψηλότερες από την αρχική τιμή του μετάλλου βάσης, λόγω της εκλείπτωσης των κόκκων. Ωστόσο στην περίπτωση της συγκόλλησης του 6061 με το 6061 οι τιμές της σκληρότητας μειώνονται δραστικά.

Καθώς η μέθοδος συγκόλλησης FSW είναι στερεάς κατάστασης, γίνεται ελκυστική για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων μεταξύ κραμάτων αλουμινίου και χαλύβων, Οι S. Fukumoto, H. Tsubakino, K. Okita, M. Aritoshi και T. Tomita^[10], αναφέρουν πως όταν εφαρμόζονται τεχνικές συγκόλλησης με τήξη, σε σύστημα Al - Fe, δημιουργούνται πολλές ψαθυρές μεσομεταλλικές ενώσεις που υποβαθμίζουν την αντοχή της συγκόλλησης. Έτσι, καθώς η FSW αποτελεί μια τεχνική στερεάς κατάστασης, κατά την εφαρμογή της σε συγκολλήσεις Al - Fe δεν δημιουργούνται πολλές τέτοιες ενώσεις στη ζώνη συγκόλλησης. Βέβαια, καθώς η διαλυτότητα στο σύστημα Al - Fe είναι σχεδόν μηδενική, θα πρέπει να υπάρχει κάποιος ικανός αριθμός τέτοιων μεσομεταλλικών ενώσεων ώστε να υπάρξει ικανοποιητική ένωση. Σε συγκολλήσεις με τριβή μέσω περιστροφής, ράβδων από κράμα αλουμινίου 5052 και ανοξείδωτου χάλυβα 304, πραγματοποιήθηκαν παρατηρήσεις με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διερχόμενης δέσμης και φασματοσκοπική ανάλυση. Αποκαλύφθηκε μια άμορφη ζώνη Al - Fe εξαιτίας μηχανικής κραμάτωσης και αντιδράσεων

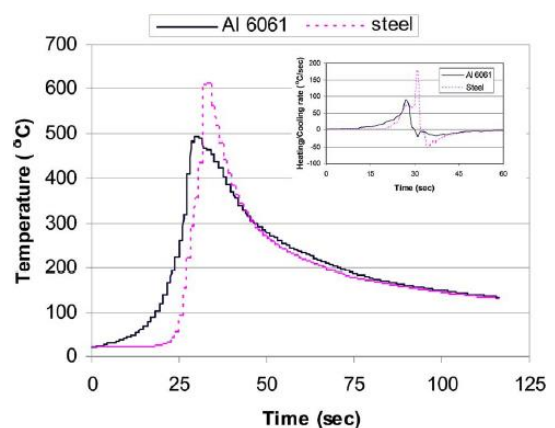
στερεής κατάστασης και μεσομεταλλικές ενώσεις Fe_2Al_5 ως αποτέλεσμα της θερμότητας από την τριβή.

Άλλοι ερευνητές, με επικεφαλής τον W.B. Lee^[18] χρησιμοποίησαν την FSW για να συγκολλήσουν κι αυτοί το κράμα 5052 με τον χάλυβα A36. Μελετήθηκε η μικροδομή των διεπιφανειών της συγκόλλησης μέσω οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), ενώ η περιοχή της δυναμικής ανακρυστάλλωσης προσδιορίστηκε μέσω αναλυτή εικόνας (image analyzer). Από τη μελέτη προκύπτει ότι το κράμα αλουμινίου 5052 μεταμορφώθηκε σημαντικά σχηματίζοντας τις τυπικές ζώνες συγκόλλησης: α) περιοχή δυναμικής ανακρυστάλλωσης, β) θερμικά επηρεασμένη και παραμορφωμένη ζώνη, γ) θερμικά επηρεασμένη ζώνη και δ) μέταλλο βάσης. Οι κόκκοι βρέθηκαν εκλεπτυσμένοι και ισοαξονικοί κοντά στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης και επιμήκεις στα άκρα της περιοχής δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Ο χάλυβας A36 δεν παραμορφώθηκε ενώ μια μαλακή περιοχή δημιουργήθηκε κοντά στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, αυξανόμενης της πίεσης η περιοχή αυτή μικραίνει, ενώ αυξανόμενου του χρόνου τριβής η περιοχή αυτή γίνεται πιο πλατιά. Το μέγιστο πάχος της εν λόγω περιοχής ήταν ~8 mm. Επιπλέον, το πάχος του μεσομεταλλικού στρώματος που αντιδρά, αυξάνει με την αύξηση του χρόνου τριβής ενώ παρατηρήθηκε ότι ήταν παχύτερο στη περιφερειακή περιοχή σε σχέση με την κεντρική περιοχή και προσδιορίστηκε ότι αποτελείται από ενώσεις $FeAl$ και MgO .

Πρόσφατα πραγματοποιήθηκαν και συγκολλήσεις μεταξύ μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου σειράς 6xxx και ανοξειδωτων χαλύβων^[21]. Η Εικόνα 3.6 δείχνει τη μορφή της ζώνης σύνδεσης μεταξύ του 6061 και του AISI1018 καθώς και το μετρούμενο θερμικό κύκλο της συγκόλλησης.



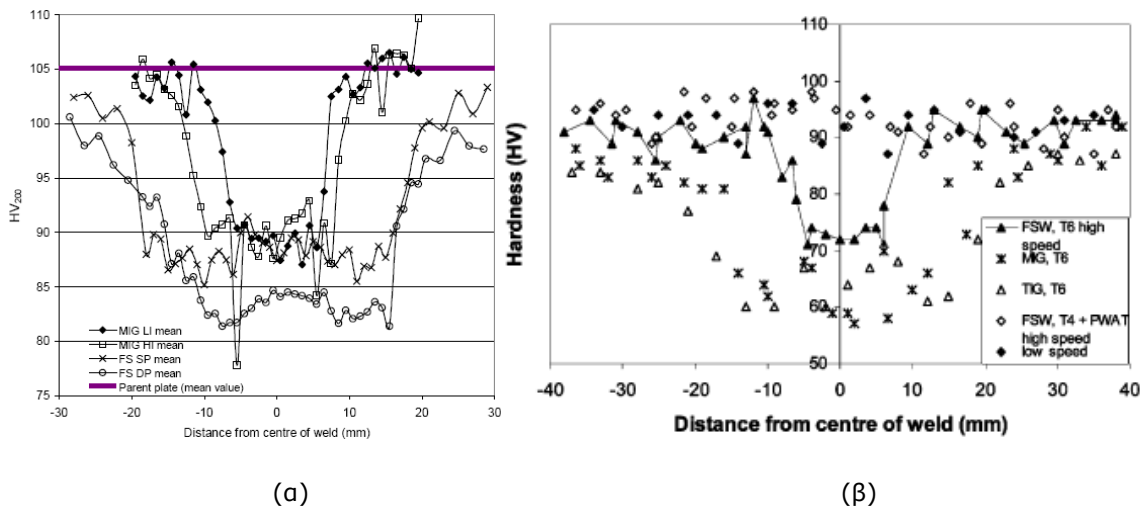
(α)



(β)

Εικόνα 3.6 Συγκόλληση FSW μεταξύ AA6061 και AISI1018 α) Μικρογραφίες τομής της συγκόλλησης, β) θερμικός κύκλος συγκόλλησης για τα δύο κράματα

Αναπόφευκτη βέβαια είναι η σύγκριση των μικροδομών και των ιδιοτήτων τους που προκύπτουν από την FSW με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης τόξου GMAW και GTAW. Τέτοιες συγκρίσεις έχουν πραγματοποιηθεί για παράδειγμα από τους G.R. Bradley, M.N. James^[8] (Εικ 3.7α) και από τους M. Ericsson, R. Sandström^[27] (Εικ 3.7β).



Εικόνα 3.7 Σύγκριση μικροσκληρομετρήσεων α) Συγκόλλησης FSW και GMAW^[8], β) FSW GMAW και GTAW ^[27]

Σε ότι αφορά στη μεταλλογραφική μελέτη συγκολλήσεων με χρήση δέσμης λέιζερ, κραμάτων αλουμινίου, αυτές εξαρτώνται κυρίως από τη φύση της δέσμης που χρησιμοποιείται καθώς και από τις παραμέτρους συγκόλλησης που ισχύουν για τη μέθοδο αυτή.

Έτσι, οι S. Ramasamy και C. E. Albright^[28], σε κράμα αλουμινίου 5754 - Ο πραγματοποίησαν συγκολλήσεις με χρήση δέσμης λέιζερ (CO₂ και Nd - YAG) ισχύος 3kW και 5kW. Εφαρμόζοντας διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης, εξέτασαν την επίδραση τους στη μορφή και το σχήμα της ραφής, στη μορφολογία των κόκκων στις διάφορες ζώνες του συγκολλημένου μετάλλου και στις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου μετάλλου μέσω σκληρομετρήσεων και δοκιμών εφελκυσμού.

Ο H. Kanazawa^[29], χρησιμοποιώντας ένα 4kW YAG λέιζερ έκανε πειράματα συγκόλλησης σε κράματα αλουμινίου διαφόρων σειρών και συνέκρινε το βαθμό διεισδυσης και το ποσοστό πορώδους. Επίσης, έλεγξε την ευαισθησία σε ρωγμάτωση των διαφόρων κραμάτων ενώ κατέγραψε την επίδραση των διαφορετικών τύπων κύματος (συνεχούς και παλμικού).

Σε δύο διαφορετικές αναφορές, οι A. Katsunawa, S. Katayama και K. Kojima^{[30],[31]}, μελέτησαν συνολικά συγκολλήσεις με δέσμη λέιζερ CO₂ εμπορικών κραμάτων αλουμινίου όπως τα 5052, 5083 και 6061 σε πάχος 6mm. Μελετήθηκε, η επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως η ισχύς της δέσμης,

η ταχύτητα συγκόλλησης, η απόσταση αφεστίασης, οι συνθήκες του αερίου προστασίας κ.λπ. στο βάθος διείσδυσης^[30]. Επίσης καταγράφηκε η επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στη δημιουργία πορώδους^[31]. Παρατηρήθηκε ότι το πορώδες μειώνεται όταν υπάρχει ροή του αερίου προστασίας πριν από τη συγκόλληση, όταν οι επιφάνειες είναι επαρκώς καθαρισμένες ώστε να απαλείφονται πηγές παραγωγής υδρογόνου, όταν οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπεται η ροή των φυσαλίδων εγκλωβισμένου αερίου προς την επιφάνεια του λουτρού συγκόλλησης και όταν χρησιμοποιείται άζωτο ή ήλιο αντί αργού. Επιπλέον, βρέθηκε ότι η απόσταση αφεστίασης της δέσμης είναι σημαντικότερος παράγοντας στη δημιουργία πορώδους και μάλιστα όσο η απόσταση αυτή αυξάνει, το πορώδες μειώνεται. Σε συνθήκες συγκόλλησης υψηλών ταχυτήτων παρατηρήθηκε και ρωγμάτωση στερεοποίησης.

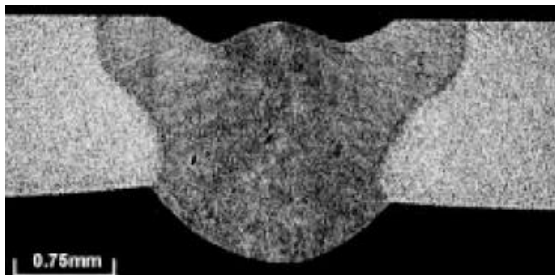
Ανάλογη μελέτη πραγματοποίησαν οι W. Xijing, S. Katayama και A. Matsunawa^[32], οι οποίοι πραγματοποίησαν συγκολλήσεις Nd:YAG λέιζερ συνεχούς κύματος, κραμάτων αλουμινίου 5052 και 5083. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν $100 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$ ενώ μελετήθηκε η εξάχνωση του μαγνησίου από το μέταλλο συγκόλλησης. Βρέθηκε ότι η εξάχνωση ήταν μεγαλύτερη στην επιφάνεια και το κέντρο της ζώνης τήξης ενώ παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας την ροή του αερίου προστασίας αυξάνει και η απορροφητικότητα της δέσμης. Επιπλέον, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μικρή αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης αυξάνει την απορροφητικότητα της, συνεπώς και τη διείσδυση της συγκόλλησης.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε και η έρευνα των M. Pastor, H. Zhao, R. P. Martukanitz, T. Debroy^[33], για τις συγκολλήσεις με χρήση δέσμης λέιζερ των κραμάτων 5182 και 5754 ενώ ο J.S. Kim, με την ερευνητική του ομάδα^[34], μελέτησε αποκλειστικά την επίδραση της αφεστίασης της δέσμης στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης και στη δημιουργία του πορώδους.

Άλλοι ερευνητές^[35], προσδιόρισαν ποσοτικά και ανέλυσαν τις διάφορες ζώνες συγκόλλησης, θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου (6061-T6) χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους συγκόλλησης με δέσμη λέιζερ, ενώ οι A. Hirose, H. Todaka και K. F. Kobayashi^[36], έκαναν συγκολλήσεις πλήρους διείσδυσης με δέσμη λέιζερ CO₂ 2,5kW στο ίδιο κράμα αλουμινίου. Πέτυχαν χαμηλά επίπεδα πορώδους (0,02 - 0,05%), και συνέκριναν το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης με αυτό που εμφανίζεται σε συγκολλήσεις GTAW ήταν κατά 75% μικρότερο. Τη διαφορά αυτή, την απέδωσαν στην επαναφορά των κατακρημνισμάτων σκλήρυνσης β-Mg₂Al₃ από την εισερχόμενη θερμότητα. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι τιμές σκληρότητας ανακτήθηκαν πλήρως μετά από τεχνητή γήρανση, κάτι που δεν συμβαίνει στις συγκολλήσεις GTAW.

Τέλος, από τις δημοσιεύσεις που αξίζει να αναφερθούν, είναι και αυτή των P.A. Friedman και G.T. Kridli^[37], οι οποίοι μελέτησαν τη μικροδομή των συγκολλήσεων λέιζερ Nd:YAG και CO₂, των κραμάτων 5754 - O, 5182 - O και 6111 - T4. Από τις βασικές παρατηρήσεις που έκαναν είναι ότι σε

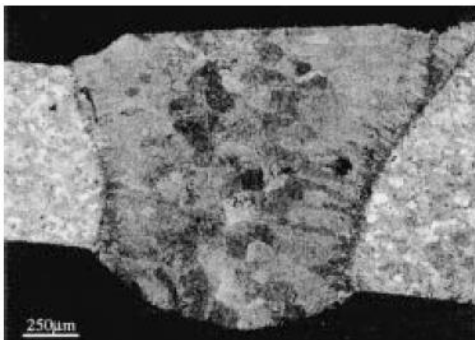
τομές της συγκόλλησης σε επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια του ελάσματος οι επιμηκωμένοι κόκκοι δεν είχαν αναπτυχθεί κάθετα στο βασικό μέταλλο αλλά υπό γωνία με αυτό, και το απέδωσαν στην κίνηση της δέσμης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Σημείωσαν ακόμα ότι η γωνία αυτή μεγαλώνει, όσο αυξάνεται η ταχύτητα συγκόλλησης (Εικ. 3.8)



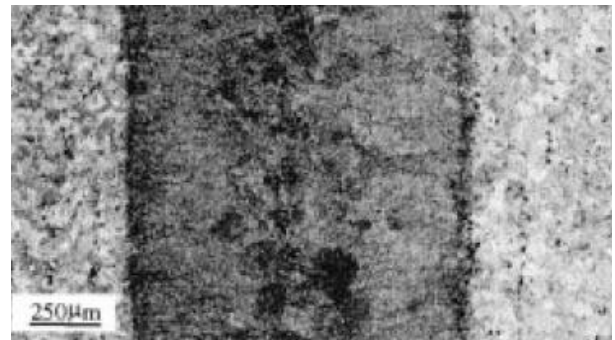
(α)



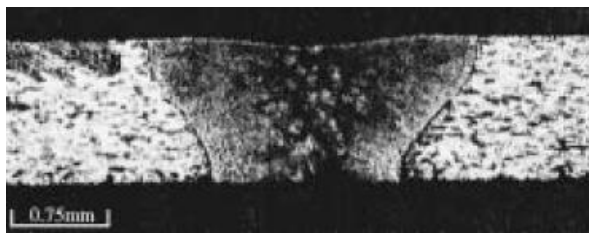
(β)



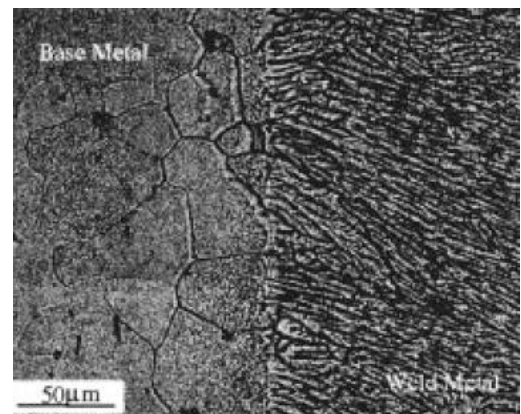
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Εικόνα 3.8 Τομές συγκολλήσεων με δέσμη λέιζερ^[1]. α), β) 5754 – O, γ), δ) 5182 – O, ε), στ) 6111 – T4

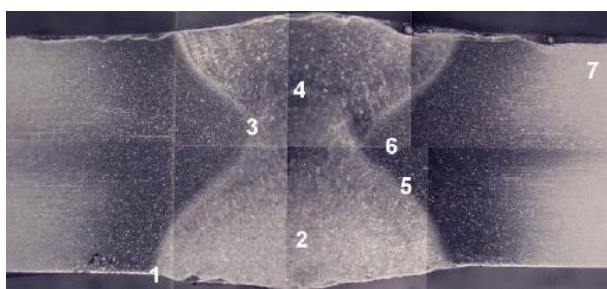
Βέβαια, κυρίαρχη θέση στην έρευνα και μελέτη των συγκολλήσεων των κραμάτων αλουμινίου, έχουν οι τεχνικές τόξου GMAW και GTAW καθώς άλλωστε είναι και οι πρώτες που εφαρμόστηκαν. Σύγχρονες αναφορές της επιστημονικής κοινότητας που έχουν να κάνουν με τη

μεταλλογραφική μελέτη των συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζονται στις γραμμές που ακολουθούν.

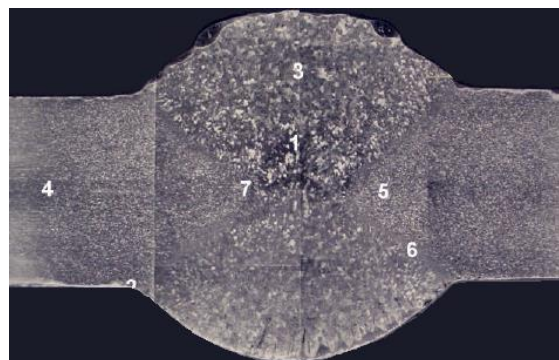
Ο R.C. Calcraft μαζί με άλλους ερευνητές^[38], μετά την πραγματοποίηση συγκολλήσεων GMAW ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου 5456 - H116 και 5383 - H116, σε δοκίμια πάχους 10mm, με γεωμετρία ακμών μορφής διπλού 'V' και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356, πραγματοποίησαν μεταλλογραφική μελέτη των συγκολλήσεων η οποία έδειξε ότι η θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες των συγκολλήσεων του δεύτερου κράματος, ήταν συγκριτικά μεγαλύτερες από εκείνες του πρώτου. Επιπλέον, μετρήσεις μικροσκληρότητας έδειξαν πτώση της αντοχής από 15% στην περιοχή της ΘΕΖ ως 25% στο μέταλλο συγκόλλησης και για τα δύο κράματα.

Το αντικείμενο της έρευνας του S. Rajasekaran^[41] ήταν ο προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων παλμικού ρεύματος ώστε να επιτευχθούν άριστης ποιότητας συγκολλήσεις για δεδομένο μέγεθος ραφής. Χρησιμοποιήθηκε τεχνική απόθεσης μετάλλου GMAW με βασικό μέταλλο το κράμα 5083 και μέταλλο προσθήκης το 5356 σε μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm. Το όπλο συγκόλλησης ήταν σε γωνία 90° με το βασικό μέταλλο και η απόσταση του από αυτό ήταν στα 15mm

Οι G.R. Bradley, M.N. James^[8], πραγματοποίησαν συγκολλήσεις GMAW σε κράμα 5383 - H321 πάχους 8mm και διαστάσεων 1000x500mm². Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα από δυο σειρές πειραμάτων, μία με χαμηλό και μια με υψηλό ρεύμα συγκόλλησης. Προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ραφών που προέκυψαν και αναλύθηκε η μικροδομή των διαφόρων ζωνών συγκόλλησης.



(α)



(β)

Εικόνα 3.9 Φωτογραφίες της τομής της συγκόλλησης α) Συγκόλληση με χαμηλό ρεύμα συγκόλλησης β) συγκόλληση με υψηλό ρεύμα συγκόλλησης^[8]

Σε μια παρόμοια μελέτη οι T. Yuri, T. Ogata, M. Saito και Y. Hirayama^[47], εξέτασαν τη μικροδομή του κράματος 5083 και του συγκολλημένου 5183, με οπτικό μικροσκόπιο. Στο βασικό μέταλλο οι κόκκοι ήταν επιμήκεις κατά τη διεύθυνση της θερμής διέλασης και τα κρυσταλλωμένα σωματίδια, τα οποία παρατηρήθηκε να είναι διασκορπισμένα, μετρήθηκαν στα 10μm. Στο συγκολλημένο κράμα 5183 παρατηρήθηκαν διασκορπισμένα και κρυσταλλωμένα σωματίδια αρκετών μικρομέτρων σε μέγεθος. Η χημική ανάλυση αυτών των σωματιδίων με EDS που πραγματοποίησαν οι ερευνητές, αποκάλυψε ότι τα σωματίδια που παρουσιάζονται στο βασικό μέταλλο αποτελούνται κυρίως από Al, Fe και Mn, ενώ του A5183 αποτελούνται κυρίως από Al, Si και Mg. Ατέλειες λόγω της συγκόλλησης, όπως πορώδες και ρωγμές στο μέταλλο συγκόλλησης δεν αποκαλύφθηκαν.

Σε συγκόλληση GTAW κράματος της σειράς 5xxx^[50], εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων της μεθόδου TIG στις διαστάσεις της ραφής της συγκόλλησης. Χρησιμοποιήθηκε εναλλασσόμενο ρεύμα ενώ το πάχος των δοκιμίων ήταν 3mm. Διερευνήθηκε η επίδραση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, της γωνίας του δαυλού συγκόλλησης ως προς τα δοκίμια, του ρεύματος και της τάσης της συγκόλλησης στη γεωμετρία της ραφής. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι ο ρυθμός αύξησης του πλάτους της ραφής με αύξηση του ρεύματος είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό που λαμβάνεται με μείωση της ταχύτητας πρόωσης. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι το πλάτος της ραφής μπορεί να καθορισθεί αποτελεσματικότερα από την ένταση του ρεύματος της συγκόλλησης, παρά από την ταχύτητα συγκόλλησης. Έτσι, αναφέρεται ότι αυτό, μπορεί να μειωθεί στο μισό με τριπλασιασμό της ταχύτητας προχώρησης, ενώ μπορεί να διπλασιαστεί, αν η ένταση του ρεύματος διπλασιαστεί. Αντίθετα, σημειώνεται ότι το βάθος της ραφής βρέθηκε να είναι πιο ευαίσθητο στην ταχύτητα συγκόλλησης παρά στο ρεύμα συγκόλλησης. Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της μελέτης αυτής είναι ότι το μέσο πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης μειώνεται με την αύξηση της έντασης του ρεύματος ή της ταχύτητας συγκόλλησης. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η επίδραση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου και της γωνίας του δαυλού στο πλάτος της ραφής είναι παρόμοια με την επίδρασή τους στο τόξο. Βρέθηκε ότι το πλάτος της ραφής μειώνεται, ως ένα βαθμό, με αύξηση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου και αυξάνεται, ελάχιστα, με αύξηση της γωνίας του δαυλού.

Οι συγκολλήσεις των κραμάτων της σειράς 5xxx έχουν βέβαια αποτελέσει πεδίο μελέτης και όταν πραγματοποιούνται με την τεχνική EBW^[58] ενώ έχουν υπάρξει και μελέτες που συγκρίνουν την τεχνική αυτή με τις κλασικές GMAW και GTAW^[57].

Αντίστοιχες αναφορές που συγκρίνουν την EBW με τις κλασικές τεχνικές τόξου, υπάρχουν και για τα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου^[45], ωστόσο η εφαρμογή των τεχνικών

GMAW και GTAW στα κράματα αυτά, αποτελούν από μόνες τους ένα μεγάλο κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογίας των συγκολλήσεων.

Ο V. Malin^[54], το 1995 μελέτησε διεξοδικά τα μεταλλουργικά φαινόμενα που συμβαίνουν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη της συγκόλλησης, GMAW και GTAW, του κλασικού ναυπηγικού θερμικά κατεργάσιμου κράματος αλουμινίου 6061-T6. Πραγματοποίησε τόσο μελέτη της μικροδομής όσο και των μέγιστων θερμοκρασιών κατά μήκος του άξονα συγκόλλησης ενώ από τις μικροσκοπιομετρήσεις προέκυψε 50% - 60% μείωση αντοχής στη ΘΕΖ. Ανάλογη μελέτη, στο κράμα 6082-T6, έχει πραγματοποιηθεί και από άλλους ερευνητές^[55], οι οποίοι έδειξαν ότι οι τιμές μικροσκληρότητας είχαν την ελάχιστη τιμή τους σε μια ζώνη του μετάλλου βάσης (μέσα στη ΘΕΖ), που απέχει από τη ζώνη τήξης περίπου 10mm

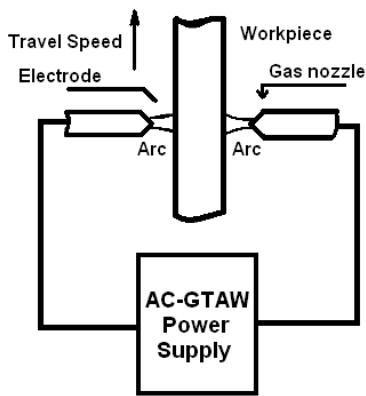
Την ίδια περίπου χρονική περίοδο, οι N.B. Potlari, P.K. Ghosh, P.C. Gupta και Y.S. Reddy^[42], μελέτησαν τη συγκόλληση GMAW του κράματος 7005. Καθώς χρησιμοποίησαν παλμικό ρεύμα, διερεύνησαν την επίδραση στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης των διαφόρων συνδυασμών παραμέτρων του παλμού και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αυτά της συγκόλλησης GMAW συνεχούς ρεύματος.

Συγκολλήσεις GTAW ελασμάτων μεγάλου πάχους από θερμικά κατεργάσιμο κράμα αλουμινίου 2219 - T87, μελετήθηκαν από τους S.C. Gambrell Jr και Kishen Kavikondala^[43], οι οποίοι επικεντρώθηκαν στη διερεύνηση του ρυθμού συστολής της συγκόλλησης. Στη συγκόλληση του ίδιου κράματος αλλά με την τεχνική GMAW οι C.Huang και S. Kou^[52], συνδυάζοντας θεωρίες στερεοποίησης που ισχύουν σε επίπεδο χυτών μετάλλων αλλά και κρυσταλλικής ανάπτυξης των κόκκων και εφαρμόζοντας αυτές σε μικροσκοπική κλίμακα, διερεύνησαν τους μηχανισμούς στερεοποίησης της ζώνης μερικής τήξης.

Οι D.C. Lin, G.X. Wang και T.S. Srivatsan^[51], μελέτησαν το μηχανισμό μορφοποίησης ισοαξονικών κόκκων, γύρω από τα όρια της ζώνης τήξης, μετά από συγκόλληση GTAW κράματος 2090 με διαφορετικά μέταλλα προσθήκης (2319 και 4145). Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα, ότι η δημιουργία μιας τέτοιας ζώνης εξαρτάται περισσότερο από τα χαρακτηριστικά του μετάλλου που τήκεται παρά από αυτά του βασικού μετάλλου, και κατά συνέπεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζώνης αυτής εξαρτώνται και από τη σύσταση του μετάλλου προσθήκης.

Δοκιμές συγκόλλησης τόξου, έχουν γίνει και με τη χρήση διπλού δαυλού συγκόλλησης (Εικ. 3.10) όπου ο ένας δρυα στην επάνω επιφάνεια των υπό συγκόλληση δοκιμίων και ο άλλος στην επιφάνεια ρίζας τους^{[40],[44]}. Σε συγκολλήσεις, με αυτήν την τεχνική, κραμάτων Al-Mg^[40], πραγματοποιήθηκε μελέτη της μικροδομής στην περιοχή των ορίων της ζώνης τήξης η οποία αποκάλυψε ανάπτυξη κιονοειδών κόκκων με μεσομεταλλικά κατακρημνίσματα Mg_2Al_3 στα όρια

τους. Το μέγεθος των κόκκων αυτών ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται στο

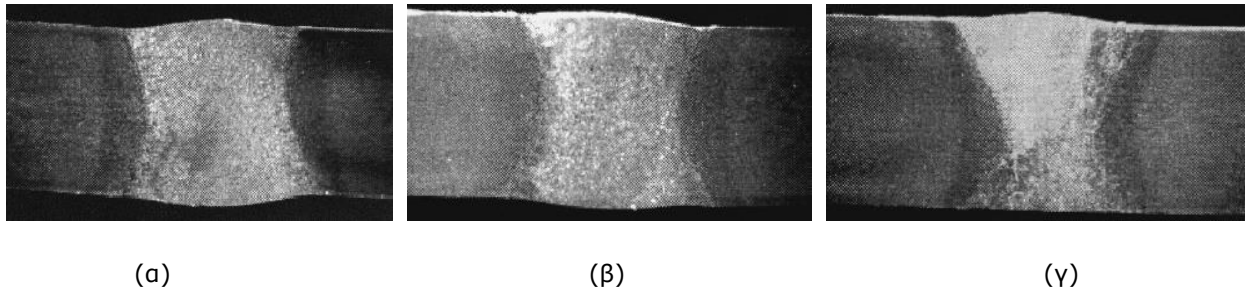


Εικόνα 3.10 Σκαρίφημα της τεχνικής με χρήση διπλού δαυλού συγκόλλησης^[40]

κέντρο της ζώνης τήξης. Η δομή αυτή είναι χαρακτηριστική κρυσταλλικής ανάπτυξης λόγω στερεοποίησης που συμβαίνει από τα όρια και προς το κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης και έχει διαφορετική κατεύθυνση ανάλογα με την επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η συγκόλληση. Παρατηρήθηκε πώς κατά τη μετάβαση προς το κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης η μορφή των κόκκων αλλάζει από κιονοειδή σε ισοαξονική. Η ύπαρξη ισοαξονικών κόκκων στο κέντρο της συγκόλλησης θεωρείται σημαντική, καθώς κατά τη στερεοποίηση αυτοί επιτρέπουν την εύκολη μεταφορά του ρευστού ανάμεσά τους ενώ βρίσκονται σε χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση. Έτσι, η τάση για ρωγμάτωση

κατά τη στερεοποίηση και η πιθανότητα ψαθυρής θραύσης μειώνονται ενώ βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής. Η μελέτη αναφέρει, ότι η μεταβολή από κιονοειδή σε ισοαξονική μορφή δεν συναντάται στις δομές των συγκολλήσεων. Για δεδομένο σύστημα, η στερεοποιημένη δομή εξαρτάται από τις παραμέτρους στερεοποίησης δηλαδή το ρυθμό ανάπτυξης του κόκκου, R και τη θερμική βαθμωτή μεταβολή της ενέργειας του ρευστού, G_L . Ο λόγος των δύο αυτών παραμέτρων G_L/R μεταβάλλεται από τη μέγιστη τιμή του στα όρια της ζώνης τήξης προς την ελάχιστη στο κέντρο της συγκόλλησης. Μεταβολή από κιονοειδή σε ισοαξονική μορφή κόκκων έχει παρατηρηθεί σε συγκολλήσεις διαφόρων κραμάτων αλουμινίου. Οι ερευνητές έδειξαν ότι υπάρχει μια εξαιρετικά μεγάλη περιοχή με ισοαξονικούς κόκκους η οποία δεν αποδίδεται στην αργή απόψυξη του μετάλλου αλλά στο γεγονός ότι εξαιτίας του διπλού τόξου, το ηλεκτρικό ρεύμα παραμένει στο λουτρό συγκόλλησης δημιουργώντας μια σύνθετη ροή του ρευστού, παρουσία ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων.

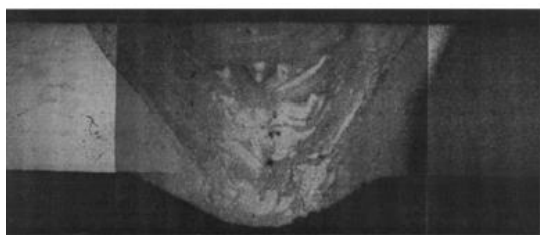
Σε μια αντίστοιχη μελέτη με μελετώμενο υλικό ένα κράμα της σειράς 6xxx^[44], σε δοκίμια διαστάσεων 250x50x6,4mm³ αποδείχθηκε ότι η τεχνική διπλού δαυλού μπορεί να εφαρμοστεί με απόλυτη επιτυχία καθώς έδωσε συγκολλήσεις με μειωμένη τάση για θερμή ρωγμάτωση (Εικ. 3.11). Οι ερευνητές επισημαίνουν πως η τεχνική πλεονεκτεί όταν είναι δυνατή η πρόσβαση και στις δυο επιφάνειες συγκόλλησης, μιας και μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων περασμάτων.



Εικόνα 3.11 Τομές της συγκόλλησης κραμάτων σειράς 6xxx με τη μέθοδο διπλού δαυλού^[44] α) Ταχύτητα συγκόλλησης 4.2 mm/s β) Ταχύτητα συγκόλλησης 6 mm/s γ) Ταχύτητα συγκόλλησης 7.5 mm/s

Έρευνες σε επίπεδο μικροδομής έχουν πραγματοποιηθεί και σε συγκολλήσεις GMAW και GTAW κραμάτων 5xxx με 6xxx. Οι C. Menzemer, P.C. Lam, T.S. Srivatsn και C.F. Wittel^[39], πραγματοποίησαν αυθεντικές συγκολλήσεις GMAW κράματος αλουμινίου 5083 - H321 με κράμα αλουμινίου 6061 - T6 και μέταλλο προσθήκης το 5356. Προέκυψε ότι στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, κοντά στα όρια της ζώνης τήξης, παρατηρείται ανακρυστάλλωση και μετανάστευση των μεσομεταλλικών β-φάσης ενώσεων, μέσου μεγέθους, στα όρια των κόκκων. Η χονδροκόκη μικροδομή αποδόθηκε στην αργή διάχυση της θερμότητας που παράγεται από τη συγκόλληση. Σημάδια θερμής ρωγμάτωσης που παρατηρήθηκαν στη βάση της συγκόλλησης στην πλευρά του κράματος 6061 αποδόθηκαν στην υπέρμετρη θέρμανση και τήξη των διακριτών συστατικών που συναντώνται στα όρια των κόκκων.

Επίσης, ο T. Luijendijk^[46], μετά από συγκολλήσεις GTAW ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου (5xxx με 6xxx) έφτασε σε χρήσιμα συμπεράσματα, με βασικό ότι η διαφορετική χημική σύσταση

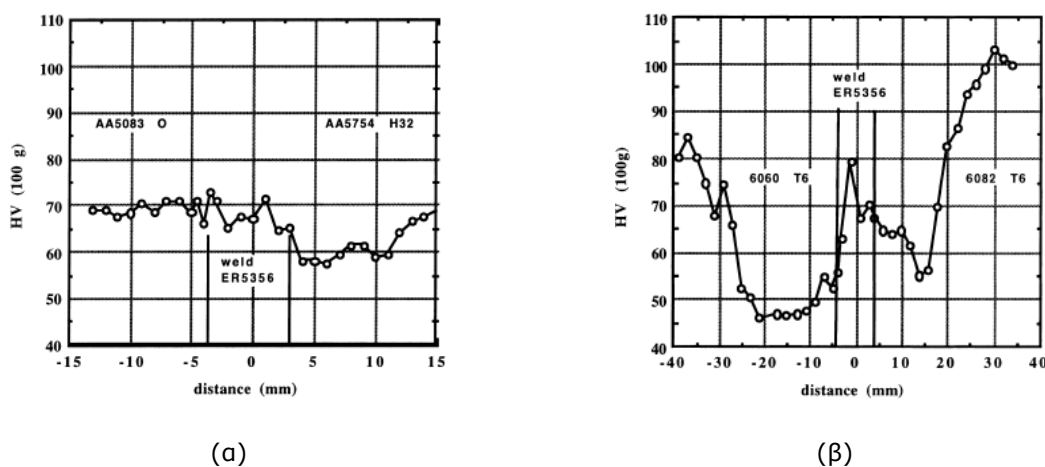


Εικόνα 3.12 Τομή συγκόλλησης 5083 (δεξιά) με 6060 (αριστερά) και κράμα προσθήκης το 4043. Πάχος ελάσματος

και θερμική αγωγιμότητα δημιουργεί προβλήματα στη διεύθυνση. Πρότεινε την τοποθέτηση του δαυλού προς την πλευρά του μετάλλου με την μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και τη χρήση μετάλλου προσθήκης ακόμα και κατά τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων. Επιπλέον, αναφέρει πως το κράμα προσθήκης 4043 δεν ενδεικνύεται καθώς οδηγεί σε θερμή ρωγμάτωση

ενώ συμπεραίνει πως η πτώση της αντοχής στη ΘΕΖ των κραμάτων της σειράς 5xxx είναι μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη των κραμάτων της σειράς 6xxx. Τέλος, καθώς η έρευνα του περιλαμβάνει και συγκολλήσεις μεταξύ διαφορετικών κραμάτων αλλά ιδίων σειρών (π.χ. συγκόλληση 5083-Ο με 5754-H32 και 6060-T6 με 6082-T6 αλλά και 6061-T4) αναφέρει ότι η μείωση

της αντοχής αυτής στη ΘΕΖ των κραμάτων της σειράς 6xxx είναι μικρότερη σε αυτά που έχουν υποστεί φυσική γήρανση από αυτά που έχουν υποστεί τεχνητή γήρανση.



Εικόνα 3.13 Προφίλ μικροσκληρότητας συγκόλλησης α) κράματος 5083 με 5754 πάχους 3mm με ταχύτητα συγκόλλησης 315mm/min και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356^[46], β) κράματος 6060-T6 με 6082-T6 πάχους 5mm με ταχύτητα συγκόλλησης 400mm/min και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356^[46]

Μελέτη της συγκολλησιμότητας σε συγκολλήσεις GMAW ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου (5xxx με 6xxx) πραγματοποιήσαν και οι M.M. Mossman και J.C. Lippold^[49]. Τα κράματα 6111, 6022, 5754 και 5182, σε πάχος 1mm, συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο GMAW. Οι δοκιμές συγκολλησιμότητας αυτών των κραμάτων πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό της ευαισθησίας σε ρωγμάτωση λόγω ταχείας στερεοποίησης. Οι ερευνητές παρατήρησαν επίδραση της σύστασης της ζώνης τήξης στην ευαισθησία για ρωγμάτωση. Αυτό το απέδωσαν εν μέρει στη μεταβολή της περιεκτικότητας του Si και του Mg, σε σχέση με τη διαλυτοποίησή τους στο τηγμένο μέταλλο. Αναφέρουν επίσης ότι η συγκόλληση οποιουδήποτε από τα υπό μελέτη κράματα με το 5182-H16 παρουσίασε την υψηλότερη αντίσταση σε ρωγμάτωση σε αντίθεση με το 6022-T4, το οποίο σε συνδυασμό με καθένα από τα υπόλοιπα, παρουσίασε τη χειρότερη. Επιπλέον αναφέρουν ότι οι διαφορετικοί συνδυασμοί 5182/5754 και 5182/6111 παρουσίασαν την υψηλότερη αντίσταση σε ρωγμάτωση λόγω ταχείας στερεοποίησης. Επίσης όλοι οι συνδυασμοί του 6022 έδωσαν χαμηλή αντίσταση σε ρωγμάτωση λόγω ταχείας στερεοποίησης, εξαιτίας της αστοχίας στη θερμικώς επηρεασμένη ζώνη στο κράμα 6022. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι παρατηρήθηκε ανομοιομορφη ανάμιξη των κραμάτων της σειράς 6xxx στα 5xxx στη ζώνη τήξης, και αποδίδεται στο συνδυασμό των υψηλών ταχυτήτων προχώρησης και των διαφορών στο ιξώδες αλλά και τις επιφανειακές τάσεις.

Οι S. Subramaniam και D.R. White^[48], ανέπτυξαν μια μέθοδο η οποία παρέχει μια αποτελεσματική προσέγγιση για την επιλογή των παραμέτρων παλμού, σε συγκολλήσεις τόξου παλμικού ρεύματος, που απαιτεί και αξιοσημείωτα λιγότερη πειραματική διαδικασία. Οι M. Suban και J. Tusek^[53], έκαναν προσπάθεια συσχετισμού του ρυθμού τήξης με τον τύπο του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις MIG/MAG. Επιπλέον, οι A. Kostirivas και J. C. Lippold^[56], παρουσιάζουν μια μεθοδολογία μελέτης της μικροδομής των ορίων τήξης και πειραματικά αποτελέσματα με βάση τη μελέτη αυτή, για τα κράματα 5454 - H34, 6061 - T6, 2195 - T8 και 2219 - T8 (με παρατηρήσεις πάνω στη μορφοποίηση των κόκκων, στα όρια της ζώνης τήξης, μικροσκληρομετρήσεις αλλά και εκτίμηση ιδιοτήτων του μετάλλου όπως η θερμοκρασία μηδενικής αντοχής που αντιστοιχεί στο όριο της ζώνης τήξης). Και οι τρεις παραπάνω αναφορές, παρόλο που έχουν θεωρητική βάση, έχουν άμεση σχέση με τη διεξαγωγή της συγκόλλησης και φυσικά με τους μηχανισμούς διαμόρφωσης της μικροδομής στην περιοχή που πραγματοποιείται.

Κεφάλαιο 4°

Θεωρητική μελέτη στερεοποίησης του λουτρού Συγκόλλησης

Σε προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε ο χαρακτηρισμός των διαφόρων ζωνών που προκύπτουν από τη συγκόλληση διαφόρων κραμάτων αλουμινίου. Η μεταβολή της μικροδομής στη ΘΕΖ, φαινόμενα ανόπτωσης, ανακρυστάλλωσης και μεγέθυνσης των κόκκων καθώς και η επίδραση αυτών στις ιδιότητες του συγκολλημένου μετάλλου, αναλύθηκαν εκτενώς. Ωστόσο, πριν την παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας και των αποτελεσμάτων της μεταλλογραφικής μελέτης που θα ακολουθήσουν, είναι σημαντική μια σύντομη αναφορά στους μηχανισμούς στερεοποίησης του λουτρού συγκόλλησης και στη σχέση τους με τις παραμέτρους της διαδικασίας.

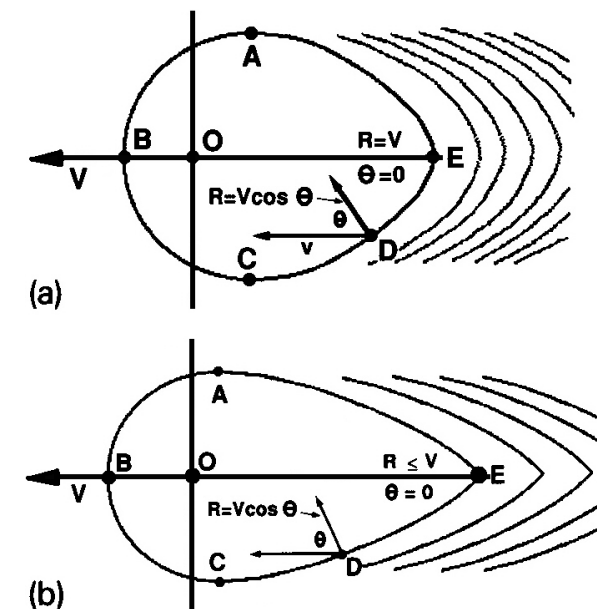
4.1 Χαρακτηριστικά στερεοποίησης στο κέντρο του λουτρού συγκόλλησης

Η στερεοποίηση του λουτρού συγκόλλησης είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο φαινόμενο, αν ληφθεί υπόψη το μεγάλο εύρος των ρυθμών απόψυξης και των ταχυτήτων στερεοποίησης που συναντώνται στα διάφορα κράματα. Καθώς η διαδικασία συγκόλλησης επιδρά άμεσα στη μικροδομή της σχηματιζόμενης ραφής, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη μελέτη των κρίσιμων

μεταλλουργικών παραγόντων και παραμέτρων της συγκόλλησης που οδηγούν στην ανάπτυξη της μικροδομής της, το μέγεθος και την κλίμακα της αλλά και τη δομή της σε ότι αφορά τα όρια των κόκκων και τη μορφολογία τους.

Η μικροδομή της συγκόλλησης και οι ιδιότητες της, εξαρτώνται επίσης από φαινόμενα μικροδιαφορισμού και από το μέγεθος, τη μορφή και τη θέση των στοιχείων κραμάτωσης και των ακαθαρσιών.

Το λουτρό συγκόλλησης μπορεί να περιγραφεί ως μια κινούμενη διεπιφάνεια υγρής - στερεής κατάστασης η οποία, κατά κάποιο τρόπο, καταναλώνει στερεή φάση στο μέτωπο της κίνησης της (C-B-A, Εικ. 4.1), ενώ δημιουργεί



Εικόνα 4.1 Διακύμανση του σχήματος του λουτρού συγκόλλησης σε συνάρτηση με την ταχύτητα της συγκόλλησης^[59]

στερεή φάση στο πίσω μέρος της (A-E-C, Εικ. 4.1)^[59]. Η μικροδομή του στερεοποιημένου λουτρού συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από τη χημική σύσταση του μετάλλου και τους ρυθμούς απόψυξης

ενώ η τελική μορφοποίηση της εξαρτάται από τα κρυσταλλογραφικά όρια των κόκκων λαμβάνοντας υπόψη και τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Κατανοώντας καλύτερα την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων συγκόλλησης και των συνθηκών στερεοποίησης, γίνεται πιο εύκολη η κατανόηση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων αυτών και της μικροδομής που μορφοποιείται.

Όπως έχει αποδειχθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά^{[60],[61]}, η γεωμετρία του λουτρού συγκόλλησης αλλάζει με την μεταβολή της ταχύτητας της συγκόλλησης (Εικ. 4.1).

Δύο είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζονται από τη μεταβολή αυτή, ο ρυθμός στερεοποίησης (ή ταχύτητα στερεοποίησης) 'R' και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο ρευστό του λουτρού συγκόλλησης 'G_L'. Σε ότι αφορά την ταχύτητα στερεοποίησης 'R', μπορούν σύντομα να αναφερθούν τα εξής:

Θεωρώντας ροή θερμότητας δύο διαστάσεων, ο 'R', σε διαφορετικές περιοχές του λουτρού συγκόλλησης, περιγράφεται από τη σχέση:

$$R = V \cos \theta \quad (1)$$

Όπου, V: η ταχύτητα της συγκόλλησης και

θ : η γωνία μεταξύ της κάθετης στην εφαιπτομένη της ισόθερμης του σημείου και της παράλληλης με τη διεύθυνση της ταχύτητας συγκόλλησης (Εικ. 4.1).

Όταν $\theta = 0^\circ$ ο ρυθμός στερεοποίησης 'R' γίνεται μέγιστος στο σημείο E (Εικ. 4.1) πλησιάζοντας την ταχύτητα της συγκόλλησης. Ωστόσο, για ταχύτητες συγκόλλησης μεγαλύτερες από 30 - 100cm/min (ανάλογα με το υλικό), η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το 'R', είναι σαφώς μικρότερη από την ταχύτητα της συγκόλλησης. Γι' αυτό και η εξίσωση (1) αναπαριστά το άνω όριο του ρυθμού στερεοποίησης. Από την εξίσωση (1) προκύπτει ακόμα πως όταν η εφαιπτομένη γραμμή στη ζώνη τήξης είναι παράλληλη στην κατεύθυνση προχώρησης της συγκόλλησης ($\theta = 90^\circ$) το 'R' γίνεται ίσο με μηδέν. Ανάλογα με την τεχνική συγκόλλησης, η ταχύτητα στερεοποίησης μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που ισχύει στα χυτά.

Για τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας στο ρευστό του λουτρού συγκόλλησης 'G_L', μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

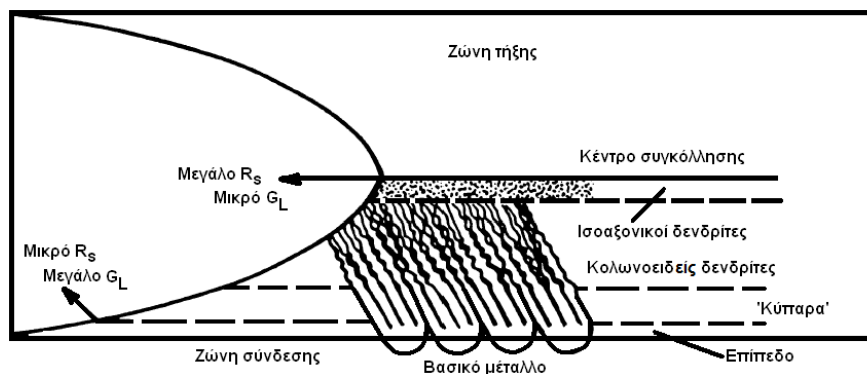
Είναι μέγιστος κατά μήκος των ορίων της ζώνης τήξης, ελάχιστος στο κέντρο του και ορίζεται από τη σχέση:

$$G_L = dT_L/dx \quad (2)$$

Όπου, T_L : η θερμοκρασία του ρευστού και
 x : η απόσταση από τη διεπιφάνεια υγρού - στερεού

Το ' G_L ', μεταβάλλεται ως συνάρτηση με το πάχος του υλικού, τις θερμικές του ιδιότητες και το εύρος της θερμοκρασίας κατά την οποία συμβαίνει η στερεοποίηση.

Στην Εικόνα 4.2, παρουσιάζονται σκαριφηματικά, τυπικές δομές μορφοποίησης κόκκων, λαμβάνοντας υπόψη τα ' R ' και ' G_L ' στην περιοχή γύρω από το λουτρό συγκόλλησης.

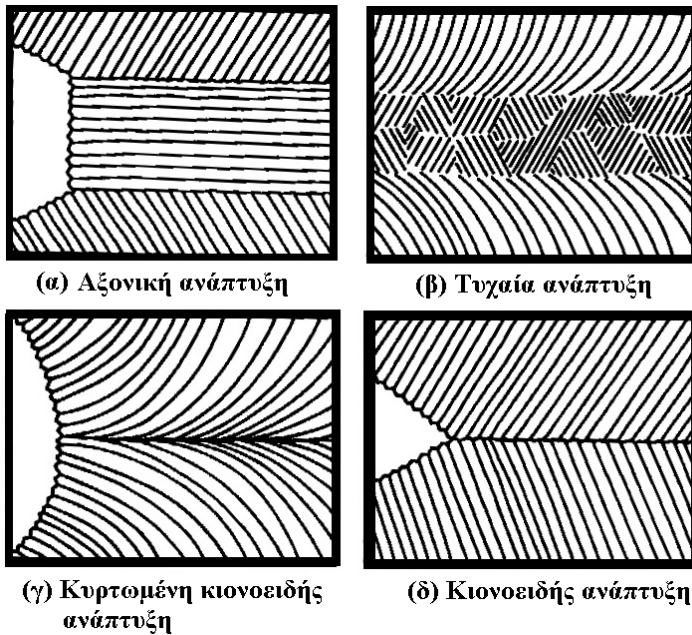


Εικόνα 4.2 Τυπικές δομές μορφοποίησης κόκκων, λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό στερεοποίησης γύρω από το λουτρό συγκόλλησης^[8]

Η στερεοποίηση στο λουτρό συγκόλλησης διαφέρει από αυτή που συμβαίνει στα χυτά λόγω του ότι συμβαίνει πιο γρήγορα ενώ δεν περιλαμβάνει απαραίτητα πυρηνοποίηση πριν την ανάπτυξη στερεού μετώπου. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η στερεοποίηση συμβαίνει με την κρυσταλλική ανάπτυξη των κόκκων να ξεκινά από την περιοχή του βασικού μετάλλου και να τερματίζεται στο κέντρο του λουτρού συγκόλλησης ενώ το μέγεθος των κόκκων που αρχίζουν να αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια υγρού - στερεού, εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του βασικού μετάλλου στην περιοχή αυτή.

Καθώς η στερεοποίηση εξελίσσεται, οι κόκκοι αναπτύσσονται σχεδόν κάθετα στη ζώνη τήξης. Ο ρυθμός ανάπτυξης τους εξαρτάται έντονα από τη μορφή της καμπύλης μεταβολής της θερμοκρασίας καθώς και από το πώς διαμορφώνονται τα όρια των κρυστάλλων. Οι κρύσταλλοι που ακολουθούν ανάπτυξη παράλληλη με αυτή της πιο απότομης θερμοκρασιακής μεταβολής, έχουν την τάση να αναπτύσσονται πιο δραστικά, σε βάρος άλλων που ακολουθούν διαφορετική

διεύθυνση ανάπτυξης. Καθώς η διεύθυνση της πιο απότομης θερμοκρασιακής μεταβολής αλλάζει, άλλοι κόκκοι συνεχίζουν να αναπτύσσονται ενώ σε άλλους η ανάπτυξη τερματίζεται. Η μετάβαση από τη φάση της δημιουργίας κρυσταλλικής δομής, στη φάση της ανταγωνιστικής εξέλιξης των



Εικόνα 4.3 Τύποι μικροδομών μετάλλου συγκόλλησης όπως προκύπτουν από μεταβολές της ταχύτητας συγκόλλησης

κόκκων, εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους συγκόλλησης και ιδιαίτερα από την ταχύτητα που αυτή πραγματοποιείται. Σε χαμηλές ταχύτητες, είναι δυνατή η ανάπτυξη κόκκων κοντά στον άξονα της συγκόλλησης, στην «ουρά» του λουτρού συγκόλλησης, με ισοαξονικό σχήμα (Εικ. 4.3α). Η ισοαξονική ανάπτυξη των κόκκων, μπορεί να μειωθεί ή και να σταματήσει να υπάρχει είτε με αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, είτε με αύξηση του βαθμού συστασιακής υπέρτηξης στο λουτρό της συγκόλλησης.

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον παράγοντα της ταχύτητας της συγκόλλησης, η αύξησή της έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός περισσότερο ελλειπτικού σχήματος λουτρού συγκόλλησης που καταστρέφει την ισοαξονική ανάπτυξη των κόκκων. Στα κράματα αλουμινίου, ιδιαίτερα σε αυτά της σειράς 5xxx, αυτό έχει σαν συνέπεια τον πολλαπλασιασμό των κιονοειδών κόκκων κοντά στον άξονα συγκόλλησης και την αντίστοιχη αύξηση των δενδριτικών κλάδων με αποτέλεσμα την μορφοποίηση μιας κρυσταλλικής δομής με κόκκους σε τυχαίες διευθύνσεις (Εικ. 4.3β).

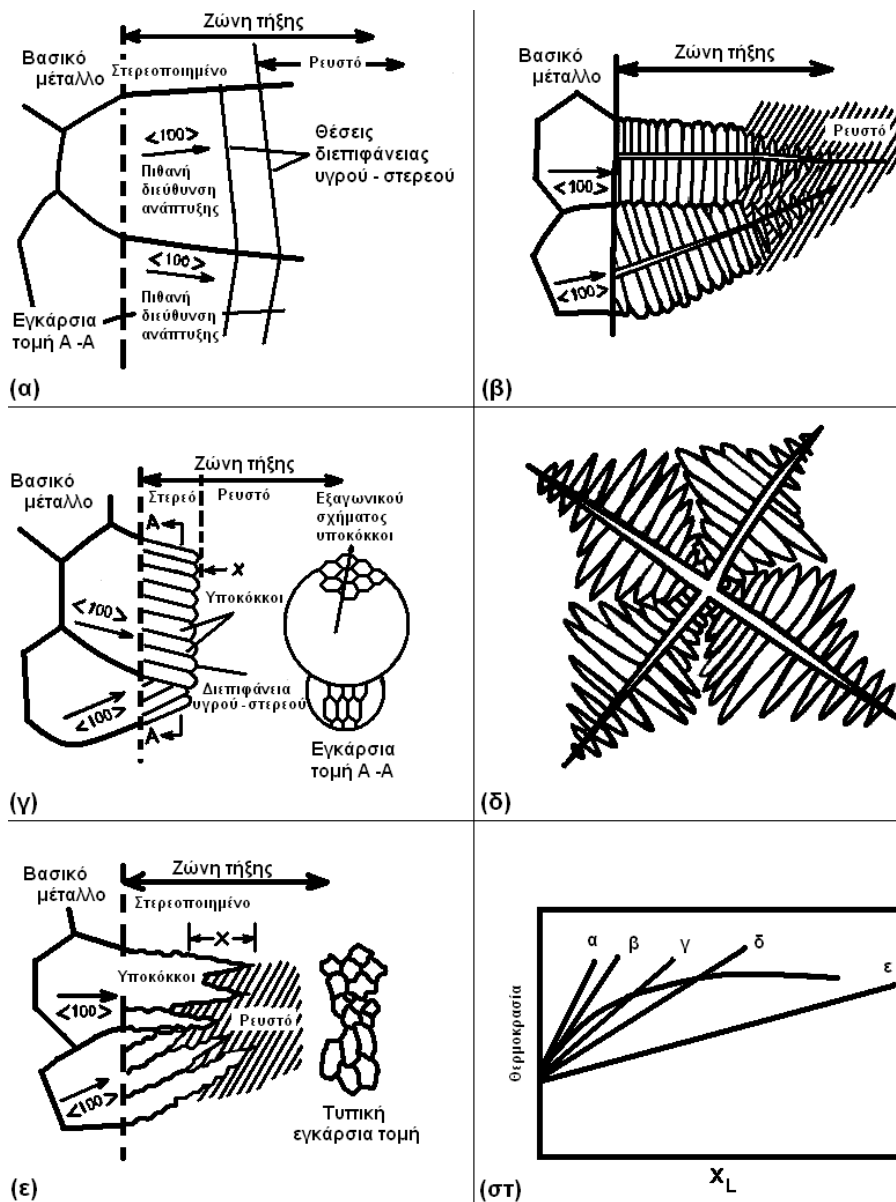
Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, η μορφή του λουτρού συγκόλλησης επιμηκύνεται και η προδιάθεση για ανάπτυξη των κόκκων, από τη μια κάθετα στη ζώνη τήξης και από την άλλη κατά τη διεύθυνση της πιο απότομης θερμοκρασιακής μεταβολής, έχει σαν συνέπεια την καμπυλοειδή μορφοποίησή τους (Εικ. 4.3γ).

Καθώς η ταχύτητα στερεοποίησης φτάνει το μέγιστο όριο της, για δεδομένη γεωμετρία λουτρού, εγείρεται μια ευδιάκριτη γραμμή στο κέντρο της συγκόλλησης και κιονοειδείς κόκκοι αναπτύσσονται εκατέρωθεν αυτής με κατεύθυνση σχεδόν κάθετα στη ζώνη τήξης (Εικ. 4.3δ).

4.2 Χαρακτηριστικά στερεοποίησης στα όρια της ζώνης τήξης με το βασικό μέταλλο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη Παράγραφο, η μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης ενός κράματος αλουμινίου της σειράς 5xxx, στην περιοχή των ορίων του μετάλλου συγκόλλησης με τη Θ.Ε.Ζ., αποτελείται, συνήθως, από κολωνοειδούς μορφής κόκκους, επιμήκεις, κυτταρικής ή κουπελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης η οποία περιέχει ενδο-δενδριτικής ευτηκτικής μορφής φάσεις κυρίως Mg_3Al_2 .

Γενικότερα, οι τύποι της ανάπτυξης των κόκκων, που λαμβάνουν χώρα στα όρια της ζώνης τήξης, κατά τη στερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης απεικονίζονται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 Τύποι ανάπτυξης κόκκων κατά τη στερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης^[59]

Η Εικόνα 4.4στ απεικονίζει πέντε μεταβολές θερμοκρασίας, α-ε, συναρτήσεως της δομικής ή συστασιακής υπέρτηξης. Οι προκύπτουσες δομές των κόκκων, για κάθε από τις περιπτώσεις (α - ε), παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.4α - 4.4ε.

Η επίπεδη ανάπτυξη (Εικ. 4.4α) των κόκκων, εμφανίζεται μόνο κατά τη στερεοποίηση καθαρών μετάλλων, όταν το μέταλλο ψύχεται αργά (συνθήκες ισορροπίας). Η θερμοκρασία του τήγματος είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία στερεοποίησης, ενώ η θερμοκρασία του στερεού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη βραδεία απόψυξη του υγρού καθαρού μετάλλου, η στερεοποίηση περνά κατά προσέγγιση από διαδοχικά στάδια ισορροπίας. Δεν υπάρχουν εκτεταμένες περιοχές σε κατάσταση υπέρτηξης, ενώ η στερεοποίηση πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο πάνω στη διεπιφάνεια υγρού - στερεού, μια ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια με ταχύτητα κίνησης που εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα απαγωγής της θερμότητας, διαμέσου των τοιχωμάτων του βασικού μετάλλου και του ήδη στερεοποιημένου μετάλλου. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απομακρύνεται με αγωγή από τη διεπιφάνεια στερεού - υγρού, διαμέσου του στερεού, προς τη γειτονική περιβάλλουσα περιοχή, ώστε να συνεχιστεί η στερεοποίηση. Οποιαδήποτε μικρή ανωμαλία ή εξογκωμα, που αρχίζει να δημιουργείται στη διεπιφάνεια, περιβάλλεται από υγρό μέταλλο το οποίο έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν της στερεοποίησης. Η ανάπτυξη του εξογκώματος σταματά, μέχρις ότου και η υπόλοιπη διεπιφάνεια προσεγγίσει το ίδιο επίπεδο. Η ταχύτητα ανάπτυξης των διαφορετικών κρυστάλλων του στερεού, δεν εξαρτάται από την κρυσταλλογραφική διεύθυνση τους ως προς τη βάθμωση της θερμοκρασίας^[62].

Για να επιτευχθεί μη επίπεδη ανάπτυξη των κόκκων, απαιτείται αρνητική βάθμωση της θερμοκρασίας (μείωση της θερμοκρασίας από την στερεή - υγρή διεπιφάνεια προς την υγρή φάση), κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να συμβεί στις συγκολλήσεις. Ωστόσο, στα κράματα, λόγω της δομικής υπέρτηξης, λαμβάνει χώρα μη επίπεδη ανάπτυξη των κόκκων ακόμα και αν υπάρχει θετική μεταβολή της θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση λοιπόν των κραμάτων, η στερεοποίηση συνοδεύεται από ανακατανομή του διαλυόμενου στοιχείου μεταξύ της στερεάς και της υγρής φάσης. Η στερεοποίηση μονοφασικού κράματος, διεξάγεται, θεωρητικά καθ' ολοκληρία σε κατάσταση ισορροπίας, Στην πράξη όμως, ο χρόνος που απαιτείται για την ομογενοποίηση του κράματος, μέσω διάχυσης, είναι εξαιρετικά μεγάλος ή αλλιώς, η διάχυση εντός της στερεάς φάσης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης είναι πρακτικά αμελητέα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες στερεοποίησης διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

A) Περίπτωση κατά την οποία η σύσταση της υγρής φάσης είναι πάντα ομογενής και η κατανομή του διαλυόμενου στοιχείου πραγματοποιείται με διάχυση και φυσική ανάδευση.

B) Περίπτωση κατά την οποία η σύσταση του υγρού μεταβάλλεται από τη διεπιφάνεια στερεού - υγρού και η κατανομή του διαλυόμενου στοιχείου πραγματοποιείται μόνο με διάχυση.

Για την περίπτωση (A), όταν η σύσταση της υγρής φάσης είναι ομογενής από το κέντρο του στερεού κόκκου μέχρι του σημείου περάτωσης της στερεοποίησης, δηλαδή στο όριο δύο κόκκων, το διαλυόμενο στοιχείο μετακινείται απορριπτόμενο από το κέντρο του κόκκου προς την περιφέρεια του. Μια τέτοια ετερογένεια στην περιεκτικότητα του διαλυόμενου στοιχείου ονομάζεται διαφορισμός και γίνεται εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος μεταξύ liquidus και solidus, όσο μεγαλύτερο γίνεται το μέγεθος των κόκκων και όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στερεοποίησης.

Όταν η κατανομή του διαλυόμενου στοιχείου γίνεται μόνο με διάχυση (περίπτωση - B), εμπρός από το μέτωπο της στερεοποίησης παράγεται μια δομική ή συστασιακή υπέρτηξη. Στην περίπτωση αυτή, η πραγματική μεταβολή της θερμοκρασίας του υγρού καθορίζεται από το ποσοστό της απαγόμενης θερμότητας από τις γειτονικές περιοχές του βασικού μετάλλου. Σε απόσταση x_L μπροστά από το μέτωπο της στερεοποίησης, η πραγματική θερμοκρασία του υγρού είναι κατώτερη της θερμοκρασίας liquidus και το μήκος αυτό (x_L) ορίζει τη ζώνη της συστασιακής υπέρτηξης. Το πάχος της ζώνης αυτής εξαρτάται προφανώς από τις συνθήκες στερεοποίησης. Έτσι, σε περιπτώσεις κραμάτων με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, όπως είναι τα κράματα αλουμινίου, ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας εντός του μετάλλου είναι υψηλός και η συστασιακή υπέρτηξη παρατηρείται σε μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια^[62].

Όσο μικρότερη είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας από τις πέντε μεταβολές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4στ, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός υπέρτηξης.

Δενδριτική ανάπτυξη παρατηρείται κατά τη στερεοποίηση ολιγάριθμων κρυσταλλικών πυρήνων. Τότε το υγρό μέταλλο υποψύχεται πριν τη στερεοποίηση και υπό αυτές τις συνθήκες ευνοείται η ανάπτυξη μικρών εξογκωμάτων που μορφοποιούν έναν δενδρίτη. Κατά την ανάπτυξη του δενδρίτη, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απάγεται προς το υποψυχόμενο υγρό, ανυψώνοντας τη θερμοκρασία του, η οποία τείνει προς τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Στον αρχικό δενδριτικό κορμό αναπτύσσονται δευτερογενείς και τριτογενείς κλάδοι και με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ταχύτητα της λανθάνουσας θερμότητας. Στα καθαρά μέταλλα, η δενδριτική ανάπτυξη αποτελεί, συνήθως, ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ανάπτυξης. Το ποσοστό αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{c \cdot \Delta T}{\Delta H_f} \quad (3)$$

όπου:

c: η ειδική θερμότητα του υγρού

ΔT : η υπόψυξη

ΔH_f : η λανθάνουσα θερμότητα που αποδίδεται κατά τη στερεοποίηση

$c\Delta T$: η θερμότητα, την οποία είναι δυνατό να απορροφήσει το υποψυχόμενο υγρό

Από τη σχέση (3), γίνεται φανερό ότι όσο η υπόψυξη (ΔT) αυξάνεται, τόσο περισσότερο εντείνεται η δενδριτική ανάπτυξη.

Η κυψελοειδής ή κυτταρική ανάπτυξη, συναντάται στην περίπτωση κατά την οποία η υγρή ζώνη που βρίσκεται στην κατάσταση υπέρτηξης, μπροστά από τη διεπιφάνεια στερεού υγρού, έχει μικρό πλάτος, ώστε να μην καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη δενδριτών. Τότε, κάθε κρύσταλλος υποδιαιρείται σε κυψέλες, επιμήκεις κατά τη διεύθυνση του ρυθμού μεταβολής της ποσότητας $\frac{\partial T}{\partial x}$.

Από τα παραπάνω, για την Εικόνα 4.4, η μεταβολή (ϵ) αντιστοιχεί σε κατάσταση όπου η θερμοκρασία ρευστοποίησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν του υγρού οπότε και εμφανίζονται ισοαξονικοί δενδρίτες πέρα από τη διεπιφάνεια της στερεής - υγρής φάσης. Οι ενδιάμεσες μεταβολές της θερμοκρασίας, μεταβολές (β), (γ) και (δ), επιτρέπουν την ανάπτυξη κυτταρικής, κυτταρικής-δενδριτικής και κολονοειδούς-δενδριτικής ανάπτυξης αντίστοιχα. Η δομική υπέρτηξη στο λουτρό συγκόλλησης ευθύνεται για την ανάπτυξη ισοαξονικών δενδριτών μπροστά από τη διεπιφάνεια στερεής - υγρής φάσης (Εικ. 4.4ε), και το μέταλλο συγκόλλησης, ενώ στη διεπιφάνεια του λουτρού συγκόλλησης με το αρχικό μέταλλο, για βαθμό υπέρτηξης μικρότερο, πραγματοποιείται ανάπτυξη δενδριτών κολονοειδούς μορφής (Εικ. 4.4δ), με κατεύθυνση κάθετα προς αυτή.

Κεφάλαιο 5°

Πειραματική διαδικασία

Όλα τα στάδια της μεταλλογραφικής μελέτης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Συνοπτικά, η μελέτη περιλαμβάνει τα εξής:

↪ Προκαταρκτικές συγκολλήσεις απόθεσης μετάλλου (bead on plate), με την μέθοδο GMAW, σε δοκίμια από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου σειράς 5xxx, διαστάσεων 175x300mm² πάχους 4mm, 5mm και 6mm. Μεταλλογραφική μελέτη αυτών με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης ως προς τη γεωμετρία και το πορώδες της ραφής.

↪ Συγκολλήσεις GMAW, σε δοκίμια από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου σειράς 5xxx, διαστάσεων 175x150mm² πάχους 4mm, 5mm, 6mm. Μεταλλογραφική μελέτη αυτών και μελέτη των θερμικών κύκλων.

↪ Συγκολλήσεις GMAW, σε μεγάλα δοκίμια από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου σειράς 5xxx, (διαστάσεων 700x300mm²) πάχους 4mm, 5mm και 6mm Πλήρης μεταλλογραφική μελέτη σε τομές των συγκολλήσεων και μελέτη των θερμικών κύκλων.

Σημειώνεται πως όλες οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση μετάλλου προσθήκης σε μορφή σύρματος διαμέτρου 1,2mm ενώ ως αέριο προστασίας χρησιμοποιήθηκε αργό υψηλής καθαρότητας (99,999%)

5.1 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Σε ότι αφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πειραμάτων, η χημική σύσταση τους παρατίθεται στον Πίνακα 5.1. Συνοπτικά πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- Προκαταρκτικές συγκολλήσεις απόθεσης μετάλλου (bead on plate) σε ελάσματα διαστάσεων 175x300mm² (μήκος απόθεσης 175mm, απόθεση στο μέσο πλάτος του δοκιμίου)
 - Α) από κράμα αλουμινίου 5083-H116 πάχους 4mm
 - Β) από κράμα αλουμινίου 5083-H111 πάχους 5mm
 - Γ) από κράμα αλουμινίου 5383-H116 πάχους 6mm

- Επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις σε ελάσματα διαστάσεων 175x150mm² (μήκος ραφής 175mm)
 - Α) από κράμα αλουμινίου 5083-H116 πάχους 4mm
 - Β) από κράμα αλουμινίου 5083-H111 πάχους 5mm
 - Γ) από κράμα αλουμινίου 5383-H116 πάχους 6mm
- Επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις σε ελάσματα διαστάσεων 700x300mm² (μήκος ραφής 700mm)
 - Α) από κράμα αλουμινίου 5083-H116 πάχους 4mm
 - Β) από κράμα αλουμινίου 5083-H111 πάχους 5mm
 - Γ) από κράμα αλουμινίου 5383-H116 πάχους 6mm

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι βασικές φυσικές ιδιότητες των υπό μελέτη κραμάτων ενώ, στον Πίνακα 5.3 οι βασικές μηχανικές τους ιδιότητες, όλες σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Πίνακας 5.1 Η χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν

Κράμα \ Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.	% κ.β.
AA5083-H111 / H116	0,344	0,224	0,078	0,622	4,573	0,097	0,112	0,014
AA5383-H116	0,1	0,2	0,1	0,8	4,91	0,12	0,04	0,014
Μέταλλο προσθήκης AA5356	0,25	0,40	1,10	0,05-0,20	4,5-5,5	0,05-0,20	0,10	0,06-0,20

Πίνακας 5.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Φυσικές ιδιότητες	Πυκνότητα (g/cc)	Ειδική θερμότητα (J/g-°C)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία Ανόπτησης (°C)	Σημείο τήξης (°C)
AA5083-H111	2,66	0,9	117	350	590,6 - 638
AA5083-H116	2,66	0,9	117	350	590,6 - 638
AA5383-H116	2,66	0,9	117	350	585 - 641

Πίνακας 5.3 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Συντελεστής θερμικής διαστολής ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	Σκληρότητα (HV)
AA5083-H111	290	150	70,3	22,3	87
AA5083-H116	317	228	70,3	22,3	96
AA5383-H116	305	220	70,3	23,8	98

5.2 Εξοπλισμός και μετρητικές διατάξεις

5.2.1 Χαρακτηριστικά της συγκολλητικής διάταξης^[63]

Τα πειράματα έγιναν με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα συγκόλλησης του οίκου HITACHI (μοντέλο M6100) το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο ώστε να εκτελεί συγκολλήσεις GMAW. Η συνολική ρομποτική διάταξη αποτελείται από:

- Το κυρίως σώμα
- Την κονσόλα ελέγχου
- Την κονσόλα playback(PBC)
- Τη μονάδα προγραμματισμού (PBC)
- Τη μονάδα ελέγχου της συγκόλλησης ή συγκολλητή (welder)
- Περιφερειακά συστήματα, που συμπληρώνουν την ρομποτική διάταξη (πιστόλι συγκόλλησης, φιάλη παροχής αερίου προστασίας, γείωση κ.λπ.)

5.2.1.1 Το κυρίως σώμα

Το κυρίως σώμα της ρομποτικής διάταξης (Εικ. 5.1), διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι του επιτρέπουν να εκτελέσει ένα μεγάλο αριθμό κινήσεων. Υπάρχουν βεβαίως περιορισμοί στην κίνηση, για την αντιμετώπιση των οποίων απαιτείται καλός προγραμματισμός και πλήρης γνώση του δυνατού χώρου εργασίας. Είναι πιθανό να προκύψουν θέσεις μέσα στο χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα όπου ενώ ο προγραμματισμός τους είναι εφικτός, ωστόσο κατά την εκτέλεση δεν είναι προσβάσιμες.



(α)



(β)

Εικόνα 5.1 Όψεις του χώρου λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα

5.2.1.2 Η κονσόλα ελέγχου

Η κονσόλα ελέγχου (Εικ. 5.2), έχει ως σκοπό τον έλεγχο της εύρυθμης λειτουργίας της ρομποτικής διάταξης στο σύνολο της. Διαβιβάζει στο ρομπότ και τις υπόλοιπες περιφερειακές συσκευές (όπως π.χ. ο συγκολλητής) τις εντολές οι οποίες εισάγονται ως δεδομένα. Τροφοδοτείται με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα και φροντίζει για τις κινήσεις του ρομποτικού βραχίονα. Βρίσκεται σε απόσταση από οποιαδήποτε θέση εργασίας που μπορεί να βρεθεί ο βραχίονας, ώστε να αποφεύγεται οποιοσδήποτε κίνδυνος κατά την αυτόματη διενέργεια των συγκολλήσεων.



Εικόνα 5.2 Η κονσόλα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα

5.2.1.3 Η κονσόλα 'playback' (PBC)

Είναι ουσιαστικά ένας πίνακας ελέγχου μέσα από τον οποίο, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού, ελέγχονται διάφορα δεδομένα της λειτουργίας του ρομπότ, καθώς αυτό εκτελεί κάποιο πρόγραμμα.



Εικόνα 5.3 Η κονσόλα "playback" (PBC)

Τέτοια δεδομένα είναι:

- Ο αριθμός του προγράμματος
- Η ενεργοποίηση του συγκολλητή
- Το σταμάτημα του σερβοκινητήρα που δίνει κίνηση στο βραχίονα

5.2.1.4 Η μονάδα προγραμματισμού (PGU)

Η μονάδα προγραμματισμού παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα, ώστε να εκτελέσει μια συγκόλληση. Μέσω αυτής, τίθεται σε λειτουργία ο σερβοκινητήρας του βραχίονα και ελέγχονται μια σειρά δευτερευουσών λειτουργιών. Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται η μονάδα PGU.



Εικόνα 5.4: Η μονάδα προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα

5.2.1.5 Η μονάδα ελέγχου της συγκόλλησης ή συγκολλητής (welder)

Η συνεργαζόμενη μονάδα συγκόλλησης είναι του οίκου Hitachi (μοντέλο Inverter 350 CXP II) και όπως είναι φυσικό είναι αυτή που ελέγχει τις παραμέτρους της συγκόλλησης τροφοδοτώντας την με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος. Όταν είναι απενεργοποιημένη δεν πραγματοποιείται συγκόλληση ωστόσο η προγραμματισμένη κίνηση του βραχίονα μπορεί να εκτελεστεί δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ελέγχου της ορθότητας του προγραμματισμού. Τροφοδοτείται με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα και έχει τη δυνατότητα ρύθμισης, ώστε να πραγματοποιούνται συγκολλήσεις με συνεχές αλλά και παλμικό ρεύμα. Στην Εικόνα 5.5 φαίνεται η διάταξη του συγκολλητή.



Εικόνα 5.5 Ο συγκολλητής του ρομποτικού βραχίονα

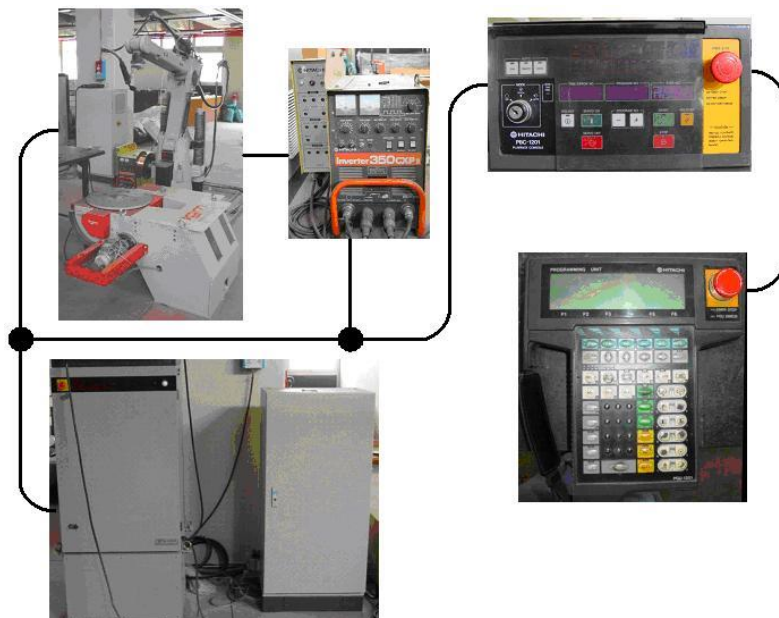
5.1.2.6 Συνεργασία των επιμέρους στοιχείων της ρομποτικής διάταξης.

Τα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν τη ρομποτική διάταξη λειτουργούν και επικοινωνούν μεταξύ τους με βάση τη φιλοσοφία ότι η όλη διαδικασία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη και ασφαλέστερη (Εικ. 4.6).

Ο χειριστής αρχικά πληκτρολογεί προγράμματα που αυτός επιθυμεί στη PGU. Με αυτήν τη διαδικασία «διδάσκει» στο ρομπότ τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει και προσδιορίζει επακριβώς τα δεδομένα της συγκόλλησης που θα εκτελεστεί. Όλα αυτά γίνονται μέσω της PGU και του εύχρηστου διαδραστικού περιβάλλοντος που παρέχει.

Εν συνεχεία, τα δεδομένα τροφοδοτούνται στην PBC. Εκεί ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει τον συγκολλητή και να ελέγξει μια σειρά από παραμέτρους που είναι χρήσιμες για την εύρυθμη λειτουργία του ρομπότ. Ακολούθως δίνεται η εντολή για την εκτέλεση της συγκόλλησης μέσω του κομβίου START που βρίσκεται στην PBC.

Το σήμα μεταβιβάζεται στην κονσόλα ελέγχου, η οποία δίνει τις κατάλληλες πληροφορίες στο ρομπότ και τον συγκολλητή. Επίσης, ελέγχει τη διοχέτευση του αερίου προστασίας. Από εκείνο το σημείο, ο χειριστής παρακολουθεί προσεκτικά τη διαδικασία, έτοιμος να επέμβει σε περίπτωση που συμβεί κάτι απρόοπτο μέσω των κομβίων εκτάκτου ανάγκης (emergency stops) που βρίσκονται σε διάφορες προσβάσιμες θέσεις της διάταξης (κονσόλα ελέγχου, PBC, PGU).



Εικόνα 5.6 Η διάταξη του τρόπου επικοινωνίας των επιμέρους συστημάτων του ρομποτικού βραχίονα

5.2.2 Μεταλλογραφικός εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μεταλλογραφική μελέτη περιλαμβάνει:

- Κοιπτικές διατάξεις όπως κορδέλα κοπής (VERMAC, KB - 456) και κοιπική μηχανή STRUERS, Discotom-50, για την εξαγωγή δοκιμίων από τα συγκολλημένα ελάσματα.
- Διάταξη λείανσης - στίλβωσης (STRUERS) με τα κατάλληλα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται στην προετοιμασία δοκιμίων αλουμινίου για μεταλλογραφική μελέτη.
- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή προς αποτύπωση μακροσκοπικών παρατηρήσεων.
- Χημικά αντιδραστήρια με σκοπό τη χημική προσβολή των δοκιμίων προς παρατήρηση τους στο μικροσκόπιο. Χρησιμοποιήθηκαν τα αντιδραστήρια Keller (1ml HF, 1.5ml HCl, 2.5ml HNO₃ σε 95ml H₂O) και Barcker`s (5ml HBF₄ σε 200 ml H₂O - ηλεκτροχημική προσβολή και παρατήρηση σε οπτικό μικροσκόπιο με χρήση πολωμένου φωτός).
- Στερεοσκόπιο του οίκου LEICA (μοντέλο MZ6) για μακροσκοπική μελέτη των δοκιμίων.
- Οπτικό μικροσκόπιο του οίκου LEITZ, για τη μελέτη της μικροδομής των εξεταζόμενων δοκιμίων.
- Λογισμικό ανάλυσης εικόνας (IMAGE PRO PLUS ANALYSIS), που επιτρέπει την επεξεργασία και διενέργεια μετρήσεων σε Εικόνες που φτάνουν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή από το στερεοσκόπιο και το οπτικό μικροσκόπιο, μέσω κάμερας προσαρμοζόμενης σε αυτά.
- Μικροσκληρόμετρο του οίκου SHIMADZU μοντέλο HMV-2E με διεισδυτή Vickers.

Επιπλέον, η μεταλλογραφική μελέτη, περιλαμβάνει και ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM - EDS) η οποία πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.).



Εικόνα 5.7 Άποψη του χώρου μεταλλογραφίας του εργαστηρίου ναυπηγικής τεχνολογίας

5.2.3 Εξοπλισμός μέτρησης θερμικών κύκλων συγκόλλησης

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκαν όργανα μετατροπής και ενίσχυσης σημάτων από θερμοστοιχεία, του οίκου ΙΟΤΕCH, συμπεριλαμβανομένων κατάλληλων φίλτρων συμβατού λογισμικού (pDaqView) προς καταγραφή των μετρήσεων σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα θερμοστοιχεία ήταν τύπου - K (Chromel/Alumel Thermocouples). Χαρακτηρίζονται ως “γενικής χρήσης”, έχουν χαμηλό κόστος και παρέχονται σε μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες καλύπτουν εύρος από - 200°C έως +1200°C και η ευαισθησία τους είναι 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Δημιουργούν ηλεκτρικό σήμα κατά την κάμψη τους κι έτσι είναι καλό να αποφεύγεται η χρήση τους σε συστήματα που παρουσιάζουν κραδασμούς ή να λαμβάνεται ειδική μέριμνα πριν τη χρήση τους.

5.3 Προετοιμασία ελασμάτων και δοκιμών για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων και το μεταλλογραφικό έλεγχο αντίστοιχα

5.3.1 Προετοιμασία των ελασμάτων για τη διενέργεια των συγκολλήσεων

Της διενέργειας των συγκολλήσεων προηγήθηκε επιμελής προετοιμασία των προς συγκόλληση τεμαχίων η οποία περιλάμβανε:

- Αφαίρεση των επιφανειακών λιπαντικών ή άλλων ακαθαρσιών με τη βοήθεια υφάσματος ή χαρτιού, εμβαπτισμένου σε ακετόνη.
- Χρήση μεταλλικής βούρτσας από ανοξείδωτο χάλυβα, προς απομάκρυνση του οξειδίου του αλουμινίου που μορφοποιείται στην επιφάνεια του κράματος.
- Διαμόρφωση των ακμών συγκόλλησης (Εικ. 5.8) σύμφωνα με τους κανονισμούς^[64] στη φρεζομηχανή του εργαστηρίου.
- Αφαίρεση των επιφανειακών λιπαντικών από τη διαδικασία φρεζαρίσματος με τη βοήθεια υφάσματος ή χαρτιού, εμβαπτισμένου σε ακετόνη.
- Χρήση μεταλλικής βούρτσας από ανοξείδωτο χάλυβα επί των διαμορφωμένων ακμών προς απομάκρυνση του οξειδίου του αλουμινίου που τυχόν έχει μορφοποιηθεί στην επιφάνεια τους από τη διαδικασία φρεζαρίσματος.
- Διάνοιξη οπών σε προκαθορισμένες θέσεις και τοποθέτηση θερμοστοιχείων για τη μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης. Επικάλυψη των θερμοστοιχείων με κεραμική κόλλα για την προστασία τους αλλά και προς εξασφάλιση της σταθερής τους θέσης.



Εικόνα 5.8 Γεωμετρίες ακμών συγκόλλησης ανάλογα με το πάχος του ελάσματος όπως ορίζονται από τους κανονισμούς. α) Πάχος ελάσματος 4mm και 5mm, β) πάχος ελάσματος 5mm και 6mm

5.2.5 Προετοιμασία των δοκιμών για τη διαδικασία των μετρήσεων

Μετά την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων, τα συγκολλημένα ελάσματα κόπηκαν εγκάρσια, έτσι ώστε να διακρίνεται σε τομή η επιφάνεια της ραφής της συγκόλλησης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Κατόπιν, ενδεικτικό τμήμα από κάθε τεμάχιο τοποθετήθηκε σε ρητίνη, ώστε να λειανθεί και στιλβωθεί η τομή. Εφόσον όλα τα δοκίμια απέκτησαν την επιθυμητή επιφάνεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας ενώ ύστερα από χημική - ηλεκτροχημική προσβολή, παρατηρήθηκαν αρχικά μακροσκοπικά και στη συνέχεια σε οπτικό μικροσκόπιο ή/και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, όπου και φωτογραφήθηκαν οι κρίσιμες περιοχές μελέτης, σε διαφορετικές μεγεθύνσεις. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες μετρήσεις, όπως το ποσοστό πορώδους στο μέταλλο συγκόλλησης και οι διαστάσεις των κόκκων στις διάφορες ζώνες της συγκόλλησης.



Εικόνα 5.9 Το κύκλωμα ηλεκτροχημικής προσβολής που χρησιμοποιήθηκε (ιδιοκατασκευή)

Κεφάλαιο 6°

Αποτελέσματα και συζήτηση μεταλλογραφικής μελέτης

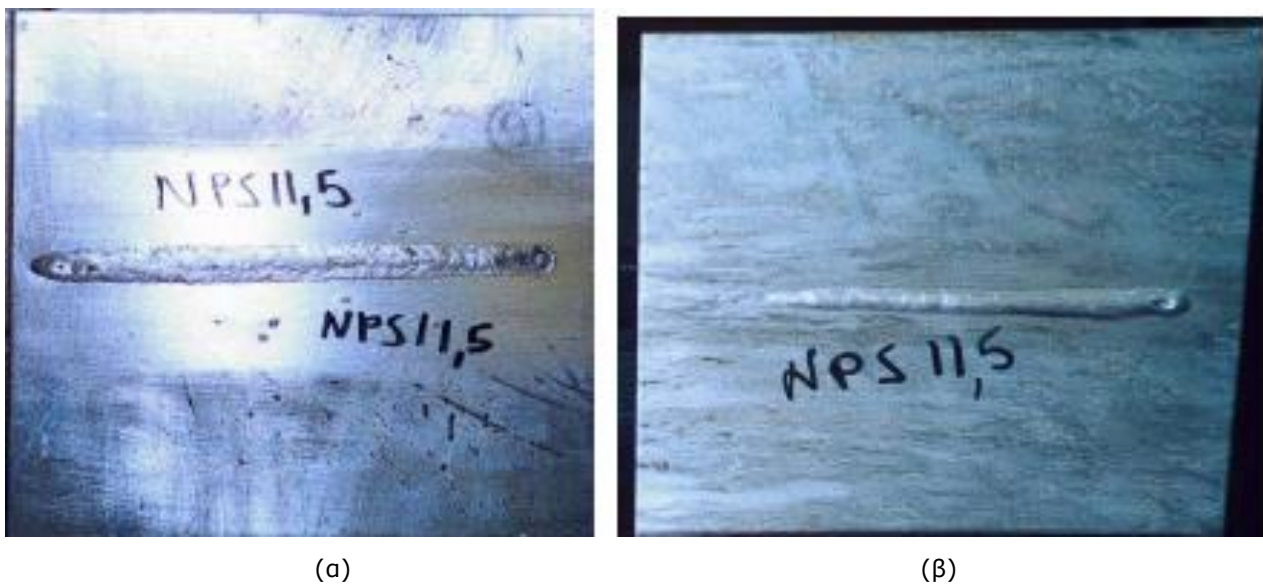
6.1 Δοκιμές απόθεσης μετάλλου (Bead on plate) σε δοκίμια πάχους 4mm

Σε δοκίμια πάχους 4mm και διαστάσεων 175x300mm², πραγματοποιήθηκαν συνολικά 16 δοκιμές (Εικ. 6.1) με διαφορετικές παραμέτρους συγκόλλησης (Πιν. 6.1).

Αναλυτικότερα, διατηρήθηκε σταθερή η παράμετρος της τάσης του ρεύματος, στην τιμή των 24V (τιμή εντός των ορίων που προτείνουν οι κανονισμοί^[64]), ενώ ως μεταβλητές παράμετροι επιλέχθηκαν η ένταση του ρεύματος και η ταχύτητα προχώρησης του τόξου. Για διαφορετικές τιμές της έντασης του ρεύματος, έγιναν δοκιμές με πέντε διαφορετικές ταχύτητες. Οι δοκιμές αριθμήθηκαν από 1-12 και μπροστά από κάθε αριθμό προστέθηκαν τα αρχικά ΧΠ (Χωρίς Προθέρμανση).

Κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών επιλέχθηκαν νέες παράμετροι συγκόλλησης που αρχικά δεν είχαν αποφασιστεί οπότε και προέκυψε η αρίθμηση ΧΠ3.5, ΧΠ7.5, ΧΠ11.5. Μια δοκιμή ήταν εκτός οποιασδήποτε άλλης ομάδας δοκιμών από πλευράς συνθηκών και ονομάστηκε ΧΠF.

Προκειμένου να διερευνηθεί ο ρόλος του αερίου προστασίας και της τυχόν προθέρμανσης των ελασμάτων, η παροχή αυτού κρατήθηκε αρχικά εσκεμμένα στα 16 - 18 lit/min, χαμηλότερα δηλαδή σε σχέση με την τιμή που προτείνεται από τους κανονισμούς (20lit/min).

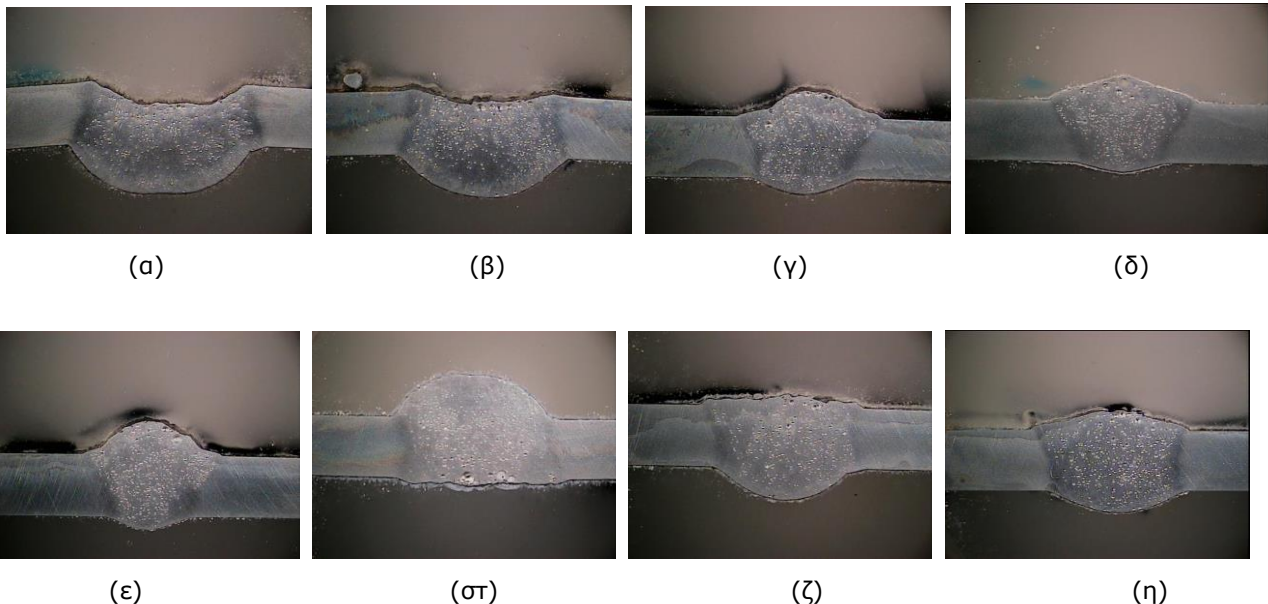


Εικόνα 6.1 Ενδεικτική φωτογραφία δοκιμίου έπειτα από συγκόλληση απόθεσης μετάλλου. α) επιφάνεια συγκόλλησης, β) επιφάνεια ρίζας

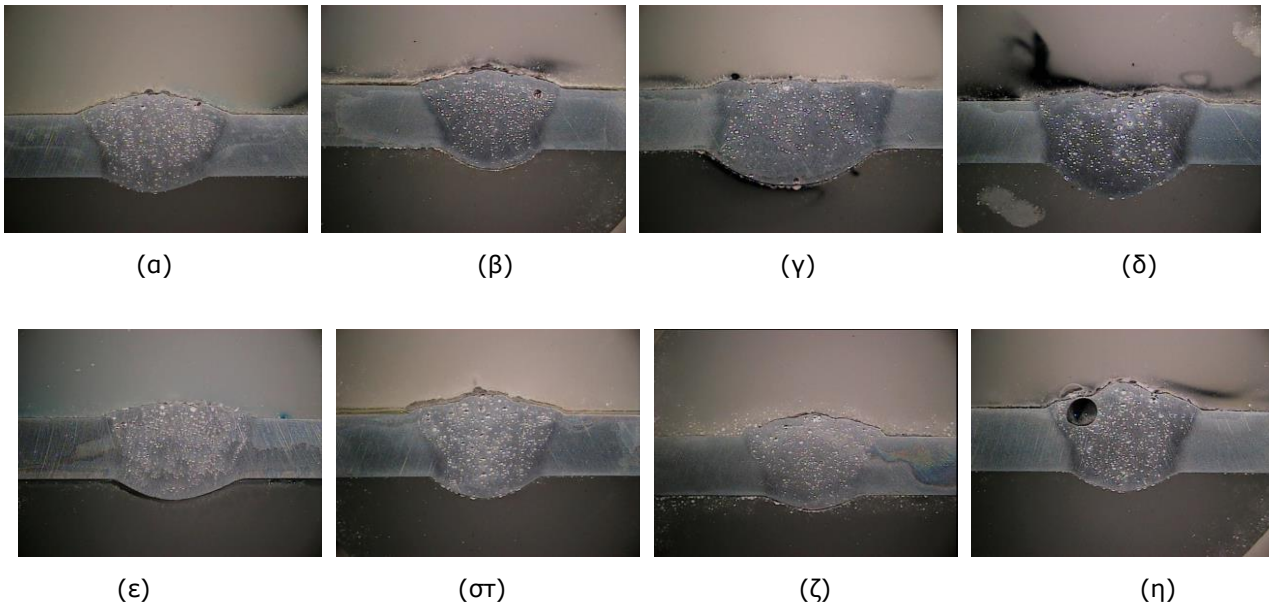
Πίνακας 6.1 Οι παράμετροι συγκόλλησης για τις δοκιμές απόθεσης μετάλλου, για παροχή του αερίου προστασίας περίπου 16 – 18 lit/min

α/α	Ένταση ρεύματος συγκόλλησης (A)	Τάση ρεύματος συγκόλλησης (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (cm/min)	Κωδική ονομασία δοκιμίου
1	130	24	40	ΧΠ1
2	140	24	50	ΧΠ2
3	140	24	60	ΧΠ3
4	140	24	65	ΧΠ3.5
5	145	24	70	ΧΠ4
6	150	24	40	ΧΠ5
7	150	24	50	ΧΠ6
8	150	24	60	ΧΠ7
9	150	24	65	ΧΠ7.5
10	155	24	70	ΧΠ8
11	160	24	40	ΧΠ9
12	160	24	50	ΧΠ10
13	160	24	60	ΧΠ11
14	160	24	65	ΧΠ11.5
15	165	24	70	ΧΠ12
16	170	24	65	ΧΠF

Φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων φαίνονται στις Εικόνες 5.2 και 5.3 που ακολουθούν



Εικόνα 6.2 Φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων α) ΧΠ1, β) ΧΠ2, γ) ΧΠ3, δ) ΧΠ3.5, ε) ΧΠ4, στ) ΧΠ5, ζ) ΧΠ6, η) ΧΠ7 (Πιν. 6.1)



Εικόνα 6.3 Φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων α) ΧΠ7.5, β) ΧΠ8, γ) ΧΠ9, δ) ΧΠ10, ε) ΧΠ11, στ) ΧΠ11.5, ζ) ΧΠ12, η) ΧΠΦ (Πιν. 6.1)

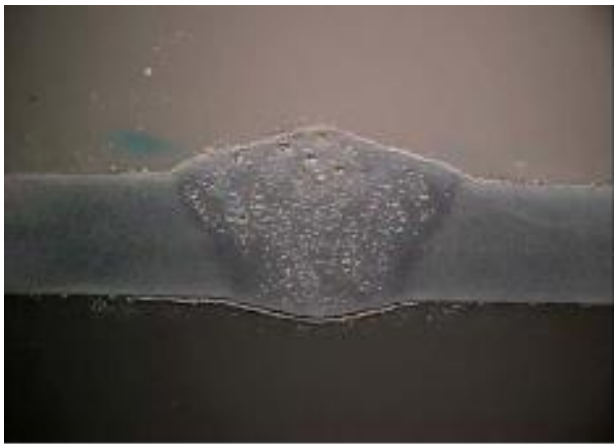
Από τις παραπάνω δοκιμές (Πιν. 6.1), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν χωρίς προθέρμανση των ελασμάτων, και τις Εικόνες 6.2, 6.3, αγνοώντας την ύπαρξη υπερβολικού πορώδους, το οποίο άλλωστε ήταν αναμενόμενο, λόγω της χαμηλής παροχής αερίου προστασίας, επιλέχθηκαν τα δοκίμια ΧΠ3.5, ΧΠ4, ΧΠ7.5, ΧΠ8, ΧΠ11.5, ΧΠ12 ως τα βέλτιστα, σε ότι αφορά στη γεωμετρία της ραφής.

Στη συνέχεια, και υπό τις συνθήκες που έγιναν οι δοκιμές για τα δοκίμια που επιλέχθηκαν ως βέλτιστα, έγιναν νέες δοκιμές, με τα ελάσματα όμως να έχουν προθερμανθεί σε θερμοκρασία 150°C. Τα δοκίμια απέκτησαν την κωδική ονομασία ΜΠ (Με Προθέρμανση) ενώ η αρίθμηση τους παρέμεινε ίδια με αυτήν των δοκιμών ΧΠ.

Καθώς η παροχή του αερίου προστασίας παρέμεινε σε χαμηλότερα από τα κανονικά επίπεδα, το ποσοστό του πορώδους στο μέταλλο συγκόλλησης παρέμεινε υψηλό (Εικ. 6.4β, 6.4δ, 6.4στ, 6.5β, 6.5δ, 6.5στ). Ωστόσο, σε σύγκριση με τις δοκιμές χωρίς προθέρμανση (Εικ. 6.4α, 6.4γ, 6.4σε, 6.5α, 6.5γ, 6.5ε), η πυκνότητα των πόρων δείχνει, σε κάθε περίπτωση, να έχει ελαττωθεί, ενώ παρατηρείται τάση μετατόπισης τους προς την κορυφή της συγκόλλησης.

Το γεγονός αυτό οφείλεται, προφανώς, στους χαμηλότερους ρυθμούς απόψυξης των συγκολλημένων ελασμάτων, που έχουν υποστεί προθέρμανση πριν τη συγκόλληση τους, που επιτρέπει στο εγκλωβισμένο αέριο (κυρίως υδρογόνο) του μετάλλου συγκόλλησης, να διαφύγει

μερικώς ή πλήρως από αυτό ή έστω να κινηθεί με πιο γρήγορους ρυθμούς προς την επιφάνεια διαφυγής, πριν προλάβει τελικά να παγιδευτεί κατά την στερεοποίηση του.



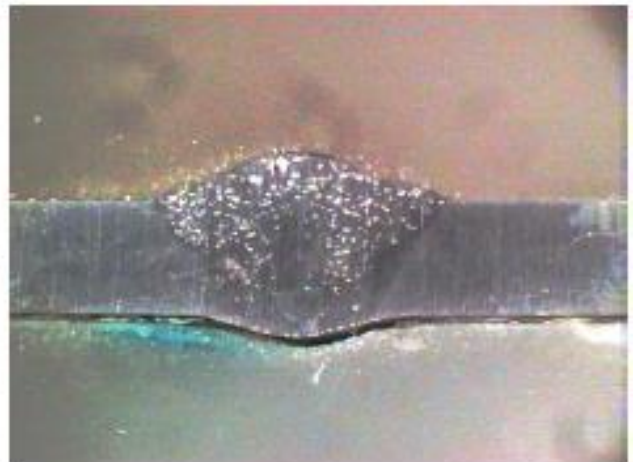
α)



β)



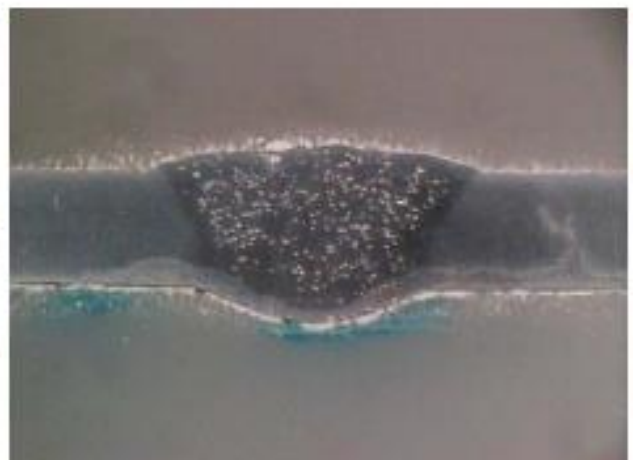
γ)



δ)



ε)

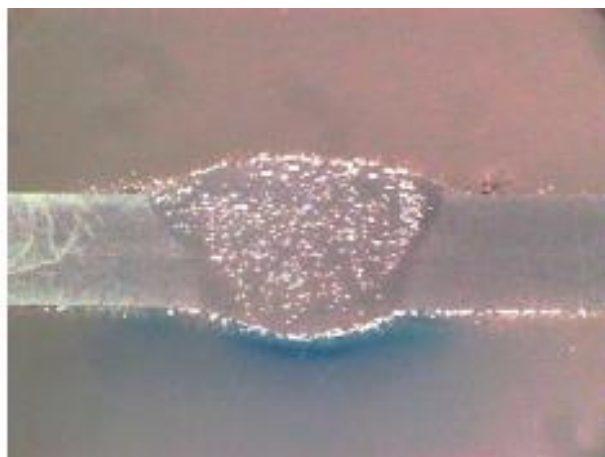


στ)

Εικόνα 6.4 Σύγκριση τομών συγκόλλησης ΧΠ και ΜΠ. α) ΧΠ3.5, β) ΜΠ3.5, γ) ΧΠ4, δ) ΜΠ4, ε) ΧΠ7.5, στ) ΜΠ7.5



α)



β)



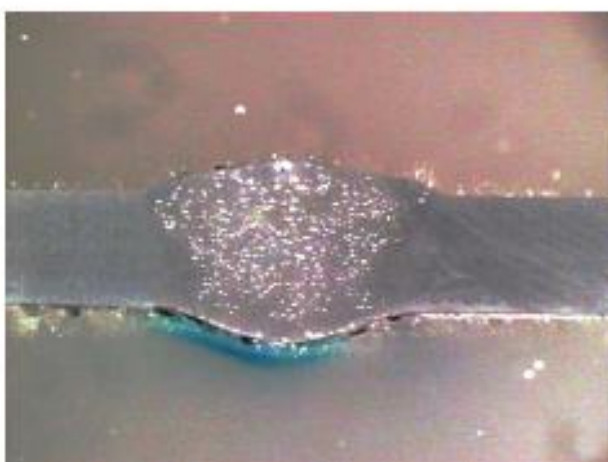
γ)



δ)



ε)



στ)

Εικόνα 6.5 Σύγκριση τομών συγκόλλησης ΧΠ και ΜΠ α) ΧΠ8, β) ΜΠ8, γ) ΧΠ11.5, δ) ΜΠ11.5, ε) ΧΠ12, στ) ΜΠ12

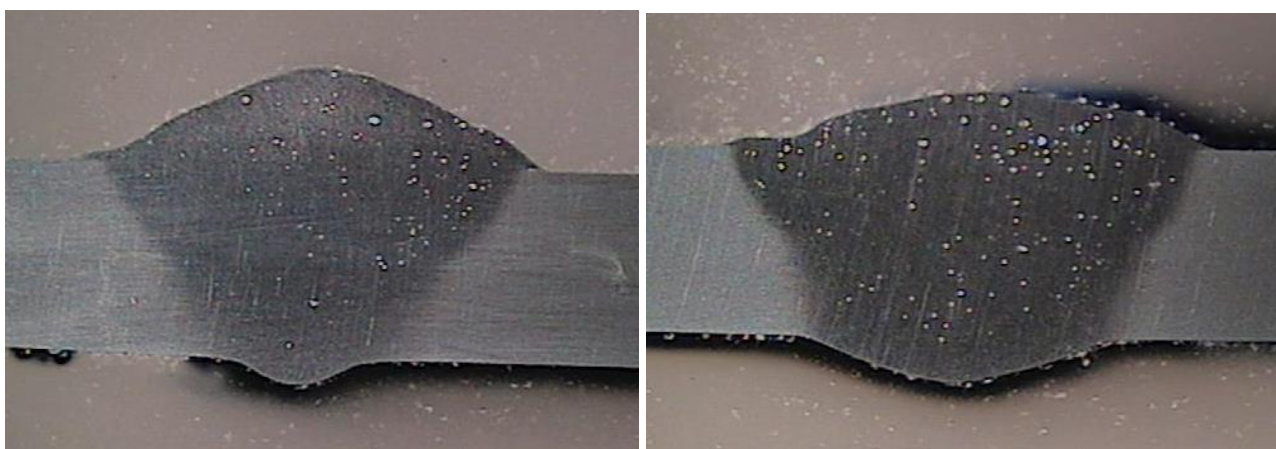
Τέλος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απόθεσης μετάλλου (bead on plate), χωρίς να προηγηθεί της συγκόλλησης προθέρμανση των ελασμάτων, με κανονικές συνθήκες παροχής αερίου προστασίας, της τάξης των 20lit/min.

Οι παράμετροι των συγκολλήσεων ήταν ίδιες με αυτές των βέλτιστων ΧΠ - ΜΠ και υπενθυμίζονται στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης ως προς τη γεωμετρία της ραφής για τις δοκιμές απόθεσης μετάλλου ΧΠ και ΜΠ.

α/α	Ένταση ρεύματος συγκόλλησης (A)	Τάση ρεύματος συγκόλλησης (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (cm/min)	Κωδική ονομασία δοκιμίου
1	140	24	65	ΧΠ3.5
2	145	24	70	ΧΠ4
3	150	24	65	ΧΠ7.5
4	155	24	70	ΧΠ8
5	160	24	65	ΧΠ11.5
6	165	24	70	ΧΠ12

Μελέτη των τομών των συγκολλήσεων αυτών, έδειξαν δραστική μείωση του ποσοστού του πορώδους και διατήρηση της καλής γεωμετρίας των ραφών. Ενδεικτικά, στις Εικόνες 6.6α και 6.6β, παρουσιάζονται φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων με αύξοντα αριθμό 3 και 6 αντίστοιχα (Πιν. 6.2). Έπειτα από μετρήσεις, προέκυψε το ποσοστό του πορώδους για την συγκόλληση υπό τις συνθήκες 3 (Πιν. 6.2) ήταν της τάξης του 5% ενώ υπό τις συνθήκες 6, της τάξης του 8%. Ανάλογα ποσοστά προέκυψαν και για τις συγκολλήσεις υπό τις υπόλοιπες ομάδες παραμέτρων του Πίνακα 6.2.



α)

β)

Εικόνα 6.6 Μακροφωτογραφίες τομών των συγκολλήσεων με συνθήκες παροχής αερίου προστασίας 20lit/min. α) 150A, 24V, 65cm/min β) 165A, 24V, 70cm/min

6.2 Επίπεδες συγκολλήσεις ελασμάτων μικρών διαστάσεων

Αντίστοιχη μελέτη, με αυτή που παρουσιάστηκε στην §6.1, πραγματοποιήθηκε και σε δοκίμια πάχους 5mm και 6mm, διαστάσεων 175x300mm², προκειμένου να προκύψουν οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης σε ότι αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ραφής.

Έτσι, μετά την ολοκλήρωση των προκαταρκτικών δοκιμών bead on plate και για τα τρία πάχη από τα δύο διατιθέμενα κράματα αλουμινίου (AA 5083 και AA 5383), οι βέλτιστες παράμετροι που προέκυψαν, συνοψίζονται στον Πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 6.3).

Πίνακας 6.3 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη όπως προέκυψαν από τις προκαταρκτικές δοκιμές bead on plate.

Κράμα - Πάχος	Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή αερίου προστασίας (lit/min)	Στρώσεις
AA5083-H116 (4mm)	24	150	67	20	1
AA5083-H111 (5mm)	26	165	67	20	1
AA5383-H116 (6mm)	28	180	63	20	1 ^η
			67		2 ^η

6.2.1 Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5083-H116 πάχους 4mm

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε δοκίμια από κράμα αλουμινίου AA5083-H116 πάχους 4mm και διαστάσεων 175x150mm² με τις συνθήκες που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.3. Η γεωμετρία των ακμών και η θέση τους κατά τη διαδικασία συγκόλλησης φαίνεται στην Εικόνα 5.8α. Τονίζεται ότι δεν υπήρχε διάκενο μεταξύ των υπό συγκόλληση ελασμάτων.

Ως επικαλύπτρα, χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ανοξείδωτο χάλυβα (304L) κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να υπακούει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ορίζουν οι κανονισμοί^[64].

Τις συγκολλήσεις, ακολούθησε, όπως έχει αναφερθεί, πλήρης μεταλλογραφική μελέτη.

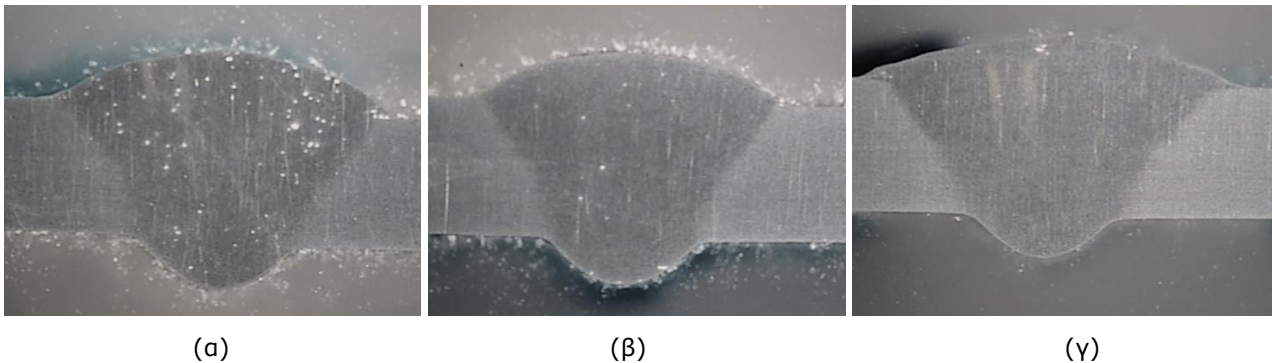
6.2.1.1 Μακρογραφική μελέτη

Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων όπως αυτές ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο.

Από τη μακρογραφική παρατήρηση και μελέτη των τομών προκύπτουν τα εξής:

- Η διείδωση είναι ικανοποιητική (Εικ. 6.7).

- Οι τομές (Εικ. 6.7) παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (ύψος, πλάτος ραφής - Πίνακας 6.4).
- Το πορώδες κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα (από 8% π.χ. Εικ. 6.8α έως 0,5% π.χ. Εικ. 6.8γ)
- Το πλάτος της ζώνης τήξης στο μέσον της τομής είναι της τάξης των 6000μm.
- Συνολικά, η επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης καθώς και η προετοιμασία των δοκιμίων που επιλέχθηκε δείχνουν να είναι ορθές.



Εικόνα 6.7 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων

Πίνακας 6.4 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης

	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης (mm)		
	a	b	c
	6,5	8,5	4,5

6.2.1.2 Μελέτη μικροδομής

Στις Εικόνες 6.8 – 6.11, φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης της μικροδομής.

Στην Εικόνα 6.8 φαίνεται η μικροδομή του βασικού μετάλλου. Όπως φαίνεται, αυτή αποτελείται από πλήρως επιμηκυσμένους κόκκους εξαιτίας της κατεργασίας μορφοποίησης που έχει υποστεί το υλικό (Εικ. 6.8α και 6.8γ). Ευδιάκριτες είναι και οι γραμμές πλαστικής παραμόρφωσης λόγω ακριβώς της κατεργασίας αυτής (Εικ. 6.8β και 6.8δ). Οι γκριζόχρωμες και οι πιο σκούρες

μαύρες περιοχές που διακρίνονται στη λευκή μήτρα αλουμινίου (Εικ. 6.8β, 6.8δ) αποτελούν φάσεις Al-Mg, Al-Mg-Si ή Al-Mg-Fe-Mn. Λόγω της μορφολογίας των κόκκων δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του μεγέθους τους κατά ASTM ωστόσο το μέσο πλάτος τους υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 20 έως 30μm ενώ το μέσο μήκος τους βρέθηκε να είναι από 50μm ως 90 ή και 100μm.

Καθώς η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης μειώνεται, παρατηρείται ανακρυστάλλωση των κόκκων (Εικ. 6.9). Στην αρχική μικροδομή του βασικού μετάλλου εμφανίζεται ελάχιστος αριθμός ισοαξονικών κόκκων (Εικ. 6.9α). Καθώς όμως η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης συνεχίζει να μειώνεται, το ποσοστό αυτό σταδιακά αυξάνει ορίζοντας τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη - Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.9β και 6.9γ). Στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ., πολύ κοντά στη ζώνη σύνδεσης με το μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.), οι κόκκοι εμφανίζονται ισοαξονικοί με μέση διάμετρο 30μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 7,5G), υποδηλώνοντας πλήρη ανακρυστάλλωση (Εικ. 6.9γ).

Σε ότι αφορά στο μέταλλο συγκόλλησης, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης με τη Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.10) παρατηρούνται κολονοειδούς μορφής κόκκοι, επιμήκεις, κυψελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης (Εικ. 6.10α-6.10γ) με μέσο πλάτος 80μm και αντίστοιχο μήκος 340μm. Η ανάπτυξη τους εμφανίζεται κάθετη στα όρια της ζώνης στερεοποίησης, ακολουθώντας προφανώς τη διεύθυνση της μέγιστης θερμοκρασιακής μεταβολής. Στην Εικόνα 6.10δ και 6.10ε, η διάταξη των σκουρόχρωμων φάσεων υποδεικνύουν ενδο-δενδριτικής - ευτηκτικής μορφής φάσεις κυρίως Mg_3Al_2 . Στη ζώνη σύνδεσης παρατηρείται επίσης και το φαινόμενο της επιταξίας, καθώς οι αρχικοί κρύσταλλοι του Μ.Σ. στα όρια της, αποτελούν, αρχικά τουλάχιστο, προέκταση των κόκκων που βρίσκονται στα όρια αυτής, αλλά από την πλευρά της Θ.Ε.Ζ. (6.10α-6.10γ).

Στο κέντρο του Μ.Σ., (Εικ. 6.11), οι κόκκοι εμφανίζονται ευμεγέθεις και ισοαξονικοί κυτταροειδούς μορφής και δενδριτικής ανάπτυξης, με μέση διάμετρο 270μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 1,1G).

Συνολικά η ανάπτυξη των κόκκων στο μέταλλο συγκόλλησης αντιστοιχεί με αυτήν του σχήματος 4.4γ και 4.4δ σε ότι αφορά στα όρια του με τη Θ.Ε.Ζ. και με αυτήν του σχήματος 4.4ε σε ότι αφορά στο κέντρο του.

Κατά τη μελέτη της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν σε καμιά περιοχή μικρορωγμές, ενώ στο μέταλλο συγκόλλησης δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική συγκέντρωση μικροπόρων καθώς όπου αυτοί

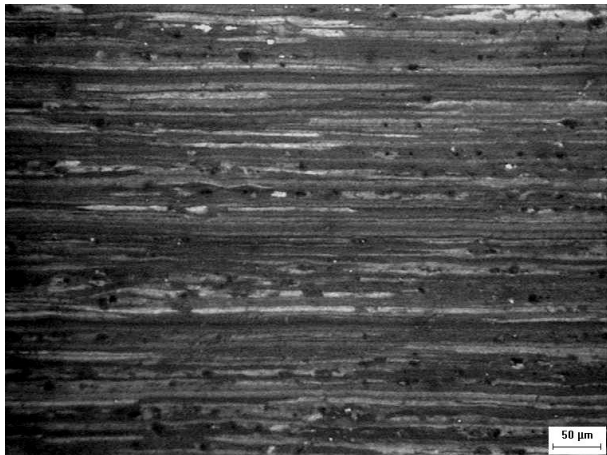
παρατηρήθηκαν ήταν μεμονωμένοι και διασκορπισμένοι σε τυχαίες περιοχές (Εικ. 6.10δ, 6.10ε και 6.11ε, 6.11στ).



(α)



(β)

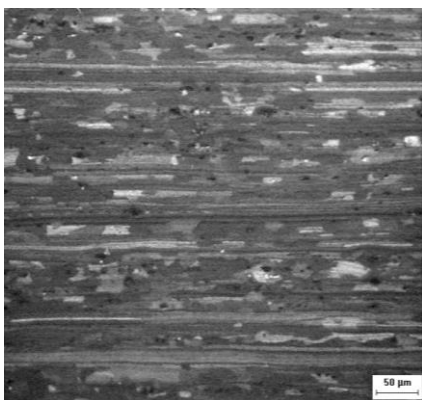


(γ)

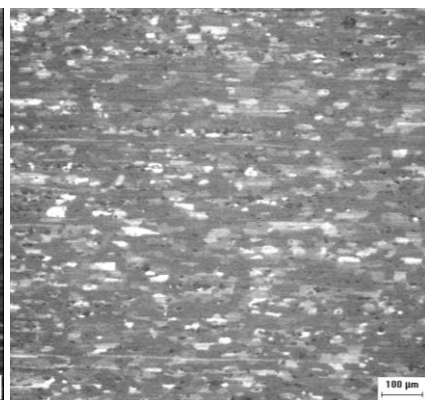


(δ)

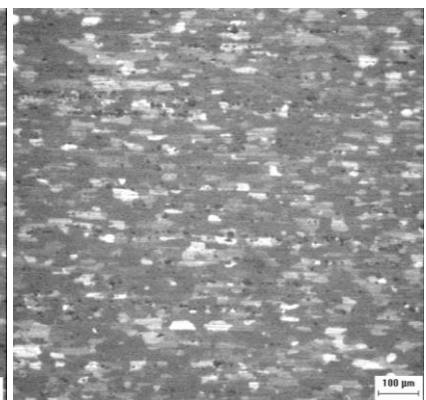
Εικόνα 6.8 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, γ) παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, δ) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200



(α)

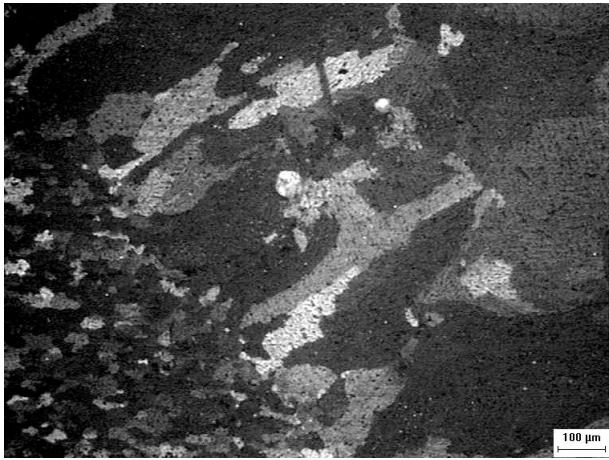


(β)



(γ)

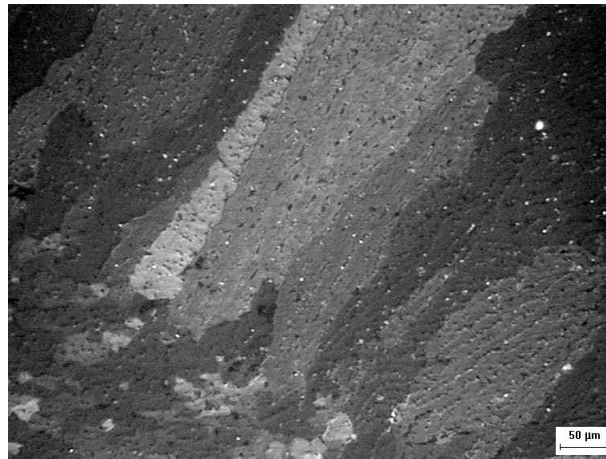
Εικόνα 6.9 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) κοντά στη ζώνη σύνδεσης



(α)



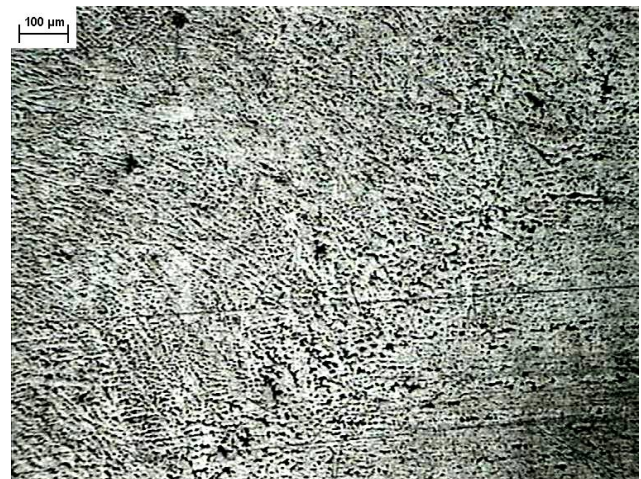
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

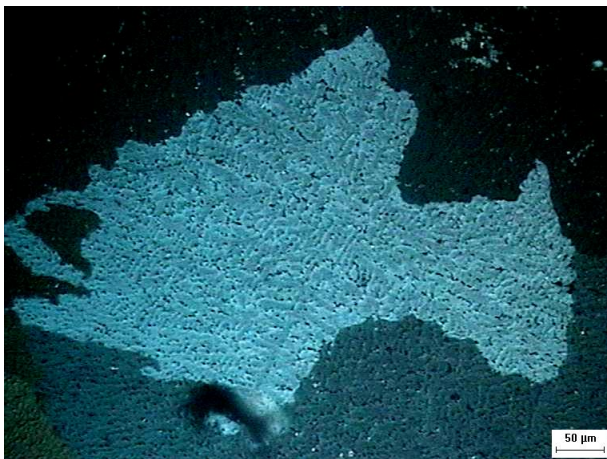
Εικόνα 6.10 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης.
α), β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, γ) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200,
δ), ε) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100



(α)



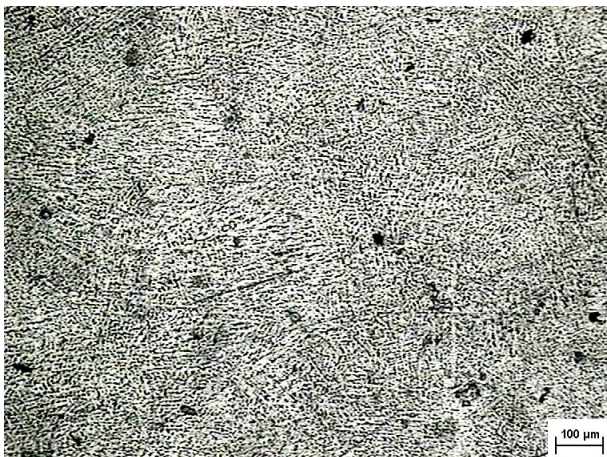
(β)



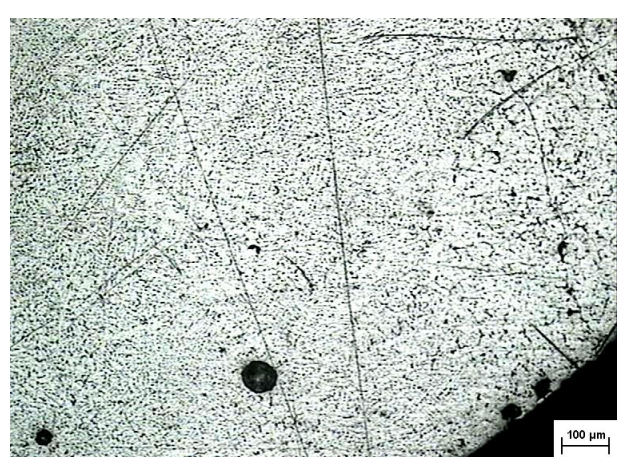
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

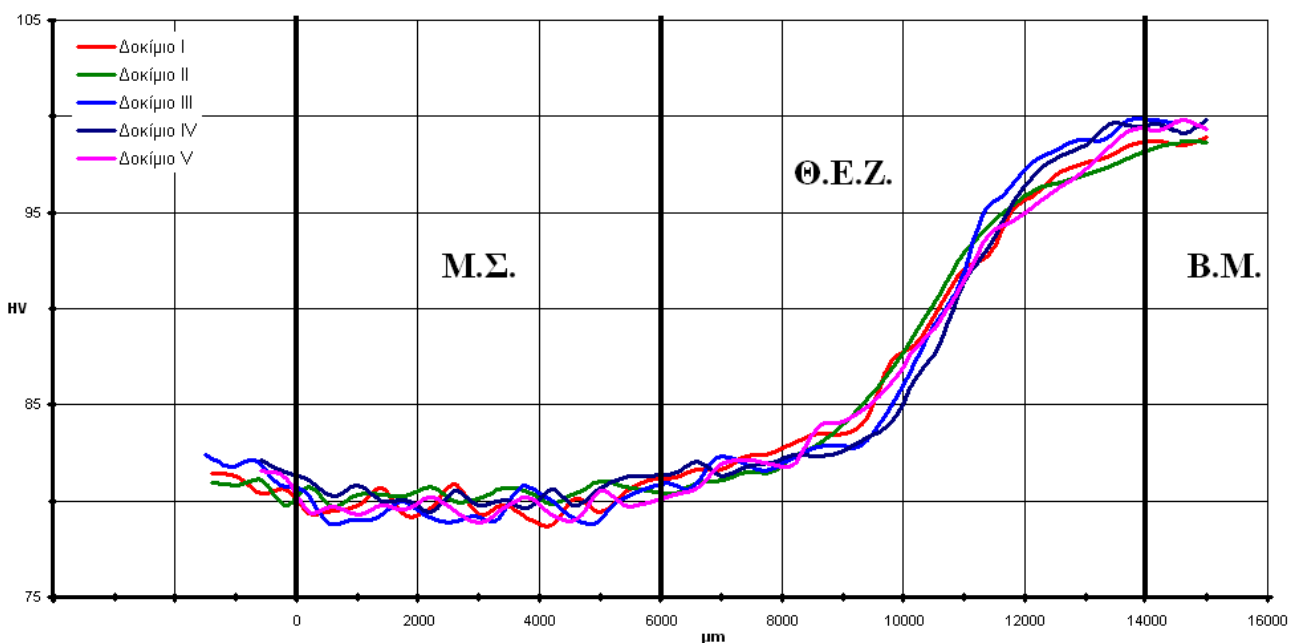
Εικόνα 6.11 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης.

α), β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, γ), δ) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, ε) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, στ) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100, περιοχή ρίζας

6.2.1.3 Μετρήσεις μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν στα δοκίμια όπου πραγματοποιήθηκε και η μελέτη της μικροδομής, στο μέσο πάχος των ελασμάτων (2mm) και με φορτίο 300p (HV_{0.3N}). Κάθε μέτρηση απείχε από την προηγούμενη κατά περίπου 500μm.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικ. 6.12), φαίνονται ενδεικτικά, οι καμπύλες των τιμών μικροσκληρότητας σε συνάρτηση με την απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης, όπως προέκυψαν από μετρήσεις σε τυχαίες τομές των συγκολλήσεων από πέντε διαφορετικά δοκίμια.



Εικόνα 6.12 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλήσεων ελασμάτων μικρών διαστάσεων, πάχους 4mm

Όπως προκύπτει λοιπόν από το μέσο όρο των τιμών των μετρήσεων (Εικ. 6.12), η σκληρότητα του βασικού μετάλλου (Β.Μ.) είναι της τάξης των 97HV_{0.3}, ενώ του μετάλλου συγκόλλησης (Μ.Σ.) είναι 80HV_{0.3} (μείωση ~18%).

Η μείωση των τιμών μικροσκληρότητας συντελείται σταδιακά στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.12) και αντιστοιχεί στην αύξηση του ποσοστού ανακρυστάλλωσης στην περιοχή αυτή (Εικ. 6.9). Στο Μ.Σ. δεν συμβαίνει περαιτέρω μείωση των τιμών μικροσκληρότητας, όπως ίσως θα ανέμενε κανείς καθώς αυτό είναι περισσότερο χονδρόκοκο (Εικ. 6.11α - 6.11δ), εξαιτίας του αυξημένου ποσοστού κραματικών στοιχείων που έχει συνεισφέρει σε αυτό το μέταλλο προσθήκης.

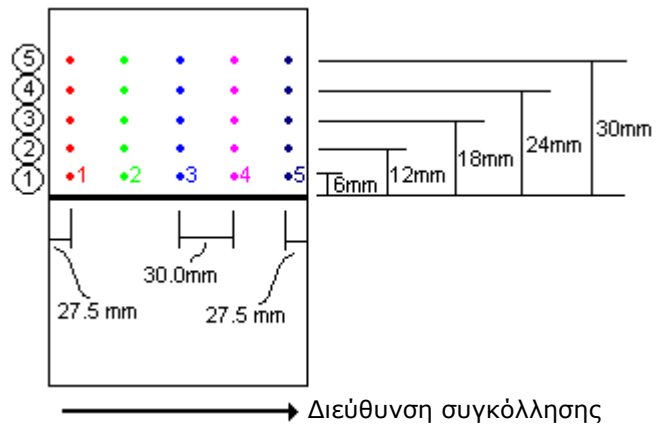
Μετρήσεις μικροσκληρότητας, σε διαφορετικά δοκίμια, στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του, δεν έδωσαν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις και ο μέσος όρος αυτών ήταν 80 HV_{0.3}.

Αν θεωρηθεί ότι η πτώση των τιμών μικροσκληρότητας, αντιστοιχεί σε μείωση της αντοχής λόγω της συγκόλλησης, τότε, ισχύει η παρατήρηση ότι εμφανίζεται, συνολικά, μείωση της μηχανικής αντοχής σε μια ζώνη πλάτους περίπου 15mm εκατέρωθεν του άξονα της συγκόλλησης. Επιπλέον, προκύπτει ότι το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης είναι περίπου 6mm (Εικ. 6.12).

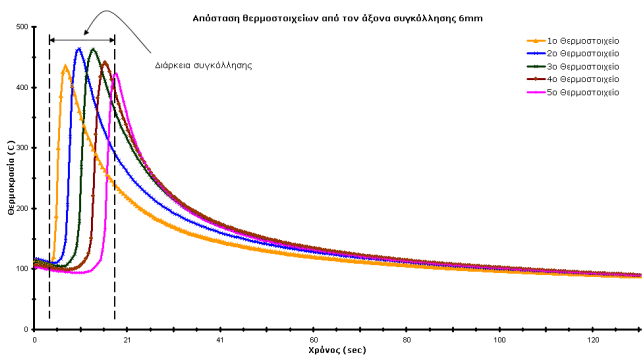
6.2.1.4 Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης

Πραγματοποιήθηκαν πέντε συνολικά δοκιμές συγκόλλησης, με τις βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης (Πιν. 6.3). Σε καθεμιά από αυτές, πέντε θερμοστοιχεία είχαν εγκατασταθεί σε άξονα παράλληλο με τον άξονα συγκόλλησης σε αποστάσεις 27,5mm, 57,5mm, 87,5mm, 117,5mm, 147,5mm από το σημείο έναρξης της συγκόλλησης - αρχή δοκιμίου - (Εικ. 6.14). Σε κάθε δοκιμή, ο άξονας στον οποίο ήταν τοποθετημένα τα θερμοστοιχεία, είχε διαφορετική απόσταση από τον άξονα της συγκόλλησης. Έτσι, στην πρώτη δοκιμή τα θερμοστοιχεία απείχαν 6mm από τον άξονα συγκόλλησης, στη δεύτερη 12mm, στην τρίτη 18mm, στην τέταρτη 24mm και στην πέμπτη 30mm Εικ. 6.14α - 6.14ε).

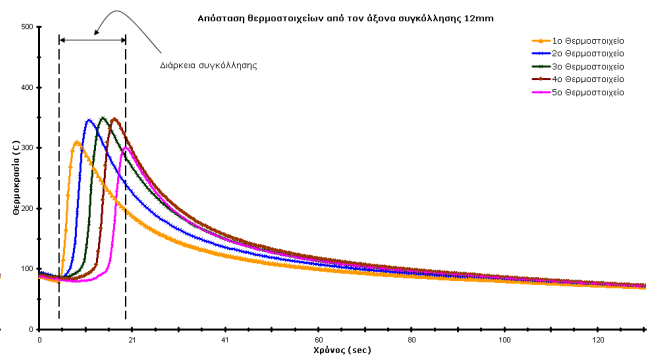
Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση, τα θερμοστοιχεία ήταν τοποθετημένα σε βάθος 2mm από την επιφάνεια συγκόλλησης.



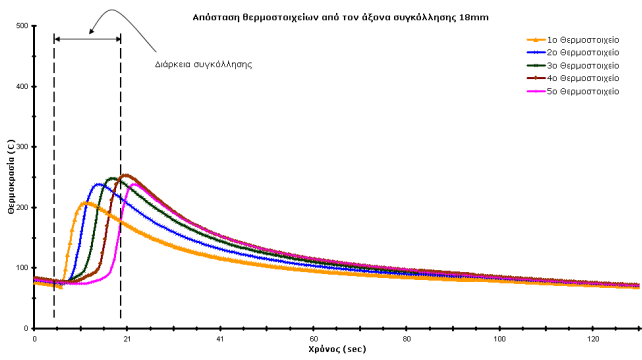
Εικόνα 6.13 Συνολική διάταξη θερμοστοιχείων προς μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης



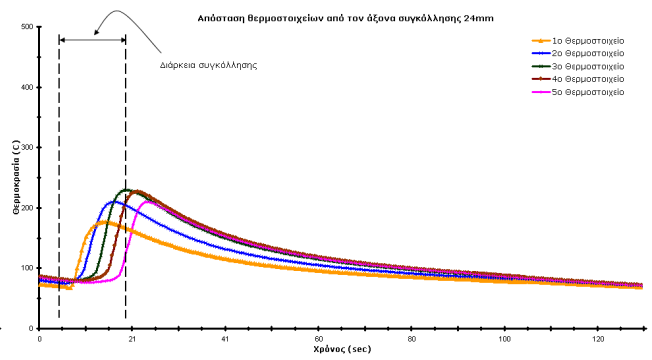
(α)



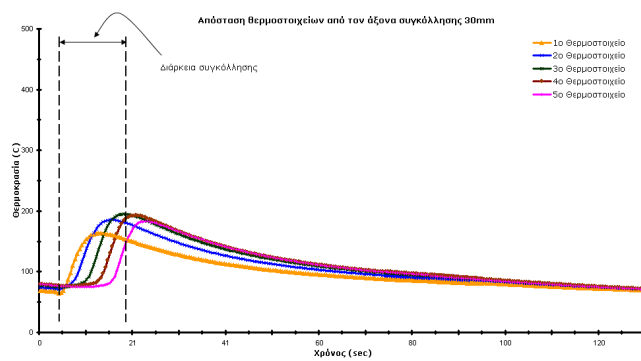
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

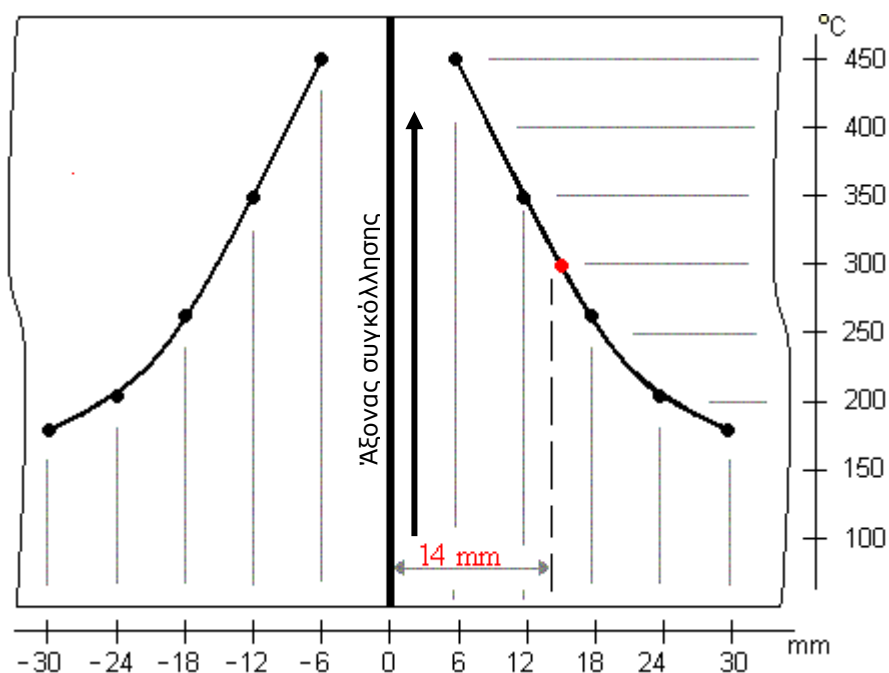
Εικόνα 6.14 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης
Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm

Από τις μετρήσεις των θερμικών κύκλων προκύπτει ότι:

- Η θερμοκρασία αποκτά τη μέγιστη τιμή της, σχεδόν τη χρονική στιγμή που διέρχεται από τον άξονα εγκατάστασης των θερμοστοιχείων ο συγκολλητικός δαυλός, στην περίπτωση που τα θερμοστοιχεία βρίσκονται κοντά στη συγκόλληση (Εικ. 6.14α, 6.14β), ενώ για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται μακριά από αυτήν, παρατηρείται μικρή χρονική υστέρηση έως ότου καταμετρηθεί η μέγιστη θερμοκρασία.
- Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, η θερμοκρασία αποκτά τη μέγιστη, ανά περιοχή, τιμή της μέσα στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η συγκόλληση γεγονός αναμενόμενο, αν λάβει κανείς υπόψη τη μεγάλη θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου σε συνδυασμό με τις μικρές διαστάσεις των δοκιμίων.
- Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε όλη τη διάρκεια του θερμικού κύκλου είναι ίδιος για τις περιοχές που βρίσκονται σε ίδια απόσταση από τον άξονα της συγκόλλησης (Εικ. 6.14).
- Οι καμπύλες θερμοκρασιακής μεταβολής δίνουν απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας για περιοχές κοντά στη συγκόλληση και περισσότερο ομαλή για περιοχές μακριά από αυτή.
- Σε κάθε περίπτωση σε χρόνο μικρότερο από 150sec από το τέλος της συγκόλλησης το δοκίμιο αποκτά θερμοκρασία μικρότερη από 100°C.

- Η θερμοκρασία σε απόσταση 6mm από τον άξονα συγκόλλησης αγγίζει τους 450°C υποδηλώνοντας την πλήρη ανακρυστάλλωση του υλικού στην περιοχή αυτή (Εικ. 6.14α).
- Όσο η απόσταση από την περιοχή συγκόλλησης αυξάνει οι τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών ελαττώνονται. Έτσι, σε απόσταση 12mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 350°C υποδεικνύοντας ότι και σε αυτήν την περιοχή έχει συμβεί ανακρυστάλλωση (Εικ. 6.14β).
- Σε απόσταση 18mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 250°C (Εικ. 6.14γ) ενώ σε αποστάσεις 24mm και 30mm οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν ήταν 230°C και 190°C αντίστοιχα (Εικ. 6.14β, 6.14δ).

- Όπως προκύπτει και από το σκαριφηματικό διάγραμμα της Εικόνας 6.15, που είναι βασισμένο στις μετρήσεις των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης, το εύρος της παράλληλης με τον άξονα συγκόλλησης, ζώνης όπου η θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης (>300°C), (ζώνη τήξης και Θ.Ε.Ζ.) είναι της τάξης των 14mm. Η διαπίστωση αυτή, συμφωνεί με τις παρατηρήσεις από τη μελέτη της μικροδομής (Εικ. 6.8 - 6.11) και τις μετρήσεις μικροσκληρότητας (Εικ. 6.12).



Εικόνα 6.15 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης

6.2.2 Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5083-H111 πάχους 5mm

Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε δοκίμια από κράμα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 5mm και διαστάσεων 175x150mm² με τις βέλτιστες συνθήκες που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.3. Η γεωμετρία των ακμών και η θέση τους κατά τη διαδικασία συγκόλλησης φαίνεται στην Εικόνα 5.8β. Τονίζεται ότι δεν υπήρχε διάκενο μεταξύ των υπό συγκόλληση ελασμάτων.

Ως επικαλύπτρα, χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ανοξείδωτο χάλυβα (304L) κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να υπακούει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ορίζουν οι κανονισμοί^[64].

Τις συγκολλήσεις, ακολούθησε πλήρης μεταλλογραφική μελέτη. Από αυτή, διαπιστώθηκε πως παρ' όλη τη διαφορά στις συνθήκες συγκόλλησης σε σχέση με τις συγκολλήσεις των αντίστοιχων ελασμάτων πάχους 4mm, δεν παρατηρήθηκαν ουσιώδεις διαφορές κατά τη μεταλλογραφική μελέτη των συγκολλήσεων αυτών σε σύγκριση με αυτήν που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 6.2.1.

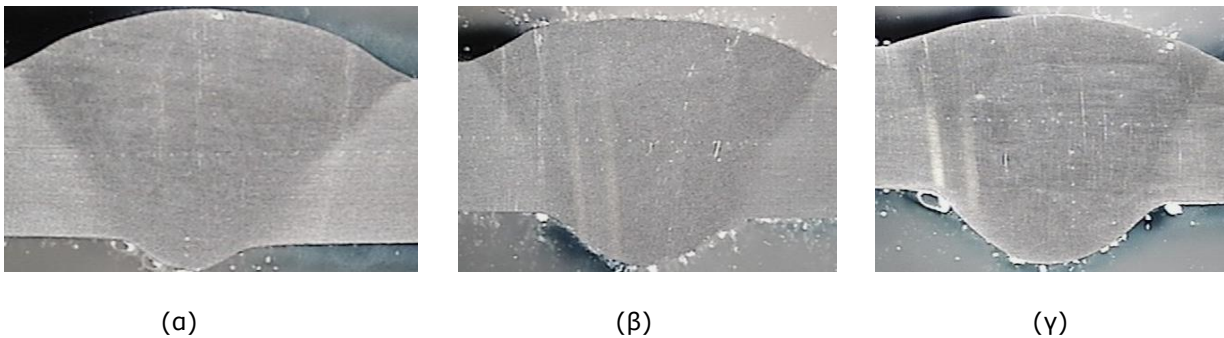
Ωστόσο, για λόγους πληρότητας και για να καταστεί προφανής η παραπάνω διαπίστωση, παρουσιάζονται συνοπτικά τα ακόλουθα αποτελέσματα:

6.2.2.1 Μακρογραφική μελέτη

Στην Εικόνα 6.16 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων όπως αυτές ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο.

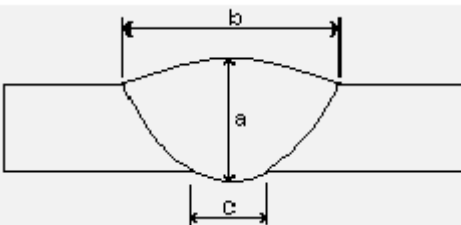
Από τη μακρογραφική παρατήρηση και μελέτη των τομών προκύπτουν τα εξής:

- Η διεύθυνση είναι ικανοποιητική (Εικ. 6.16).
- Οι τομές (Εικ. 6.17) παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (ύψος, πλάτος ραφής - Πίνακας 6.5).
- Το πορώδες κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα (~ 0,5%).
- Το πλάτος της ζώνης τήξης στο μέσο της τομής είναι της τάξης των 8000μm
- Συνολικά, η επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης καθώς και η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων που ακολουθήθηκε, δείχνουν να είναι ορθές.



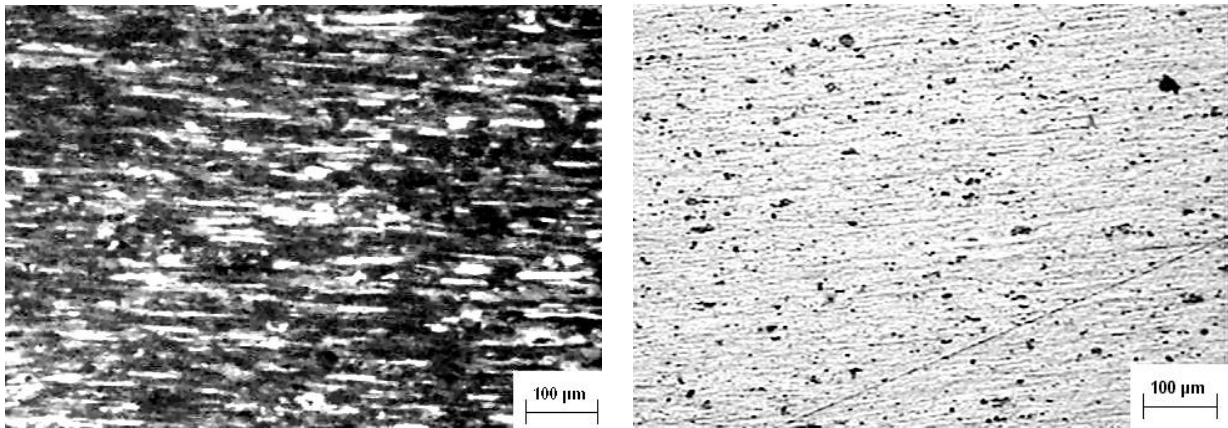
Εικόνα 6.16 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων

Πίνακας 6.5 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης

	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης (mm)		
	a	b	c
	7,5	10,5	5,5

6.2.2.2 Μελέτη μικροδομής

Στις Εικόνες 6.17 – 6.20, φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης της μικροδομής.



(α)

(β)

Εικόνα 6.17 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x100

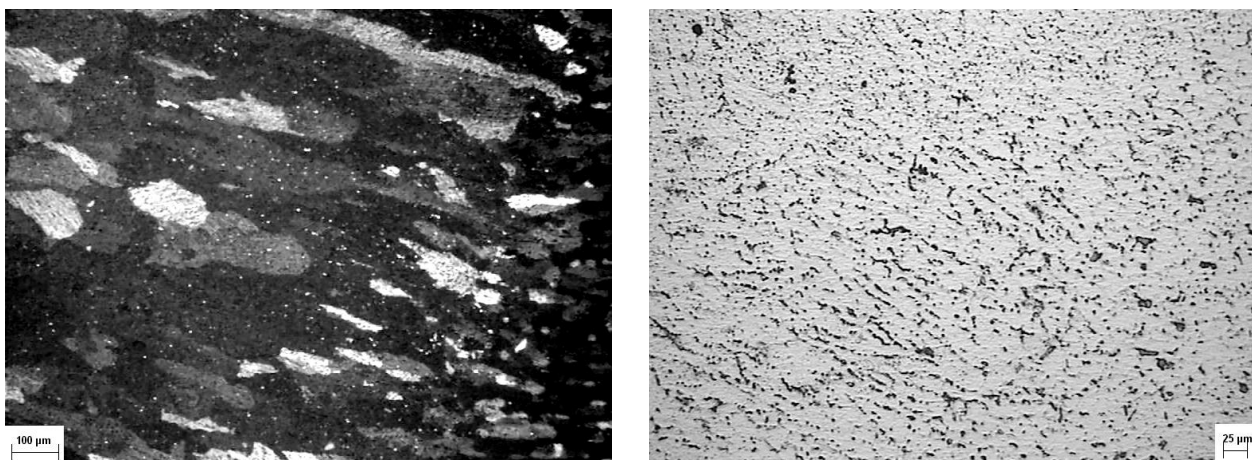


(α)

(β)

(γ)

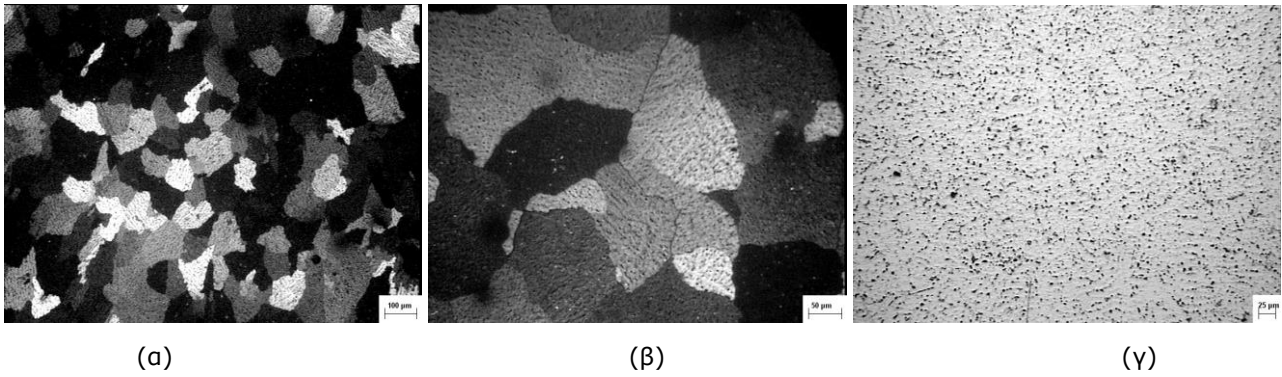
Εικόνα 6.18 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) πιο κοντά στη ζώνη σύνδεσης



(α)

(β)

Εικόνα 6.19 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης.
α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100,
β) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200



Εικόνα 6.20 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης.

α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x100, β) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός x200, γ) Παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός x200

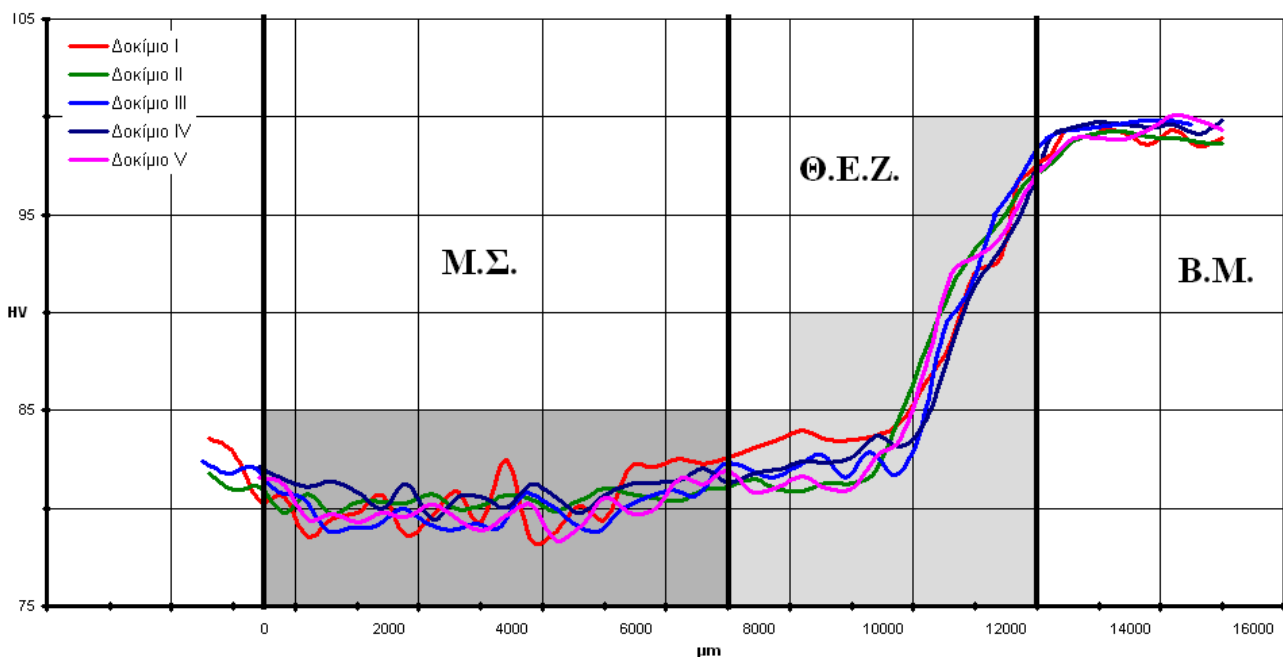
Από τη μελέτη της μικροδομής προκύπτει ότι:

- Η μικροδομή του βασικού μετάλλου παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά του κράματος AA5083-H116 και αποτελείται από πλήρως επιμηκυσμένους κόκκους με ευδιάκριτες τις γραμμές πλαστικής παραμόρφωσης εξαιτίας της κατεργασίας μορφοποίησης (Εικ. 6.17β). Το μέσο πλάτος των κόκκων στην περιοχή αυτή, υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 20μm – 30μm ενώ το μέσο μήκος τους βρέθηκε να κυμαίνεται από 50μm ως και 100μm.
- Ανακρυστάλλωση παρατηρείται καθώς η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης μειώνεται (Εικ. 6.18) και το ποσοστό αυτής αυξάνει όσο μειώνεται η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης.
- Στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ., πολύ κοντά στη ζώνη σύνδεσης με το μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.), οι κόκκοι εμφανίζονται ισοαξονικοί με μέση διάμετρο 30μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 7,5G), υποδηλώνοντας πλήρη ανακρυστάλλωση (Εικ. 6.19).
- Στο μέταλλο συγκόλλησης, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης με τη Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.19) εμφανίζονται και πάλι κολονοειδούς μορφής κόκκοι, επιμήκεις, κυψελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης, με μέσο πλάτος 85μm και αντίστοιχο μήκος 350μm. Η ανάπτυξη τους εμφανίζεται κάθετη στα όρια της ζώνης στερεοποίησης ενώ παρατηρείται και εδώ φαινόμενο επιταξίας (6.19α).
- Στο κέντρο του Μ.Σ., (Εικ. 6.21), οι κόκκοι εμφανίζονται ευμεγέθεις και ισοαξονικοί κυτταροειδούς μορφής και δενδριτικής ανάπτυξης, με μέση διάμετρο 270μm (ASTM grain size 1,1G).
- Κατά τη μελέτη της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν σε καμιά περιοχή μικρορωγμές, ενώ στο μέταλλο συγκόλλησης δεν παρατηρήθηκε συγκέντρωση μικροπόρων.
- Συνολικά η ανάπτυξη των κόκκων στο μέταλλο συγκόλλησης αντιστοιχεί με αυτήν του σχήματος 4.4γ και 4.4δ σε ότι αφορά στα όρια του με τη Θ.Ε.Ζ. και με αυτή του σχήματος 4.4ε σε ότι αφορά στο κέντρο του.

6.2.2.3 Μετρήσεις μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν στα δοκίμια όπου πραγματοποιήθηκε και η μελέτη της μικροδομής, στο μέσο πάχος των ελασμάτων (2,5mm) και με φορτίο 300p (HV_{0.3N}). Κάθε μέτρηση απείχε από την προηγούμενη απόσταση περίπου 500μm.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικ. 6.21), φαίνονται ενδεικτικά, οι καμπύλες των τιμών μικροσκληρότητας σε συνάρτηση με την απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης, όπως προέκυψαν από μετρήσεις σε τυχαίες τομές των συγκολλήσεων από πέντε διαφορετικά δοκίμια.



Εικόνα 6.21 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας – απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλήσεων ελασμάτων μικρών διαστάσεων, πάχους 5mm

Όπως και στην περίπτωση των συγκολλήσεων για τα δοκίμια πάχους 4mm (§ 6.2.1) παρατηρήθηκε μείωση των τιμών μικροσκληρότητας από το βασικό μέταλλο στο μέταλλο συγκόλλησης της τάξης του 20%. Η μείωση συντελείται σταδιακά στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.22) και αντιστοιχεί στην αύξηση του ποσοστού ανακρυστάλλωσης που συμβαίνει όσο η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης μειώνεται. Στο μέταλλο συγκόλλησης δεν συμβαίνει περαιτέρω μείωση των τιμών μικροσκληρότητας, εξαιτίας του αυξημένου ποσοστού κραματικών στοιχείων που έχει συνεισφέρει σε αυτό το μέταλλο προσθήκης.

Οι τιμές μικροσκληρότητας στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του, δεν έδωσαν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις και ο μέσος όρος αυτών ήταν 80 HV_{0.3}.

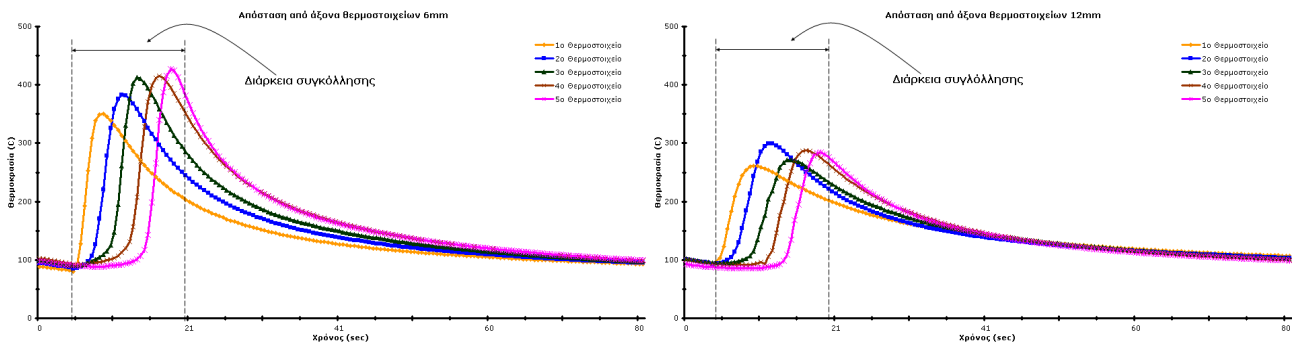
6.2.2.4 Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, ο αριθμός των θερμοστοιχείων καθώς και οι θέσεις που αυτά εγκαταστάθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης, περιγράφονται στην Παράγραφο 6.2.1.4.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ελάχιστα διαφέρουν από αυτά της παραγράφου 6.2.1.4 παρ' όλο που η ισχύς της συγκόλλησης ήταν μεγαλύτερη (Πιν. 6.3). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο κατά 1mm μεγαλύτερο πάχος των δοκιμίων που επιτρέπει σχετικά μεγαλύτερη διάχυση της θερμότητας σε άξονα 'Ζ' κάθετο στο επίπεδο του ελάσματος.

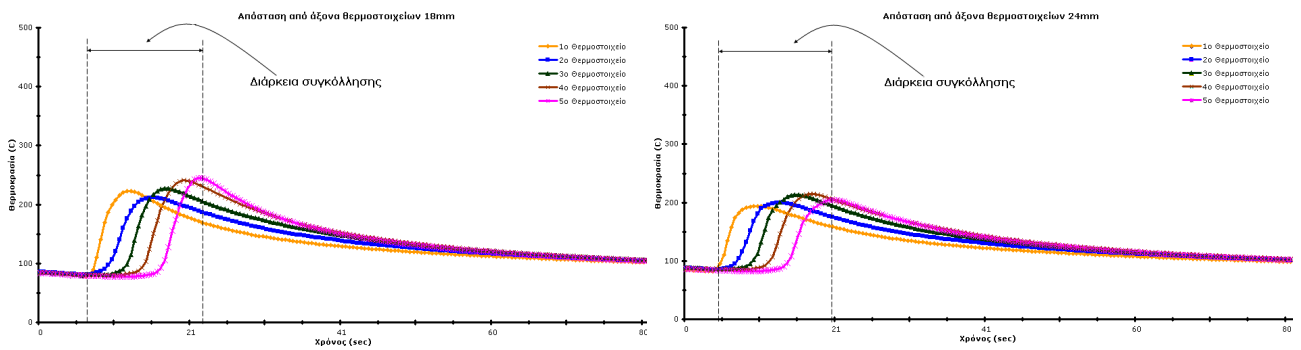
Κατά συνέπεια, τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν συνοψίζονται στα εξής:

- Η θερμοκρασία αποκτά τη μέγιστη, ανά περιοχή, τιμή της μέσα στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η συγκόλληση.
- Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε όλη τη διάρκεια του θερμικού κύκλου είναι ίδιος για τις περιοχές που βρίσκονται σε ίδια απόσταση από τον άξονα της συγκόλλησης (Εικ. 6.22).
- Οι καμπύλες θερμοκρασιακής μεταβολής δίνουν απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας για περιοχές κοντά στη συγκόλληση και περισσότερο ομαλή για περιοχές μακριά από αυτή.
- Σε κάθε περίπτωση σε χρόνο μικρότερο από 80sec από το τέλος της συγκόλλησης το δοκίμιο αποκτά θερμοκρασία μικρότερη από 100°C.
- Η θερμοκρασία σε απόσταση 6mm από τον άξονα συγκόλλησης αγγίζει τους 450°C υποδηλώνοντας την πλήρη ανακρυστάλλωση του υλικού στην περιοχή αυτή (Εικ. 6.22α). Σε απόσταση 12mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνά τους 300°C υποδεικνύοντας ότι και σε αυτήν την περιοχή έχει συμβεί ανακρυστάλλωση (Εικ. 6.22β) ενώ, σε απόσταση 18mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 220°C (Εικ. 6.22γ).
- Όπως προκύπτει και από το σκαριφηματικό διάγραμμα της Εικόνας 6.23, που είναι βασισμένο στις μετρήσεις των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης, το εύρος της παράλληλης με τον άξονα συγκόλλησης ζώνης, όπου η θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, είναι της τάξης των 12mm. Η διαπίστωση αυτή, συμφωνεί με τις παρατηρήσεις από τη μελέτη της μικροδομής (Εικ. 6.17 – 6.20) και τις μετρήσεις μικροσκληρότητας (Εικ. 6.21).



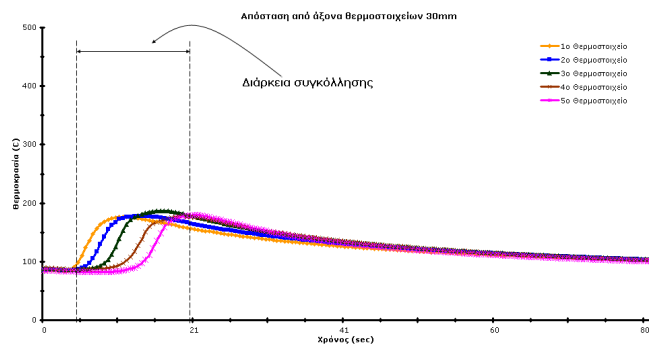
(α)

(β)



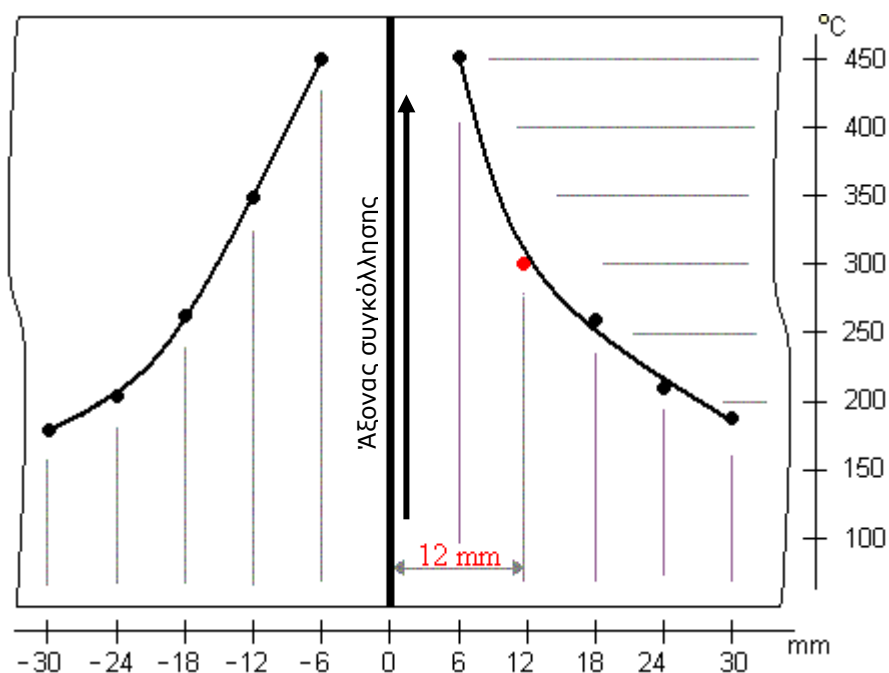
(γ)

(δ)



(ε)

Εικόνα 6.22 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης
Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm



Εικόνα 6.23 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης

6.2.3 Συγκολλήσεις ελασμάτων AA5383-H116 πάχους 6mm

Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε δοκίμια από κράμα αλουμινίου AA5383-H116 πάχους 6mm και διαστάσεων 175x150mm² με τις συνθήκες που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.3. Η γεωμετρία των ακμών και η θέση τους κατά τη διαδικασία συγκόλλησης φαίνεται στην Εικόνα 5.8β. Τονίζεται ότι δεν υπήρχε διάκενο μεταξύ των υπό συγκόλληση ελασμάτων.

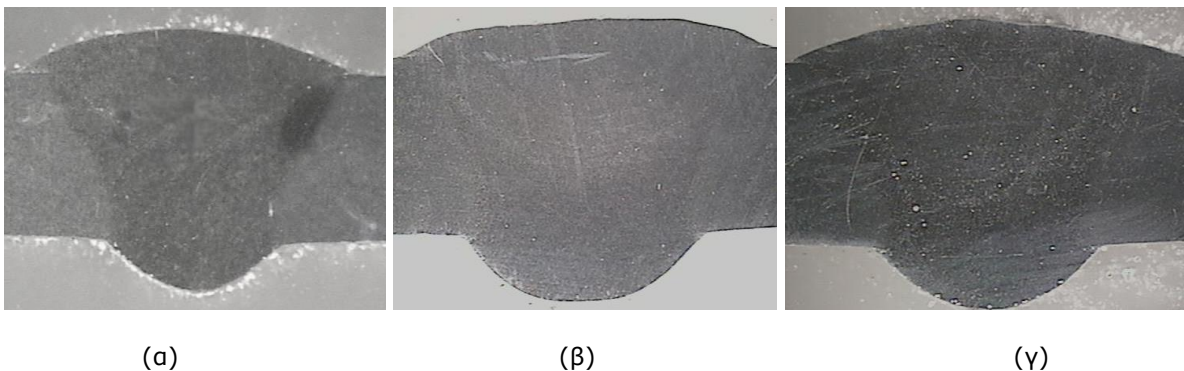
Ως επικαλύπτρα, χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ανοξείδωτο χάλυβα (304L) κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να υπακούει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ορίζουν οι κανονισμοί^[64].

6.2.3.1 Μακρογραφική μελέτη

Στην Εικόνα 6.24 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων όπως αυτές ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο.

Από τη μακρογραφική παρατήρηση και μελέτη των τομών προκύπτουν τα εξής:

- Η διείδωση είναι ικανοποιητική (Εικ. 6.24).
- Οι τομές (Εικ. 6.24) παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (ύψος, πλάτος ραφής - Πίνακας 6.6).
- Το πορώδες κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα (από 5% π.χ. Εικ. 6.24γ έως 0,5% π.χ. Εικ. 6.24α)
- Το πλάτος της ζώνης τήξης στο μέσον της τομής είναι της τάξης των 7500μm.
- Συνολικά, η επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης καθώς και η προετοιμασία των δοκιμών που επιλέχθηκε δείχνουν να είναι ορθές.



Εικόνα 6.24 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων

Πίνακας 6.6 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης

	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης (mm)		
	a	b	c
	10	11	5,5

6.2.3.2 Μελέτη μικροδομής

Στις Εικόνες 6.25 – 6.28, φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης της μικροδομής.

Στην Εικόνα 6.25 φαίνεται η μικροδομή του βασικού μετάλλου η οποία σχεδόν ταυτίζεται με τη μικροδομή που εμφανίζεται στην Εικόνα 6.8 καθώς και τα δύο κράματα βρίσκονται στην ίδια ψυχρή κατεργασία, H116.

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη χαρακτηρίζεται από τη σταδιακή αύξηση του ποσοστού ανακρυστάλλωσης καθώς η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης μειώνεται (Εικ. 6.26) με τους κόκκους να είναι ισοαξονικοί πολύ κοντά στη ζώνη σύνδεσης με το μέταλλο συγκόλλησης και να έχουν μέση διάμετρο 30 μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 7,5G - Εικ. 6.26γ).

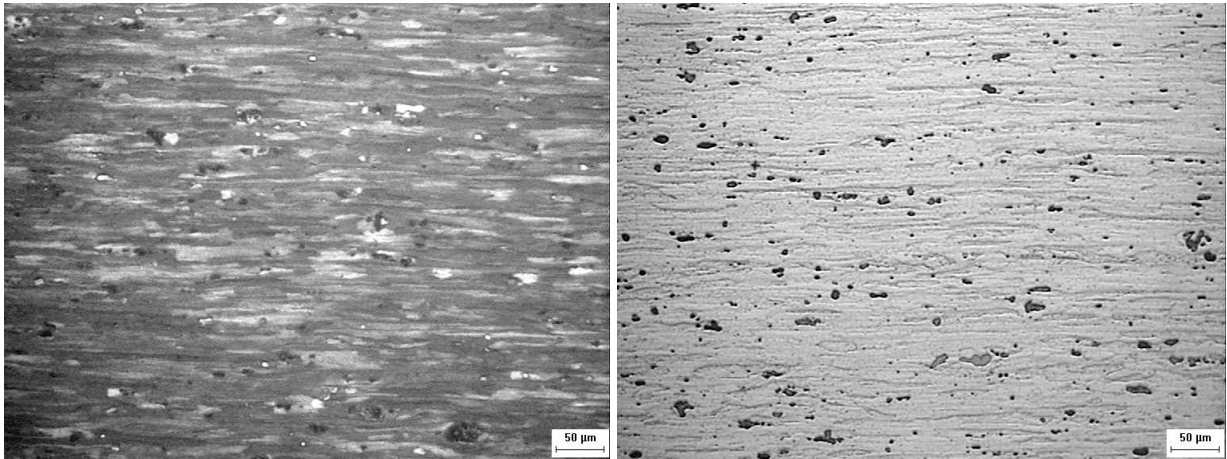
Σε ότι αφορά στο μέταλλο συγκόλλησης, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης με τη Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.27) οι κόκκοι εμφανίζουν την ίδια μορφολογία και διάταξη με αυτές που παρουσιάστηκαν στις Εικόνες 6.10 και 6.19 με διαστάσεις μέσου πλάτους και μήκους 56 μm και 366 μm αντίστοιχα. Στη ζώνη σύνδεσης παρατηρείται επίσης το φαινόμενο της επιταξίας (6.27α-6.27γ).

Στο κέντρο του Μ.Σ., (Εικ. 6.28), οι κόκκοι εμφανίζονται ευμεγέθεις και ισοαξονικοί κυτταροειδούς μορφής και δενδριτικής ανάπτυξης, με μέση διάμετρο 187 μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 2,3G).

Στην περιοχή σύνδεσης μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} περάσματος, παρατηρούνται και πάλι κολονοειδούς μορφής κόκκοι, επιμήκεις, κυψελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης (Εικ. 6.28γ), με σαφώς μικρότερες διαστάσεις από αυτούς που εμφανίζονται στη ζώνη σύνδεσης, δείγμα τις ταχύτατης στερεοποίησης που συμβαίνει στην περιοχή αυτή.

Συνολικά η ανάπτυξη των κόκκων στο μέταλλο συγκόλλησης αντιστοιχεί με αυτήν του σχήματος 4.4γ και 4.4δ σε ότι αφορά στα όρια του με τη Θ.Ε.Ζ. και με αυτήν του Σχήματος 4.4ε σε ότι αφορά στο κέντρο του.

Κατά τη μελέτη της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν σε καμιά περιοχή μικρορωγμές, ενώ στο μέταλλο συγκόλλησης δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική συγκέντρωση μικροπόρων.



(α)

(β)

Εικόνα 6.25 Η μικροδομή του βασικού μετάλλου x200

α) Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός, β) παρατήρηση χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός



(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 6.26 Η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. x100 α) Μακριά από το μέταλλο συγκόλλησης, β) στο μέσο της Θ.Ε.Ζ., γ) κοντά στη ζώνη σύνδεσης

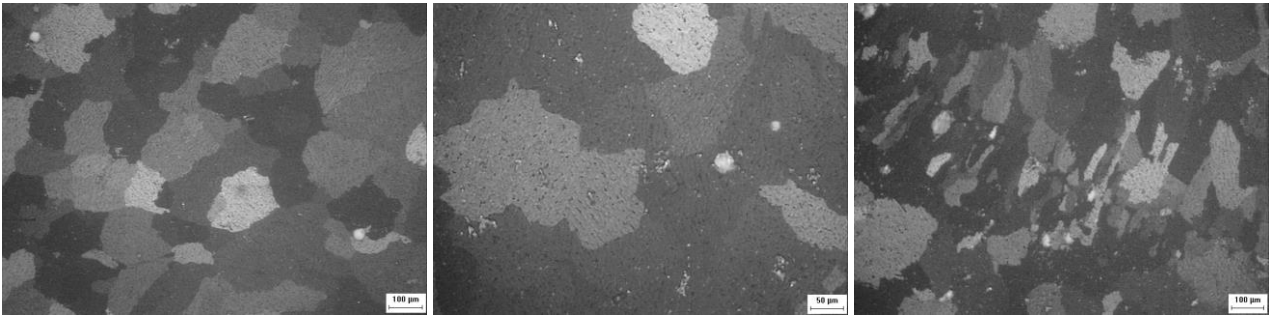


(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 6.27 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης σε παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός. α) x100, β) x200, γ) Στην περιοχή της ρίζας x100



(α)

(β)

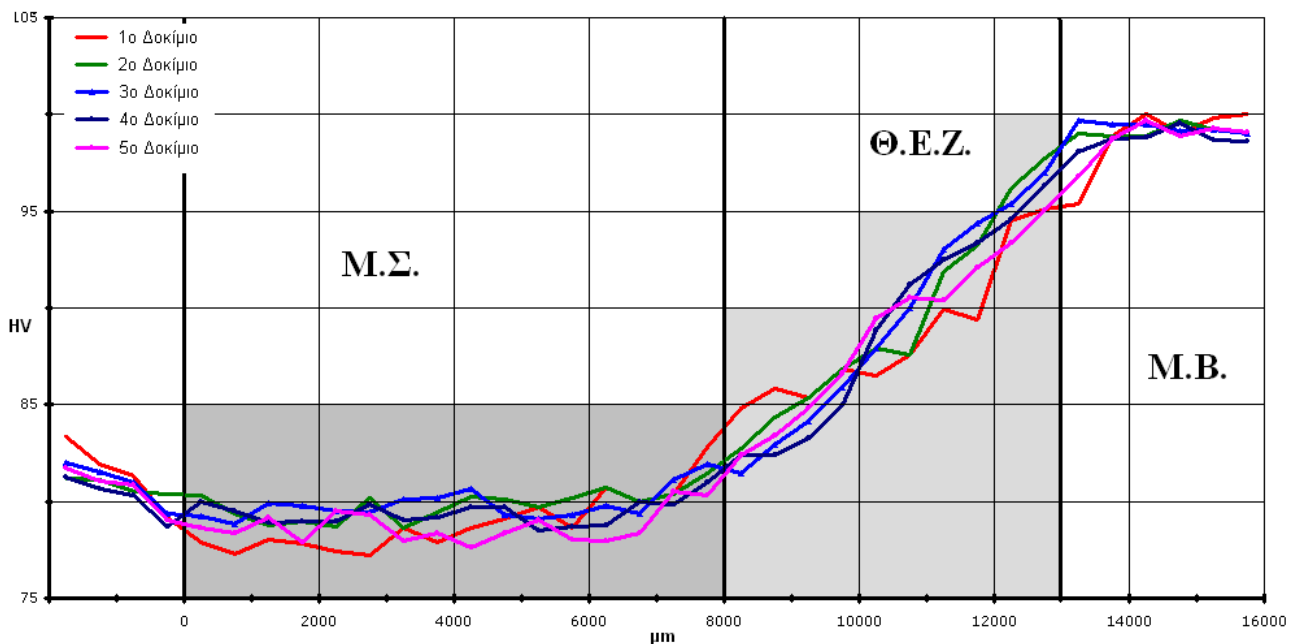
(γ)

Εικόνα 6.28 Η μικροδομή στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης με χρήση πολωμένου φωτός
α) x100, β) x200 γ) περιοχή σύνδεσης 1^{ου} και 2^{ου} περάσματος x100

6.2.3.3 Μετρήσεις μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στο μέσο πάχος των ελασμάτων (3mm) με φορτίο 300p (HV_{0.3N}) ενώ κάθε μέτρηση απείχε από την προηγούμενη απόσταση περίπου 500μm.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικ. 6.29), φαίνονται ενδεικτικά, οι καμπύλες των τιμών μικροσκληρότητας σε συνάρτηση με την απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης, όπως προέκυψαν από μετρήσεις σε τυχαίες τομές των συγκολλήσεων από πέντε διαφορετικά δοκίμια.



Εικόνα 6.29 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας – απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης
συγκολλήσεων ελασμάτων μικρών διαστάσεων, πάχους 6mm

Όπως φαίνεται, (Εικ. 6.29), η σκληρότητα του βασικού μετάλλου (B.M.) είναι της τάξης των 98HV_{0.3}, ενώ του μετάλλου συγκόλλησης (Μ.Σ.) έχει μια μέση τιμή της τάξης των 78HV_{0.3} (μείωση ~20%).

Η μείωση των τιμών μικροσκληρότητας συντελείται σταδιακά στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ. (Εικ. 6.29) και προφανώς αντιστοιχεί στην αύξηση του ποσοστού ανακρυστάλλωσης. Στο Μ.Σ. δεν συμβαίνει περαιτέρω μείωση των τιμών μικροσκληρότητας.

Μετρήσεις μικροσκληρότητας, σε διαφορετικά δοκίμια, στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας του, δεν έδωσαν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις παρ' όλη τη διαφοροποίηση που παρατηρείται στη μικροδομή στην περιοχή μεταξύ πρώτου και δεύτερου περάσματος και ο μέσος όρος αυτών ήταν 80 HV_{0.3}.

Συνολικά, διαπιστώνεται μείωση της μηχανικής αντοχής σε μια ζώνη πλάτους περίπου 13mm εκατέρωθεν του άξονα της συγκόλλησης, ενώ το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης είναι περίπου 6mm.

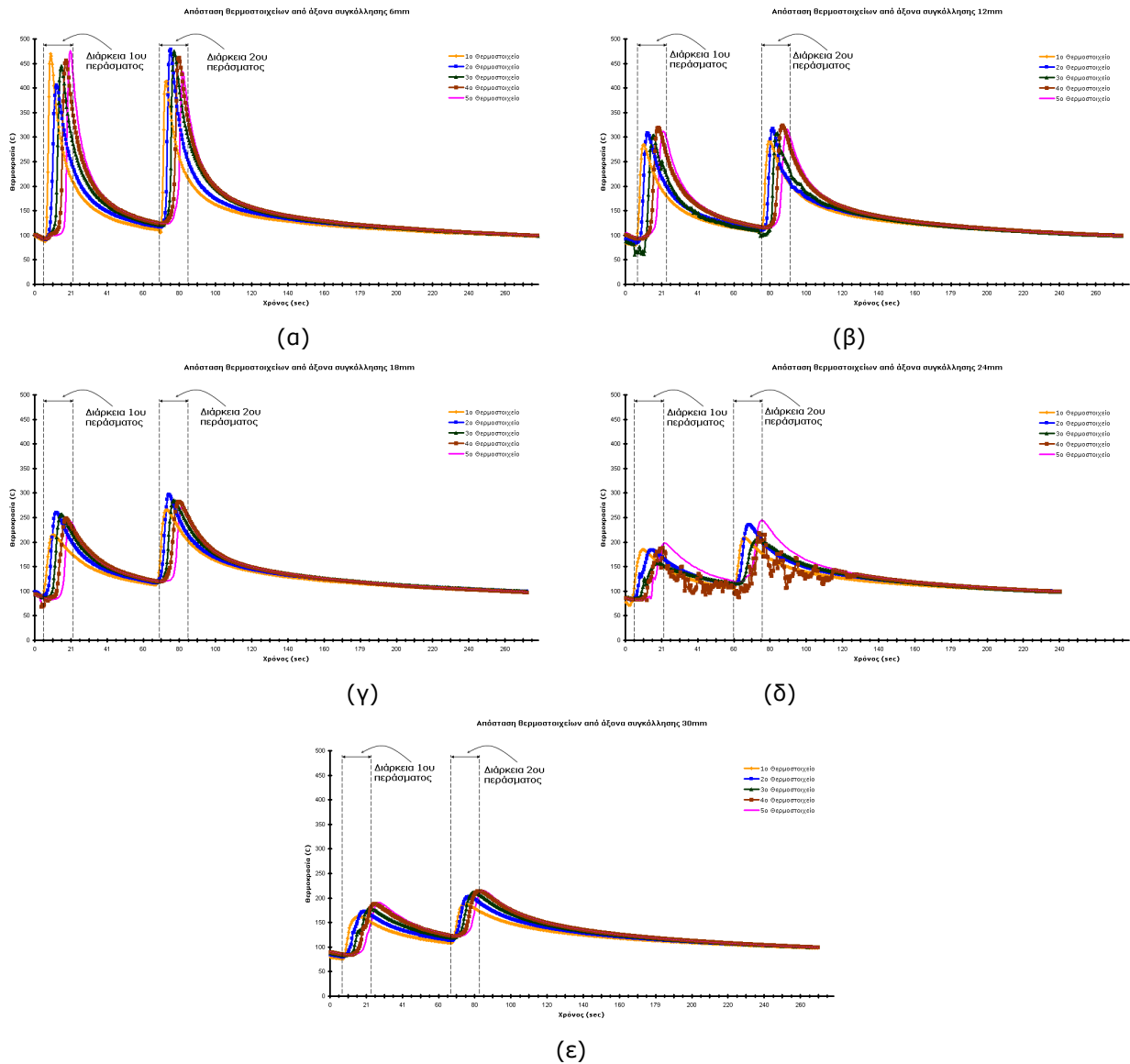
6.2.3.4 Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, ο αριθμός των θερμοστοιχείων καθώς και οι θέσεις που αυτά εγκαταστάθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης, περιγράφονται στην Παράγραφο 6.2.1.4.

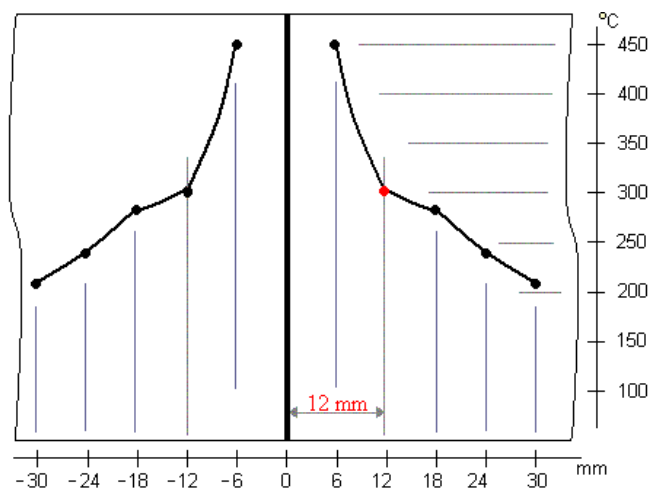
Από τις μετρήσεις των θερμικών κύκλων προκύπτει ότι:

- Η θερμοκρασία αποκτά τη μέγιστη τιμή της, σχεδόν τη χρονική στιγμή που διέρχεται από αυτά ο συγκολλητικός δαυλός, στην περίπτωση που τα θερμοστοιχεία βρίσκονται κοντά στη συγκόλληση (Εικ. 6.30), ενώ για τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται μακριά από αυτή, παρατηρείται μικρή χρονική υστέρηση έως ότου καταμετρηθεί η μέγιστη θερμοκρασία.
- Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, η θερμοκρασία αποκτά τη μέγιστη, ανά περιοχή, τιμή της μέσα στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η συγκόλληση.

- Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε όλη τη διάρκεια του θερμικού κύκλου είναι ίδιος για τις περιοχές που βρίσκονται σε ίδια απόσταση από τον άξονα της συγκόλλησης.
- Οι καμπύλες θερμοκρασιακής μεταβολής δίνουν απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας για περιοχές κοντά στη συγκόλληση και περισσότερο ομαλή για περιοχές μακριά από αυτή.
- Σε κάθε περίπτωση σε χρόνο μικρότερο από 250sec από το τέλος της συγκόλλησης το δοκίμιο αποκτά θερμοκρασία μικρότερη από 100°C.
- Η θερμοκρασία σε απόσταση 6mm από τον άξονα συγκόλλησης αγγίζει τους 450°C ενώ σε απόσταση 12mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνά τους 300°C. Σε απόσταση 18mm από τον άξονα της συγκόλλησης η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 290°C, ενώ σε αποστάσεις 24mm και 30mm οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν ήταν 240°C και 220°C αντίστοιχα (Εικ. 6.14β, 6.14δ και 6.15).
- Οι καμπύλες των θερμικών κύκλων του πρώτου και του δεύτερου περάσματος κάθε δοκιμής έχουν την ίδια μορφή ενώ δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά στη μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται σε κάθε πέρασμα.
- Το χρονικό κενό των 40 - 50sec που μεσολαβεί μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου περάσματος, κατά το οποίο πραγματοποιείται καθαρισμός της επιφάνειας συγκόλλησης, είναι αρκετό ώστε η θερμοκρασία να πέσει σε επίπεδα όπου δεν πραγματοποιείται κανένας μεταλλουργικός μετασχηματισμός (~100°C). Έτσι, το δεύτερο πέρασμα πραγματοποιείται ουσιαστικά υπό τις αρχικές συνθήκες συγκόλλησης.
- Όπως προκύπτει και από το σκαριφηματικό διάγραμμα της Εικόνας 6.31, το εύρος της παράλληλης, με τον άξονα συγκόλλησης, ζώνης όπου η θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, είναι της τάξης των 13mm διαπίστωση που συμφωνεί με τις παρατηρήσεις από τη μελέτη της μικροδομής και τις μετρήσεις μικροσκληρότητας.



Εικόνα 6.30 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης σε αποστάσεις παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης
Απόσταση θερμοστοιχείων από τον άξονα συγκόλλησης α) 6mm, β) 12mm, γ) 18mm, δ) 24mm, ε) 30mm



Εικόνα 6.31 Σκαριφηματικό διάγραμμα κατανομής μέγιστων θερμοκρασιών σε άξονα κάθετο με τον άξονα της συγκόλλησης

6.3 Επίπεδες συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων

Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε δοκίμια διαστάσεων 700x300mm² πάχους 4mm, 5mm και 6mm. Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι βέλτιστες συνθήκες με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές για κάθε πάχος, φαίνονται στον Πίνακα 6.7.

Οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης προέκυψαν έπειτα από σειρά δοκιμών απόθεσης μετάλλου και δοκιμαστικών συγκολλήσεων σε δοκίμια με τις παραπάνω διαστάσεις. Όπως φαίνεται σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκολλήσεις των δοκιμίων 175x300mm² (Πίν. 6.3) η ταχύτητα συγκόλλησης ήταν ελαφρώς χαμηλότερη ενώ η ισχύς (τάση και ένταση συγκόλλησης) σχετικά μεγαλύτερη. Κάτι τέτοιο αποδείχθηκε αναγκαίο καθώς οι μεγαλύτερες διαστάσεις των δοκιμίων έχουν σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη απαγωγή της θερμότητας από την περιοχή της συγκόλλησης κι έτσι απαιτείται σχετικά μεγαλύτερη παροχή θερμικής ισχύος και χαμηλότερη ταχύτητα ώστε ο ρυθμός στερεοποίησης και απόψυξης να διατηρηθεί στα ίδια περίπου επίπεδα ώστε να αποφευχθούν προβλήματα πορώδους ή ατελούς τήξης.

Πίνακας 6.7 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη

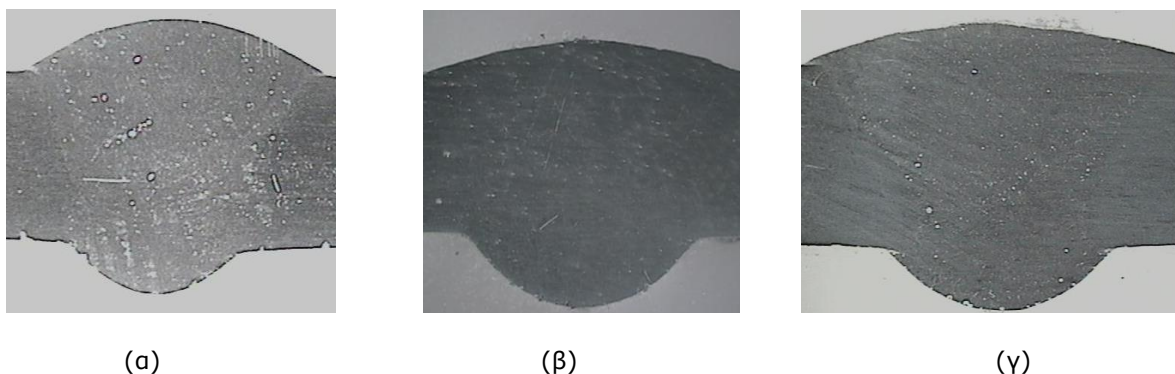
Κράμα - Πάχος	Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή αερίου προστασίας (lit/min)	Στρώσεις
AA5083-H116 (4mm)	24	160	65	20	1
AA5083-H111 (5mm)	25	170	65	20	1
AA5383-H116 (6mm)	28	190	65	20	1 ^η
			65		2 ^η

Τονίζεται ότι τόσο κατά τη μακρογραφική μελέτη των συγκολλημένων δοκιμίων όσο και κατά τη μελέτη της μικροδομής τους, δεν παρουσιάστηκαν διαφορές μεταξύ των συγκολλήσεων για τα τρία διαφορετικά διατιθέμενα πάχη ελασμάτων ενώ οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι αντίστοιχες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 6.2. Έτσι λοιπόν, σε ότι αφορά και στα τρία διαφορετικά πάχη, ισχύουν τα παρακάτω:

6.3.1 Μακρογραφική μελέτη συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm, 5mm και 6mm

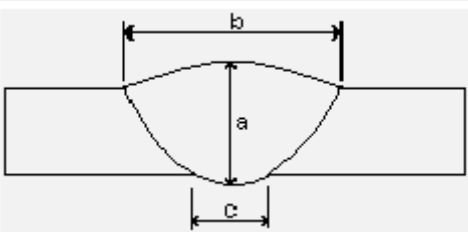
Στην Εικόνα 6.32 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες τομών των συγκολλήσεων ελασμάτων και για τα τρία διαφορετικά πάχη.

Από τη μακρογραφική μελέτη προκύπτει ότι η διείσδυση είναι ικανοποιητική και οι ραφές παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (ύψος, πλάτος). Το πορώδες κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα (από 0,5% - 8%) ενώ δεν παρατηρήθηκαν, μακροσκοπικά, φαινόμενα θερμής ρωγμάτωσης.



Εικόνα 6.32 Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των τομών των συγκολλήσεων Συγκόλληση ελασμάτων πάχους α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm

Πίνακας 6.8 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης

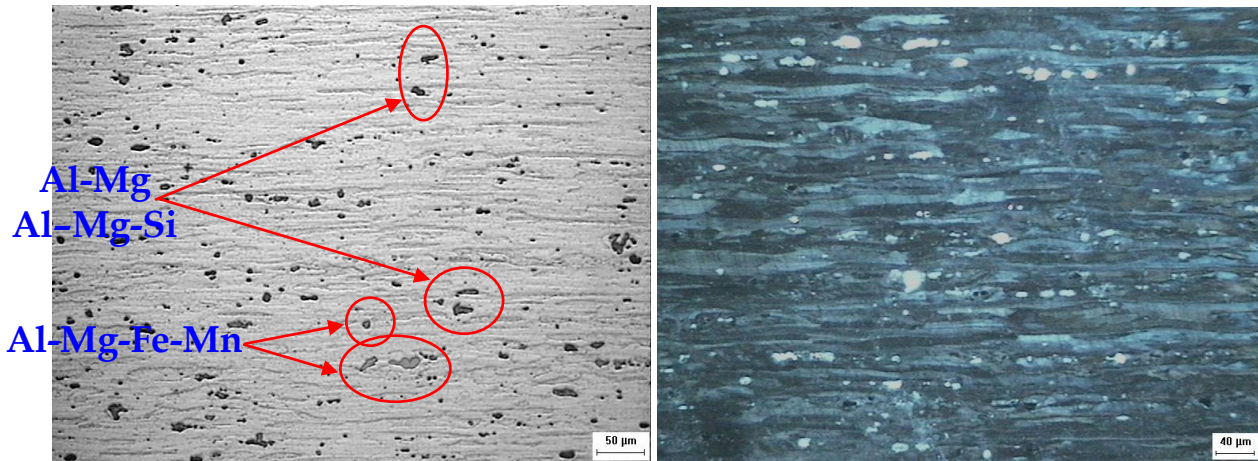
	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης (mm)			Πάχος (mm)
	a	b	c	
	6,5	8,5	4,5	4
	7,5	10,5	5,5	5
	10	11	5,5	6

6.3.2 Μελέτη μικροδομής συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm, 5mm και 6mm

Η μορφολογία των κόκκων από την περιοχή του βασικού μετάλλου ως την περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, ακολουθεί τις παρατηρήσεις της μελέτης που έχει προηγηθεί (§ 6.2).

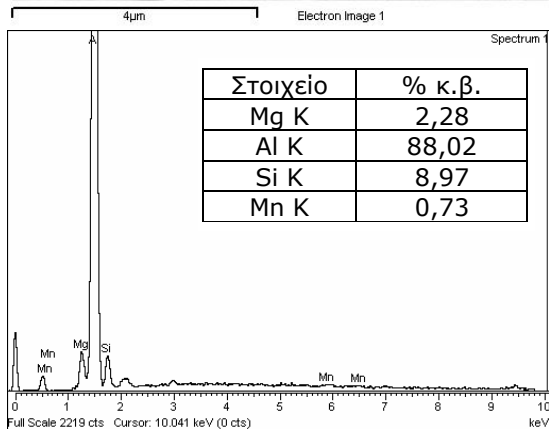
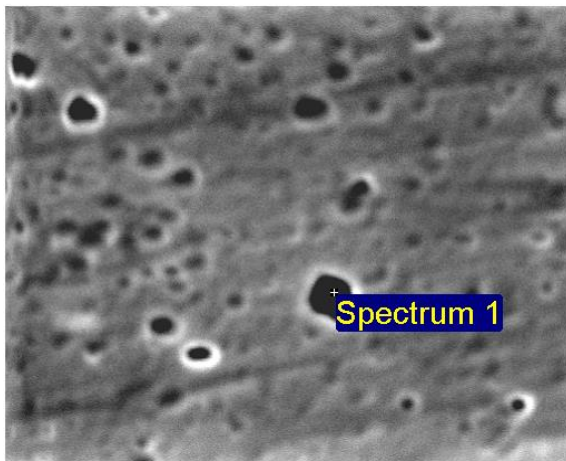
Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις, αποτελείται από επιμήκεις κόκκους, αποτέλεσμα της κατεργασίας μορφοποίησης που έχει υποστεί το κράμα, ενώ ευδιάκριτες είναι και οι γραμμές πλαστικής παραμόρφωσης αποτέλεσμα της κατεργασίας αυτής. Τα μαύρα σωματίδια που διακρίνονται στη λευκόχρωμη μήτρα αλουμινίου (Εικ. 2.33α) είναι κυρίως μεσομεταλλικά β-φάσης κατακρημνίσματα Mg_2Al_3 ή και Mg_2Si καθώς και άλλες φάσεις βάσης Al-Mg και Al-Mg-Si (Εικ.

2.33γ). Μικρότερες μορφές κατακρημνισμάτων γκριζας απόχρωσης, αποτελούν φάσεις κυρίως Al-Mg-Fe-Mn όπως για παράδειγμα $Al_{12}(FeMn)_3Si$ ή $Al_6(MnFe)$ (Εικ. 2.33δ). Το μέσο πλάτος των κόκκων υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 μm ενώ το μέσο μήκος τους βρέθηκε να είναι από 50 μm ως 90 ή και 100 μm (Εικ. 2.33β).

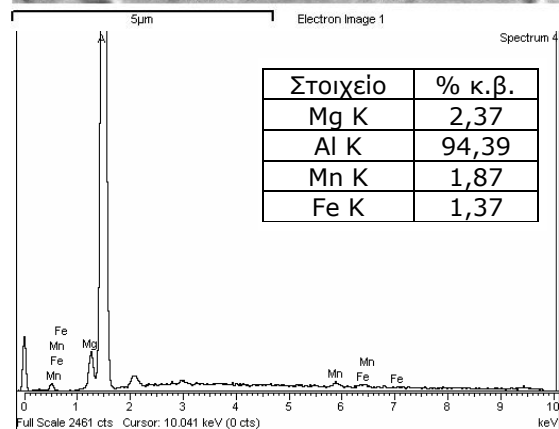
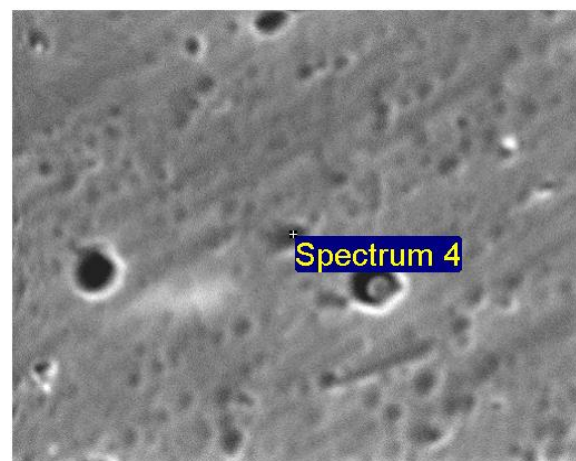


(α)

(β)



(γ)

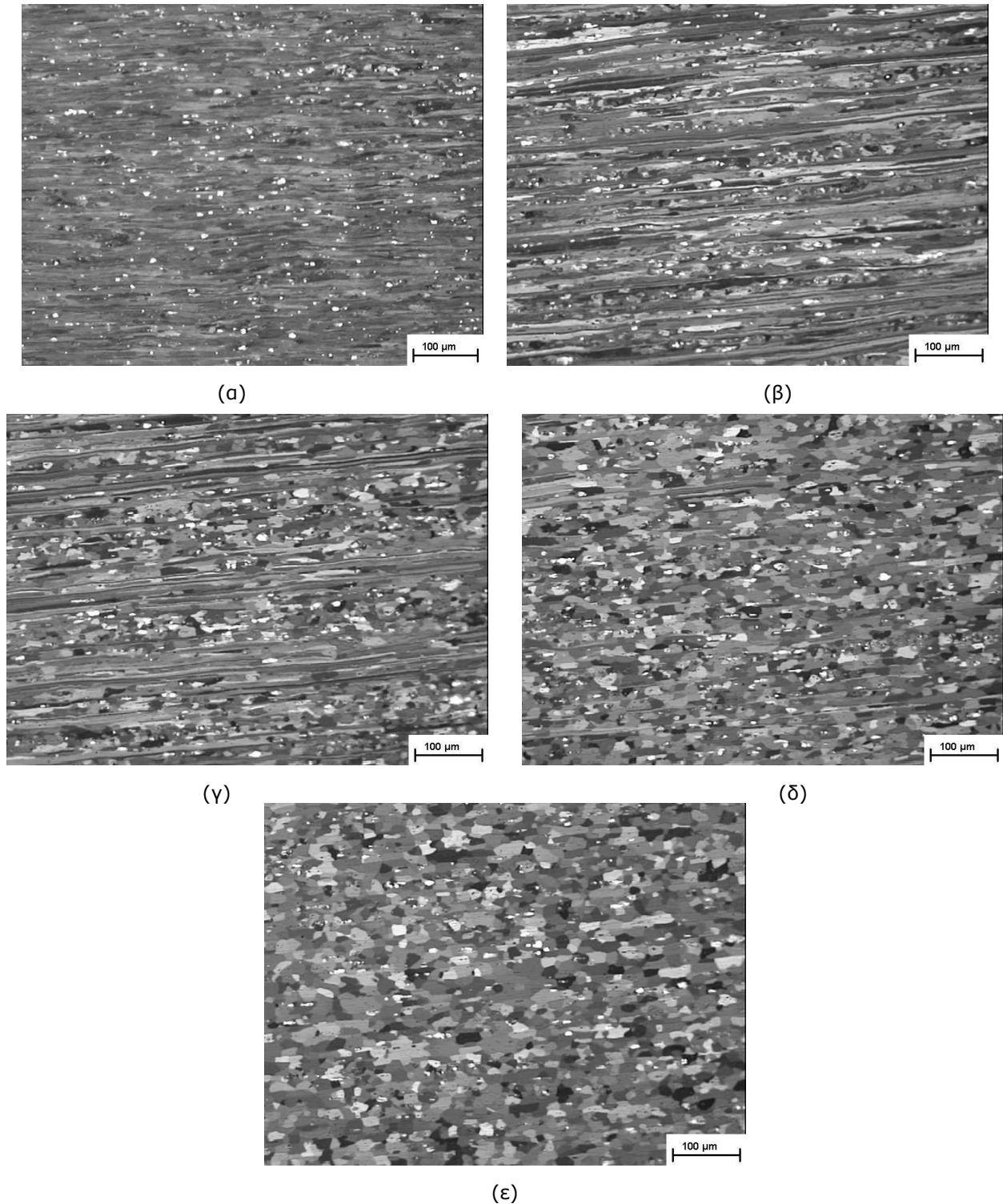


(δ)

Εικόνα 6.33 Η μικροδομή του μετάλλου βάσης.

α) Οπτικό μικροσκόπιο x200 α), β) Οπτικό μικροσκόπιο x200 με χρήση πολωμένου φωτός, γ), δ) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM – EDS)

Αντίστοιχα, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, παρουσιάζει τη χαρακτηριστική μορφολογία των συγκολλησεων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5xxx που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση, με την εμφάνιση ανακρυστάλλωσης, το ποσοστό της οποίας γίνεται ολοένα και μεγαλύτερο καθώς πλησιάζουμε προς στο μέταλλο συγκόλλησης (Εικ. 6.34).



Εικόνα 6.34 Θ.Ε.Ζ. x100. Βαθμιαία αύξηση ποσοστού ανακρυστάλλωσης όσο πλησιάζουμε στο Μ.Σ..
(Από Εικόνα α προς ε)

Λίγο πριν τη ζώνη σύνδεσης, οι κόκκοι της Θ.Ε.Ζ. εμφανίζονται πλήρως ανακρυσταλλωμένοι και σχεδόν ισοαξονικοί (Εικ. 6.34ε) με μέση διάμετρο της τάξης των 30μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 7,5G).

Σε ότι αφορά στο μέταλλο συγκόλλησης και τη μορφολογία των κόκκων που εμφανίζονται σε αυτό, οι γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν δε διαφοροποιούνται σημαντικά από αυτές που συναντώνται βιβλιογραφικά αλλά, κυρίως, από αυτές που προέκυψαν από την έως τώρα μελέτη.

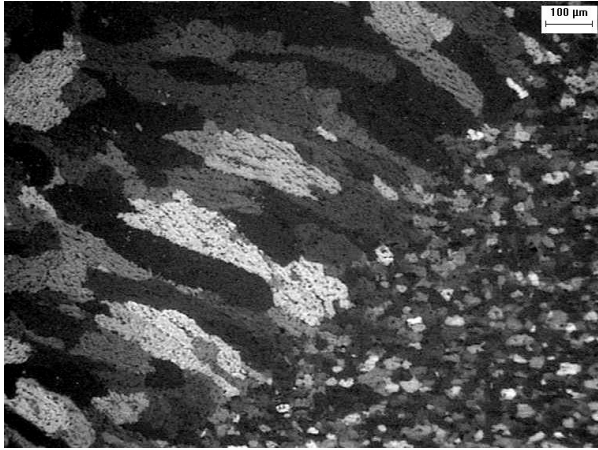
Έτσι, το μέταλλο συγκόλλησης και για τα τρία διαφορετικά πάχη, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης εμφανίζει κολονοειδούς μορφής κόκκους, επιμήκεις, κυψελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης (Εικ. 6.35α, 6.35β) με μέσο πλάτος 90μm και αντίστοιχο μήκος 350μm με την ανάπτυξη τους να εμφανίζεται κάθετη στα όρια της ζώνης στερεοποίησης. Στην Εικόνα 6.35γ - 6.35ε, η διάταξη των σκουρόχρωμων περιοχών υποδεικνύουν ενδο-δενδριτικής ευτηκτικής μορφής φάσεις κυρίως Mg_3Al_2 . Στη ζώνη σύνδεσης παρατηρείται επίσης και το φαινόμενο της επιταξίας, καθώς οι αρχικοί κρύσταλλοι του Μ.Σ. στα όρια της, αποτελούν, αρχικά τουλάχιστο, προέκταση των κόκκων που βρίσκονται στα όρια αυτής, αλλά από την πλευρά της Θ.Ε.Ζ. (6.35α και 6.35β).

Στο κέντρο του Μ.Σ., (Εικ. 6.36), οι κόκκοι εμφανίζονται ευμεγέθεις και ισοαξονικοί κυτταροειδούς μορφής και δενδριτικής ανάπτυξης. Η μέση διάμετρος τους υπολογίστηκε στα 160μm (μέγεθος κόκκων κατά ASTM 2,8G), σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη που μετρήθηκε στις συγκολλήσεις των ελασμάτων μικρών διαστάσεων (ASTM 1,1G). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον χαμηλότερο ρυθμό απόψυξης κατά τη συγκόλληση των δοκιμίων 175x150mm² που επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων κόκκων.

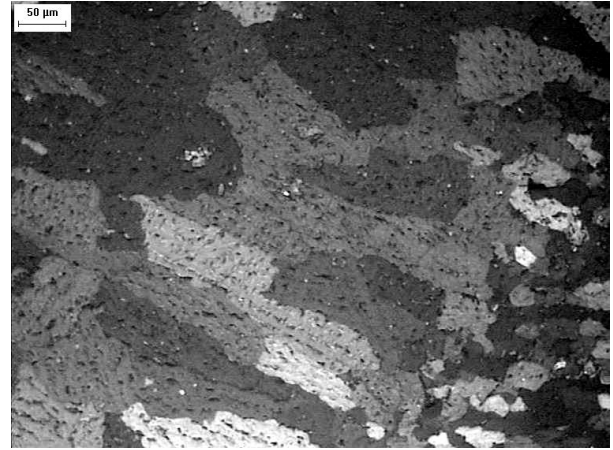
Γενικά, η ύπαρξη ισοαξονικών κόκκων στο κέντρο της συγκόλλησης θεωρείται σημαντική, καθώς κατά τη στερεοποίηση αυτοί επιτρέπουν την εύκολη μεταφορά του ρευστού ανάμεσά τους ενώ βρίσκονται σε χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση. Έτσι, η τάση για ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση και η πιθανότητα ψαθυρής θραύσης μειώνονται ενώ βελτιώνονται και οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής.

Συνολικά η ανάπτυξη των κόκκων στο μέταλλο συγκόλλησης αντιστοιχεί με αυτήν των σχημάτων 4.3α (αξονική ανάπτυξη), 4.4γ και 4.4δ σε ότι αφορά στα όρια του με τη Θ.Ε.Ζ. και με αυτή του σχήματος 4.4ε σε ότι αφορά στο κέντρο του.

Κατά τη μελέτη της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν σε καμιά περιοχή μικρορωγμές, ενώ στο μέταλλο συγκόλλησης δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική συγκέντρωση μικροπόρων.



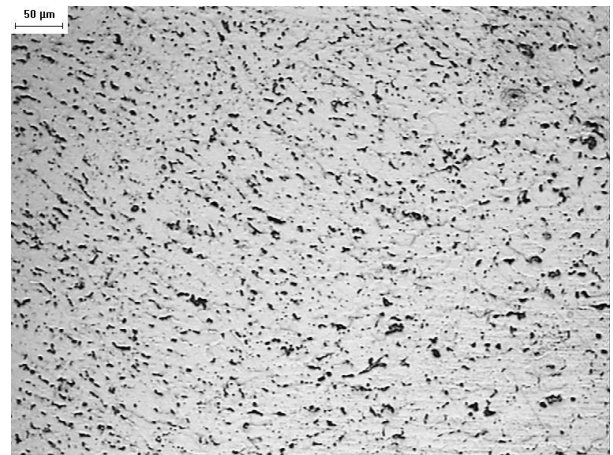
(α)



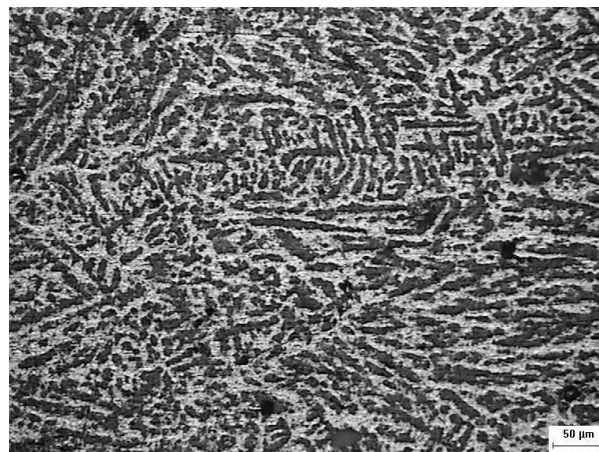
(β)



(γ)

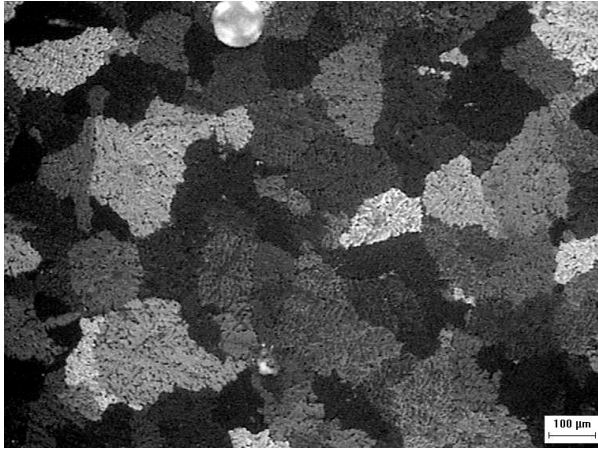


(δ)

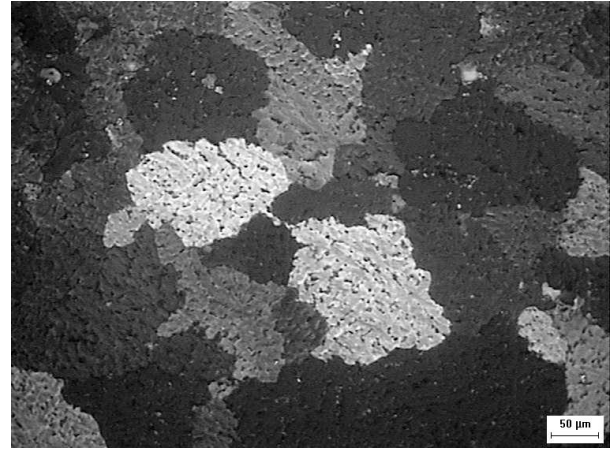


(ε)

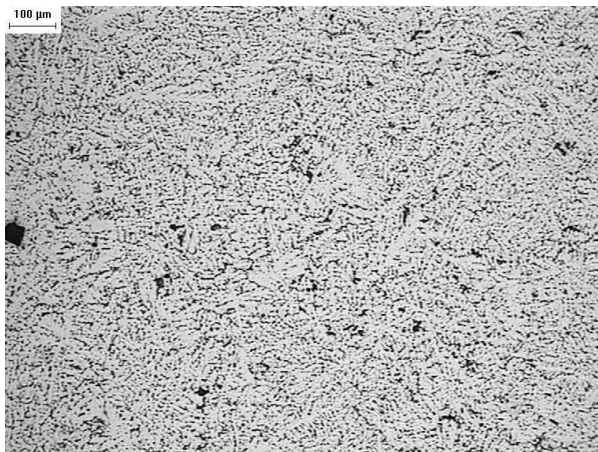
Εικόνα 6.35 Η μικροδομή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης
Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός α) x100, β) x200
Χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός γ) x100, δ), ε) x200



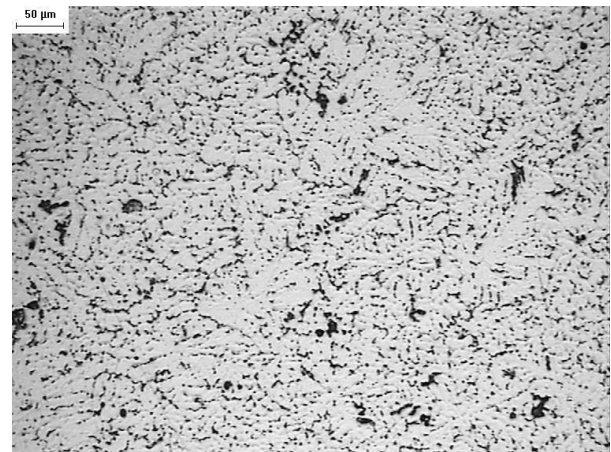
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6.36 Η μικροδομή στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης
 Παρατήρηση με χρήση πολωμένου φωτός α) x100, β) x200
 Χωρίς τη χρήση πολωμένου φωτός γ) x100, δ) x200

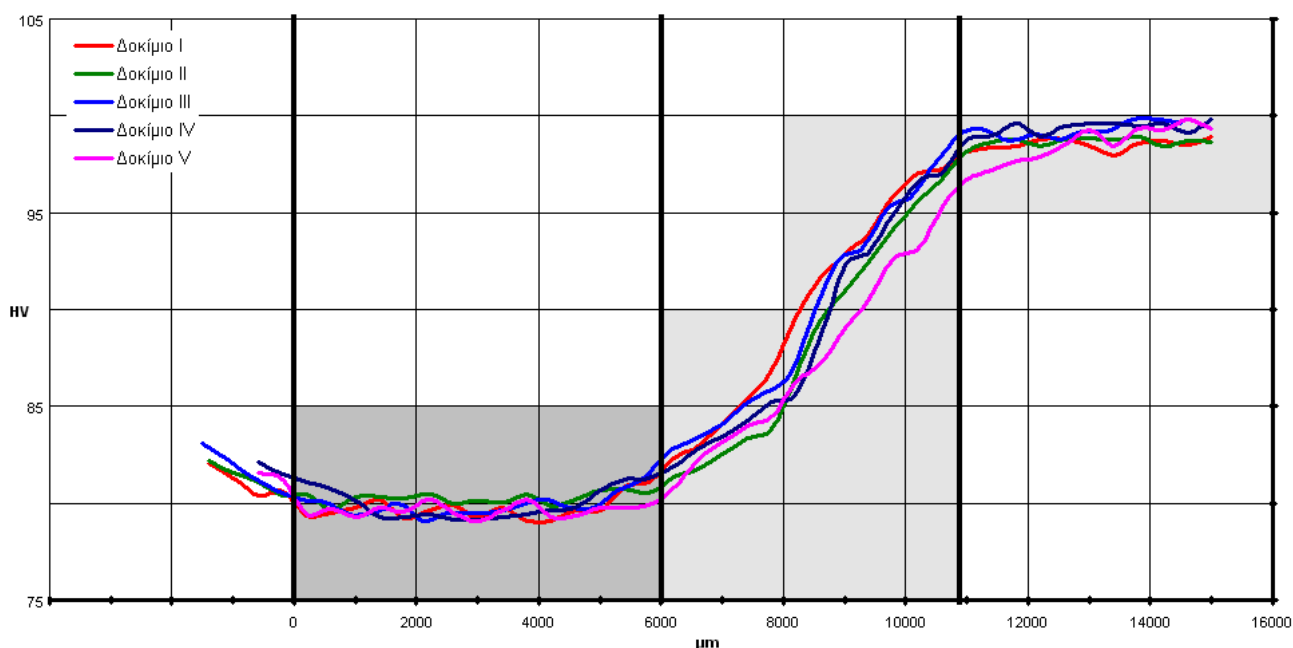
6.3.3 Μετρήσεις μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στο μέσο πάχος των δοκιμίων και κάθε μέτρηση απείχε από την προηγούμενη απόσταση 500μm.

Η μορφή της καμπύλης μικροσκληρότητας που προέκυψε έπειτα από μετρήσεις $HV_{0.3N}$ δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε σχέση με αυτήν που προέκυψε από την ως τώρα μελέτη. Παρατηρείται δηλαδή μια σταδιακή πτώση των τιμών μικροσκληρότητας από το βασικό μέταλλο στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη η οποία είναι της τάξης του 20% και η οποία διατηρείται σταθερή σε όλη την επιφάνεια της τομής του μετάλλου συγκόλλησης.

Ωστόσο, το εύρος της ζώνης όπου παρατηρείται η σταδιακή πτώση των τιμών είναι σαφώς περιορισμένη σε σύγκριση με αυτές που παρατίθενται στις Εικόνες 6.12, 6.21, 6.29 καθώς είναι της τάξης των 8mm.

Στην Εικόνα 6.37 φαίνεται αντιπροσωπευτικό διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης, από πέντε διαφορετικά δοκίμια συγκολλήσεων ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων, πάχους 4mm. Ίδια καμπύλη προκύπτει και για τις συγκολλήσεις των αντίστοιχων ελασμάτων πάχους 5mm και 6mm με διαφοροποιήσεις μόνο σε ότι αφορά το εύρος της περιοχής του μετάλλου συγκόλλησης (Πιν. 6.8).



Εικόνα 6.37 Διάγραμμα τιμών μικροσκληρότητας - απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης συγκολλήσεων ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων, πάχους 4mm

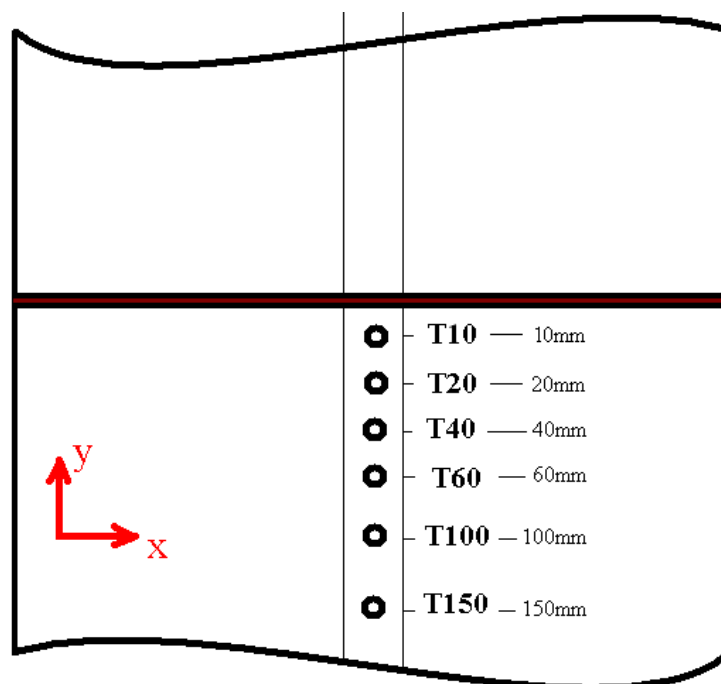
6.3.4 Μετρήσεις θερμικών κύκλων της συγκόλλησης

Η διάταξη των θερμοστοιχείων για τις μετρήσεις των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης διαφοροποιείται σε σχέση με αυτήν που παρουσιάστηκε στις συγκολλήσεις των δοκιμίων μικρών διαστάσεων. Καθώς οι μετρήσεις των θερμικών κύκλων συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες μετρήσεις των στρεβλώσεων και παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στο μέσο μήκος του δοκιμίου και κατά το πλάτος αυτού (Ενότητα 3), τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.38 ώστε να καταγράφουν τη θερμοκρασία σε θέσεις που ήταν τοποθετημένα επιμηκνισιόμετρα για τη μέτρηση των μεγεθών που αναφέρθηκαν.

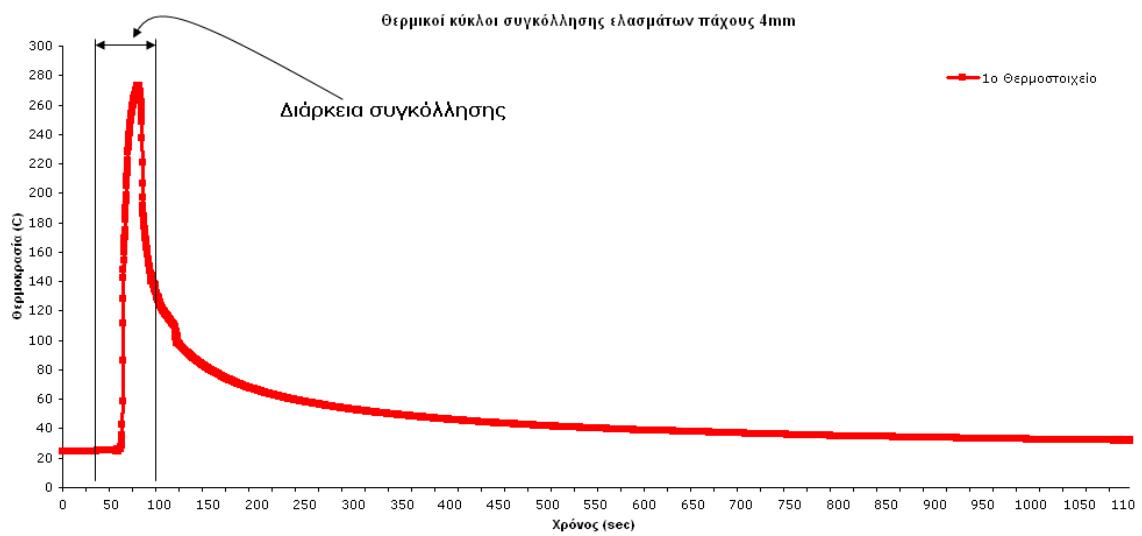
Οι καμπύλες των θερμικών κύκλων για τις συγκολλήσεις των ελασμάτων 4mm και 5mm που πραγματοποιήθηκαν με μια στρώση ήταν σχεδόν ταυτόσημες κι έτσι παρακάτω (Εικ. 6.39) παρουσιάζονται ενδεικτικά αυτές που προέκυψαν για τα ελάσματα των 4mm.

Η καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου για το θερμοστοιχείο που απέχει 10mm από τον άξονα συγκόλλησης προέκυψε με χρήση διαφορετικής μετρητικής διάταξης, σε σχέση με τα υπόλοιπα, και μεγαλύτερους χρόνους δειγματοληψίας κι έτσι κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί σε ξεχωριστό διάγραμμα (Εικ. 6.39α και 6.40α). Επιπλέον, από την Εικόνα 6.38, για τις Εικόνες 6.39 και 6.40 διευκρινίζεται ότι:

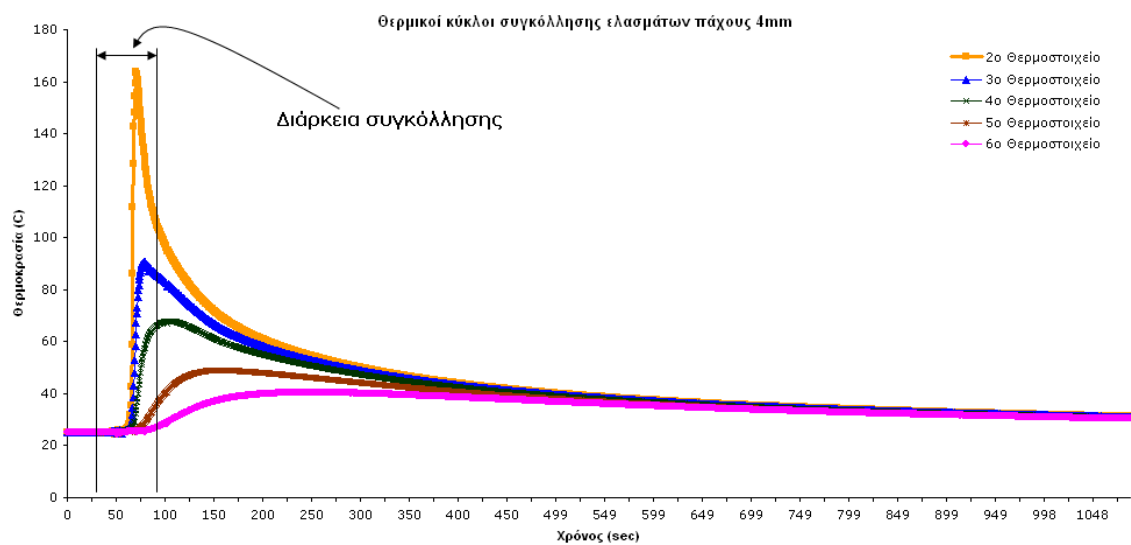
- T10 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 10mm (1^ο Θερμοστοιχείο)
- T20 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 20mm (2^ο Θερμοστοιχείο)
- T40 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 40mm (3^ο Θερμοστοιχείο)
- T60 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 60mm (4^ο Θερμοστοιχείο)
- T100 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 100mm (5^ο Θερμοστοιχείο)
- T150 : Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 150mm (6^ο Θερμοστοιχείο)



Εικόνα 6.38 Διάταξη θερμοστοιχείων προς μέτρηση των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης.



(α)

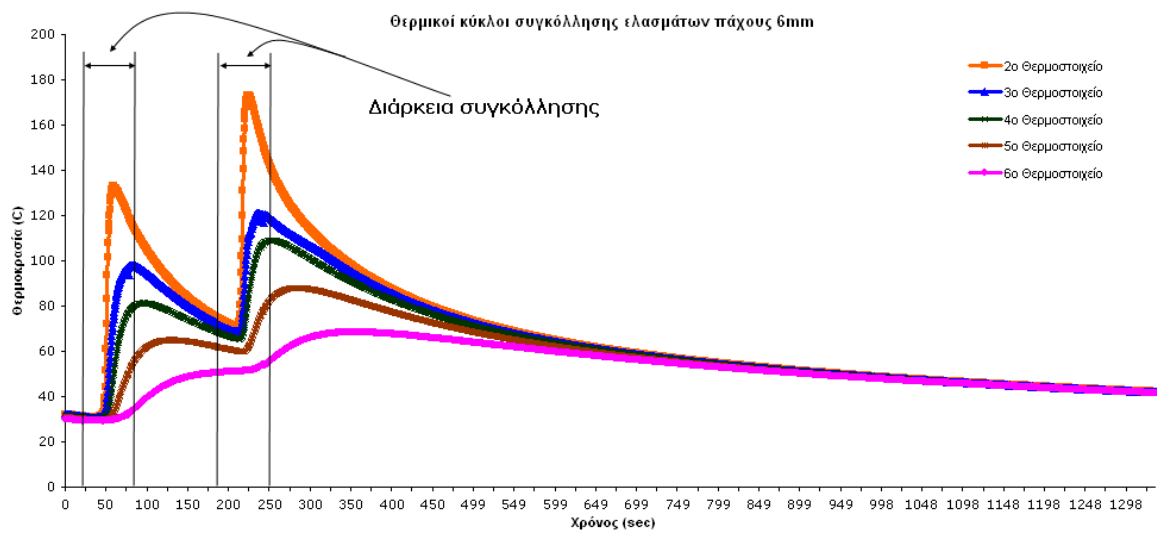


(β)

Εικόνα 6.39 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm
Απόσταση από άξονα συγκόλλησης α) 10mm, β) 20mm, 40mm, 60mm, 100mm και 150mm



(α)



(β)

Εικόνα 6.40 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 6mm

Απόσταση από άξονα συγκόλλησης α) 10mm, β) 20mm, 40mm, 60mm, 100mm και 150mm

Από τη μελέτη των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης των ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων προκύπτει ότι:

- Οι συγκολλήσεις των ελασμάτων πάχους 4mm και 5mm δίνουν την ίδια καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου.
- Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι μέγιστος τη στιγμή σχεδόν που ο δαυλός συγκόλλησης περνά από τον άξονα διάταξης των θερμοστοιχείων.
- Η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων σε συνδυασμό με τις μεγάλες διαστάσεις των δοκιμίων δίνουν μεγάλη διαφορά μέγιστων θερμοκρασιακών τιμών για κάθε θερμοστοιχείο ιδιαίτερα μεταξύ πρώτου (~270°C) και δεύτερου (~170°C) οι καμπύλες θερμοκρασιακής μεταβολής δίνουν απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας για περιοχές κοντά στη συγκόλληση και περισσότερο ομαλή για περιοχές μακριά από αυτή.
- Οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές ανά θέση θερμοστοιχείου κρίνονται αναμενόμενες με βάση τη φύση του υλικού και υποδεικνύουν την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων, στρεβλώσεων και παραμορφώσεων.
- Σε απόσταση περίπου 40mm από τον άξονα συγκόλλησης η θερμοκρασία είναι μόλις της τάξης των 100°C. Σε κάθε περίπτωση σε χρόνο μικρότερο από 80sec από το τέλος της συγκόλλησης το δοκίμιο αποκτά θερμοκρασία μικρότερη από 100°C.
- Σε απόσταση 10mm από τον άξονα συγκόλλησης η θερμοκρασία δεν ξεπερνά σε καμία στιγμή τους 270°C κάτι που σημαίνει ότι ακόμα και εκεί δεν έχει συμβεί ανακρυστάλλωση του υλικού.
- Κατά τις συγκολλήσεις των ελασμάτων πάχους 6mm οι οποίες πραγματοποιούνται με δυο στρώσεις, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης, είναι αρκετό ώστε η θερμοκρασία να πέσει κάτω από 80°C κάτι που σημαίνει πως η δεύτερη στρώση γίνεται ουσιαστικά με τις ίδιες αρχικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

1. ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM, 10th Edition Vol. 2, November 1990
2. W.C. Liu, J.G. Morris, 'Effect of pre-treatment on recrystallization and recrystallization textures of cold rolled CC AA 5182 aluminum alloy', Materials Science and Engineering A, Vol. A363, 2003, pp. 253-262.
3. R. Mahmudi, 'Plastic instability during tensile deformation of temper-annealed non-heat-treatable aluminium alloy sheets', Journal of Materials Processing Technology, Vol. 82, 1998, pp. 46-52.
4. W.C. Liu, T. Zhai, J.G. Morris, 'CoMParison of recrystallization and recrystallization textures of DC and CC AA 5182 aluminum alloys', Materials Science and Engineering A, Vol. A358, 2003, pp. 84-93.
5. R.A. Siddiqui, H.A. Abdullah, K.R. Al-Belushi, 'Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy', Journal of Materials Processing Technology, Vol. 102, 2000, pp. 234-240.
6. J. Van de Langkruis, W.H. Kool, C.M. Sellars, M.R. van der Winden, S. van der Zwaag, 'The effect of β , β' and β'' precipitates in a homogenized AA6063 alloy on the hot deformability and the peak hardness', Materials Science and Engineering A, Vol. A299, 2001, pp. 105-115.
7. A. Balasundaram, Z. Shan, A.M. Gokhale, S. Graham, M.F. Horstemeyer, 'Particle rotations during plastic deformation of 5086 aluminum alloy', Materials Characterization, Vol. 48, 2002, pp. 363-369.
8. G.R. Bradley, M.N. James, 'Geometry and Microstructure of Metal Inert Gas and Friction Stir Welded Aluminium Alloy 5383-H321', Department of Mechanical and Marine Engineering, University of Plymouth, England, October 2000.
9. K. Colligan, 'Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum', Welding Journal, Vol.78, No 7, July 1999, pp. 249s-237s.

- 10.** S. Fukumoto, H. Tsubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita, 'Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel', *Scripta Materialia*, Vol.42, 2000, pp. 807-812.
- 11.** L.E. Murr, R.D. Flores, O.V. Flores, J.C. McClure, G. Liu, D. Brown, 'Friction-stir welding: microstructural characterization', *Materials Research Innovations*, Vol. 1, 1998, pp. 211-243.
- 12.** L.E. Murr, Ying Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, J.C. McClure, 'Intercalation vortices and related microstructural features in the friction- stir welding of dissimilar metals', *Materials Research Innovations*, Vol. 2, 1998, pp. 150-163.
- 13.** M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers, 'Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds', *Acta Materialia*, Vol. 51, 2003, pp. 4791-4801.
- 14.** M.A. Sutton, A.P. Reynolds, B. Yang, R. Taylor, 'Mode I fracture and microstructure for 2024-T3 friction stir welds', *Materials Science and Engineering A*, Vol. A354, 2003, pp. 6-16.
- 15.** M.N James, D.G. Hattingh, G.R. Bradley, 'Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium', *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, 2003, pp. 1389-1398.
- 16.** I. Shigematsu, Y.J. Kwon, K. Susuki, T. Imai, N. Saito, 'Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding', *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 24, 2003, pp. 353-356.
- 17.** W.M. Thomas, E.D. Nicholas, 'Friction stir welding for the transportation industries', *Materials and Design*, Vol. 18, Nos.4/6, 1997, pp. 269-273.
- 18.** W.B. Lee, Y.M. Yeon, D.U. Kim, S.B. Jung, 'Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of aluminium alloy 5052-A36 steel joint', *Materials Science and Technology*, Vol. 19, June 2003, pp. 773-778.
- 19.** W-B Lee, Y-M Yeon, S-B Jung, 'The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials', *Scripta Materialia*, Volume 49, Issue 5, September 2003, pp. 423-428.

- 20.** A. Squillace, A. De Fenzo, G. Giorleo, F. Bellucci, 'A coMParison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints', *Journal of Materials Processing Technology* xxx (2004) xxx-xxx (Article in press).
- 21.** C.M. Chen, R. Kovacevic, 'Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding', *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 44, 2004, pp. 1205-1214.
- 22.** H G. Salem, 'Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments', *Scripta Materialia* Vol. 49, 2003, pp. 1103-1110.
- 23.** K.V. Jata, S.L. Semiatin, 'Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys', *Scripta Materialia* Vol. 43, 2000, pp. 743-749.
- 24.** M. Cabibbo, E. Meccia, E. Evangelista, 'TEM analysis of a friction stir-welded butt joint of Al-Si-Mg alloys', *Materials Chemistry and Physics* Vol. 81, 2003, pp. 289-292.
- 25.** H. Uzun, C. D. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini, C. Gambaro, 'Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel', *Materials and Design* xxx (2004) xxx-xxx (Article in press).
- 26.** G. Liu, L.E. Murr, C-S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, 'Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 Aluminum', *Scripta Materialia*, Vol. 37, No 3, 1997, pp. 355 - 361
- 27.** M. Ericsson, R. Sandström, 'Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and coMParison with MIG and TIG', *International Journal of Fatigue*, article in press.
- 28.** S. Ramasamy, C. E. Albright, 'CO₂ and Nd - YAG laser beam welding of 5754 - O aluminium alloy for automotive applications', *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6, 2001, No. 3, pp. 182 - 190
- 29.** H. Kanazawa, 'Welding performance of high power YAG lasers with aluminium alloys', *Welding International*, Vol. 12, Issue 5, 1998, pp. 341 - 346
- 30.** Katsunawa, S. Katayama, K. Kojima, 'CO₂ laser weldability of aluminium alloys (Report 1): Effect of welding conditions on melting characteristics', *Welding International*, Vol. 12, Issue 7, 1998, pp. 519 - 528

- 31.** Katsunawa, S. Katayama, K. Kojima, 'CO₂ laser weldability of aluminium alloys (Report 2): Effect of welding conditions on melting characteristics', *Welding International*, Vol. 12, Issue 10, 1998, pp. 774 - 789
- 32.** W. Xijing, S. Katayama, A. Matsunawa, 'Character of melting and evaporation in lazer beam welding of two aluminum alloys', *Welding Journal*, Vol. 76, No 2, 1997, pp. 70s - 73s
- 33.** M. Pastor, H. Zhao, R. P. Martukanitz, T. Debroy, 'Porosity, underfill and Magnesium loss during Continuous wave of aluminum alloys 5182 and 5754', *Welding Journal*, Vol. 78, No 11, 1999, pp. 207s - 216s
- 34.** J.S. Kim, T. Watanabe, Y. Yoshida, 'Effect of the beam- defocusing characteristics on porosity formation in laser welding', *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 14, November 1995, Issue 24, pp. 1624-1626.
- 35.** A. Hirose, H. Todaka, H. Yamaoka, N. Kurosawa, K.F. Kobayashi, 'Quantitative Evaluation of Softened Regions in Weld Heat-Affected Zones of 6061-T6 Aluminum Alloy: Characterization of the Laser Beam Welding Process', *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30A, Issue 8, August 1999, pp. 2115-2120.
- 36.** A. Hirose, H. Todaka, K.F. Kobayashi, 'CO₂ Laser Beam Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy Thin Plate', *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, Vol. 28A, Issue 12, December 1997, pp. 2657-2662.
- 37.** P.A. Friedman and G.T. Kridli, 'Microstructural and mechanical investigation of Aluminum Tailor-welded blanks', *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9, Issue 5, October 2000, pp. 541-551.
- 38.** R.C. Calcraft, M.A. Wahab, D.M. Viano, G.O. Schumann, R.H. Phillips, N.U. Ahmed, 'The development of the welding procedures and fatigue of butt-welded structures of aluminium-AA5383', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, 1999, pp. 60-65.
- 39.** C. Menzemer, P.C. Lam, T.S. Srivatsn, C.F. Wittel, 'An investigation of fusion zone microstructures of welded aluminum alloy joints', *Materials Letters*, Vol. 41, 1999, pp. 192-197.
- 40.** Y.M. Zhang, C. Pan, A.T. Male, 'Solidification behavior of Al-Mg aluminum alloy using double-sided arc welding process', *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 19, 2000, pp. 831-833.

- 41.** S. Rajasekaran, 'Weld Bead Characteristics in Pulsed GMA Welding of Al-Mg Alloys', *Welding Journal*, Vol. 78, No. 12, December 1999, pp. 397s-407s.
- 42.** N.B. Potlari, P.K. Ghosh, P.C. Gupta, Y.S. Reddy, 'Studies on weld metal characteristics and their influence on tensile and fatigue properties of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy', *Welding Journal*, Vol. 75, No. 2, 1996, pp. 62s-70s.
- 43.** S.C. Gambrell Jr, Kishen Kavikondala, 'Contraction Ratios in Thick Aluminum Welded Joints', *Welding Journal*, Vol. 75, No. 4, April 1996, pp. 109s-114s.
- 44.** Y.M. Zhang, S.B. Zhang, 'Welding Aluminum Alloy 6061 with the Opposing Dual-Torch GTAW Process', *Welding Journal*, Vol. 78, No. 6, June 1999, pp. 202s-206s.
- 45.** L.A. Gutterez, G. Neye, E. Zschech, 'Microstructure, Hardness Profile and Tensile Strength in Welds of AA60613 T6 Extrusions', *Welding Journal*, Vol. 75, No. 4, April 1996, pp. 115s-121s.
- 46.** T. Luijendijk, 'Welding of dissimilar aluminium alloys' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, 2000, pp. 29-35.
- 47.** T. Yuri, T. Ogata, M. Saito, Y. Hirayama, 'Effect of welding structure on high-cycle and low-cycle fatigue properties for MIG welded A5083 aluminum alloys at cryogenic temperatures', *Cryogenics*, Vol. 41, 2001, pp. 475-483.
- 48.** S. Subramaniam, D.R. White, J.E. Jones and D.W. Lyons, 'Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW', *Welding Journal*, Vol. 78, No. 5, May 1999, pp. 166s-172s.
- 49.** M.M. Mossman and J.C. Lippold, 'Weldability testing of dissimilar combinations of 5000- and 6000- series Aluminium alloys', *Welding Journal*, Vol. 82, September 2002, No. 9, pp. 188s-194s.
- 50.** M-A Aesh, 'Optimization of weld bead dimensions in GTAW of Aluminium - Magnesium alloy', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 16, Issue 6, pp. 725-736.

- 51.** D.C. Lin, G.X. Wang, T.S. Srivatsan, 'A mechanism for the formation of equiaxed grains in welds of aluminium - lithium alloy 2090', *Materials Science and Engineering A*, Vol. A351, 2003, pp. 304-309.
- 52.** C.Huang and S. Kou, 'Partially melted zone in Aluminum welds-planar and cellular solidification', *Welding Journal*, Vol. 80, No. 2, February 2001, pp. 46s-53s.
- 53.** M. Suban, J. Tusek, 'Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, 2001, pp. 185-192.
- 54.** V. Malin, 'Study of Metallurgical Phenomena in the HAZ of 6061-T6 Aluminum Welded Joints', *Welding Journal*, Vol. 74, No. 9, September 1995, pp. 305s-318s.
- 55.** S. Missori, E. Pezzuti, 'Microstructural and mechanical characteristics of welded joints in type 6082-T6 aluminium alloy', *Welding International*, Vol. 11, Issue 6, 1997, pp. 468-474.
- 56.** A. Kostrivas, J. C. Lippold, 'A method for Studying Weld Fusion Boundary Microstructure Evolution in Aluminum Alloys', *Welding Journal*, Vol. 79, No. 1, January 2000, pp. 1s-8s.
- 57.** S.S. Bahu, S.A. David, J.M. Vitek, R.W. Reed, 'Solidification and microstructure modeling of welds in aluminium alloys 5754 and 6111', *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6, No. 6, 2001, pp. 31-40.
- 58.** C. H. Lee, S. W. Kim, E. P. Yoon, 'Electron beam welding characteristics of high strength aluminum alloys for express train applications', *Science and technology of Welding and Joining*, Vol. 5, No. 5, 2000, pp. 277 - 283.
- 59.** D.L. Olson, R. Dixon, A.L. Liby, 'Welding theory and practice', *Materials processing - theory and practices*, Vol. 8, Series editor F.F.Y. Wang, North-Holland.
- 60.** W.F. Savage, A.H. Aronson, *Welding Journal*, Vol. 45, No. 2, 1966, p. 85s.
- 61.** W.F. Savage, E.F. Nippes, J.S. Erickson, *Welding Journal*, Vol. 55, No. 8, 1876, p. 213s.
- 62.** Δ. Ι. Παντελής, Γ. Χρυσουλάκης, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Αθήνα, 1996

- 63.** HITACHI 'Process Robot M6100/M6150(HRC-2100)', HITACHI Instruction Manual
- 64.** ANSI/AWS D3.7-83, 'Guide for Aluminum hull welding', ANSI/AWS, 1983
- 65.** Y.B. Zhao, Z.L. Lei, Y.B. Chen, W. Tao, 'A comparative study of laser-arc double-sided welding and double-sided arc welding of 6 mm 5A06 aluminium alloy', *Materials and Design*, 32 (2011), pp. 2165–2171
- 66.** M. Salcudean, M. Choi, R. Greif, 'A study of heat transfer during arc welding' *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 29 No. 2 (1986), pp. 215-225,
- 67.** Teresa Sibillano, Antonio Ancona, Vincenzo Berardi, Emanuela Schingaro, Giuseppe Basile, Pietro Mario Lugara, 'A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation' *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44 (2006), pp. 1039–1051
- 68.** R.K. Gupta, S.V.S. Narayan Murty, 'Analysis of crack in aluminium alloy AA2219 weldment' *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13 (2006), pp. 1370–1375
- 69.** P.K. Ghosh, L. Dorn, Marc Huubner, V.K. Goyal, 'Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194 (2007), pp. 163–175
- 70.** M. Kueppers, C.M. Sonsino, 'Assessment of the fatigue behaviour of welded aluminium joints under multiaxial spectrum loading by a critical plane approach' *International Journal of Fatigue*, Vol. 28 (2006), pp. 540–546
- 71.** B.Y. Kang, Yarlagadd K.D.V. Prasad, M.J. Kang, H.J. Kim, I.S. Kim, 'Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminum GMA welding' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209 (2009), pp. 4716–4721
- 72.** Jeom Kee Paik, 'Characteristics of welding induced initial deflections in welded aluminum plates' *Thin-Walled Structures*, Vol. 45 (2007), pp. 493–501
- 73.** M.I. Mirandou, S.F. Arico, S.N. Balart, L.M. Gribaudo, 'Characterization of the interaction layer in diffusion couples U-7 wt.%Mo/Al 6061 alloy at 550°C and 340°C. Effect of the γ U(Mo) cellular decomposition' *Materials Characterization*, Vol. 60 (2009), pp. 888 – 893

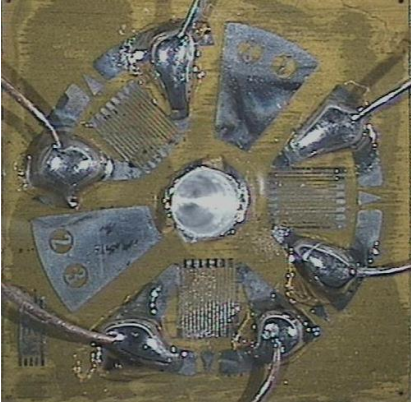
- 74.** Da-Quan Zhang, Jin Li, Hyung Goun Joo, Kang Yong Lee, 'Corrosion properties of Nd:YAG laser-GMA hybrid welded AA6061 Al alloy and its microstructure' *Corrosion Science*, Vol. 51 (2009), pp. 1399-1404
- 75.** S. Katsas, J. Nikolaou, G. Papadimitriou, 'Corrosion resistance of repair welded naval aluminium alloys' *Materials and Design*, Vol. 28 (2007), pp. 831-836
- 76.** BAI Yan, GAO Hong-ming, QIU Ling, 'Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys' *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 20 (2010), pp. 2234 - 2239
- 77.** Victor H.C. de Albuquerque, Cleiton C. Silva, Cicero R.O. Moura, Willys M. Aguiar, Jesualdo P. Farias, 'Effect of nonmetallic inclusion and banding on the success of the two-layer temper bead welding technique' *Materials and Design*, Vol. 30 (2009), pp. 1068-1074
- 78.** V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G. Madhusudhan Reddy, 'Effect of pulsed current and post weld aging treatment on tensile properties of argon arc welded high strength aluminium alloy' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 459 (2007), pp. 19-34
- 79.** Jun Yan, Xiaoyan Zeng, Ming Gao, Jian Lai, Tianxiao Lin, 'Effect of welding wires on microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminum alloy in CO₂ laser-MIG hybrid welding' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 7307-7313
- 80.** Her-Yueh Huang, 'Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding' *Materials and Design*, Vol. 31 (2010), pp. 2488-2495
- 81.** D. Gery, H. Longb, P. Maropoulos, 'Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167 (2005), pp. 393-401
- 82.** P.M.G.P. Moreira, M.A.V. de Figueiredo, P.M.S.T. de Castro, 'Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys' *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 48 (2007), pp. 169-177
- 83.** H. Guo, J. Hub, H.L. Tsai, 'Formation of weld crater in GMAW of aluminum alloys' *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52 (2009), pp. 5533-5546

- 84.** E. Cicala, G. Duffet, H. Andrzejewski, D. Grevey, S. Ignat, 'Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding - operating parameters and their effects' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 395 (2005), pp. 1-9
- 85.** G. CaMPana, A. Ascari, A. Fortunato, G. Tani, 'Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 5588-5590
- 86.** BAI Yan, GAO Hong-ming, WU Lin, MA Zhao-hui, CAO Neng, 'Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test' *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 20 (2010), pp. 1392 - 1396
- 87.** D. Fabrègue, A. Deschamps, M. Suéry, 'Influence of the silicon content on the mechanical properties of AA6xxx laser welds' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 506 (2009), pp. 157-164
- 88.** C.J. Bayley, A.K. Pilkey, 'Influence of welding defects on the localization behaviour of an aluminum alloy tailor-welded blank' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 403 (2005), pp. 1-10
- 89.** V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G. Madhusudhan Reddy, 'Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints' *International Journal of Fatigue*, Vol. 30 (2008), pp. 405-416
- 90.** A. Farzadi, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, 'Investigation of weld pool in aluminum alloys: Geometry and solidification microstructure' *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49 (2010), pp. 809 - 819
- 91.** J.M. Sanchez-Amaya, T. Delgado, L. Gonzalez-Rovira, F.J. Botana, 'Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 9512-9521
- 92.** B. Hu, I.M. Richardson, 'Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminium alloys' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 429 (2006), pp. 287-294

- 93.** P. Praveen, P.K.D.V. Yarlagadda, 'Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165 (2005), pp. 1106-1112
- 94.** F. Lefebvre, S. Ganguly, I. Sinclair, 'Micromechanical aspects of fatigue in a MIG welded aluminium airframe alloy Part 1. Microstructural characterization' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 397 (2005), pp. 338-345
- 95.** S. Zielinska, F. Valensi, N. Pellerin, S. Pellerin, K. Musiol, Ch. de Izarra, F. Briand, 'Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding (GMAW)' *Journal of materials processing technology*, Vol. 209 (2009), pp. 3581-3591
- 96.** S. Katsas, J. Nikolaou, G. Papadimitriou, 'Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx aluminium alloys and their effect on the mechanical properties' *Materials and Design*, Vol. 27 (2006), pp. 968-975
- 97.** S. Babu, T. Senthil Kumar, V. Balasubramanian, 'Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm' *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 18 (2008), pp. 1028 - 1036
- 98.** N. Coniglio, C.E. Cross, I. Dorfel, W. Osterle, 'Phase formation in 6060/4043 aluminum weld solidification' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 517 (2009), pp. 321-327
- 99.** T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi, P.M. Lugara, 'Real-time monitoring of laser welding by correlation analysis: The case of AA5083' *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45 (2007), pp. 1005-1009
- 100.** P.K. Palani, N. Murugan, 'Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172 (2006), pp. 1-10
- 101.** G. Casalino, 'Statistical analysis of MIG-laser CO2 hybrid welding of Al-Mg alloy' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191 (2007), pp. 106-110
- 102.** Celina Leal Mendes da Silva, Americo Scotti, 'The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171 (2006), pp. 366-372

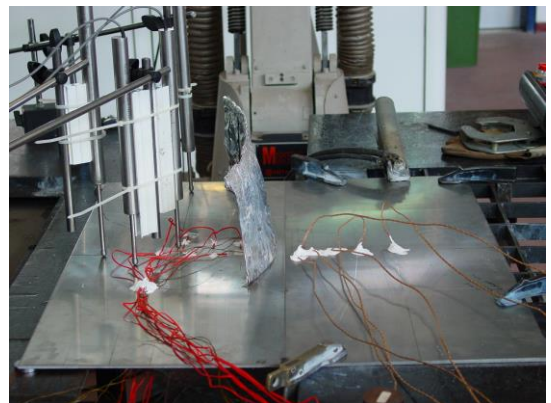
103. Rakesh Kumar, Ulrich Diltthey, D.K. Dwivedi, P.K. Ghosh, 'Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding' *Materials and Design*, Vol. 30 (2009), pp. 306-313

104. Prachya Peasura, Anucha Watanapa, 'Influence of Shielding Gas on Aluminum Alloy 5083 in Gas Tungsten Arc Welding', *Procedia Engineering*, Vol.29, 2012, pp. 2465 - 2469



ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η

Πειραματική Μελέτη Στρεβλώσεων – Παραμορφώσεων σε Συγκολλήσεις GMAW Ναυπηγικών Κραμάτων Αλουμινίου, Σειράς 5xxx



Κεφάλαιο 7°

Οι παραμένουσες τάσεις σε συγκολλητές κατασκευές

7.1 Γενικά

Οι παραμένουσες τάσεις σε ένα κατασκευαστικό υλικό είναι οι τάσεις που υπάρχουν σε αυτό χωρίς (και συνήθως πριν) την επιβολή κάποιου εξωτερικού φορτίου. Μηχανουργικές και θερμικές κατεργασίες (χύτευση, συγκόλληση) είναι συνήθεις λόγοι για την εμφάνισή τους. Σε κάποιες περιπτώσεις οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να εμφανιστούν αργότερα στη ζωή του υλικού μιας κατασκευής όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που αυτή δεχθεί περιστασιακή υπερφόρτιση, ή και κατά τη συντήρηση και τροποποίησή της.

Οι επιδράσεις των παραμενουσών τάσεων μπορούν να είναι είτε θετικές είτε αρνητικές, εξαρτώμενες πάντα από την ένταση και την κατανομή τους σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο.

7.2 Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις

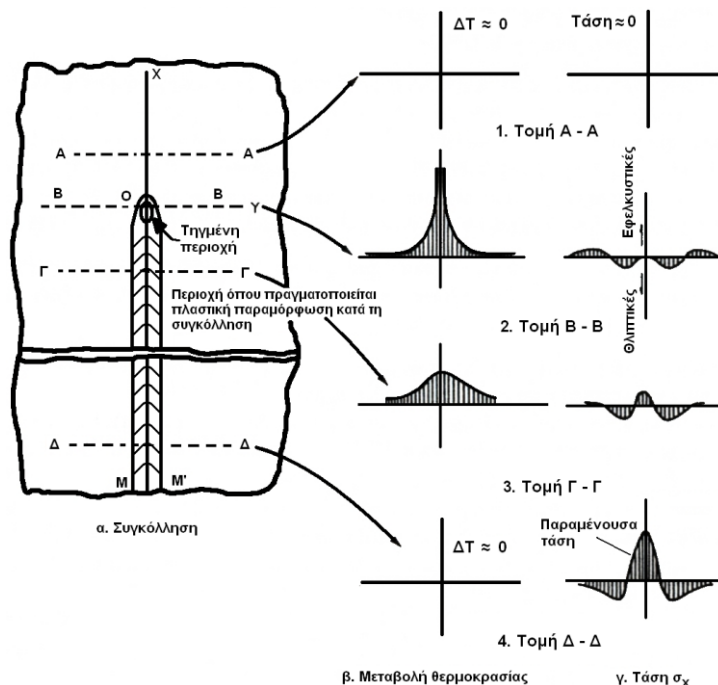
Κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, ιδιαίτερα όταν αυτές πραγματοποιούνται με συμβατικές τεχνικές, τα προς συγκόλληση τεμάχια θερμαίνονται τοπικά, με αποτέλεσμα η θερμοκρασιακή κατανομή τους να μην είναι ομοιόμορφη και να μεταβάλλεται με την πρόοδο της συγκόλλησης. Συνέπεια της ανομοιομορφίας αυτής στην κατανομή των θερμοκρασιών, είναι η δημιουργία θερμικών παραμορφώσεων πολύπλοκης μορφής, τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης όσο και στο βασικό μέταλλο. Το μέγεθος των παραμορφώσεων αυτών είναι τέτοιο που το υλικό διαρρέει πλαστικά στην περιοχή της συγκόλλησης. Έτσι, όταν πλέον τα συγκολλημένα τεμάχια ψυχθούν και αποκτήσουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, δεν επανέρχονται σε μηδενική εντατική κατάσταση. Οι τάσεις που παραμένουν καλούνται παραμένουσες τάσεις.

Σε ερευνητικό επίπεδο, η μελέτη των παραμενουσών τάσεων επικεντρώνεται, όπως είναι φυσικό, στη δυσμενή επίπτωσή τους στη συνολική αντοχή της συγκολλητής κατασκευής. Για παράδειγμα, υψηλές εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στην περιοχή μιας συγκόλλησης μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα ψαθυρή θραύση ή μείωση της αντοχής σε κόπωση, ενώ υψηλές θλιπτικές παραμένουσες τάσεις ή αρχικές παραμορφώσεις μειώνουν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Βιβλιογραφικά, διάφορες ονομασίες έχουν χρησιμοποιηθεί για να αποδώσουν τις παραμένουσες τάσεις. Έτσι, αυτές περιγράφονται ως:

- Εσωτερικές τάσεις

- Αρχικές τάσεις
- Εγγενείς τάσεις
- Τάσεις αντίδρασης
- Παγιδευμένες τάσεις

Στην Εικόνα 7.1 φαίνονται σχηματικά οι μεταβολές των θερμοκρασιών και των τάσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης. Η συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται στην απόθεση μιας στρώσης μετάλλου, χρησιμοποιώντας συμβατική τεχνική συγκόλλησης, στην επιφάνεια ενός ελάσματος (Bead-on-plate weld) κατά μήκος του άξονα 'x'. Το τόξο της συγκόλλησης κινείται με ταχύτητα u και τη χρονική στιγμή που παριστάνεται στο σχήμα, βρίσκεται στη θέση 0.



Εικόνα 7.1 Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων^[1]

Η Εικόνα 7.1β δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ελάσματος κατά μήκος διαφόρων εγκάρσιων τομών. Στην τομή A - A, που βρίσκεται αρκετά μπροστά από το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή λόγω συγκόλλησης είναι πρακτικά μηδέν. Στην τομή B - B, που διασχίζει το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι απότομη και η κατανομή της ανομοιόμορφη. Στην τομή Γ - Γ, που βρίσκεται σε κάποια απόσταση πίσω από το τόξο, η θερμοκρασιακή κατανομή γίνεται λιγότερο ανομοιόμορφη. Τέλος, στην κατανομή Δ - Δ, που βρίσκεται σε μεγάλη

απόσταση πίσω από το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή της συγκόλλησης έχει και πάλι μηδενιστεί.

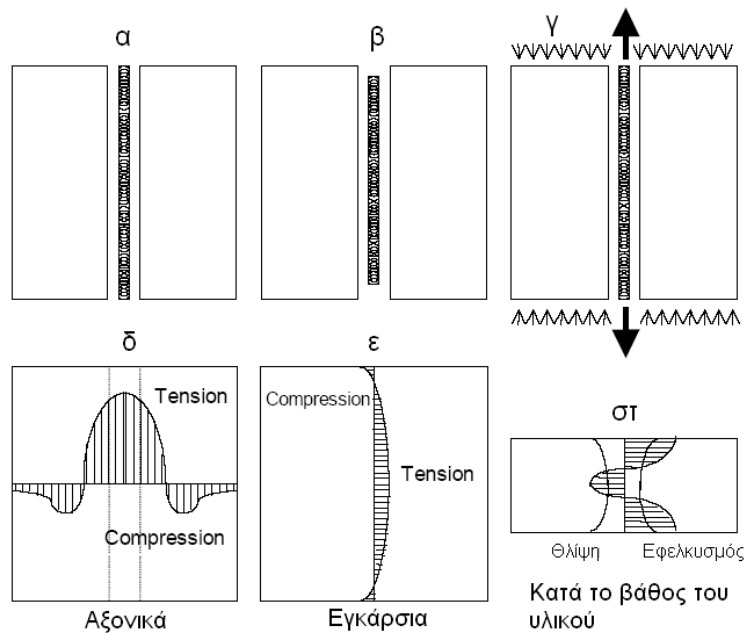
Στην Εικόνα 7.1γ, φαίνεται η κατανομή των τάσεων σ_x στις ίδιες εγκάρσιες τομές. Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα, προφανώς και αναπτύσσονται και τάσεις σ_y και τ_{xy} που όμως δεν εμφανίζονται στο σχήμα.

Στην τομή A - A, οι θερμικές τάσεις λόγω της συγκόλλησης είναι αμελητέες. Στην τομή B - B, στην περιοχή του τηγμένου μετάλλου, επειδή αυτό δεν μπορεί να συγκρατήσει φορτία οι θερμικές τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές ενώ σε γειτονικές από αυτό περιοχές, υπάρχουν θλιπτικές τάσεις εξαιτίας του γεγονότος ότι η διαστολή του μετάλλου εμποδίζεται από το υπόλοιπο υλικό που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασιακή κατάσταση. Καθώς στις περιοχές αυτές, της ύπαρξης θλιπτικών τάσεων, η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή και κατά συνέπεια η τάση διαρροής πολύ χαμηλή, οι αναπτυσσόμενες θερμικές τάσεις έχουν μέγιστη τιμή ίση με το όριο διαρροής στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Το μέγεθος των θλιπτικών τάσεων φτάνει ως ένα άνω όριο όσο η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης αυξάνει και η θερμοκρασία μειώνεται. Σε μεγαλύτερες ακόμα αποστάσεις οι τάσεις μειώνονται και μετατρέπονται σε εφελκυστικές, για λόγους ισορροπίας. Στην τομή Γ - Γ, το μέταλλο συγκόλλησης και οι περιοχές που γειτονεύουν με αυτό αποψύχονται τείνουν να συσταλούν. Η συστολή αυτή, εμποδίζεται από την περιοχή του υλικού που βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της θέρμανσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων. Καθώς η απόσταση από την περιοχή της συγκόλλησης αυξάνει, οι τάσεις μετατρέπονται σε θλιπτικές και κατόπιν, πάλι σε εφελκυστικές. Στην τομή Δ - Δ, όπου έχει συμβεί πλήρης απόψυξη του συγκολλημένου υλικού, εγκαθίστανται υψηλές εφελκυστικές τάσεις στην περιοχή γύρω από τη συγκόλληση και θλιπτικές, για λόγους ισορροπίας, σε πιο απομακρυσμένες περιοχές. Η κατανομή αυτή, αποτελεί και την τυπική κατανομή παραμενουσών τάσεων που δημιουργείται σε συγκολλήσεις.

Στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζεται μια διαφορετική προσεγγιστική εκδοχή των παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται στο υλικό, εξαιτίας της συγκόλλησης. Αρχικά, και αμέσως μετά το πέρας της διαδικασίας (Εικ. 7.2α) η περιοχή της ραφής και η άμεσα γειτονική περιοχή βρίσκονται σε ίδιας τάξης μεγέθους υψηλή θερμοκρασία ενώ πιο απομακρυσμένες περιοχές βρίσκονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Η Εικόνα 7.2β, αναπαριστά τι πραγματικά θα συνέβαινε εάν το συγκολλημένο υλικό διαχωριζόταν σε τρία διαφορετικά τμήματα (ένα για την περιοχή της συγκόλλησης και δύο για τις εκατέρωθεν από αυτή γειτονικές περιοχές). Κατά την απόψυξη, τα τμήματα μακριά από τη συγκόλληση που έχουν χαμηλότερο θερμοκρασιακό φορτίο θα διατηρούσαν τις διαστάσεις τους ενώ το τμήμα που συμπεριλαμβάνει τη συγκόλληση θα συστέλλονταν. Η Εικόνα 7.2γ αναπαριστά το σύστημα τάσεων - παραμορφώσεων που

αναπτύσσεται για τα τρία υποθετικά τμήματα κατά την απόψυξη. Το τμήμα που περιλαμβάνει τη συγκόλληση δέχεται εφελκυστικές τάσεις καθώς η συστολή του εμποδίζεται από τα γειτονικά, τα οποία και αναπτύσσουν θλιπτικές τάσεις.

Στις Εικόνες 7.2δ και 7.2ε, φαίνονται οι κατανομές των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης κατά σ_x και σ_y αντίστοιχα ενώ στην Εικόνα 7.2στ κατά το πάχος του υλικού.



Εικόνα 7.2 Η δημιουργία των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης^[3]

Το εύρος των παραμενουσών τάσεων/παραμορφώσεων, όπως και η κατανομή τους στην περιοχή της συγκόλλησης, εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες οι σημαντικότεροι των οποίων είναι η τεχνική συγκόλλησης, ο αριθμός των περασμάτων που εφαρμόζεται, οι ιδιότητες του υπό συγκόλληση υλικού, η εφαρμογή περιορισμών στη μετατόπιση των υπό συγκόλληση τεμαχίων κ.α.

7.3 Επίδραση διαφόρων παραγόντων στο μέγεθος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων

7.3.1 Επίδραση του υλικού

Το μέγεθος και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές εξαρτάται κατά κύριο λόγο από βασικές παραμέτρους των υλικών όπως:

- Η θερμοκρασιακή κατανομή
- Τα χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής τους

- ο Οι μηχανικές ιδιότητες τους στις υψηλές θερμοκρασίες

Όπως έχει διαπιστωθεί, στα περισσότερα υλικά, συμπεριλαμβανομένων του κοινού χάλυβα και των κραμάτων αλουμινίου, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμένουσας τάσης είναι ίση με το όριο διαρροής του υλικού. Ωστόσο, στην περίπτωση χαλύβων υψηλής αντοχής δεν υπάρχει, ως και σήμερα, σύμπτωση απόψεων ως προς μέγεθος των παραμενουσών τάσεων. Έτσι λοιπόν, ενώ στους περισσότερους αναλυτικούς υπολογισμούς οι μέγιστες τάσεις φαίνεται να πλησιάζουν το όριο διαρροής, πληθώρα πειραματικών μετρήσεων δείχνουν ότι οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες αυτού.

7.3.2 Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου

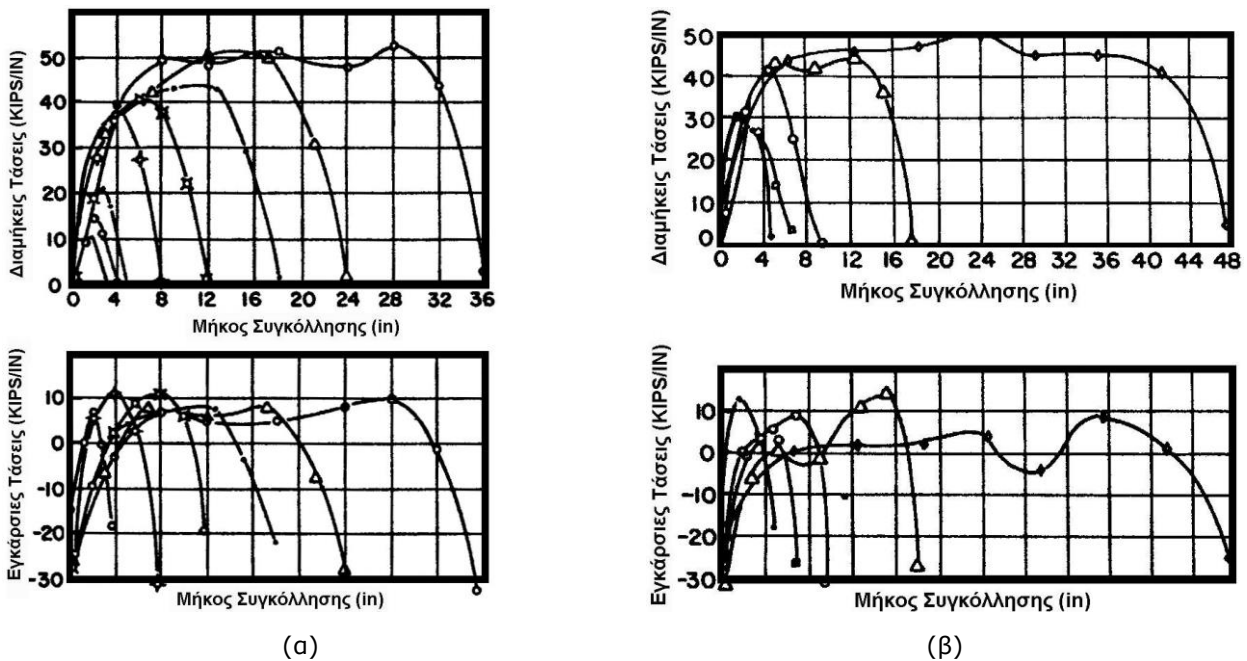
Για τη σωστή μέτρηση των παραμενουσών τάσεων σε μια συγκολλητή κατασκευή, είναι απαραίτητη προϋπόθεση το μέγεθος του δοκιμίου να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλάβει παραμένουσες τάσεις μεγέθους ίσου προς τις μέγιστες δυνατές που μπορεί να αναπτυχθούν σε πραγματικές κατασκευές.

Στις Εικόνες που ακολουθούν (Εικ. 7.3 και 7.4) φαίνονται τα αποτελέσματα από μια τυπική σειρά πειραμάτων που σκοπό είχε τον προσδιορισμό του ελάχιστου μεγέθους των δοκιμίων που απαιτείται για την ανάπτυξη των μέγιστων δυνατών παραμενουσών τάσεων. Πραγματοποιήθηκαν επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις ελασμάτων από μαλακό χάλυβα, με χρήση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων και με την τεχνική βυθισμένου τόξου. Τα πειράματα έγιναν χωρίς τη χρήση εξωτερικού περιορισμού. Στις Εικόνες 7.3α και 7.3β φαίνονται οι κατανομές των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις διαφόρων μηκών, με τις τεχνικές βυθισμένου τόξου και επενδεδυμένων ηλεκτροδίων αντίστοιχα.

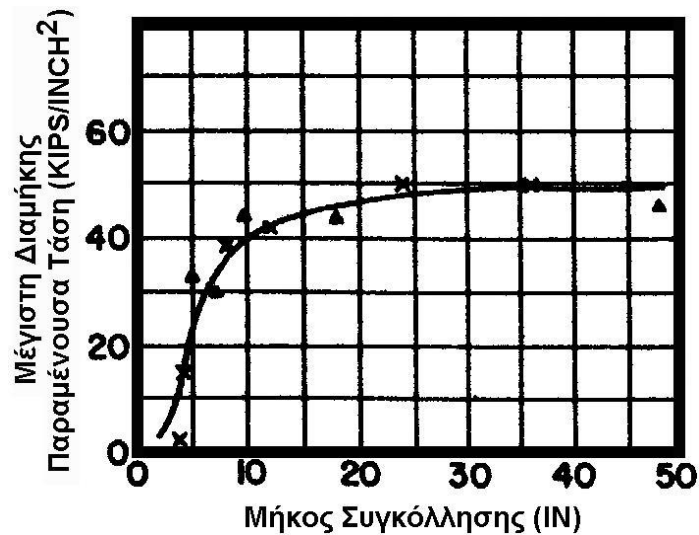
Η τιμή της διαμήκουσ παραμένουσας τάσης πρέπει να είναι ίση με το μηδέν στα δύο άκρα και να αποκτά τη μέγιστη τιμή στην κεντρική περιοχή της. Η Εικόνα 7.3 δείχνει ότι η τιμή της μέγιστης τάσης αυξάνει, με αύξηση του μήκους της συγκόλλησης. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 7.4, όπου δείχνει τη μέγιστη διαμήκη παραμένουσα τάση σαν συνάρτηση του μήκους συγκόλλησης. Παρατηρείται ότι απαιτούνται μήκη συγκόλλησης μεγαλύτερα από 460mm (18in) για την πλήρη ανάπτυξη των μέγιστων δυνατών διαμηκών εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι, σε συγκολλήσεις με μήκος μεγαλύτερο από 460mm, η κατανομή των διαμηκών παραμενουσών τάσεων στην κεντρική τους περιοχή, είναι ομοιόμορφη.

Η Εικόνα 7.3, δείχνει ότι οι εγκάρσιες παραμενουσες τάσεις είναι εφελκυστικές στις κεντρικές περιοχές και θλιπτικές στα άκρα της συγκόλλησης. Το μήκος της συγκόλλησης δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος της μέγιστης εγκάρσιας τάσης. Αναφέρεται ακόμα ότι το πλάτος του δοκιμίου έχει αμελητέα επίδραση στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων, αρκεί το

μέγεθός του να είναι ίσο με μερικά πολλαπλάσια του πλάτους της ζώνης που παρουσιάζονται εφελκυστικές τάσεις.



Εικόνα 7.3 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις διαφόρων μηκών. α) Μέθοδος βυθισμένου τόξου, β) μέθοδος επενδεδυμένων ηλεκτροδίων^[2]



Εικόνα 7.4 Επίδραση του μήκους συγκόλλησης στη μέγιστη παραμένουσα τάση^[2]

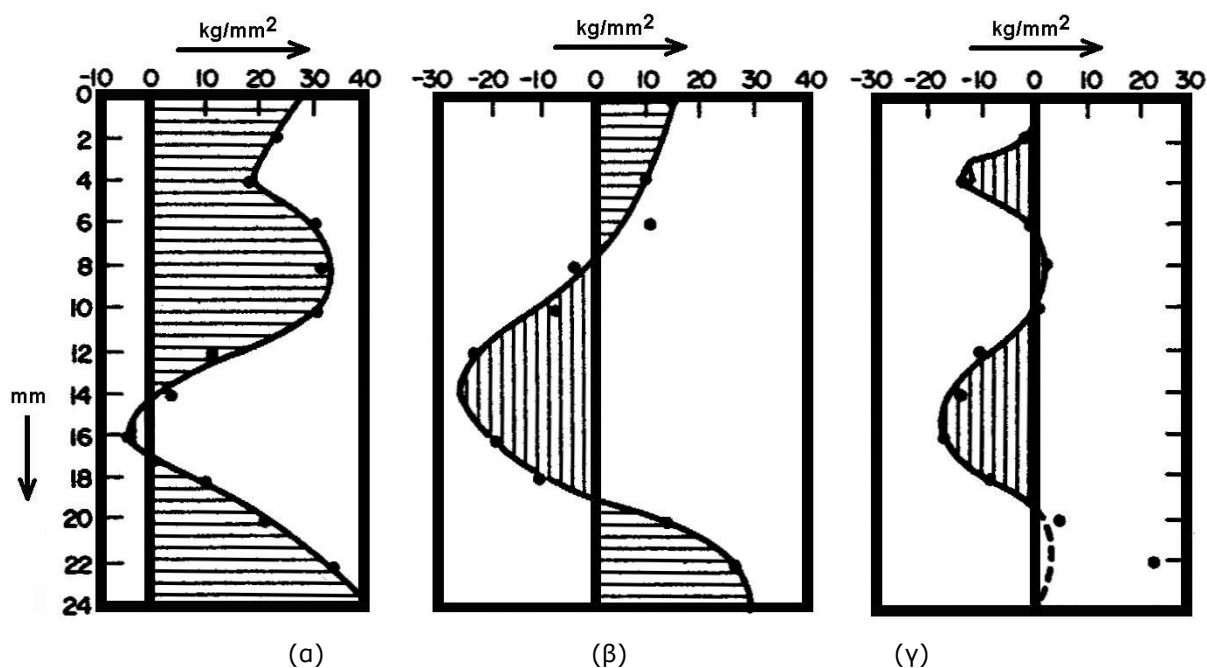
7.3.3 Επίδραση του πάχους των ελασμάτων

Στην περίπτωση συγκόλλησης ελασμάτων πάχους μεγαλύτερο από 25mm, δεν είναι δυνατό να αγνοηθούν ούτε η ύπαρξη της παραμένουσας τάσης κατά τη διεύθυνση του πάχους σ_z , ούτε η κατανομή των άλλων τάσεων σ_x και σ_y σε σχέση με το πάχος. Στην Εικόνα 7.5, φαίνεται η

κατανομή των παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους στο μέταλλο συγκόλλησης, σε ραφή μετωπικής συγκόλλησης, δοκιμίων από μαλακό χάλυβα πάχους 25mm και διαστάσεων 500x500mm². Η συγκόλληση έγινε ταυτόχρονα και από τις δύο πλευρές για να αποφευχθούν παραμορφώσεις.

Από τις Εικόνες 7.5α και 7.5β, φαίνεται ότι οι διαμήκεις και οι εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές κοντά στις δύο επιφάνειες του ελάσματος. Οι θλιπτικές τάσεις στο εσωτερικό της συγκόλλησης δημιουργήθηκαν, πιθανότατα, κατά τη διάρκεια των στρώσεων στην πάνω και κάτω επιφάνεια.

Στην Εικόνα 7.5γ, φαίνεται η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_z οι οποίες είναι, όπως και πρέπει, ίσες με μηδέν στις δύο επιφάνειες, ενώ εμφανίζονται θλιπτικές στο εσωτερικό της συγκόλλησης.



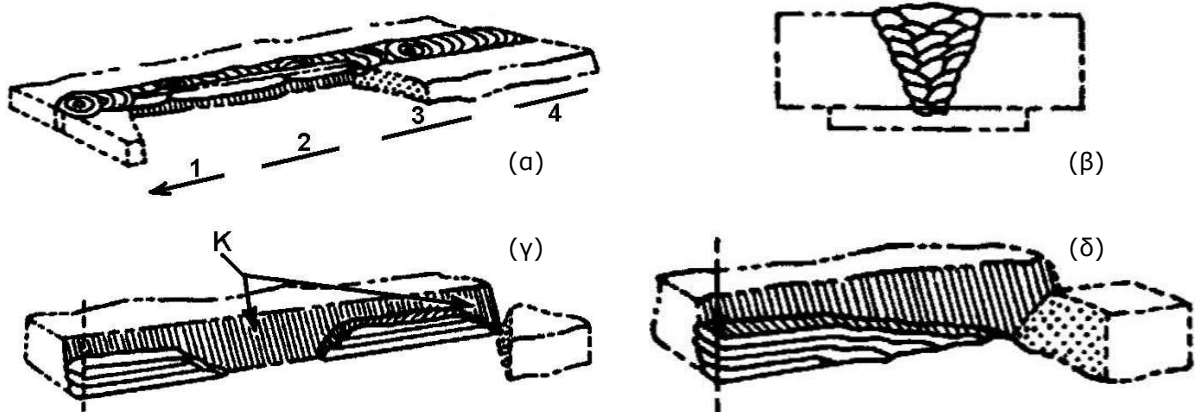
Εικόνα 7.5 Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους^[2]. α) Διαμήκης τάση σ_x , β) εγκάρσια τάση σ_y , γ) κατακόρυφη τάση σ_z

7.3.4 Επίδραση της μεθόδου συγκόλλησης

Γενικά πιστεύεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων, για τις διάφορες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Ωστόσο, σημαντικές διαφορές απαντώνται μεταξύ των συμβατικών και των μη συμβατικών, σχετικά νέων, τεχνικών συγκόλλησης (LBW, FSW) όχι τόσο σε ότι αφορά στη μορφή της κατανομής των παραμενουσών τάσεων όσο στο πλάτος των κατανομών αυτών.

7.3.5 Επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης

Για τη συγκόλληση ραφών μετωπικών συγκολλήσεων μεγάλου μήκους, έχουν προταθεί διάφορες ακολουθίες συγκόλλησης (Welding Sequences) με σκοπό τη μείωση των παραμενουσών τάσεων αλλά και της παραμόρφωσης. Στην Εικόνα 7.6, παρουσιάζονται τέσσερις τέτοιες τυπικές ακολουθίες συγκόλλησης: η ακολουθία οπισθοδρόμησης (back-step sequence), η ακολουθία κατά τομείς (block sequence), η ακολουθία συνεχούς απόθεσης (build-up sequence) και η ακολουθία καταρράκτη (cascade sequence). Τέτοιου είδους ακολουθίες εφαρμόζονται τόσο κατά τις συγκολλήσεις χαλύβων όσο και κατά τις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.



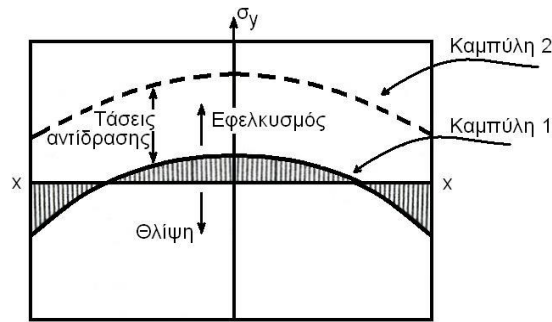
Εικόνα 7.6 Τυπικές ακολουθίες Συγκόλλησης^[2]

- α) Ακολουθία οπισθοδρόμησης, β) ακολουθία κατά τομείς, γ) ακολουθία συνεχούς προσθήκης (κ: μη συγκολλημένα τμήματα γεμίζονται μετά την ολοκλήρωση άλλων ενδιάμεσων τμημάτων), δ) ακολουθία καταρράκτη

7.3.6 Επίδραση της εφαρμογής περιορισμών στη μετατόπιση των δοκιμίων

Αν στη μετωπική συγκόλληση δύο ελασμάτων εφαρμοστεί μηχανικός περιορισμός της πλευρικής συστολής τους τότε, η κατανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων σ_y κατά μήκος της συγκόλλησης, δεν θα έχει την αναμενόμενη τοπική μορφή (Εικ. 7.7, Καμπύλη 1) καθώς σε αυτή προστίθενται επιπλέον εφελκυστικές τάσεις (τάσεις αντίδρασης), εξαιτίας των περιορισμών, δίνοντάς της νέα μορφή (Εικ. 7.7, Καμπύλη 2). Για την πληρότητα του παραδείγματος, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιβολή εξωτερικού περιορισμού, έχει αμελητέα επίδραση στην κατανομή των διαμηκών παραμενουσών τάσεων σ_x .

Τάσεις αντίδρασης δημιουργούνται και κατά τη διάρκεια συγκόλλησης με πολλαπλές στρώσεις.



Εικόνα 7.7 Εγκάρσια κατανομή παραμενουσών τάσεων σε επίπεδη μετωπική συγκόλληση χωρίς (καμπύλη 1) και με (καμπύλη 2). Παρεμπόδιση της πλευρικής συστολής^[1]

7.4 Μέτρηση παραμενουσών τάσεων στις συγκολλήσεις

Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στις συγκολλήσεις, από τις οποίες άλλες είναι καταστρεπτικές και άλλες μη καταστρεπτικές. Οι κυριότερες από τις μεθόδους αυτές κατατάσσονται σε ομάδες, ανάλογα με τις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζονται. Προκύπτουν έτσι:

- Τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων (stress relaxation techniques)
 - Με χρήση επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges) ηλεκτρικής αντίστασης ή μηχανικών
 - Με χρήση άλλων τεχνικών
- Τεχνικές περιθλασης ακτινών Χ (X-ray diffraction)
- Τεχνικές βασισμένες σε ιδιότητες που εξαρτώνται από την τιμή των τάσεων (stress-sensitive properties)
- Τεχνικές ρωγμάτωσης (cracking techniques)

Στις τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων, οι παραμένουσες τάσεις υπολογίζονται με μέτρηση της ελαστικής παραμόρφωσης που προκύπτει σαν αποτέλεσμα του τεμαχισμού του δοκιμίου ή της αφαιρέσεως ενός τμήματος από αυτό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια επιμηκυνσιομέτρων, είτε μηχανικών είτε ηλεκτρικής αντίστασης. Ανάλογα με τον απαιτούμενο από τη μέθοδο τρόπο αφαίρεσης υλικού από το δοκίμιο ή τον τεμαχισμό του, άλλες τεχνικές εφαρμόζονται σε ελάσματα, άλλες σε σωλήνες κ.λπ.. Είναι, όμως, δυνατή η μέτρηση της μεταβολής της ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της χαλάρωσης των τάσεων και με άλλους τρόπους, όπως π.χ. με τη βοήθεια εύθραυστων επικαλύψεων (brittle coatings), δικτυωτών συστημάτων (grid systems) ή φωτοελαστικότητας. Το βασικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών

είναι φυσικά ότι πραγματοποιείται μερική ή ολική καταστροφή του δοκιμίου. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές είναι ευρύτατα χρησιμοποιούμενες εξαιτίας της μεγάλης τους ποιότητας.

Στα μέταλλα που έχουν κρυσταλλική δομή, οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι δυνατό να βρεθούν με μέτρηση της παραμέτρου πλέγματος (lattice parameter) με την τεχνική της περιθλασης των ακτινών Χ. Δεδομένου ότι η παράμετρος πλέγματος ενός μετάλλου στην αφόρτιστη κατάσταση είναι γνωστή, οι ελαστικές παραμορφώσεις μπορούν να μετρηθούν χωρίς καταστροφή του δοκιμίου. Η μέτρηση, γίνεται είτε με ακτινογραφίες Χ (X-ray film) είτε με χρήση περιθλασίμετρου (diffractometer). Με τις τεχνικές αυτές, είναι δυνατή η μέτρηση επιφανειακών τάσεων σε περιοχή βάθους μέχρι 0,025mm και διαμέτρου 0,0025mm. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι η μέθοδος είναι χρονοβόρα ενώ υπάρχουν ερωτηματικά και για την ακρίβειά της, ιδιαίτερα στα μέταλλα που έχουν υποστεί παραμόρφωση της ατομικής τους δομής λόγω προηγούμενων θερμικών κατεργασιών.

Προσπάθειες μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, έχουν γίνει σε μέταλλα και με έμμεσο τρόπο, μετρώντας τις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού που εξαρτώνται από την επιβαλλόμενη τάση. Από τις γνωστές τεχνικές της ομάδας αυτής, ξεχωρίζουν αυτές των υπερήχων και της σκληρότητας. Η τεχνική με υπέρηχους (ultrasonic technique) γίνεται είτε με πολωμένα υπερηχητικά κύματα (polarized ultrasonic waves), που βασίζεται στη μεταβολή της γωνίας πόλωσης με την τάση, είτε με εκμετάλλευση του γεγονότος ότι η απορρόφηση των υπερηχητικών κυμάτων είναι συνάρτηση της τάσης. Η τεχνική σκληρότητας (hardness technique), βασίζεται στη μεταβολή της σκληρότητας του υλικού σαν συνάρτηση της τάσης. Καμία, πάντως, τεχνική της ομάδας αυτής δεν χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη.

Τέλος, ποιοτικά συμπεράσματα για την κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή μιας συγκόλλησης μπορούν να διεξαχθούν από την παρατήρηση της φύσης των ρωγμών, σε συγκολλητά δοκίμια, που δημιουργούνται με έκθεση των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον και την εφαρμογή εξωτερικών φορτίων (δοκιμή ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση SCC).

7.4.1 Τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων

Οι τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων βασίζονται στη γενική αρχή ότι οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται κατά την αποφόρτιση (unloading) είναι ελαστικές, ακόμα και αν το υλικό έχει υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση φορτίων. Είναι, επομένως, δυνατή η εύρεση των παραμενουσών τάσεων χωρίς γνώση της προηγούμενης ιστορίας κατεργασιών και φορτίσεων του υλικού.

Στις επόμενες σελίδες περιγράφονται περιληπτικά έντεκα τεχνικές μέτρησης παραμενουσών τάσεων που βασίζονται στις τεχνικές χαλάρωσης τάσεων. Οι τεχνικές 1 έως 4 είναι εφαρμόσιμες κυρίως σε ελάσματα, οι 5 και 6 σε κυλινδρικά στερεά και σωλήνες, οι 7 και 8 σε τρισδιάστατα στερεά ενώ οι 9 ως 11 βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε περιβάλλον εργαστηρίου. Οι οκτώ πρώτες τεχνικές χρησιμοποιούν ηλεκτρικά ή μηχανικά επιμηκυνσιόμετρα, ενώ οι τρεις τελευταίες χρησιμοποιούν συσκευή τροχού λείανσης, ψαθυρό επίστρωμα ή φωτο-ελαστικό επίστρωμα αντίστοιχα.

Το όνομα της κάθε τεχνικής υποδηλώνει την αρχή από την οποία διέπεται, την τεχνική μέτρησης των παραμορφώσεων ή το όνομα αυτού που την ανέπτυξε ή περιέγραψε. Για κάθε μια από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζονται η πειραματική διαδικασία, το πεδίο εφαρμογής της και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που την ακολουθούν.

7.4.1.1 Τεχνικές τεμαχισμού με χρήση επιμηκυνσιόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης

Κατά την τεχνική αυτή, επιμηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετούνται στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου. Στη συνέχεια, ένα μικρό τμήμα μετάλλου, που περιέχει το επιμηκυνσιόμετρο, αφαιρείται από το δοκίμιο (Εικ. 8.7).

Καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται, η αντίσταση του επιμηκυνσιόμετρου μεταβάλλεται και το μέγεθος της παραμόρφωσης προσδιορίζεται από τη μέτρηση της μεταβολής της αντίστασης. Το τεμάχιο που αποκόπηκε παραμορφώνεται λόγω χαλάρωσης των προϋπαρχόντων παραμενουσών τάσεων, κι έτσι μεταβάλλεται η ηλεκτρική αντίσταση των επιμηκυνσιόμετρων. Μετρώντας τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων.

Έστω $\bar{\epsilon}_x$, $\bar{\epsilon}_y$ και $\bar{\gamma}_{xy}$ οι μεταβολές στην παραμόρφωση που μετρήθηκαν κατά την αποκοπή του μικρού τεμαχίου. Αν το τεμάχιο είναι αρκετά μικρό, τότε μπορεί να υποθεθεί ότι δεν υπάρχουν πλέον παραμένουσες τάσεις σε αυτό (πλήρης χαλάρωση τάσεων) οπότε:

$$\bar{\epsilon}_x = -\epsilon'_x, \bar{\epsilon}_y = -\epsilon'_y, \bar{\gamma}_{xy} = -\gamma'_{xy} \quad (7.1)$$

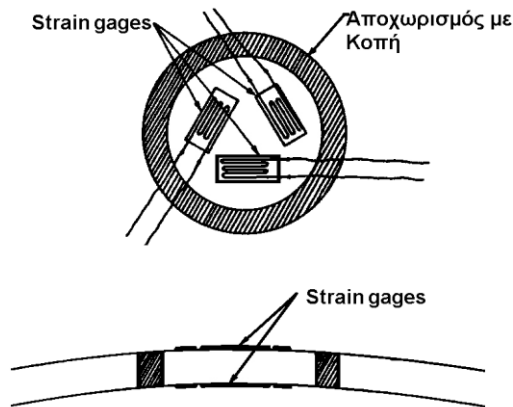
όπου ϵ'_x , ϵ'_y και γ'_{xy} είναι οι ελαστικές συνιστώσες της συνολικής παραμόρφωσης που οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις. Τα αρνητικά πρόσημα (Εξ. 7.1), υποδηλώνουν ότι όταν υπάρχουν εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στο δοκίμιο, τότε συμβαίνει συστολή (όχι επιμήκυνση) κατά τη χαλάρωση των τάσεων. Τότε οι παραμένουσες τάσεις είναι:

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2} (\bar{\varepsilon}_x + \nu \bar{\varepsilon}_y)$$

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2} (\bar{\varepsilon}_y + \nu \bar{\varepsilon}_x)$$

$$\sigma_{xy} = -G \bar{\gamma}_{xy}$$

(7.2)

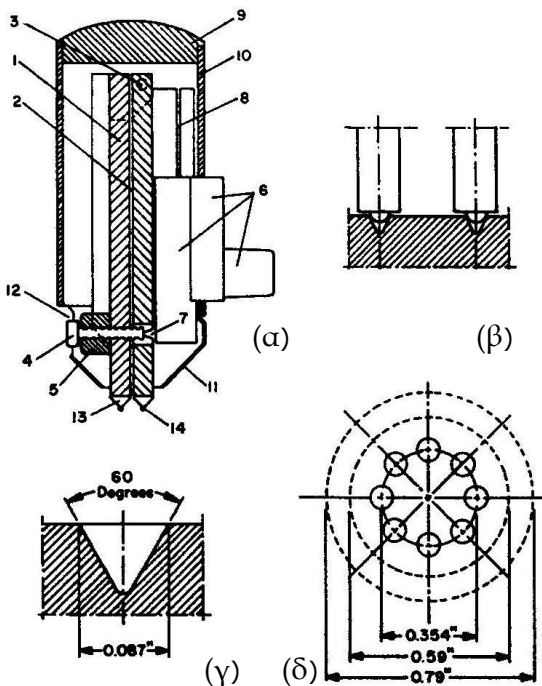


Εικόνα 7.8 Εφαρμογή επιμηκνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης σε έλασμα^[2]

Επειδή είναι πιθανή η υπέρθεση στις παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης και παραμενουσών τάσεων από κάμψη, συνιστάται η τοποθέτηση επιμηκνσιομέτρων και στις δύο επιφάνειες του ελάσματος. Η μέση τιμή των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στις δύο επιφάνειες παριστά τη επίπεδη τάση, ενώ η διαφορά τους παριστά την τάση που προκλήθηκε από την κάμψη.

Πλεονεκτήματα: Είναι αξιόπιστη μέθοδος. Η αρχή που τη διέπει είναι απλή και είναι εξαιρετικά ακριβής.

Μειονεκτήματα: Είναι καταστρεπτική μέθοδος. Δίνει μόνο τη μέση τιμή της τάσης για την περιοχή του δοκιμίου από όπου αφαιρείται το κομμάτι και δεν μετρά τοπικά συγκεντρωμένες τάσεις. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την κοπή είναι ακριβός και η διαδικασία χρονοβόρα.



Εικόνα 7.9 Η τεχνική του Gunnert για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων.
α) Επιμηκνσιομέτρο, β) μπάλες Brinell στις οπές των επιμηκνσιομέτρων, γ) σχήμα των οπών υποδοχής μπάλας Brinell, δ) επιφάνεια μετρήσεων^[2]

7.4.1.2 Η τεχνική διάτρησης του Gunnert

Ο Gunnert πρότεινε μια τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας το μηχανικό επιμηκνσιομέτρο που φαίνεται στην Εικόνα 7.9α. Κατά την τεχνική αυτή, οι κωνικές μπάλες Brinell 13 και 14, που τα κέντρα τους απέχουν μεταξύ τους 9mm (Εικ. 7.9β), τοποθετούνται σε κωνικές εσοχές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το σχήμα των εσοχών αυτών φαίνεται στην Εικόνα 7.9γ. Για τη μέτρηση των

παραμενουσών τάσεων απαιτείται η ύπαρξη τριών ζευγών εσοχών, αλλά για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων χρησιμοποιούνται συνήθως τέσσερα ζεύγη. Τα κέντρα των εσοχών βρίσκονται στην περιφέρεια κύκλου ακτίνας 4,5mm. Αρχικά, λαμβάνονται μετρήσεις των αντιδιαμετρικών αποστάσεων κάθε ζεύγους εσοχών. Ακολουθεί αποχωρισμός του τεμαχίου που φέρει τις εσοχές με τρυπάνι (διακεκομμένες γραμμές - Εικ. 7.9δ) και νέα μέτρηση των αντιδιαμετρικών αποστάσεων. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων παρέχει ένδειξη της χαλάρωσης των τάσεων.

Εφαρμογές: Κατάλληλη σε εργαστηριακό επίπεδο και παραγωγική διαδικασία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οριζόντιες, κεκλιμένες ή κάθετες επιφάνειες.

Πλεονεκτήματα: Απλότητα της μεθόδου. Ευκολία επιδιόρθωσης του δοκιμίου. Επιτρέπει μετρήσεις των μέγιστων τάσεων. Στιβαρή συσκευή που επιτρέπει τη μέτρηση σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Μειονεκτήματα: Η μέθοδος απαιτεί πολύ καλή εκπαίδευση του χρήστη για την εξασφάλιση σωστών μετρήσεων.

7.4.1.3 Η τεχνική διάνοιξης οπής των Mathar - Soete

Όταν διανοίγεται μια μικρή οπή σε ένα έλασμα που υπόκειται σε παραμένουσες τάσεις, οι παραμένουσες τάσεις στις άμεσα γειτονικές περιοχές γύρω από την οπή πρακτικά χαλαρώνουν. Οι παραμένουσες τάσεις που υπάρχουν στην περιοχή διάνοιξης της οπής προσδιορίζονται από τη μέτρηση των τάσεων χαλάρωσης, στην περιοχή που την περιβάλλει. Η μέθοδος της οπής για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων αρχικά προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Mathar και αργότερα εξελίχθηκε από τον Soete και τους Suppriger κ.α..

Υποθέτοντας ότι οι συνιστώσες της παραμένουσας τάσης στο σημείο 0 είναι σ_{x_0} , σ_{y_0} και σ_{xy_0} , τότε οι συνιστώσες της παραμένουσας τάσης στην περιφέρεια ενός μικρού κύκλου με κέντρο το σημείο 0, δίνονται από τις Εξισώσεις 7.3 (Εικ. 7.10α):

$$\begin{aligned}\sigma_{r_0} &= \frac{1}{2}(\sigma_{x_0} + \sigma_{y_0}) + \frac{1}{2}(\sigma_{x_0} - \sigma_{y_0}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy_0} \sin 2\theta \\ \sigma_{\theta_0} &= \frac{1}{2}(\sigma_{x_0} + \sigma_{y_0}) - \frac{1}{2}(\sigma_{x_0} - \sigma_{y_0}) \cos 2\theta - 2\tau_{xy_0} \sin 2\theta \\ \tau_{r\theta_0} &= \tau_{xy_0} \cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_{x_0} - \sigma_{y_0}) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (7.3)$$

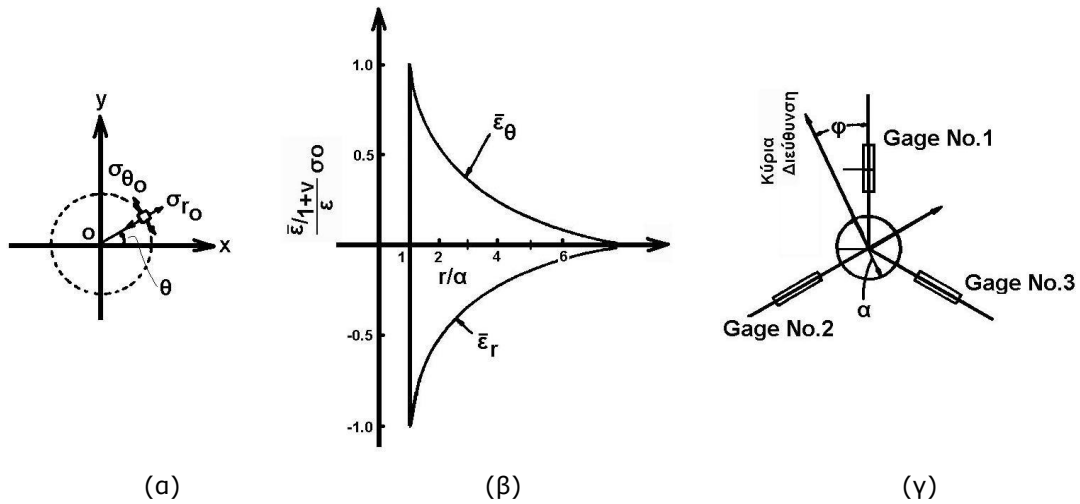
όπου,

σ_{r_0} = η ακτινική συνιστώσα της τάσης,

σ_{θ_0} = η εφαπτομενική συνιστώσα της τάσης,

$\tau_{r\theta_0}$ = η διατμητική συνιστώσα της παραμένουσας τάσης κατά γωνία θ .

Στην Εξίσωση 7.3 θεωρείται ότι οι παραμένουσες τάσεις είναι ομοιόμορφες στο εσωτερικό του μικρού κύκλου.



Εικόνα 7.10 Η τεχνική των Matha – Soete. α) Ακτινικές σ_r και εφαπτομενικές σ_θ παραμένουσες τάσεις στην περιφέρεια μικρού κύκλου με κέντρο το Ο, β) κατανομή των $\bar{\epsilon}_r$ και $\bar{\epsilon}_\theta$ όταν $\sigma_{x_0}=\sigma_{y_0}=\sigma_0$ και $\sigma_{x_0y_0}=0$, γ) τοποθέτηση των επιμηκνσιομέτρων σε σχήμα άστρου^[1]

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της μεταβολής της παραμόρφωσης που συμβαίνει στις περιοχές έξω από το μικρό κύκλο, ακτίνας α , όταν το υλικό μέσα στον κύκλο αφαιρείται, π.χ. με τρυπάνι. Το σημαντικό γεγονός σχετικά με τη μεταβολή της παραμόρφωσης είναι ότι ο κύκλος καθίσταται ελεύθερος τάσεων. Με άλλα λόγια οι σ_{r_0} και $\tau_{r\theta_0}$ μηδενίζονται. Συνεπώς, οι μεταβολή της παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία χαλάρωσης των τάσεων είναι ίδια με την παραμόρφωση που προκαλείται σε ένα έλασμα με οπή όταν εφαρμόζονται τάσεις $-\sigma_{r_0}$ και $-\sigma_{r\theta_0}$ στα όρια της οπής.

Πιο απλά, υποθέτοντας ότι $\sigma_{x_0}=\sigma_{y_0}=\sigma_0$ και $\sigma_{x_0y_0}=0$ ή ότι οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές κατά τους δύο άξονες, τότε $\sigma_{r_0}=\sigma_0$ και $\tau_{r\theta_0}=0$. Η παραμόρφωση λόγω χαλάρωσης των τάσεων που συμβαίνει στο σημείο P(r, θ) όταν η οπή (ακτίνας α) διανοίγεται γύρω από το σημείο Ο δίνεται από την εξίσωση 7.4 (Εικ. 7.10β):

$$\bar{\epsilon}_r = -\bar{\epsilon}_\theta = -\frac{1+\nu}{E} \sigma_0 \left(\frac{\alpha}{r}\right)^2 \quad (7.4)$$

$$\bar{\gamma}_{r\theta} = 0$$

όπου $\bar{\epsilon}_r$, $\bar{\epsilon}_\theta$ και $\bar{\gamma}_{r\theta}$ είναι οι συνιστώσες των παραμορφώσεων λόγω χαλάρωσης των τάσεων.

Όταν υπάρχουν παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές γύρω από το σημείο Ο, η μεταβολή των παραμορφώσεων στην ακτινική διεύθυνση $\bar{\epsilon}_r$ θα υποδηλώνει τη συρρίκνωση λόγω

της δεδομένης εντατικής κατάστασης. Η Εξίσωση 7.4 υποδηλώνει ότι αν οι τιμές των \mathbf{a} και \mathbf{r} είναι γνωστές και οι $\bar{\epsilon}_r$ και $\bar{\epsilon}_\theta$ μετρήσιμες, τότε είναι δυνατό να προσδιοριστεί η τιμή της παραμένουσας τάσης σ_0 . Στη γενικότερη περίπτωση που υπάρχουν οι τρεις συνιστώσες σ_{x_0} , σ_{y_0} και τ_{xy_0} , οι παραμορφώσεις λόγω χαλάρωσης των τάσεων που συμβαίνει γύρω από την οπή είναι πιο περίπλοκη από αυτή που δίνεται από την Εξίσωση 7.4. Ένας συνηθισμένος τρόπος υπολογισμού των τάσεων είναι η τοποθέτηση επιμηκυνσιομέτρων σε διάταξη αστεριού, με γωνία 120° μεταξύ τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10γ. Οι τιμές και οι διευθύνσεις των κυρίων τάσεων υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -E \{ \mu_1(\lambda) \alpha + \mu_2(\lambda) \beta \}, \\ \sigma_2 &= -E \{ \mu_1(\lambda) \alpha - \mu_2(\lambda) \beta \}, \\ \tan 2\varphi &= \frac{\delta}{\epsilon_{r1} - \alpha}\end{aligned}\quad (7.5)$$

όπου,

σ_1 και σ_2 = οι τιμές των κύριων τάσεων,

φ = η γωνία μεταξύ του πρώτου επιμηκυνσιομέτρου (No.1) και της διεύθυνσης της κύριας τάσης σ_1 ,

$\lambda = \frac{r}{a}$ = ο λόγος της απόστασης των υπό μέτρηση σημείων από το κέντρο της οπής, r , προς

την ακτίνα της οπής, a .

$$\begin{aligned}\mu_1(\lambda) &= \frac{\lambda^2}{1 + \nu}, \\ \mu_2(\lambda) &= \frac{\lambda^4}{4\lambda^2 - 3(1 + \nu)}, \\ \alpha &= \frac{1}{3} (\bar{\epsilon}_{r1} + \bar{\epsilon}_{r2} + \bar{\epsilon}_{r3}), \\ \beta &= \sqrt{(\bar{\epsilon}_{r1} - \alpha)^2 + \delta^2}, \\ \delta &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\bar{\epsilon}_{r2} - \bar{\epsilon}_{r3})\end{aligned}\quad (7.6)$$

όπου,

$\bar{\epsilon}_{r1}$, $\bar{\epsilon}_{r2}$ και $\bar{\epsilon}_{r3}$ = ακτινικές παραμορφώσεις μετρούμενες από τα επιμηκυνσιομέτρα No.1, No.2 και No.3, αντίστοιχα.

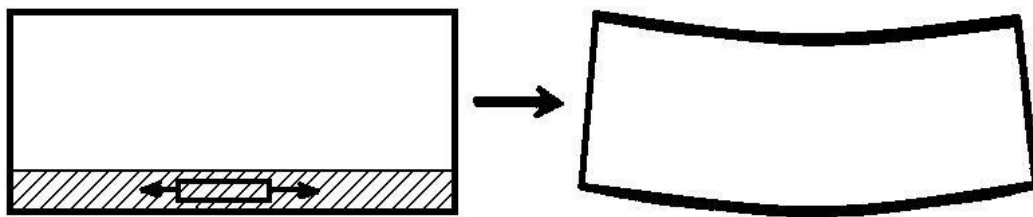
Εφαρμογές: Κατάλληλη για χρήση σε εργαστηριακό επίπεδο και παραγωγική διαδικασία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οριζόντιες, κάθετες και υπερυψωμένες επιφάνειες.

Πλεονεκτήματα: Διέπεται από μια απλή αρχή. Προκαλεί μικρή βλάβη στο εξεταζόμενο δοκίμιο, κατάλληλη για χρήση σε συγκολλήσεις και παρακείμενα υλικά.

Μειονεκτήματα: Η διάνοιξη προκαλεί πλαστικές παραμορφώσεις στην περιφέρεια της οπής, κάτι το οποίο μπορεί να επιφέρει μετατόπιση των μετρούμενων αποτελεσμάτων. Η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή.

7.4.1.4 Η τεχνική αφαίρεσης υλικού του Stäblein (successive milling technique)

Αν αφαιρεθεί μια στρώση υλικού μικρού πάχους (π.χ. με φρεζάρισμα) από τη μια επιφάνεια ενός ελάσματος και αυτό περικλείει εφελκυστικές τάσεις, τότε το έλασμα θα υποστεί κάμψη από τη μεριά της φρεζαρισμένης επιφάνειας (Εικ. 7.11). Οι διαστάσεις της αντίθετης πλευρά, από αυτήν που έχει κατεργαστεί, θα μεταβληθούν. Συνεπώς αν προσαρμοστούν επιμηκυνσιόμετρα, σε αυτή, είναι δυνατόν να μετρηθεί η μεταβολή του μήκους της κάθε φορά που ένα στρώμα υλικού αφαιρείται. Από τις τιμές που προκύπτουν είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων για κάθε στρώση.



Εικόνα 7.11 Η τεχνική αφαίρεσης υλικού του Stäblein

Εφαρμογές: Δυνατότητα μέτρησης μονοαξονικών παραμενουσών τάσεων σε ελάσματα, άξονες, επιφανειακά κατεργασμένα υλικά, θερμικά κατεργασμένα υλικά ή αντικείμενα σχήματος ράβδου.

Πλεονεκτήματα: Αξιόπιστη μέθοδος για τη μέτρηση της μέσης τάσης σε μια σχετικά μεγάλη επιφάνεια.

Μειονεκτήματα: Δεν ενδείκνυται για τη μέτρηση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις. Συνεπάγεται ολική καταστροφή του υπό μέτρηση δοκιμίου. Μόνο μονοαξονικές τάσεις μπορούν να μετρηθούν. Πιθανότητα δημιουργίας μηχανικών παραμενουσών τάσεων εξαιτίας της διαδικασίας αφαίρεσης του υλικού.

7.4.1.5 Η τεχνική των Heyn – Bauer (machining technique)

Λεπτά εξωτερικά στρώματα κυλινδρικού δοκιμίου αφαιρούνται διαδοχικά. Το μήκος του δοκιμίου μετράται μετά από κάθε αφαίρεση. Από τα δεδομένα που καταγράφονται υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις.

Εφαρμογές: Κυλινδρικά σώματα με συμμετρικές εκ περιστροφής τάσεις.

Πλεονεκτήματα: Απλή μέθοδος.

Μειονεκτήματα: Μόνο διαμήκειες τάσεις μπορούν να μετρηθούν. Περιορισμένες εφαρμογές.

7.4.1.6 Η τεχνική Mesnager – Sachs (boring out technique)

Μετρητικές διατάξεις, όπως επιμηκυνσιόμετρα, προσαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια κυλινδρικού σώματος σε διαμήκειες και εγκάρσιες διευθύνσεις. Μια κεντρική οπή διανοίγεται στο σώμα και αυξάνεται σταδιακά μέσω επαναληπτικών διανοιγμάτων. Οι μεταβολές που αντιλαμβάνονται οι μετρητικές διατάξεις καταγράφονται.

Εφαρμογές: Κυλινδρικά σώματα κυκλικής διατομής με συμμετρική εκ περιστροφής κατανομή τάσεων.

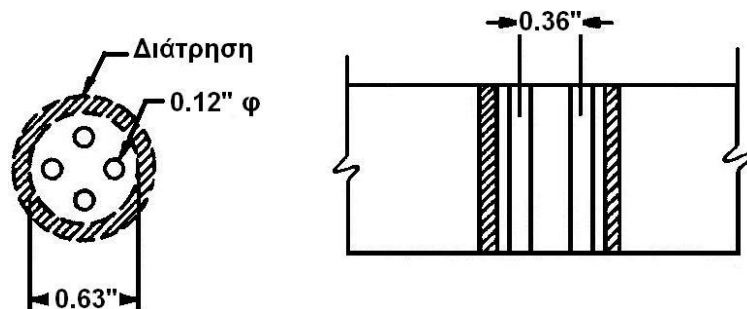
Πλεονεκτήματα: Επιτρέπει τη μέτρηση μονοαξονικών και δύο διευθύνσεων παραμενουσών τάσεων σε ολόκληρο το υπό μελέτη δοκίμιο.

Μειονεκτήματα: Υποθέτει ότι οι τάσεις είναι σταθερές κατά μήκος του κυλίνδρου και ότι η κατανομή των τάσεων είναι συμμετρική εκ περιστροφής. Συνεπάγεται ολική καταστροφή. Πιθανότητα δημιουργίας μηχανικών παραμενουσών τάσεων εξαιτίας της διαδικασίας αφαίρεσης του υλικού. Δεν είναι κατάλληλη για μέτρηση τάσεων σε συγκολλήσεις.

7.4.1.7 Η τεχνική διάνοιξης οπής του Gunnert

Τέσσερις διαμπερείς οπές διαμέτρου 3mm (0,12in) διανοίγονται στην περιφέρεια ενός κύκλου διαμέτρου 9mm (0,354in) στο υπό εξέταση σημείο (Εικ. 7.12). Μέσω ειδικά σχεδιασμένου μηχανικού επιμηκυνσιόμετρου, μετριέται η διαμετρική απόσταση μεταξύ των οπών αυτών σε διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια του ελάσματος. Μετριέται επίσης, η κατακόρυφη απόσταση του υπό μέτρηση σημείου από την επιφάνεια του ελάσματος, στα διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια. Ένα αυλάκι διανοίγεται σταδιακά γύρω από τα υπό μέτρηση σημεία, με βήμα περίπου 2mm (0,08in) σε βάθος. Η κατακόρυφη απόσταση για κάθε βήμα καταγράφεται. Αφού έχει διανοιχτεί το αυλάκι μέχρι το επιθυμητό βάθος, οι τέσσερις οπές εντοπίζονται σε κυκλική διάταξη με διάμετρο 16mm (0,63in). Ο κύκλος είναι ελεύθερος από το περιβάλλον υλικό και επομένως και από παραμένουσες τάσεις. Περαιτέρω μετρήσεις της διαμετρικής απόστασης σε όλα τα επίπεδα που

μετρήθηκαν πριν, μαζί με τις μετρήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση, παρέχουν τις πληροφορίες για τον προσδιορισμό των αρχικών παραμενουσών τάσεων.



Εικόνα 7.12 Η τεχνική διάνοιξης οπής του Gunnert^[2]

Εφαρμογές: Είναι κατάλληλη για χρήση σε εργαστηριακό επίπεδο και παραγωγική διαδικασία. Η επιφάνεια του ελάσματος πρέπει να είναι πλήρως οριζόντια.

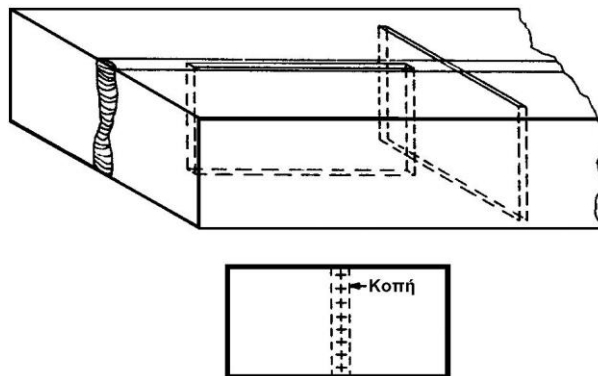
Πλεονεκτήματα: Στιβαρή και απλή διάταξη μερικώς μη καταστροφική. Ευκολία επιδιόρθωσης του δοκιμίου.

Μειονεκτήματα: Σχετικά μεγάλο εύρος σφάλματος στις μετρήσεις. Το κάτω μέρος του ελάσματος πρέπει να είναι προσβάσιμο για την προσαρμογή των στηριγμάτων. Η μέθοδος απαιτεί εκπαίδευση των χρηστών.

7.4.1.8 Η τεχνική τεμαχισμού των Rosenthal – Norton

Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις μεγάλου πάχους. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, δύο στενά τεμάχια, πάχους όσο του ελάσματος, αποκόβονται από το δοκίμιο. Ο διαμήκης άξονας του ενός συμπίπτει με τον άξονα της συγκόλλησης, ενώ του άλλου είναι κάθετος στον άξονα συγκόλλησης (Εικ. 7.13). Η διαδικασία θεωρείται ότι οδηγεί σε πλήρη χαλάρωση των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης και σε μερική χαλάρωση των διαμηκών παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης. Τονίζεται πως για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει τα τμήματα που αφαιρούνται να είναι αρκετά μακριά σε σχέση με το πάχος του συγκολλημένου δοκιμίου (διπλάσιο του πάχους ή και παραπάνω αν είναι εφικτό). Η χαλάρωση των τάσεων στο κέντρο του τμήματος που αφαιρείται είναι πολύ κοντά σε γραμμική συνάρτηση με το πάχος. Με άλλα λόγια, αν η τιμή των τάσεων αυτών είναι γνωστή στην ανώτερη και κατώτερη πλευρά του ελάσματος, τότε οι τιμές των τάσεων χαλάρωσης κατά το πάχος μπορούν να υπολογιστούν. Το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων που έχουν παραμείνει στα αποκομμένα τμήματα. Αυτό μπορεί να γίνει με προσαρμογή επιμηκυνσιομέτρων

στις πλευρικές επιφάνειες των τμημάτων και μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω της χαλάρωσης των τάσεων που προκύπτουν όταν τα τμήματα αυτά τεμαχιστούν σε μικρά κομμάτια.



Εικόνα 7.13 Η τεχνική τεμαχισμού των Rosenthal – Norton^[2]

Δύο τμήματα, ένα κάθετο και ένα διάμηκες, πρέπει να κοπούν με σκοπό τον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων στις τρεις διευθύνσεις. Εφόσον τα δύο τμήματα δε γίνεται να κοπούν από το ίδιο σημείο, η διάταξη πρέπει να διευθετηθεί έτσι ώστε να γίνει χρήση της συμμετρίας του δοκιμίου ή χρήση παρεμβολής.

Εφαρμογή: Για εργαστηριακές μετρήσεις.

Πλεονεκτήματα: Ακριβή δεδομένα είναι δυνατόν να επιτευχθούν, όταν οι μετρήσεις λαμβάνονται με προσοχή.

Μειονεκτήματα: Δύσκολη, χρονοβόρα και πλήρως καταστρεπτική μέθοδος.

7.4.1.9 Η τεχνική των συστημάτων πλέγματος – τεχνική διαχωρισμού

Στην επιφάνεια του δοκιμίου δημιουργείται ένα δίκτυο κατάλληλων προκαθορισμένων σημείων μέτρησης. Μετριέται η απόσταση μεταξύ των σημείων, τα οποία μπορεί να είναι κοιλότητες ή οπές, συμπεριλαμβανομένων και των διαγωνίων που αυτά σχηματίζουν. Ολόκληρη η περιοχή τεμαχίζεται σε τετραγωνικά στοιχεία, κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει τέσσερα σημεία μέτρησης. Οι αποστάσεις που είχαν μετρηθεί πριν, μετρούνται και πάλι και οι τάσεις υπολογίζονται από τη διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων.

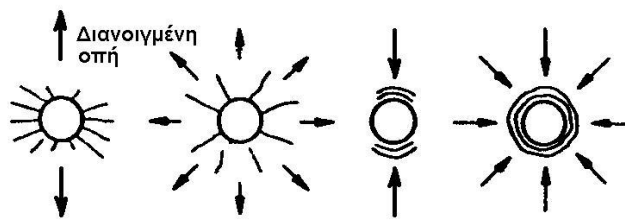
Εφαρμογές: Εργαστηριακή μέθοδος, εφόσον ο διαχωρισμός του υπό μελέτη αντικειμένου δεν είναι συνήθως επιτρεπτός.

Πλεονεκτήματα: Απλή αρχή και μέθοδος. Επιτρέπει τον προσδιορισμό στενά παρακείμενων περιοχών μεγάλων επιφανειών.

Μειονεκτήματα: Συνεπάγεται ολική καταστροφή του αντικειμένου.

7.4.1.10 Η τεχνική των ψαθυρών επιστρωμάτων

Κατά την τεχνική αυτή, το υπό μέτρηση σημείο και η περιβάλλουσα περιοχή επικαλύπτονται από μια ψαθυρή επίστρωση. Μια οπή (π.χ. διαμέτρου $d=3,2\text{mm}$) διανοίγεται, στο υπό μέτρηση σημείο, σε βάθος από $0,5d$ έως d . Λόγω της χαλάρωσης των παραμενουσών τάσεων, που προκαλείται από τη διάνοιξη της οπής, δημιουργούνται ρωγμές στην επίστρωση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.14, ακτινικές ρωγμές δημιουργούνται αν οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές, και κυκλικές ρωγμές δημιουργούνται αν οι παραμένουσες τάσεις είναι θλιπτικές.



Εικόνα 7.14 Τυπικές μορφές ρωγμάτωσης υπό διαφορετικές επιφανειακές τασικές συνθήκες

Από τη διεύθυνση και την κατανομή των ρωγμών, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η διεύθυνση των κυρίων τάσεων, δεδομένου ότι αυτές είναι κάθετες στη διεύθυνση των ρωγμών.

Εφαρμογές: Κατά προτίμηση εργαστηριακή μέθοδος, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην παραγωγική διαδικασία αν η ατμόσφαιρα είναι ξηρή. Η επιφάνεια μπορεί να είναι η επιθυμητή.

Πλεονεκτήματα: Μικρή ζημιά στο υπό μελέτη δοκίμιο. Γρήγορος προσδιορισμός της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων και μια ένδειξη του μεγέθους τους.

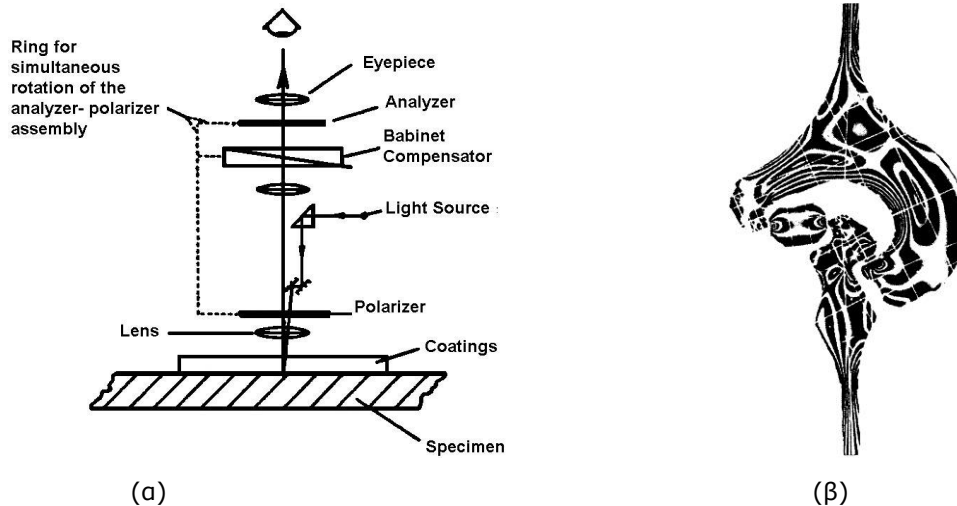
Μειονεκτήματα: Μόνο ποιοτική εκτίμηση.

7.4.1.11 Η τεχνική των φωτο-ελαστικών επιστρωμάτων

Υπό την επίδραση τάσεων, διαφανή υλικά καθίστανται διπλά διαθλαστικά. Συνεπώς, αν μια δέσμη πολωμένου φωτός διέλθει από μια κατασκευή από τέτοιο υλικό, λαμβάνεται μια έγχρωμη εικόνα από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή των τάσεων που επιδρούν σε αυτό.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, η περιοχή μελέτης, καλύπτεται από ένα φωτο-ελαστικό πλαστικό και όταν υπάρξουν παραμορφώσεις στο υλικό, μεταδίδονται στο πλαστικό επίστρωμα, το οποίο γίνεται διαθλαστικό. Η παρατήρηση και μέτρηση πραγματοποιείται με χρήση πολυοισκοπίου (Εικ. 7.15). Το φωτο-ελαστικό επίστρωμα προκύπτει επικαλύπτοντας την επιφάνεια του δοκίμιου με ένα υγρό πλαστικό το οποίο και πολυμερίζεται με την εφαρμογή θερμότητας. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να συνδεθεί στο δοκίμιο ένα προκατασκευασμένο

επίπεδο φύλλο από πλαστικό, σε θερμοκρασία δωματίου. Η μέγιστη παραμόρφωση που μετρείται, κυμαίνεται από 3 έως 50% εξαρτώμενη από τον τύπο του πλαστικού που χρησιμοποιείται. Η ευαισθησία στη μέτρηση των παραμορφώσεων συχνά μειώνεται με την αύξηση της μέγιστης μετρούμενης παραμόρφωσης.



Εικόνα 7.15 α) Σχηματική περιγραφή της τεχνικής των φωτο-ελαστικών επιστρώματων, β) Παράδειγμα απεικόνισης φωτο-ελαστικού επιστρώματος^[2]

Εφαρμογές: Κυρίως εργαστηριακή μέθοδος, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε παραγωγική διαδικασία, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Πλεονεκτήματα: Επιτρέπει τη μέτρηση των τοπικά μέγιστων τάσεων. Μικρή καταστροφή του δοκιμίου.

Μειονεκτήματα: Ευαίσθητη στις πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες δημιουργούνται στα όρια της διανοιγμένης οπής.

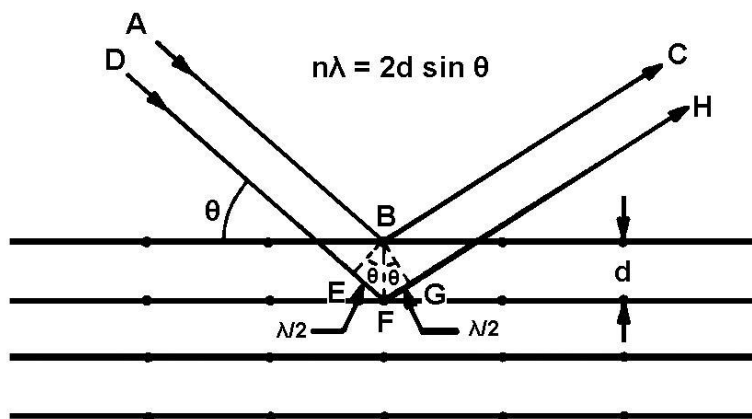
7.4.2 Μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τεχνικές περίθλασης ακτίνων X

Υπό την επίδραση εσωτερικών ή εξωτερικών δυνάμεων, παρατηρείται παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής των υλικών, συνεπώς και μεταβολή των ενδοατομικών τους αποστάσεων. Όταν η παραμόρφωση υπερβεί το όριο ελαστικότητας, λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση που οφείλεται στην ολίσθηση των πλεγματικών επιπέδων μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η μεταβολή της ενδοατομικής απόστασης είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης.

Η τεχνική μέτρησης των παραμενουσών τάσεων με ακτίνες X είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση σε μεταλλικούς κρυστάλλους ($\sim 1 \text{ \AA}$). Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων X καθιστά δυνατή τη

διείσδυση τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά ένα ποσοστό και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

Έστω επίπεδο μονοχρωματικό κύμα που προσπίπτει στα ατομικά επίπεδα μετάλλου κατά τη διεύθυνση AB (Εικ. 7.16). Οι ανακλώμενες ακτίνες από διαδοχικά παράλληλα ατομικά επίπεδα ενισχύονται σε μια διεύθυνση, τη BC, που είναι η διεύθυνση περίθλασης.



Εικόνα 7.16 Περίθλαση ακτίνων X σε κρυσταλλικό πλέγμα^[2]

Συγκεκριμένα, οι διευθύνσεις ABC και DFH (Εικ. 7.16), αντιπροσωπεύουν τις τροχιές που διανύουν σημεία στο μέτωπο του κύματος, τα οποία διεγείρουν άτομα στα σημεία Β και F δύο διαδοχικών επιπέδων. Ενίσχυση στην κατεύθυνση BC (ή FH) προϋποθέτει ότι η διαφορά των δύο τροχιών (EF+FG) είναι ίση με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος, δηλαδή ότι $EF=FG=n\lambda/2$. Στη γενική περίπτωση η συνθήκη περίθλασης εκφράζεται από το νόμο του Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (7.7)$$

όπου,

λ = το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης,

θ = η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ή ανακλώμενης δέσμης και της επιφάνειας των επιπέδων ανάκλασης,

d = η διαπλεγματική απόσταση,

n = η τάξη της ανάκλασης ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Η Εξίσωση 7.7 δείχνει ότι αν το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι γνωστό, η διαπλεγματική απόσταση, d , μπορεί να υπολογιστεί με μέτρηση της γωνίας θ .

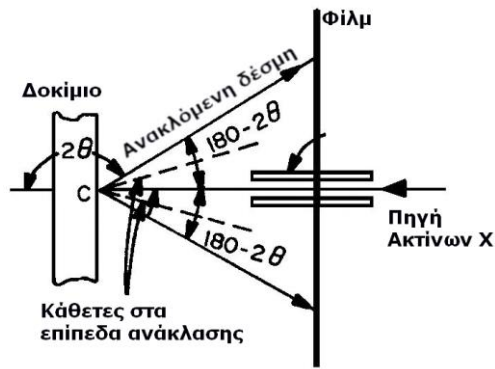
Δύο γενικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την καταγραφή των φασμάτων περίθλασης:

- Η φωτογραφική μέθοδος ή μέθοδος φιλμ ακτινών Χ (Εικ. 7.17).
- Η μέθοδος περιθλασίμετρου ακτινών Χ (Εικ. 7.18).

7.4.2.1 Φωτογραφική μέθοδος ή μέθοδος φιλμ ακτινών Χ

Σχηματική παράσταση της μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.17. Η συσκευή είναι κινητή και αποτελείται ουσιαστικά από ένα φιλμ σε αδιαπέραστη από το φως κασέτα, τοποθετημένο κάθετα στην εισερχόμενη δέσμη ακτινών Χ. Η δέσμη κατευθύνεται μέσω συστήματος σκόπευσης. Το φιλμ καταγράφει τις ακτίνες που ανακλώνται από το δοκίμιο και δείχνει, μετά την εμφάνισή του, σχεδόν κυκλικά δακτυλίδια. Η διάμετρος των δακτυλιδιών περίθλασης διαιρεμένη με την απόσταση του φιλμ από το δοκίμιο, δίνει $2\lambda \sin(180-2\theta)$, από όπου λαμβάνεται το θ για να εισαχθεί στην Εξίσωση 7.7.

Για καλύτερα αποτελέσματα συνιστάται το φιλμ να ταλαντώνεται χρησιμοποιώντας το μεταλλικό σωλήνα, που περιέχει τις συσκευές ευθυγράμμισης, σαν άξονα ταλάντευσης. Κάτι τέτοιο έχει ως συνέπεια την αφαίρεση αρκετών ανομοιομορφιών από τις γραμμές περίθλασης. Συχνά, ιδιαίτερα αν το μέγεθος των κόκκων του δοκιμίου είναι μεγάλο, είναι επίσης χρήσιμη η ταλάντευση και του δοκιμίου, για μερικές μοίρες, διατηρώντας την απόσταση του φιλμ από το ακτινοβολούμενο σημείο, αυστηρά σταθερή. Αυτή η απόσταση μπορεί να μετρηθεί με εσωτερικά μικρόμετρα ή μπορεί να προκαθορισθεί μέσω ειδικών επιμηκυνσιομέτρων τοποθετημένων μεταξύ της κασέτας και του δοκιμίου. Μια άλλη παραλλαγή της μεθόδου που χρησιμοποιείται συχνά είναι ο υπολογισμός της απόστασης του δοκιμίου από το φιλμ με μέτρηση της διαμέτρου ενός βαθμονομημένου δακτυλιδιού, πάνω στο φιλμ, γνωστής γωνίας θ . Σε αυτήν τη μέθοδο μια ελεύθερη παραμορφώσεων πούδρα τοποθετείται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου. Η πούδρα επιλέγεται να αποφέρει ένα δακτυλίδι με γωνία θ κοντά στις 90° , η οποία δεν παρεμβαίνει στις μετρήσεις των δακτυλιδιών που παράγονται από το δοκίμιο.



Εικόνα 7.17 Σχηματική παράσταση φωτογραφικής μεθόδου^[2]

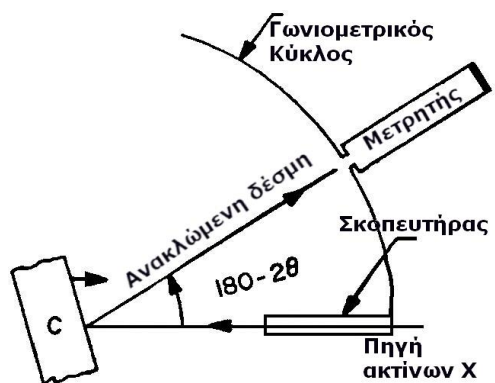
Για τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιείται πούδρα αργύρου.

Για μέγιστη ακρίβεια, η επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου πρέπει να είναι ελεύθερη από ψυχή κατεργασία. Αν η επιφάνεια δεν είναι σε κατάλληλη κατάσταση, πιθανόν η ηλεκτροχημική λείανση είναι ο καλύτερος τρόπος για να καταστεί στη σωστή κατάσταση, αλλά καλά αποτελέσματα μπορούν επίσης να προκύψουν και με χημική προσβολή, υπό τον όρο ότι η προσβολή δεν θα αφήσει σημάδια τόσο βαθιά, τα οποία να χαλαρώνουν τις επιφανειακές τάσεις.

Οπτική ανάγνωση των φιλμ μπορεί να γίνει με αφαίρεση ενός πολύ λεπτού σταυρονήματος ή ίχνους από το φιλμ σε συνθήκες καλής φωτεινότητας ή με χρήση μικροφωτομέτρων.

7.4.2.2 Μέθοδος περιθλασιόμετρου ακτίνων Χ

Η μέθοδος παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 7.18. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, διαφέρει από την προηγούμενη μόνο στο είδος του ανιχνευτή και στη γωνία μεταξύ του δοκιμίου και της δέσμης των ακτίνων Χ. Έτσι ενώ στη φωτογραφική μέθοδο η γωνία αυτή είναι 90°, στη μέθοδο του περιθλασιόμετρου είναι θ . Για την αποτύπωση της έντασης της ανακλώμενης δέσμης χρησιμοποιούνται ένας μετρητής και μια οπή που κινούνται πάνω σε γωνιομετρικό κύκλο. Η γωνία περίθλασης προσδιορίζεται ως η γωνία εκείνη που δίνει τη μέγιστη τάση.



Εικόνα 7.18 Σχηματική παράσταση της μεθόδου περιθλασιόμετρου^[2]

7.4.3 Άλλες τεχνικές μέτρησης των παραμενουσών τάσεων

Όπως έχει αναφερθεί, η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων μπορεί να γίνει και με άλλες μεθόδους οι οποίες εκμεταλλεύονται συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες του υλικού ή τη συμπεριφορά του κάτω από συγκεκριμένα περιβάλλοντα ή συνθήκες.

Όταν υπάρχουν τάσεις στα μέταλλα, ορισμένες φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες, όπως η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων και η σκληρότητα, μεταβάλλονται. Θεωρητικά είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μέθοδοι για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων με μέτρηση τέτοιων ευαίσθητων στις τάσεις ιδιοτήτων. Οι μέθοδοι μέτρησης τάσεων που έχουν αναπτυχθεί ή προταθεί περιλαμβάνουν τις τεχνικές υπερήχων και τις τεχνικές μέτρησης σκληρότητας. Ωστόσο καμία από αυτές τις μεθόδους δεν έχουν αναπτυχθεί για χρήση πέρα από το εργαστηριακό επίπεδο.

Μια άλλη ομάδα τεχνικών που αναπτύχθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων περιλαμβάνει τη προσεκτική παρατήρηση των ρωγμών που δημιουργούνται λόγω των τάσεων. Οι ρωγμές είναι συνήθως αποτέλεσμα εργοδιάβρωσης ή εξαιτίας της διαλυτοποίησης υδρογόνου.

Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται συνήθως σε κοινούς χάλυβες αλλά και σε χάλυβες υψηλής αντοχής. Ελάχιστες μελέτες έχουν αναφερθεί στη χρήση των τεχνικών ρωγμάτωσης για τη μελέτη παραμενουσών τάσεων στα κράματα αλουμινίου.

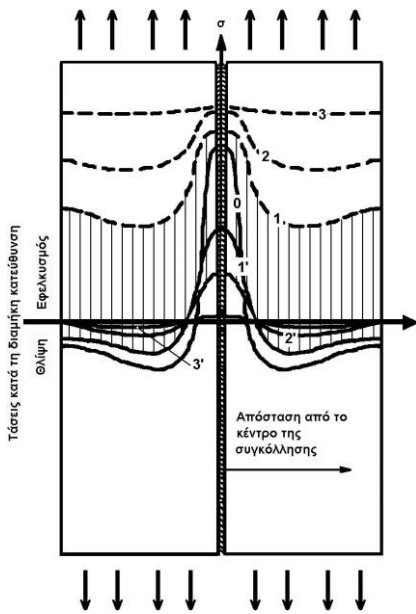
7.4.4 Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου

Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε μεταλλικές κατασκευές, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής μέτρησης προκειμένου να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος σκοπός. Μερικοί από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή αυτή είναι:

- A)** Η επιτρεπόμενη έκταση βλάβης στην κατασκευή (καταστρεπτική ή μη καταστρεπτική μέτρηση)
- B)** Η απαιτούμενη ποιότητα της μέτρησης (ακρίβεια των μετρήσεων, είδος και πιθανή κατανομή τάσεων κ.λπ.)
- Γ)** Η επίδραση μεταβολών των ιδιοτήτων του υλικού στα αποτελέσματα.
- Δ)** Το περιβάλλον διεξαγωγής των μετρήσεων (εργαστηριακός χώρος ή στο χώρο ανέγερσης ή λειτουργίας της κατασκευής)
- Ε)** Το κόστος και η διάρκεια των μετρήσεων

7.4.5 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων

Η αντίληψη που επικρατεί, είναι πως με την πάροδο του χρόνου, και υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων, οι παραμενουσες τάσεις τείνουν να ανακατανομηθούν, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αιχμών στην κατανομή τους. Στην Εικόνα 7.18, φαίνεται πως ακριβώς



Εικόνα 7.19 Κατανομές παραμενουσών τάσεων σε επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων^[1]

συμβαίνει αυτό, στην περίπτωση διαμήκους μετωπικής συγκόλλησης, που υπόκειται σε εξωτερική ομοιόμορφη εφελκυστική εντατική κατάσταση. Η καμπύλη 0, δείχνει την κατανομή των παραμενουσών τάσεων μετά τη συγκόλληση. Μετά την εφαρμογή της ομοιόμορφης εφελκυστικής τάσης $\sigma = \sigma_1$, η κατανομή των τάσεων θα είναι όπως δείχνει η καμπύλη 1 (Εικ. 7.19). Οι τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης φτάνουν το όριο διαρροής, ενώ ο μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης των τάσεων παρατηρείται σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση. Η καμπύλη 2, δείχνει την κατανομή των τάσεων όταν το εξωτερικό φορτίο αυξηθεί σε σ_2 . Καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη τάση, η κατανομή των τάσεων γίνεται πιο ομαλή, δηλαδή η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στην ολική κατανομή των τάσεων μειώνεται.

Όταν η εξωτερική τάση φτάσει κάποια τιμή σ_3 , παρατηρείται διαρροή ολόκληρης της διατομής. Η κατανομή τάσεων στην περίπτωση αυτή, παριστάνεται από την καμπύλη 3. Από το σημείο αυτό και μετά, η επίδραση των παραμενουσών τάσεων εξαφανίζεται.

Έπειτα από την άρση του επιβαλλόμενου εφελκυστικού εξωτερικού φορτίου, η κατανομή των τάσεων θα είναι όπως δείχνουν οι καμπύλες 1', 2' και 3' που αναφέρονται στις εξωτερικές τάσεις σ_1 , σ_2 , και σ_3 αντίστοιχα.

Σε σύγκριση με την αρχική κατανομή παραμενουσών τάσεων (καμπύλη 0), οι κατανομές μετά την εφαρμογή και απομάκρυνση εξωτερικών τάσεων είναι πιο ομαλές. Όσο αυξάνεται η τιμή της εξωτερικής τάσης, τόσο πιο ομοιόμορφη γίνεται η κατανομή των παραμενουσών τάσεων.

Από τα παραπάνω, είναι δυνατό να αναφερθούν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμενουσών τάσεων:

- Οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν σημαντικά μόνο τα φαινόμενα εκείνα που συμβαίνουν υπό την επίδραση χαμηλών εξωτερικών τάσεων, όπως ψαθυρή θραύση και ρωγμάτωση υπό τάση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

- Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων μειώνεται με αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων

- Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στη συμπεριφορά συγκολλητών κατασκευών είναι αμελητέα όταν οι εξωτερικά επιβαλλόμενες τάσεις προκαλούν γενική πλαστική διαρροή του υλικού

- Η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων μειώνει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού συγκολλητών κατασκευών, κάτι που οφείλεται στην παρουσία θλιπτικών τάσεων σε μεγάλο τμήμα της κατανομής των παραμενουσών τάσεων.

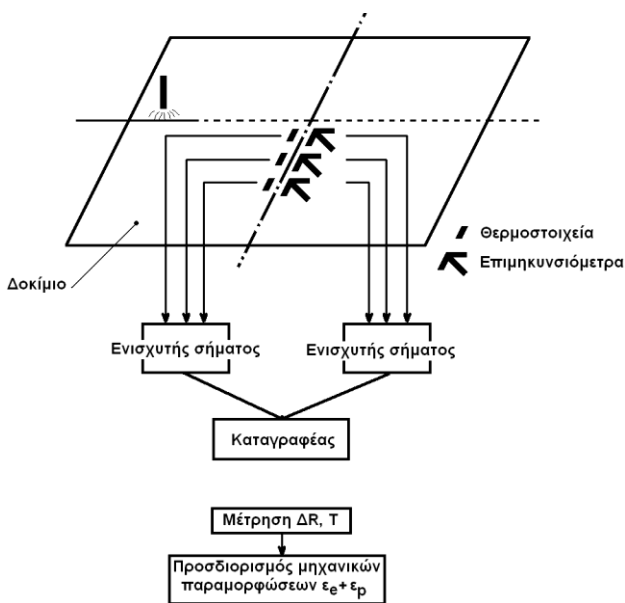
Κεφάλαιο 8°

Μεταβατικές θερμικές τάσεις, στρεβλώσεις και παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις

8.1 Οι μεταβατικές θερμικές τάσεις στις συγκολλήσεις

Η περιοχή της ένωσης δύο δοκιμίων που πρόκειται να συγκολληθούν θερμαίνεται τοπικά από την πηγή θερμότητας της συγκόλλησης. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, και καθώς η διαδικασία εξελίσσεται, η κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή της συγκόλλησης είναι ανομοιομορφη και συνεχώς μεταβαλλόμενη. Κατά τη διάρκεια του κύκλου της συγκόλλησης δημιουργούνται παραμορφώσεις σύνθετης μορφής τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης που στερεοποιείται όσο και στο γεινιάζον βασικό μέταλλο. Στην Παράγραφο 7.2 (Εικ. 7.1), περιγράφηκε η θερμοκρασιακή και τασική κατανομή σε διαφορετικές τομές της συγκόλλησης καθώς αυτή εξελίσσεται.

Ο συνηθέστερος τρόπος μέτρησης των μεταβατικών θερμικών τάσεων και των παραμορφώσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, είναι με χρήση επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης και θερμοστοιχείων τα οποία προσαρμόζονται στην επιφάνεια των υπό συγκόλληση δοκιμίων.



Εικόνα 8.1 Σχηματικό διάγραμμα μέτρησης μεταβατικών θερμικών τάσεων κατά τις συγκολλήσεις^[2]

$\Delta R_3(a.\Delta T)$ = Η μεταβολή της αντίστασης που αναφέρεται στη θερμική παραμόρφωση που προκαλείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, $a.\Delta T$

Η μεταβολή της αντίστασης των επιμηκυνσιομέτρων, ΔR , που καταγράφεται δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta R = \Delta R_1(\epsilon_e) + \Delta R_2(\epsilon_p) + \Delta R_3(a.\Delta T) + \Delta R_4(T)$$

Όπου,

$\Delta R_1(\epsilon_e)$ = Η μεταβολή της αντίστασης που αναφέρεται στην ελαστική παραμόρφωση ϵ_e , από την οποία μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τάσεις

$\Delta R_2(\epsilon_p)$ = Η μεταβολή της αντίστασης που αναφέρεται στην πλαστική παραμόρφωση ϵ_p , από την οποία μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τάσεις

$\Delta R_4(T) = H$ μεταβολή της αντίστασης που προκαλείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας T

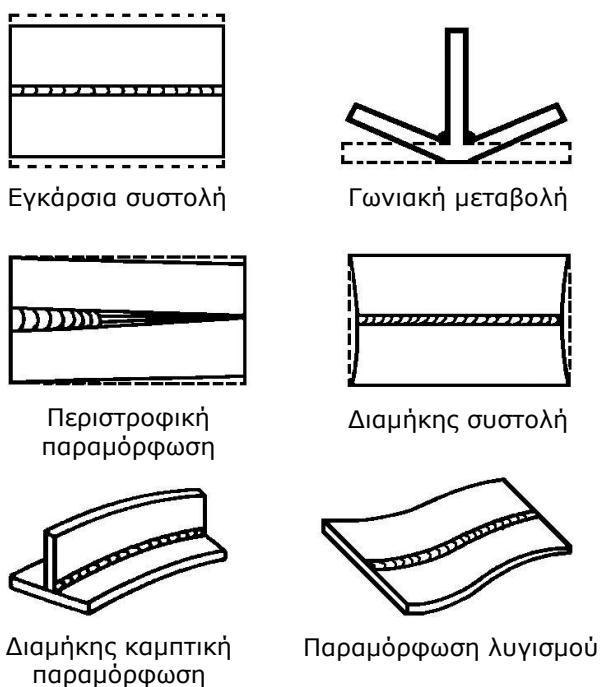
Καταγράφοντας τις μεταβολές της θερμοκρασίας T , τα ΔR_3 και ΔR_4 μπορούν να προσδιοριστούν, κάνοντας πλέον δυνατό τον προσδιορισμό της μηχανικής παραμόρφωσης ($\epsilon_e + \epsilon_p$).

Στην Εικόνα 8.1, φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα τρόπου μέτρησης των μεταβατικών θερμικών τάσεων που συμβαίνουν κατά τις συγκολλήσεις.

Ωστόσο, ο διαχωρισμός των ϵ_e και ϵ_p μέσω πειραματικής διαδικασίας ανάλογης με αυτήν που παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.1 δεν είναι εφικτός. Η ποσότητα της ελαστικής παραμόρφωσης που υπάρχει μετά το τέλος της συγκόλλησης μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με χρήση τεχνικών χαλάρωσης των τάσεων όμως, η συνολική παραμόρφωση ($\epsilon_e + \epsilon_p$) προσδιορίζεται αποτελεσματικά κυρίως με αναλυτικές ή αριθμητικές υπολογιστικές μεθόδους.

8.2 Οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις

Τα διάφορα είδη παραμορφώσεων που συναντώνται στις συγκολλητές κατασκευές οφείλονται σε τρεις βασικές μεταβολές διαστάσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης:



A) Την εγκάρσια συστολή, κάθετα προς τον άξονα της συγκόλλησης

B) Τη διαμήκη συστολή, παράλληλα με τον άξονα συγκόλλησης

Γ) Τη γωνιακή παραμόρφωση, δηλαδή την περιστροφή γύρω από τη γραμμή της συγκόλλησης

Οι βασικές αυτές μεταβολές διαστάσεων φαίνονται στην Εικόνα 8.2 στην οποία παρουσιάζονται και τα είδη παραμορφώσεων που οφείλονται σε αυτές. Δηλαδή η:

α) εγκάρσια συστολή, δηλαδή συστολή κάθετη προς τη γραμμή συγκόλλησης

β) γωνιακή μεταβολή, που οφείλεται στην

Εικόνα 8.2 Τυπικές μορφές παραμορφώσεων συγκολλητών κατασκευών^[1]

ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών κατά τη διεύθυνση του πάχους

- γ) περιστροφική μεταβολή, δηλαδή γωνιακή παραμόρφωση στο επίπεδο του ελάσματος που οφείλεται στη θερμική διαστολή
- δ) διαμήκης συστολή, δηλαδή συστολή κατά τη διεύθυνση του άξονα συγκόλλησης
- ε) διαμήκης καμπτική παραμόρφωση, που συμβαίνει σε επίπεδο που περιέχει τη γραμμή συγκόλλησης και είναι κάθετο στο έλασμα
- στ) παραμόρφωση λυγισμού, που συμβαίνει σε λεπτά ελάσματα υπό την επίδραση των θλιπτικών τάσεων

Οι παράμετροι που οδηγούν στη δημιουργία των παραπάνω παραμορφώσεων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- 1) Παράμετροι της κατασκευής, όπου περιλαμβάνουν τη γεωμετρία της κατασκευής, το πάχος των ελασμάτων και τον τύπο της ραφής
- 2) Παράμετροι του υλικού, όπως για παράδειγμα ο τύπος και οι συνθήκες του βασικού και του προστιθέμενου μετάλλου
- 3) Παράμετροι της ανέγερσης, που συμπεριλαμβάνουν τη μέθοδο συγκόλλησης, τη διαδικασία συγκόλλησης και τη διαδικασία ανέγερσης (π.χ. ακολουθία συγκολλήσεων, βαθμός περιορισμού κ.λπ.)

8.3 Ανάλυση των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης

Στις γραμμές που ακολουθούν, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των διαφόρων μορφών παραμόρφωσης λόγω συγκόλλησης και των αντίστοιχων μηχανισμών τους

8.3.1 Εγκάρσια συστολή

8.3.1.1 Μετωπικές συγκολλήσεις

Αν και η συστολή αυτή εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος της συγκόλλησης, στην πραγματικότητα η κατανομή της είναι ανομοιόμορφη, ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις μεγάλου μήκους. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθιστούν την εγκάρσια συστολή ανομοιόμορφη είναι η ύπαρξη μη σταθερού βαθμού περιορισμού κατά το μήκος της συγκόλλησης και η περιστροφική παραμόρφωση.

Καθώς η σημασία της είναι μεγάλη, μιας και οδηγεί στη δημιουργία και άλλων μορφών παραμόρφωσης, διάφορες μελέτες, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο έχουν πραγματοποιηθεί οδηγώντας στο γενικό συμπέρασμα ότι:

“Το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκάρσιας συστολής σε μετωπικές συγκολλήσεις μπορεί να αποδοθεί στη συρρίκνωση του βασικού μετάλλου. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το βασικό μέταλλο διαστέλλεται. Καθώς, όμως, το μέταλλο συγκόλλησης στερεοποιείται, το βασικό μέταλλο πρέπει να συρρίκνωθεί. Η συρρίκνωση αυτή του βασικού μετάλλου αποτελεί το 90% της συνολικής εγκάρσιας συστολής”.

Επιπλέον, πειραματικές και αναλυτικές μελέτες απέδειξαν ότι η επίδραση των διαφόρων παραγόντων στο μέγεθος της εγκάρσιας συστολής, έχει ως εξής:

- 1) Η εγκάρσια συστολή μειώνεται με την αύξηση του πάχους των προς συγκόλληση ελασμάτων
- 2) Το μέγεθος της εγκάρσιας συστολής εξαρτάται από το προς συγκόλληση υλικό (π.χ. σε σύγκριση με το χάλυβα οι συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη εγκάρσια συστολή λόγω των μεγαλύτερων τιμών των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας και θερμικής διαστολής).
- 3) Η εγκάρσια συστολή μειώνεται με αύξηση του εξωτερικού περιορισμού

Σημαντική είναι επίσης και η επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στο μέγεθος της εγκάρσιας συστολής. Έτσι, υπάρχει σταδιακή αύξησή της στις μετωπικές συγκολλήσεις με πολλές στρώσεις. Επειδή η αντίσταση έναντι εγκάρσιας συστολής αυξάνει με την αύξηση της μάζας της συγκόλλησης, η εγκάρσια συστολή είναι μεγαλύτερη κατά την απόθεση των αρχικών στρώσεων και μικρότερη στην απόθεση των τελευταίων στρώσεων.

Συνέπεια των παραπάνω, αποτελεί και το συμπέρασμα ότι η εγκάρσια συστολή επηρεάζεται από το άνοιγμα των ακμών στη βάση και το μέγεθος του ηλεκτροδίου. Αυξανόμενου του ανοίγματος ακμών αυτή αυξάνει, καθώς αυξάνεται η μάζα της συγκόλλησης, ενώ μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου.

Τέλος, κατά τη μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης στην εγκάρσια συστολή μετωπικών συγκολλήσεων μεγάλου μήκους, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και η περιστροφική παραμόρφωση. Αυτή, μπορεί να προκαλέσει είτε προσέγγιση είτε απομάκρυνση, κατά περίπτωση, των ακμών στο τμήμα της ραφής που δεν έχει ακόμα συγκολληθεί, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της πρώτης στρώσης συγκόλλησης όπου υπάρχει σχετική ελευθερία κίνησης στα μη συγκολλημένα τμήματα. Για την αποφυγή εμφάνισης περιστροφικής παραμόρφωσης γίνονται

πονταρίσματα των υπό συγκόλληση ελασμάτων τα οποία σε μερικές περιπτώσεις πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά ώστε να μπορούν να φέρουν τις δημιουργούμενες υψηλές τάσεις.

8.3.1.2 Αυχενικές συγκολλήσεις

Οι αυχενικές συγκολλήσεις παρουσιάζουν γενικά μικρότερη εγκάρσια συστολή σε σύγκριση με τις επίπεδες μετωπικές συγκολλήσεις.

Το ποσό της εγκάρσιας συστολής μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες απλές σχέσεις:

- Για ραφές τύπου T, με δύο συνεχείς συγκολλήσεις:

$$\text{Συστολή} = 0,04in * (\text{μέγεθος συγκόλλησης}) / (\text{πάχος ελάσματος})$$

- Για διακοπόμενες συγκολλήσεις εφαρμόζεται διορθωτικός συντελεστής, ανάλογος του μήκους της αυχενικής συγκόλλησης προς το συνολικό μήκος ραφής

- Για αυχενικές συγκολλήσεις σε ραφές με επικάλυψη

$$\text{Συστολή} = 0,06in * (\text{μέγεθος συγκόλλησης}) / (\text{πάχος ελάσματος})$$

8.3.2 Γωνιακή μεταβολή

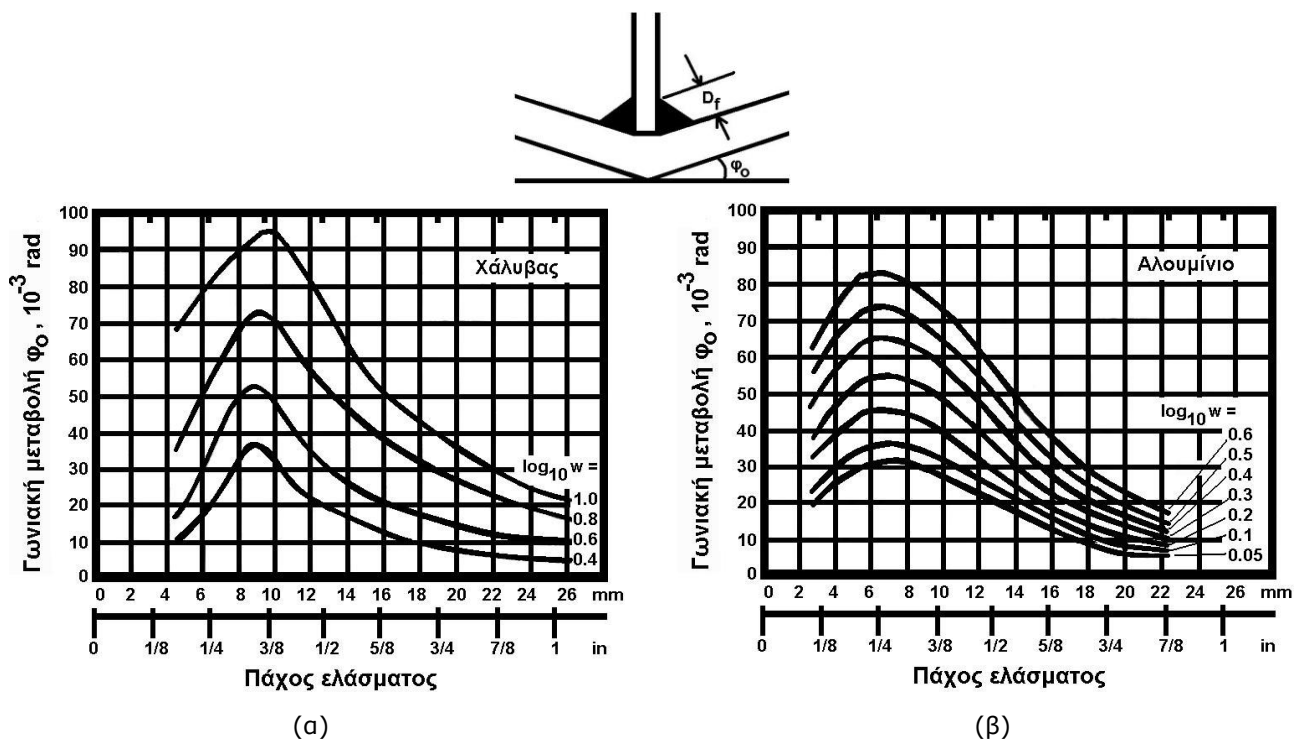
8.3.2.1 Μετωπικές συγκολλήσεις

Γωνιακή μεταβολή παρουσιάζεται συχνά σε μετωπικές συγκολλήσεις και οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή της εγκάρσιας συστολής στη διεύθυνση του πάχους. Οι σημαντικότερες παράμετροι που επιδρούν σε αυτή είναι η μορφή της ραφής και ο βαθμός περιορισμού που εφαρμόζεται.

8.3.2.2 Αυχενικές συγκολλήσεις

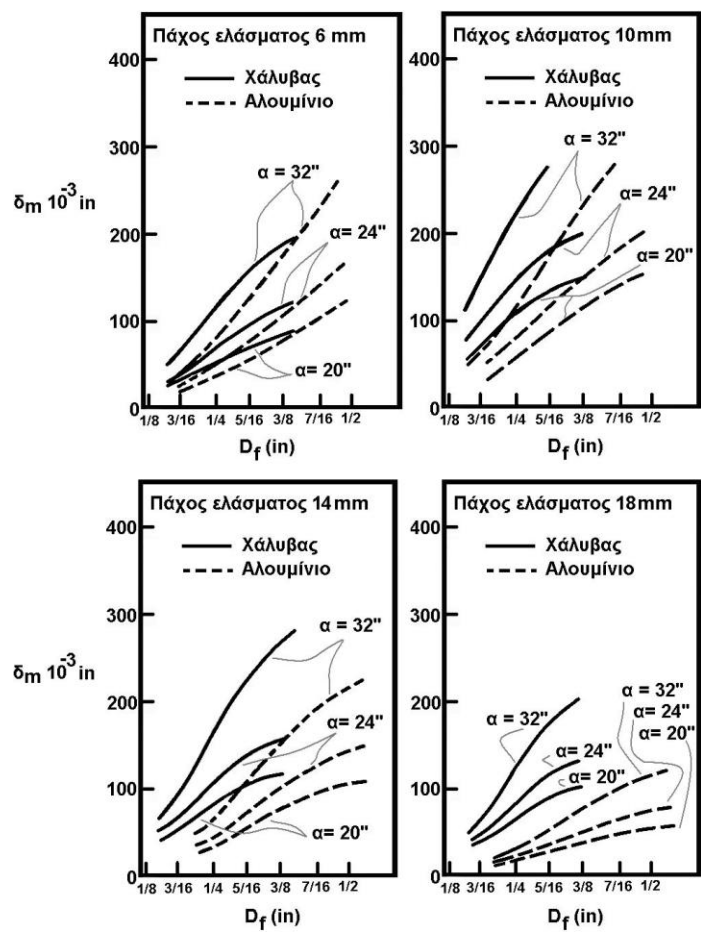
Το πρόβλημα της γωνιακής μετατόπισης στις αυχενικές συγκολλήσεις είναι σημαντικό για την περιοχή της ναυπηγικής. Οι κατασκευές που αποτελούνται από έλασμα στο οποίο συγκολλούνται διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά είναι πολύ κοινές και το σύνθηες, σημαντικό, πρόβλημα που παρουσιάζουν αυτές είναι η εκτός επιπέδου παραμόρφωση του ελάσματος που οφείλεται στις γωνιακές μεταβολές των αυχενικών συγκολλήσεων.

Η Εικόνα 8.3 παρουσιάζει τιμές της γωνιακής μεταβολής, σε ελεύθερη ένωση, (Φ_0), ως συνάρτηση του πάχους των προς συγκόλληση ελασμάτων, t , και του βάρους του ηλεκτροδίου που αναλώθηκε ανά μονάδα μήκους, w . Τα διαγράμματα (Εικ. 8.3), αναφέρονται σε συγκολλήσεις χαλύβων με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια διαμέτρου 5mm (Εικ. 8.3α) και κράματος αλουμινίου 5086-H32 με την τεχνική GMAW και μέταλλο προσθήκης το κράμα αλουμινίου 5356 (Εικ. 8.3β). Στους χάλυβες, παρατηρείται ότι η μέγιστη γωνιακή μεταβολή παρουσιάζεται για πάχος ελάσματος περίπου 9mm. Για πάχη μικρότερα από 9mm η μείωση της γωνιακής μεταβολής οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερο ομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής κατά το πάχος, που μειώνει τις επαγόμενες ροπές κάμψης, ενώ για πάχη μεγαλύτερα από 9mm η μείωση της γωνιακής μεταβολής οφείλεται στην αύξηση της ακαμψίας του ελάσματος. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και για τα κράματα αλουμινίου (Εικ. 8.3β) με τη διαφορά ότι η μέγιστη γωνιακή μεταβολή εμφανίζεται σε πάχος ελάσματος περί τα 7mm.

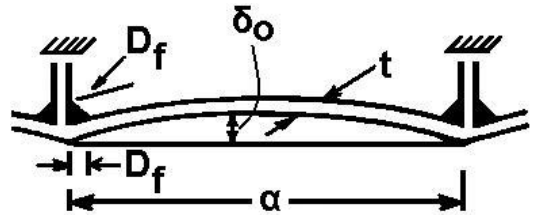


Εικόνα 8.3 Γωνιακή μεταβολή Φ_0 σε α) χαλύβδινα και β) αλουμινένια ελάσματα^[2]

Παρακάτω (Εικ. 8.4) παρουσιάζεται η σύγκριση των μέγιστων παραμορφώσεων δ_0 , για χαλύβδινα και αλουμινένια ελάσματα, ως συνάρτηση του πάχους τους, t , του μήκους ανοίγματος, a , και του μεγέθους της αυχενικής συγκόλλησης D_f (Εικ. 8.5).



Εικόνα 8.4 Μέγιστη παραμόρφωση, δ_m , σαν συνάρτηση του πάχους ελάσματος, t , του μήκους ανοίγματος, α , και του μεγέθους της αυχενικής συγκόλλησης, D_{fr} , για χάλυβα και αλουμίνιο^[2]



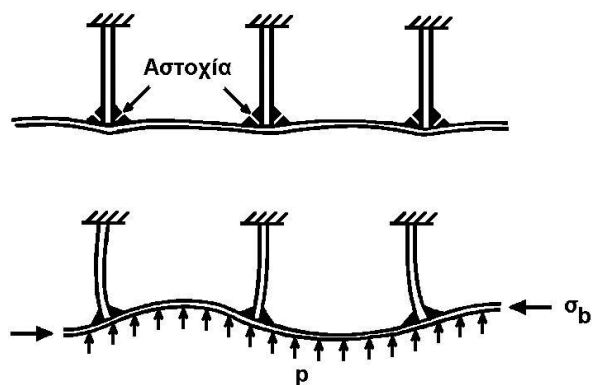
Εικόνα 8.5 Μεταβλητές που επιδρούν στη μέγιστη παραμόρφωση δ_m ^[2]

Η γωνιακή μεταβολή, εξαρτάται φυσικά και από τις συνθήκες συγκόλλησης, όπως είναι η ισχύς του τόξου συγκόλλησης η ταχύτητα προχώρησής του, το πάχος του ελάσματος, το είδος του ηλεκτροδίου και οι συνθήκες προθέρμανσης των υπό συγκόλληση ελασμάτων.

Καθώς η γωνιακή μετατόπιση λόγω αυχενικής συγκόλλησης δεν μπορεί να αποφευχθεί, διάφοροι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί θέτουν ανώτατα όρια στην επιτρεπόμενη παραμόρφωση

εξαιτίας αυτής. Ο κυριότερος λόγος γι' αυτό, είναι προφανώς η σοβαρή επίδραση της παραμόρφωσης στη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής, ιδιαίτερα σε ότι αφορά στη συμπεριφορά της σε θλιπτικά φορτία (φαινόμενα λυγισμού).

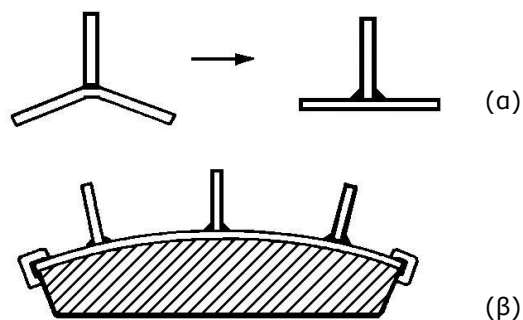
Προφανής τρόπος μείωσης της παραμόρφωσης λόγω γωνιακής μεταβολής είναι η μείωση του μεγέθους των αυχενικών συγκολλήσεων. Αν όμως το μέγεθος μειωθεί πολύ, τότε υπάρχει κίνδυνος θραύσης στην περιοχή της συγκόλλησης (Εικ 8.6α). Αντίθετα, αν το μέγεθος των αυχενικών συγκολλήσεων είναι υπερβολικά μεγάλο, τότε δημιουργείται κίνδυνος λυγισμού του ελάσματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής (Εικ 8.6β).



Εικόνα 8.6 Πιθανές αστοχίες λόγω γωνιακής μεταβολής^[1]

Στην πράξη, η γωνιακή μεταβολή σε αυχενικές συγκολλήσεις μπορεί να μειωθεί με πρόσδοση στο έλασμα αρχικής παραμόρφωσης στην αντίθετη διεύθυνση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται:

- A) Πλαστική αρχική κάμψη (Εικ. 8.7α)
- B) Ελαστική προένταση (Εικ. 8.7β)



Εικόνα 8.7 α) Πλαστική αρχική κάμψη β) ελαστική προένταση^[1]

Η χρήση της δεύτερης πιστεύεται ότι δίνει περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς, έτσι κι αλλιώς, πρόκειται για συγκόλληση που πραγματοποιείται με περιορισμό οπότε η τελική γωνιακή μεταβολή θα είναι οπωσδήποτε μικρότερη.

8.3.3 Διαμήκης συστολή

8.3.3.1 Μετωπικές συγκολλήσεις

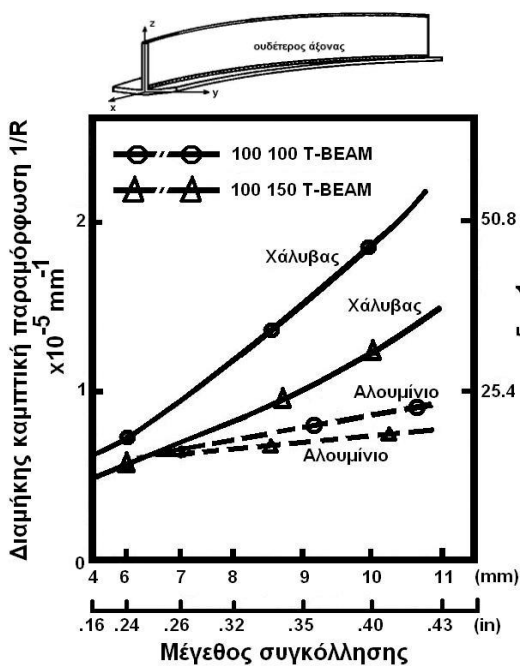
Η διαμήκης συστολή σε μετωπικές συγκολλήσεις είναι ίση περίπου με το 1/1000 του μήκους συγκόλλησης, πολύ μικρότερη δηλαδή από την εγκάρσια συστολή. Λόγω της μικρής σημασίας της, δεν προσφέρεται για ανάλυση και μελέτη σε βάθος.

8.3.3.2 Αυχενικές συγκολλήσεις

Η διαμήκης συστολή σε αυχενικές συγκολλήσεις είναι συνάρτηση της συνολικής διατομής της ένωσης. Ο περιορισμός της είναι πιο αποτελεσματικός όταν τα ελάσματα είναι παχύτερα και πλατύτερα. Η συνολική διατομή των προς συγκόλληση ελασμάτων καλείται ανθιστάμενη διατομή.

8.3.4 Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση

Όταν η γραμμή συγκόλλησης δεν συμπίπτει με τον ουδέτερο άξονα της κατασκευής, τότε η



Εικόνα 8.8 Σχέση μεταξύ διαμήκους παραμόρφωσης και μεγέθους συγκόλλησης^[2]

διαμήκης συστολή του μετάλλου έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία καμπτικών ροπών που με τη σειρά τους έχουν σαν συνέπεια τη δημιουργία καμπτικής παραμόρφωσης. Ο τύπος της παραμόρφωσης αυτής είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην κατασκευή σύνθετων διατομών T και I (δισπλού T).

Στην Εικόνα 8.8, συγκρίνονται οι τιμές διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης σε σύνθετες διατομές μορφής T από χάλυβα και αλουμίνιο. Παρατηρείται ότι η παραμόρφωση είναι μικρότερη στην περίπτωση του αλουμινίου. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, σε σύγκριση με αυτόν του χάλυβα, που έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πιο ομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής στις δοκούς αλουμινίου.

8.3.5 Παραμόρφωση λυγισμού

Η παραμόρφωση λυγισμού συναντάται συχνά σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων. Οφείλεται στις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση. Το είδος αυτό της παραμόρφωσης συμβαίνει όταν, για παράδειγμα, το μήκος του ελάσματος που πρόκειται να συγκολληθεί, δεδομένων των άλλων διαστάσεών του, υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή του.

Η παραμόρφωση λυγισμού διαφέρει από εκείνη λόγω κάμψης στο γεγονός ότι αυτή, αφενός είναι μεγαλύτερου μεγέθους, αφετέρου μπορεί να δώσει περισσότερες της μιας ευσταθούς ιδιομορφίες.

Οι υπολογιστικές και πειραματικές προσεγγίσεις του προβλήματος είναι πολλές και αφορούν, κυρίως, χαλύβδινες κατασκευές.

8.4 Γενικοί κανόνες μείωσης των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης και μέθοδοι διόρθωσής τους

☞ Διαστάσεις κατασκευής: Το μήκος, το πλάτος και το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων επιδρούν σημαντικά στο μέγεθος της δημιουργούμενης παραμόρφωσης.

☞ Διαμόρφωση ακμών: Η παραμόρφωση επηρεάζεται σημαντικά από το είδος της διαμόρφωσης των ακμών των προς συγκόλληση τεμαχίων. Σαν γενικός κανόνας, η παραμόρφωση μπορεί να μειωθεί με το να διατηρήσει κανείς τη μάζα του μετάλλου συγκόλλησης στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα.

☞ Μέθοδος και συνθήκες συγκόλλησης: Δεδομένου ότι οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις οφείλονται στην ανομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, είναι γενικά σωστό να ληφθεί ότι όσο λιγότερη θερμότητα απαιτείται για την ένωση, τόσο μικρότερες θα είναι και οι παραμορφώσεις. Πρέπει όμως να αναγνωριστεί ότι η επίδραση της θερμοκρασιακής κατανομής και της προσδιδόμενης θερμότητας στα διάφορα είδη παραμόρφωσης είναι πολύπλοκη.

☞ Συγκόλληση πολλαπλών στρώσεων: Ένα μεγάλο ποσοστό των παραμορφώσεων που συναντώνται κατά τις συγκολλήσεις αυτές, συμβαίνει κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων στρώσεων. Η χρήση ηλεκτροδίων μεγάλης διαμέτρου στην πρώτη στρώση οδηγεί σε σημαντική μείωση της συστολής.

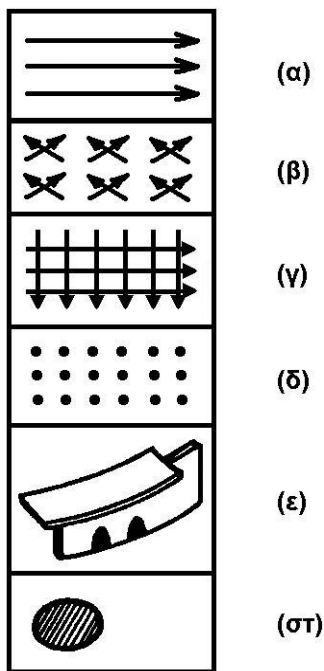
☞ Περιορισμός: Η χρήση εξωτερικών περιορισμών για τη μείωση της παραμόρφωσης χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

☞ Ακολουθία συγκόλλησης: Η ακολουθία συγκόλλησης επηρεάζει την εγκάρσια συστολή και η συγκόλληση κατά τομείς δίνει μικρότερες τέτοιες παραμορφώσεις.

☞ Χρήση διακοπτόμενης συγκόλλησης: Η διαμήκης καμπτική παραμόρφωση μπορεί να μειωθεί σημαντικά με χρήση διακοπτόμενης συγκόλλησης. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο στην περίπτωση της γωνιακής μεταβολής.

☞ Προθέρμανση: Η μείωση της ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, μπορεί να μειωθεί με προθέρμανση των υπό συγκόλληση τεμαχίων. Η μείωση επιτυγχάνεται είτε μέσω ελάττωσης της ανομοιομορφίας της θέρμανσης είτε μέσω της δημιουργίας επακριβών ποσοτήτων ανομοιόμορφης συστολής σε συγκεκριμένες θέσεις των τεμαχίων.

☞ Προένταση: Η γωνιακή μεταβολή σε αυχενικές συγκολλήσεις μπορεί να μειωθεί με πρόσδοση στο έλασμα αρχικής παραμόρφωσης στην αντίθετη διεύθυνση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πλαστική αρχική κάμψη ή ελαστική προένταση.



Εικόνα 8.9 Μέθοδοι θέρμανσης με φλόγα. α) Κατά γραμμές, β) κατά βελόνες, γ) σε κάθετες διευθύνσεις, δ) κατά σημεία, ε) τριγωνική, στ) τοπική^[1]

☞ Διόρθωση των παραμορφώσεων: Η διόρθωση των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τη συγκόλληση πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές. Η σφυρόκρουση χρησιμοποιείται για να διαταθεί το μέταλλο που έχει συρρικνωθεί κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (οι κανονισμοί, απαγορεύουν την εφαρμογή σφυρόκρουσης μετά την πρώτη και τελευταία στρώση συγκόλλησης). Η πιο συνηθισμένη, ωστόσο, μέθοδος διόρθωσης των παραμορφώσεων είναι η εύθυνση με θέρμανση. Κατ' αυτήν, πραγματοποιείται θέρμανση με φλόγα επιλεγμένων σημείων ή κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών (Εικ. 8.9), ακολουθούμενη από ψύξη σε νερό. Μερικές φορές μαζί με τη θέρμανση πραγματοποιείται και σφυρόκρουση. Άλλες μέθοδοι εύθυνσης είναι η τεχνική ανακούφισης των τάσεων μέσω ταλάντωσης και αυτή με χρήση ηλεκτρομαγνητικού σφυριού.

Κεφάλαιο 9°

Βιβλιογραφική επισκόπηση

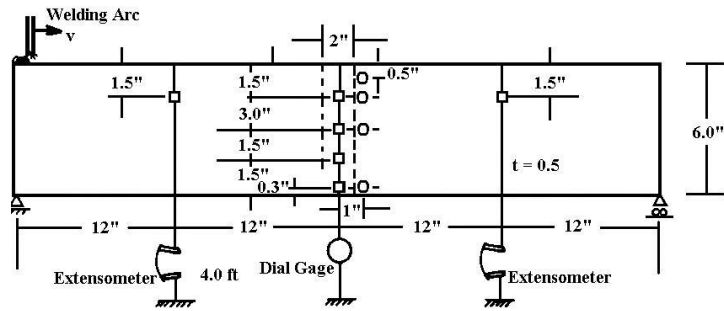
Η μελέτη των παραμενουσών τάσεων και των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης εμφανίστηκε περίπου στη δεκαετία του 1930 οπότε και δημοσιεύθηκαν τα πρώτα άρθρα που ανέλυαν τις μεταβατικές θερμικές τάσεις, τις στρεβλώσεις και τη συστολή. Στη δεκαετία του 1950, αρκετοί Ιάπωνες (π.χ. Kihara, Masubuchi, Satoh) αλλά και Ρώσοι ερευνητές, ασχολήθηκαν με τη μελέτη των παραμενουσών τάσεων και των στρεβλώσεων στις συγκολλήσεις. Ωστόσο, οι μελέτες και η βιβλιογραφία που συναντάται ως και τη δεκαετία του 1970, περίπου, περιορίζεται σε πληροφορίες πάνω σε συγκολλήσεις χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με χρήση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων. Οι αναφορές σε συγκολλήσεις με χρήση άλλων τεχνικών ή άλλων υλικών, όπως κραμάτων αλουμινίου, είναι εξαιρετικά περιορισμένες.

Σε ότι αφορά στην πειραματική μελέτη των μεταβατικών θερμικών τάσεων-παραμορφώσεων, και στρεβλώσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης, αλλά και των θερμικών κύκλων αυτής, τα δεδομένα είναι σχετικά περιορισμένα. Ο Masubuchi^[2] καθώς και άλλοι ερευνητές του Μ.Ι.Τ.^[4-7], έχουν παρουσιάσει σειρά αποτελεσμάτων τέτοιων μελετών πάνω σε διαφορετικά υλικά.

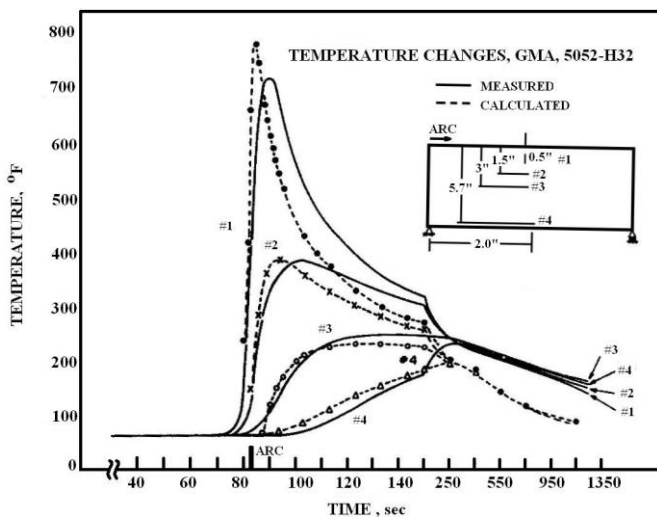
Σε μια από αυτές^[2], παρουσιάζεται η πειραματική ανάλυση των μεταβατικών παραμορφώσεων, μεταβατικών στρεβλώσεων, θερμικών κύκλων και παραμενουσών τάσεων κατά την απόθεση στρώσης μετάλλου, με την τεχνική GMAW, κατά μήκος της ακμής ελάσματος κράματος αλουμινίου 5052-H32. Τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 1220mm x 152mm x 12,5mm, ενώ οι συνθήκες συγκόλλησης και οι θέσεις των μετρητικών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 9.1 και Εικόνα 9.1 αντίστοιχα. Οι παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης υπολογίστηκαν πειραματικά με την τεχνική αφαίρεσης υλικού. Τα αποτελέσματα της μελέτης συνοψίζονται στην Εικόνα 9.2 όπου και συγκρίνονται οι πειραματικές καμπύλες με τις καμπύλες που προέκυψαν έπειτα από μονοδιάστατη αναλυτική μοντελοποίηση που πραγματοποίησαν οι ερευνητές.

Πίνακας 9.1 Συνθήκες συγκόλλησης GMAW κράματος 5052-H32 που πραγματοποιήθηκε στο Μ.Ι.Τ.

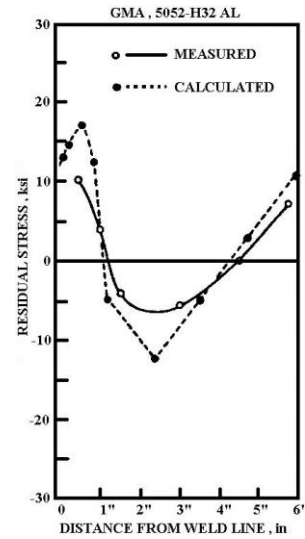
Ρεύμα συγκόλλησης	260A
Τάση συγκόλλησης	23V
Ταχύτητα τόξου	0,289in/sec
Συνολικός χρόνος συγκόλλησης	166sec
Εισερχόμενη θερμότητα	20,700 J/in
Μέταλλο προσθήκης	4043, 1/16 in ϕ
Ταχύτητα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου	400in/min
Αέριο προστασίας	Αργό



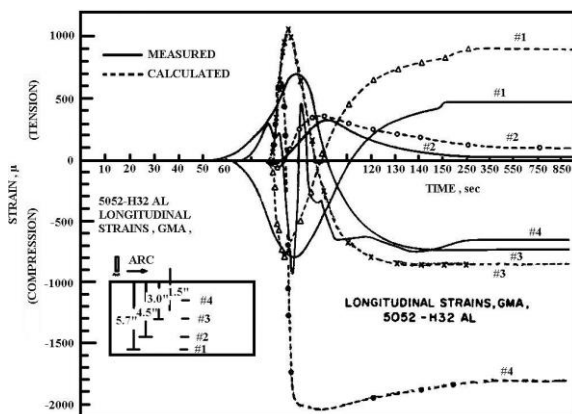
Εικόνα 9.1 Δοκίμιο και θέσεις των μετρητικών της μελέτης ερευνητών του Μ.Ι.Τ.



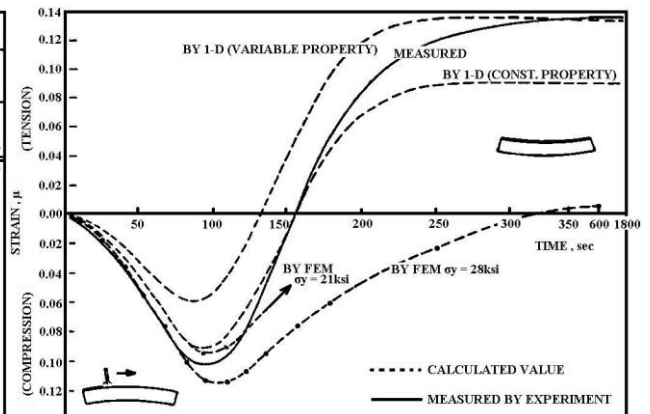
(α)



(β)



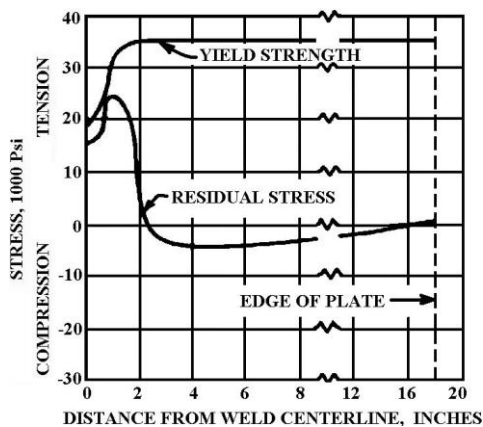
(γ)



(δ)

Εικόνα 9.2 Αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης ερευνητών του Μ.Ι.Τ. σε συγκολλήσεις GMAW κράματος 5052-H32, α) Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης, β) Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος της μέσης τομής των δοκιμίων, γ) μεταβατικές θερμικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης αλλά και κατά την απόψυξη του δοκιμίου, δ) μεταβολές της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά τη συγκόλληση και την απόψυξή του

Σύγχρονα άρθρα της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, όπως αυτό των C.L. Tsai, S.C. Park, και W.T. Cheng^[8], ή των G.B. Jang, H.K. Kim και S.S. Kang^[9], μελετούν τις στρεβλώσεις και παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης ή την επίδραση της γεωμετρίας ακμών συγκόλλησης στην τελική μορφοποίηση των τελικών παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων αντίστοιχα με τη βοήθεια αριθμητικής μοντελοποίησης. Πράγματι, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και αντίστοιχα των λογισμικών προσομοίωσης κατεργασιών έχει μειώσει το υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για τη μοντελοποίηση μιας ακολουθίας συγκόλλησης. Έτσι και καθώς ο σχεδιασμός και η εκτέλεση ενός πειράματος υπολογισμού μεταβατικών τάσεων και παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση απαιτεί σημαντικό χρόνο και υψηλό κόστος, οι σύγχρονες δημοσιεύσεις επικεντρώνονται περισσότερο στις μεθόδους και τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων (Βλ. Ενότητα 4) και ελάχιστες πειραματικές μελέτες συναντώνται στο θέμα αυτό.

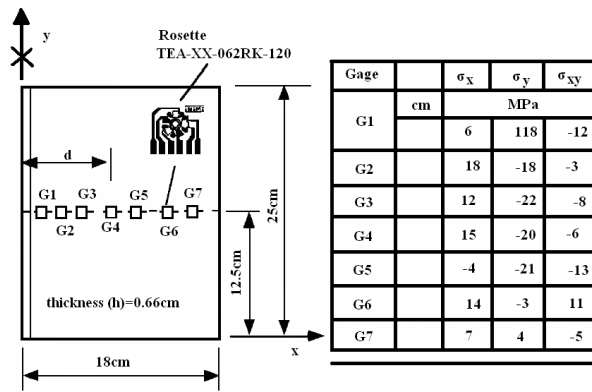


Εικ. 9.3 Κατανομή ορίου διαρροής και παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση κράματος αλουμινίου 5456-H321, πάχους $1/2$ in και μήκους 36 in^[2]

μοντελοποίησης (Εικ. 9.2β και Εικ. 9.3). Σημαντικές σύγχρονες μελέτες πάνω στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου έχουν πραγματοποιηθεί από πολλούς επιστήμονες όπως για παράδειγμα από τους J. Canas, R. Picon, F. Paris, A. Blazquez and J. C. Marin^[10] οι οποίοι μετά τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου 5083-O έκαναν πειραματική μελέτη της κατανομής των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης με τη μέθοδο διάνοιξης τυφλής οπής (Εικ. 9.4). Επιπλέον, έδειξαν ότι η κατανομή των παραμενουσών τάσεων που προκύπτει πειραματικά είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιώντας μοντέλο επίπεδων τάσεων. Στα συμπεράσματά τους αναφέρεται επίσης ότι η επίδραση στις παραμένουσες τάσεις κάποιων μηχανικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας, είναι αμελητέα. Το μοντέλο επίπεδων παραμορφώσεων που ανέπτυξαν δεν έδωσε τα επιθυμητά

Σε ότι αφορά στον πειραματικό προσδιορισμό της κατανομής των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, το μεγάλο εύρος των τεχνικών που υπάρχουν έχει σαν αποτέλεσμα να συναντάται πληθώρα επιστημονικών άρθρων στο πεδίο αυτό.

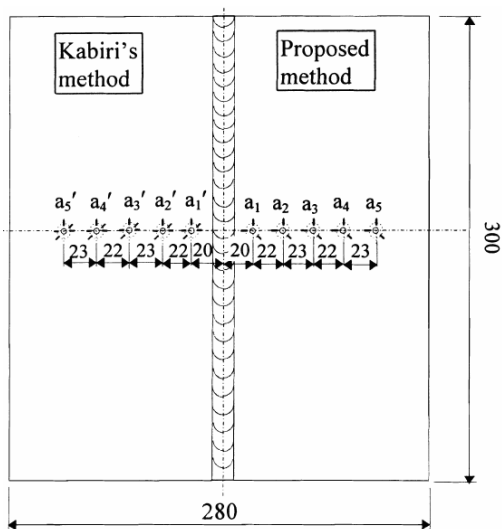
Αναφορές που είδη παρουσιάστηκαν^[4-7], σχετικά με τις μελέτες ερευνητών του M.I.T. πάνω στις μεταβατικές θερμικές τάσεις και τις στρεβλώσεις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης, πραγματεύονται και τη διερεύνηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, τόσο πειραματικά με χρήση τεχνικών χαλάρωσης των τάσεων, όσο και μέσω αναλυτικής



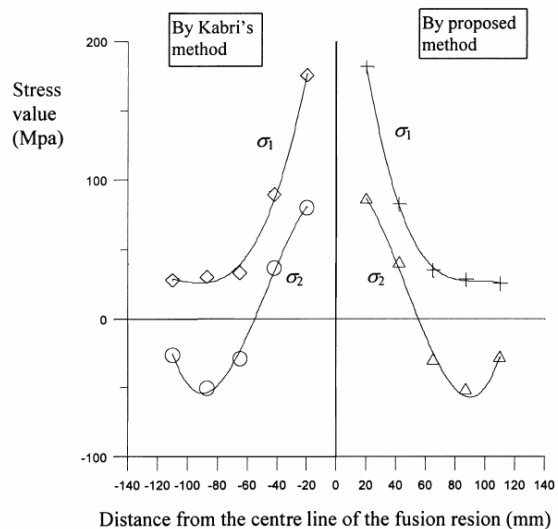
Εικ. 9.4 Μετρήσεις παραμενουσών τάσεων με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής [10]

αλουμινίου 6061-T6, πραγματοποίησαν έπειτα από συγκόλληση GTAW μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τη νέα αυτή μέθοδο. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα έδειξαν ότι το σχετικό σφάλμα μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και της κλασικής, είναι της τάξης του 9.4% (Εικ. 9.5).

αποτελέσματα καθώς αδυνατούσε να συμφωνήσει με τα πειραματικά αποτελέσματα, ανεξάρτητα από το πάχος της πλάκας. Επίσης, οι G.C. Luh και R.M. Hwang^[11], ανέπτυξαν μια νέα μέθοδο υπολογισμού του μεγέθους και των διευθύνσεων των κύριων παραμενουσών τάσεων κατά την εφαρμογή της τεχνικής διάνοιξης διαμπερούς οπής. Σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων (πάχους 2mm) και διαστάσεων 300mmx140mm από κράμα



(α)

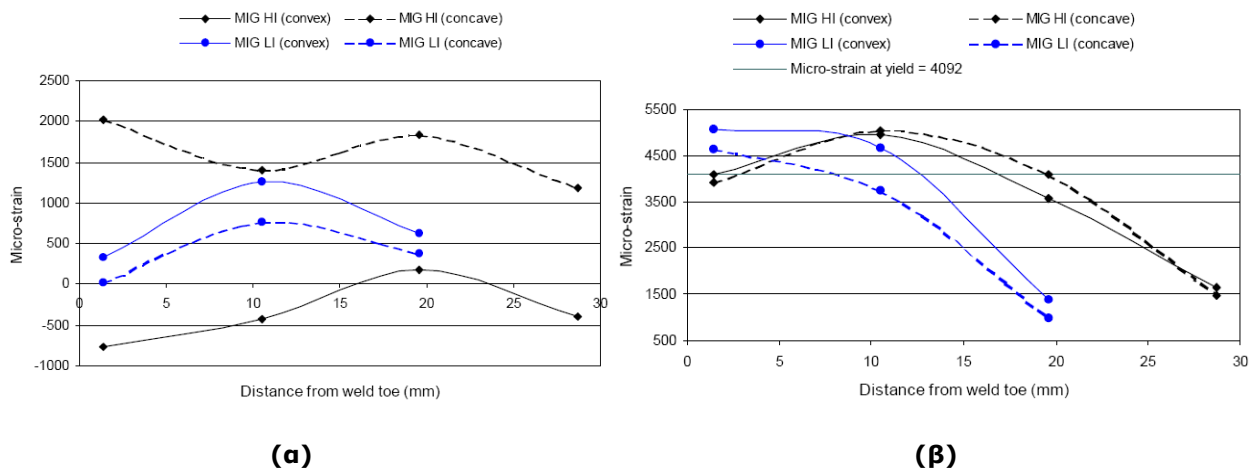


(β)

Εικόνα 9.5 α) Διάταξη μετρητικών και β) πειραματικές καμπύλες παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης κατά τους G.C. Luh και R.M. Hwang

Ιδιαίτερα αξιόλογη είναι και η μελέτη των G.R. Bradley και M.N. James^[3] οι οποίοι μελέτησαν πειραματικά την κατανομή των παραμενουσών τάσεων, με εφαρμογή της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής, σε συγκολλήσεις GMAW κράματος αλουμινίου 5383-H321 δίνοντας έμφαση στην επίδραση που έχουν αυτές στην αντοχή σε κόπωση της περιοχής της ρίζας της συγκόλλησης. Οι

δοκιμές συγκόλλησης έγιναν με εφαρμογή δύο διαφορετικών συνθηκών παροχής θερμότητας (LOW και HIGH). Πειραματικές καμπύλες κατανομής των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης για τις δύο διαφορετικές συνθήκες που εφάρμοσαν οι G.R. Bradley και M.N. James, φαίνονται στην Εικόνα 9.6.



Εικόνα 9.6 Πειραματικές καμπύλες παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της συγκόλλησης κατά τους G.R. Bradley και M.N. James. α) κάθετα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης β) παράλληλα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης

Επιπλέον, συζήτηση της επίδρασης των παραμενουσών τάσεων στην αντοχή συγκολλητών ναυπηγικών κατασκευών από κράματα αλουμινίου γίνεται από τους A. Berkovits και D.W. Kelly σε άρθρο τους που δημοσιεύθηκε το 1998^[12].

Η τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής έχει ακόμα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κατανομής των παραμενουσών τάσεων τόσο σε συγκολλήσεις Laser^[27] όσο και σε συγκολλήσεις διατριβής με ανάδευση^{[3],[28]}.

Καθώς στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής προκειμένου να προσδιοριστεί πειραματικά η κατανομή των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, τονίζεται η προσπάθεια διαφόρων ανά τον κόσμο ερευνητών να βελτιστοποιήσουν τις μεθόδους υπολογισμού που ακολουθούν την τεχνική αυτή. Η προσπάθεια αυτή αφορά, συνήθως, τη σύγκριση των προτεινόμενων βελτιστοποιημένων μεθόδων υπολογισμού με τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων, μοντελοποίησης ή άλλων τεχνικών μέτρησης των παραμενουσών τάσεων σε διάφορα υλικά.

Έτσι, ο D. Vangji^{[13],[14]}, εξετάζει την επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης κατά την εφαρμογή της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής στον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων προτείνοντας μια βελτιωμένη διαδικασία διαχείρισης των πειραματικών δεδομένων με χρήση μαθηματικών

μεθόδων ολοκλήρωσης, η οποία επιτρέπει τον ακριβέστερο προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε συνάρτηση με το βάθος διάνοιξης της οπής.

Τα σφάλματα της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής έχουν διερευνηθεί ωστόσο και από άλλους επιστήμονες όπως οι G.S. Schajer και E. Altus^[15], οι οποίοι και πρότειναν μια νέα διαδικασία υπολογισμού των σφαλμάτων με ανάλυση της επίδρασης που έχουν αυτά στα αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή της τεχνικής. Ο B. Zuccarello^[16], ο οποίος έδειξε ότι δεδομένου του μέγιστου βάθους της οπής που διανοίγεται και του αριθμού των βημάτων διάνοιξης, η ευαισθησία σφάλματος εξαρτάται από το βάθος της κάθε προσάυξης, και η ερευνητική ομάδα με επικεφαλής τον K. Sasaki^[17], η οποία και διερεύνησε την επίδραση της διανοιγόμενης οπής στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Σημαντική ακόμα είναι και η μελέτη των M. Beghini, L. Bertini και P. Raffaelli^[18] οι οποίοι διερεύνησαν την επίδραση της πλαστικότητας στις μετρήσεις παραμενουσών τάσεων, όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος διάνοιξης διαμπερούς οπής

Επιπλέον, ερευνητές έχουν προσπαθήσει να βελτιστοποιήσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την τεχνική, βελτιώνοντας τις μετρητικές διατάξεις^[19], ενισχύοντας τις μεθόδους υπολογισμού που τη διέπουν με δεδομένα από αριθμητικά μοντέλα^[20] ή εφαρμόζοντας τη σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές^[21-26] όπως έκανε για παράδειγμα ο J. Lu^[21] όπου μαζί με άλλους ερευνητές, πραγματοποίησαν σύγκριση των μεθόδων διάνοιξης οπής και περίθλασης ακτινών X και συμπέραναν ότι αυτές είναι συμπληρωματικές. Οι δύο μέθοδοι εφαρμόστηκαν από τους ερευνητές σε διάφορα είδη συγκολλήσεων (ετερογενείς, συγκολλήσεις δια τριβής, συγκολλήσεις επικάλυψης κ.λπ.) και τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά.

Πειραματικός προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων σε κράματα αλουμινίου έχει πραγματοποιηθεί και με χρήση άλλων τεχνικών^[29-33] ενώ, φυσικά, σημαντικός είναι και ο αριθμός των δημοσιεύσεων που αφορούν αντίστοιχες μελέτες στους χάλυβες^[34-40].

Κεφάλαιο 10°

Πειραματική διαδικασία

Όλα τα στάδια της μελέτης των θερμικών μεταβατικών παραμορφώσεων, παραμενουσών τάσεων και στρεβλώσεων - παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Συνοπτικά, η μελέτη περιλαμβάνει τα εξής:

↳ Πειραματική μελέτη κατανομής των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής, σε δοκίμια διαστάσεων 175mm x 150mm, πάχους 5mm από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5083-H116.

↳ Πειραματικός προσδιορισμός των μεταβατικών θερμικών παραμορφώσεων και στρεβλώσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και ως το τέλος του κύκλου απόψυξης, σε δοκίμια διαστάσεων 700mm x 300mm, από κράμα 5083-H116, πάχους 4mm και 5383-H116, πάχους 6mm.

↳ Πειραματική μελέτη κατανομής των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής και με την τεχνική τεμαχισμού με χρήση επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης, σε δοκίμια διαστάσεων 700mm x 300mm, από κράμα 5083-H116, πάχους 4mm, 5083-H111 πάχους 5mm και ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5383-H116, πάχους 6mm.

10.1 Εξοπλισμός, τεχνικές και μετρητικές διατάξεις

10.1.1 Πειραματική μελέτη παραμενουσών τάσεων

Για την πειραματική μελέτη των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής και η τεχνική τεμαχισμού με χρήση επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης η οποία και παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 7.4.1.1.

Η τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής^[41] είναι μια ημι-καταστρεπτική τεχνική που περιλαμβάνει τη μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω χαλάρωσης από τη διάνοιξη μιας μικρής οπής στην επιφάνεια υλικού. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη βοήθεια κατάλληλα σχεδιασμένων ροζετών που περιλαμβάνουν επιμηκυνσιόμετρα σε διάταξη, συνήθως, 0°, 90° και 120° ή 0°, 90° και 225°. Η

ροζέτα κολλάται στην επιφάνεια του υπό μελέτη υλικού και στη συνέχεια μια μικρή οπή ανοίγεται στο κέντρο αυτής. Καθώς οι τοπικές παραμένουσες τάσεις χαλαρώνουν, τα επιμηκνσιομέτρα καταγράφουν τις μεταβολές των παραμορφώσεων εξαιτίας αυτών.

Επειδή η απόσταση μεταξύ των επιμηκνσιομέτρων και της οπής είναι πολύ μικρή, η διάνοιξη πρέπει να γίνεται χωρίς σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις και θέρμανση. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται τρυπάνια υψηλής ταχύτητας με 300.000 περιστροφές το λεπτό.

Συνοπτικά, οι βασικές παραδοχές που ισχύουν κατά την εφαρμογή της τεχνικής και οι επεκτάσεις αυτής, έχουν ως εξής:

➤ **Υποθέσεις**

- Ισοτροπικό, γραμμικά ελαστικό υλικό
- Οι τάσεις δεν μεταβάλλονται σημαντικά με το βάθος
- Οι παραμένουσες τάσεις δεν ξεπερνούν το 0.5 του ορίου διαρροής
- Οι μεταβολές των τάσεων μέσα στα όρια της οπής είναι πολύ μικρές

➤ **Επεκτάσεις**

- Διάνοιξη οπής με προσαυξήσεις του βάθους
- Αναλύσεις μη ομοιόμορφων τασικών πεδίων
- Αναλύσεις απότομων μεταβολών τάσεων
- Ελαστο - πλαστική συμπεριφορά

Αναλύοντας λίγο περισσότερο, στην πράξη η τεχνική είναι έγκυρη μόνο για ομογενή και ισότροπα υλικά, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι και το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή μέτρησης. Παραμένουσες τάσεις μεγαλύτερες από το ένα τρίτο ή το μισό του ορίου διαρροής μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή του κυκλικού σχήματος της οπής με αρνητικές συνέπειες σε ότι αφορά στην αξιοπιστία των εξαγομένων αποτελεσμάτων. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι για παραμένουσες τάσεις της τάξης του 0,8 του ορίου διαρροής, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι αξιόπιστα (ποτέ όμως για μεγαλύτερες). Άλλα πιθανά σφάλματα ή αβεβαιότητες έχουν να κάνουν με το αν το κέντρο της οπής συμπίπτει με τον κύκλο των επιμηκνσιομέτρων με σφάλμα ± 0.025 mm, με την επιπεδότητα της βάσης της οπής και με την επιφανειακή τραχύτητα και επιπεδότητα του δοκιμίου.

Η εφαρμογή της τεχνικής, δεν απελευθερώνει πλήρως τις παραμορφώσεις που προέρχονται από τις παραμένουσες τάσεις και για το λόγο αυτό, οι τάσεις δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν απ'

ευθείας από τις μετρούμενες παραμορφώσεις αλλά απαιτούνται συντελεστές βαθμονόμησης, οι οποίοι λαμβάνονται μέσω υπολογιστικών διαδικασιών ή πειραματικά. Έτσι, οι βασικές εξισώσεις που τη διέπουν έχουν ως εξής:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4\bar{A}} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4\bar{B}} \quad (10.1)$$

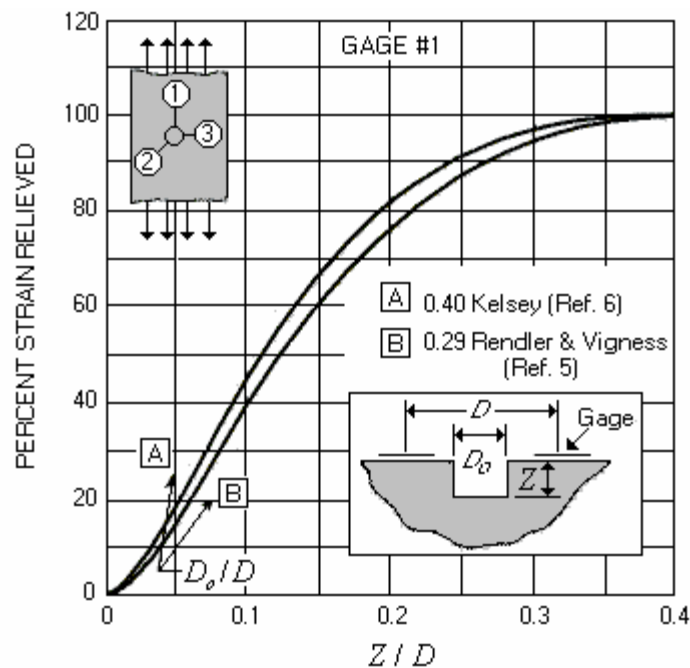
$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (10.2)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (10.3)$$

$$\text{Όπου, } \bar{A} = \frac{-\bar{a} * (1 + \nu)}{2E} \text{ και } \bar{B} = \frac{-\bar{b}}{2E}, \quad (10.4)$$

με \bar{a} και \bar{b} αδιάστατοι συντελεστές βαθμονόμησης, σχεδόν ανεξάρτητοι των ιδιοτήτων του υλικού.

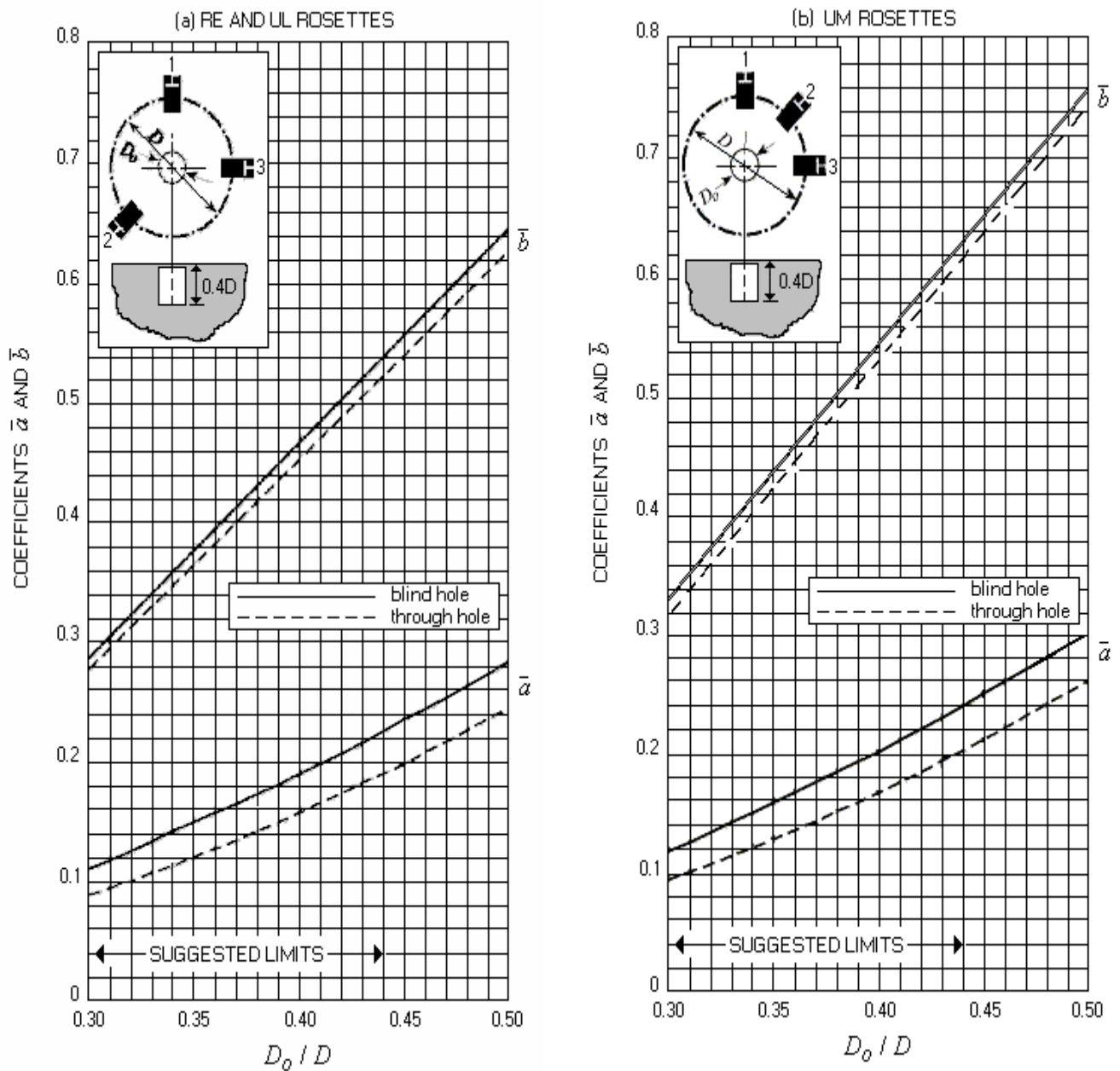
Στην Εικόνα 10.1 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ραφής καθώς και η μεταβολή του ποσοστού της παραμόρφωσης που ανακτάται από τη διάνοιξη της οπής για την περίπτωση όπου οι παραμορφώσεις έχουν πλήρως κανονικοποιηθεί στο 100% για $Z/D=0.4$.



Εικόνα 10.1 Μεταβολή του ποσοστού της παραμόρφωσης που ανακτάται από τη διάνοιξη της οπής για την περίπτωση όπου οι παραμορφώσεις έχουν πλήρως κανονικοποιηθεί στο 100% για $Z/D=0.4$

Στην Εικόνα 10.2 και στον Πίνακα 10.1 παρουσιάζονται οι συντελεστές \bar{a} και \bar{b} για τους κύριους τύπους ροζετών^[41]. Ισχύουν οι παραδοχές:

- Τυπικές προσαυξήσεις $0.05D$
- Μέγιστο βάθος για τις τυφλές οπές $\sim 0.4D$
- Μπορεί να απαιτηθεί μερική παρεμβολή



Εικόνα 10.2 Γραφική αναπαράσταση των συντελεστών \bar{a} και \bar{b} . Οι συνεχής γραμμές ανταποκρίνονται σε τυφλές οπές πλήρους βάθους και οι διακεκομμένες σε διαμπερείς οπές, υποθέτοντας και στις δύο περιπτώσεις ότι η αρχική παραμένουσα τάση είναι ομοιόμορφη με το βάθος

Πίνακας 10.1 Συντελεστές \bar{a} και \bar{b} για τους κύριους τύπους ροζετών^[41]

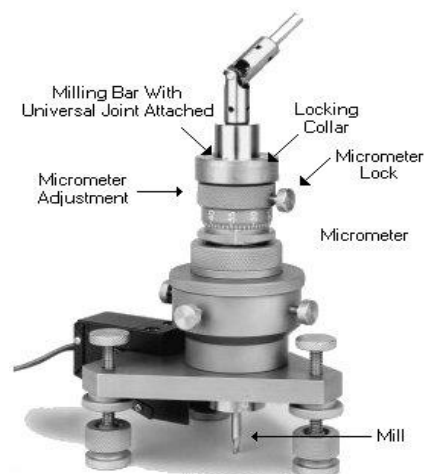
Ροζέτα A	\bar{a}					\bar{b}				
Τυφλή οπή Βάθος/D	Διάμετρος οπής D_o/D					Διάμετρος οπής D_o/D				
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.108	.138	.176	.118	.159	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.286	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.292	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.387	.482	.576	.668
Διαμπερή οπή	.090	.122	.160	.203	.249	.288	.377	.470	.562	.651

10.1.1.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

Τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής (Εικ. 10.3)

Διανοίχτηκε οπή βάθους 1,8mm και μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις λόγω χαλάρωσης. Μέσω αναλυτικών σχέσεων (Εξ. 10.1 - 10.4), υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις στην περιοχή μέτρησης. Χρησιμοποιήθηκαν:

- Ροζέτα επιμηκνσιομέτρων τύπου EA-13062RE-120 (Εικ. 10.3α)
- Κυανο-ακρυλική κόλλα για την κόλληση της ροζέτας στην επιφάνεια της εξεταζόμενης περιοχής του οίκου KYOWA τύπου CC-33A
- Οδηγός διάτρησης οπής του οίκου Measurements Group μοντέλο RS-200 με δυνατότητα περιστροφής ~30.000 rpm (Εικ. 10.3β)
- Τρυπάνια καρβιδίου του βολφραμίου διαμέτρου 1,8mm
- Μετατροπέας ηλεκτρικού σήματος επιμηκνσιομέτρων σε ένδειξη μικροπαραμορφώσεων



Εικόνα 10.3 α) Ροζέτα επιμηκνσιομέτρων, β) ο οδηγός διάτρησης RS-200

Τεχνική τεμαχισμού με χρήση επιμηκνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης

Λεπτή λωρίδα πλάτους 30mm αφαιρέθηκε εξολοκλήρου από το κέντρο των συγκολλημένων δοκιμίων με τη βοήθεια κορδέλας κοπής (VERMAC, KB - 456). Οι ακμές της αποκοιπτόμενης

λωρίδας είχαν, κατά το πλάτος, διεύθυνση κάθετα προς τον άξονα συγκόλλησης (άξονας Y) και εμπεριείχαν μονοαξονικά επιμηκνσιομέτρα προσανατολισμένα παράλληλα (άξονας X) και κάθετα (άξονας Y) προς τον άξονα συγκόλλησης σε επιλεγμένες θέσεις. Η επιλογή του πλάτους των 30mm προέκυψε μετά την εγκατάσταση των επιμηκνσιομέτρων πάνω στα συγκολλημένα ελάσματα και με στόχο να ληφθεί όσο γίνεται στενότερη λωρίδα χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης ή καταστροφής των επιμηκνσιομέτρων κατά τη διαδικασία. Έτσι, με το μήκος του επιμηκνσιομέτρου να είναι 10mm και το πλάτος του 5mm και καθώς σε κάθε θέση μέτρησης υπάρχουν δύο από αυτά σε γωνία 90° (άξονες X και Y) ενώ διατηρήθηκε και μια μικρή μεταξύ τους απόσταση της τάξης των 2mm προκειμένου αυτά να επικολληθούν με ασφάλεια στο έλασμα, προέκυψε ότι το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος εγκατάστασης των επιμηκνσιομέτρων ήταν 17mm. Θεωρώντας επιπλέον απόσταση της τάξης των 6mm - 6,5mm εκατέρωθεν των επιμηκνσιομέτρων ως απόσταση ασφαλείας προκειμένου να αποφευχθεί καταστροφή ή αποκόλληση των επιμηκνσιομέτρων κατά τη διαδικασία, προέκυψε το συνολικό πλάτος των 30mm. Χρησιμοποιήθηκαν:

- Επιμηκνσιομέτρα του οίκου KYOWA τύπου KFG-5-120-C123L1M2R
- Κυανο-ακρυλική κόλλα για την κόλληση των επιμηκνσιομέτρων στην επιφάνεια της εξεταζόμενης περιοχής του οίκου KYOWA τύπου CC-33A
- Καταγραφέας ηλεκτρικού σήματος επιμηκνσιομέτρων του οίκου HBM, μοντέλο SPIDER-8 με το συνεργαζόμενο λογισμικό διαχείρισης δεδομένων του ίδιου οίκου, CATMAN v.4.5

10.1.2 Πειραματική μελέτη μεταβατικών θερμικών τάσεων, παραμορφώσεων και στρεβλώσεων

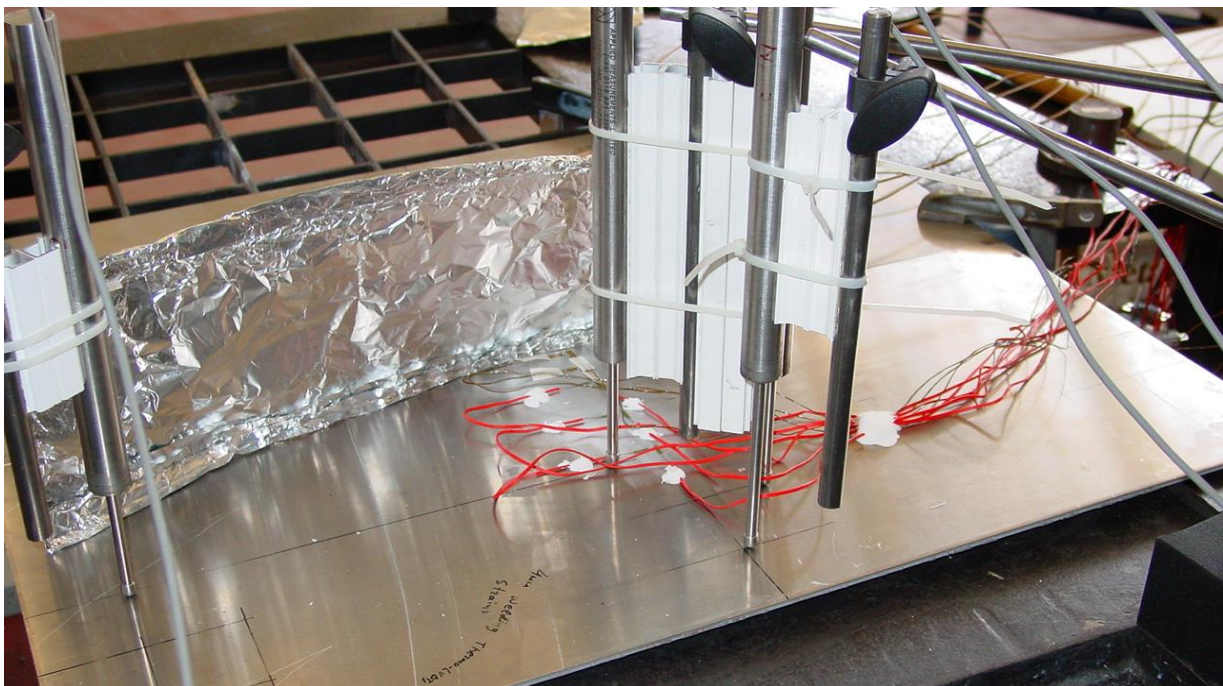
Στο κέντρο των δοκιμών και σε άξονα κάθετο προς τον άξονα συγκόλλησης, κολλήθηκαν μονοαξονικά επιμηκνσιομέτρα προσανατολισμένα παράλληλα και κάθετα στη γραμμή συγκόλλησης, σε επιλεγμένες αποστάσεις από αυτή και στις δύο επιφάνειες των δοκιμών. Τα επιμηκνσιομέτρα προστατεύθηκαν ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή τους από τους εκχυτήρες που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Στα ελάσματα εγκαταστάθηκαν και γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης (LVDTs) τοποθετημένοι σε επιλεγμένες θέσεις στην επιφάνεια συγκόλλησης των ελασμάτων προς μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακών παραμορφώσεων εξαιτίας της συγκόλλησης. Οι γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης ήταν και αυτοί προστατευμένοι ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή τους από τους εκχυτήρες που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Σημειώνεται ότι στις θέσεις εγκατάστασης των επιμηκυνσιομέτρων υπήρχαν και θερμοστοιχεία ώστε να καταγράφεται και η θερμοκρασία, λόγω συγκόλλησης, στις θέσεις μέτρησης των μικροπαραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα των θερμικών κύκλων που προέκυψαν αναλύθηκαν στην Ενότητα II. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν:

- Επιμηκυνσιομέτρα του οίκου KYOWA τύπου KFU-5-120-C123H1M3 με θερμοκρασία λειτουργίας ως και 250°C
- Επιμηκυνσιομέτρα του οίκου KYOWA τύπου KFG-5-120-C123L1M2R
- Κόλλα υψηλών θερμοκρασιών PL-6 του οίκου KYOWA για την κόλληση των επιμηκυνσιομέτρων KFU-5-120-C123H1M3
- Κυανο-ακρυλική κόλλα για την κόλληση των επιμηκυνσιομέτρων τύπου KFG-5-120-C123L1M2R
- Γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης του οίκου APPLIED MEASUREMENTS Ltd. τύπου AML/ED±25mm-s και AML/ED±50mm-s με εύρος μέτρησης γραμμικής μετατόπισης ±25mm και ±50mm αντίστοιχα.
- Καταγραφέας ηλεκτρικού σήματος επιμηκυνσιομέτρων του οίκου HBM, μοντέλο SPIDER-8 με το συνεργαζόμενο λογισμικό διαχείρισης δεδομένων του ίδιου οίκου, CATMAN v.4.5

Στην Εικόνα 10.4 φαίνεται αντιπροσωπευτική φωτογραφία των προς συγκόλληση δοκιμίων με εγκατεστημένα σε αυτά τις διατάξεις μέτρησης των μεταβατικών θερμικών, παραμορφώσεων και στρεβλώσεων.



Εικόνα 10.4 Διατάξεις μέτρησης των θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης

Κεφάλαιο 11°

Αποτελέσματα και συζήτηση

11.1 Μέτρηση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις ελασμάτων μικρών διαστάσεων – Διερεύνηση σφαλμάτων της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής

11.1.1 Μέτρηση παραμενουσών τάσεων

Σε δοκίμια από κράμα αλουμινίου 5083-H111 πάχους 5mm και διαστάσεων 175mm x 150mm πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με την μέθοδο GMAW και παραμέτρους, αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 11.1 (Ενότητα 2). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ισχυρό περιορισμό των ελασμάτων ο οποίος αφαιρέθηκε αμέσως μετά το τέλος της συγκόλλησης. Στον Πίνακα 11.2 φαίνονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος.

Πίνακας 11.1 Βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm διαστάσεων 700x300mm²

Κράμα - Πάχος	Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή αερίου προστασίας (lit/min)	Στρώσεις
AA5083-H111 (5mm)	26	165	67	20	1

Πίνακας 11.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες του AA5083-H111

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε κόπωση (MPa)	Σκληρότητα (HV)
AA5083-H111	315	230	70,3	160	96

Τις δοκιμές συγκόλλησης ακολούθησαν μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής. Σημειώνεται εκ των προτέρων, πως οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με κύριο σκοπό την εξοικείωση του ερευνητή με την χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη και όχι για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης, καθώς ο ισχυρός περιορισμός και, κυρίως, το μικρό μέγεθος των ελασμάτων (Παράγραφος 7.3.2) δεν επιτρέπει την πλήρη ανάπτυξη των μέγιστων δυνατών διαμηκών εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων.

Στον Πίνακα 11.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της ροζέτας επιμηκυνσιομέτρων τύπου EA-13062RE-120 που χρησιμοποιήθηκε ενώ στην Εικόνα 11.1 και οι θέσεις μέτρησης των παραμενουσών τάσεων.

Πίνακας 11.3 Τα χαρακτηριστικά της ροζέτας επιμηκυνσιομέτρων τύπου EA-13062RE-120



Εικόνα 11.1 Θέσεις μέτρησης των παραμενουσών τάσεων και αποστάσεις από τον άξονα συγκόλλησης

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων σε μη συγκολλημένο δοκίμιο του βασικού μετάλλου, διαστάσεων 175x300mm², προκειμένου να καταγραφούν οι παραμένουσες τάσεις λόγω της ψυχρής κατεργασίας σκλήρυνσης του ελάσματος. Οι τάσεις που προέκυψαν (ως μέσος όρος 10 μετρήσεων σε τυχαίες θέσεις) φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίν. 11.4).

Πίνακας 11.4 Τιμές παραμενουσών τάσεων μη συγκολλημένου δοκιμίου

σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	T_{xy} (MPa)
77	45	14

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων στο κέντρο των συγκολλημένων δοκιμίων σε μια ζώνη κάθετη στον άξονα συγκόλλησης και σε αποστάσεις από αυτόν 10, 12, 14, 20, 24mm (Εικ. 11.1).

Τα αποτελέσματα των σ_x και σ_y καθώς και της τ_{xy} , για τις διάφορες θέσεις, φαίνονται στον Πίνακα 11.5.

Πίνακας 11.5 Παραμένουσες τάσεις συγκολλημένου δοκιμίου

Θέση	Απόσταση από άξονα συγκόλλησης (mm)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
1	10	260,3	160,7	42,9
2	12	254,5	115,8	18,3
3	14	242,3	119,7	19,3
4	20	94,0	72,0	5,0
5	24	108,7	88,2	14,8

Από τον Πίνακα 11.5 προκύπτει:

- Οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις στο κέντρο του δοκιμίου είναι εφελκυστικές μέχρι και σε απόσταση 24mm κάθετα στον άξονα συγκόλλησης
- Καθώς η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης αυξάνει, οι τιμές της μέγιστης παραμένουσας τάσης βαθμιαία μειώνεται
- Σε απόσταση ως και 14mm από τον άξονα συγκόλλησης καταμετρώνται μέγιστες παραμένουσες τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του υλικού
- Οι ελάχιστες, σ_y , παραμένουσες τάσεις είναι κατά πολύ μικρότερες των μέγιστων, σ_x , στις αντίστοιχες θέσεις και σε κάθε περίπτωση, πολύ μικρότερες του ορίου διαρροής του υλικού

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων, λόγω συγκόλλησης, με τις δεδομένες συνθήκες του Πίνακα 11.1 εξαιτίας των μικρών διαστάσεων των δοκιμίων και του ισχυρού περιορισμού που εφαρμόστηκε σε αυτά κατά τη συγκόλληση. Οι παράμετροι αυτοί αιτιολογούν και τις πάνω από το όριο διαρροής τιμές που προέκυψαν και μάλιστα σε μεγάλο εύρος απόστασης από τον άξονα συγκόλλησης (Πίν. 11.5).

11.1.2 Διερεύνηση σφαλμάτων από τη διαδικασία διάνοιξης της οπής

Με δεδομένες τις μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων σε μη συγκολλημένα δοκίμια (Πιν. 11.4), δοκίμιο των ίδιων διαστάσεων (175x300mm²), του βασικού κράματος αλουμινίου, εισήχθη σε

φούρνο, θερμάνθηκε στους 370°C για περίπου 15min και αφέθηκε να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου, προκειμένου να πραγματοποιηθεί πλήρης ανόπτηση του μετάλλου.

Στη συνέχεια, έγινε η υπόθεση ότι η ανωτέρω διαδικασία επέφερε πλήρη χαλάρωση των τάσεων του υλικού. Μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων σε τυχαία σημεία στην περιοχή του κέντρου του δοκιμίου έδωσαν μέσο όρο τιμών (μέσος όρος 10 μετρήσεων) για τη μέγιστη κύρια τάση της τάξης των 35 MPa. Έτσι, και με βάση την υπόθεση ότι η κατεργασία οδήγησε σε πλήρη χαλάρωση των τάσεων, η τάση αυτή (35 MPa) αποδίδεται σε σφάλματα κατά τη διαδικασία διάνοιξης της οπής (π.χ. εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας του τρυπανιού, της τυχόν εκκεντρότητας του κ.λπ.), τα οποία προστίθενται σε όλες τις πραγματοποιούμενες μετρήσεις.

Συνολικά, και με βάση τα παραπάνω, στα αποτελέσματα των μετρήσεων με την τεχνική διάτρησης τυφλής οπής, που παρατίθενται στη διατριβή, δικαιολογείται σφάλμα της τάξης του 10 - 15%.

11.2 Πειραματική μελέτη μεταβατικών θερμικών τάσεων, παραμορφώσεων στρεβλώσεων και παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων

Οι συγκολλήσεις σε δοκίμια διαστάσεων 700x300mm² πάχους 4mm, 5mm και 6mm πραγματοποιήθηκαν με τις συνθήκες που φαίνονται στον Πίνακα 11.6 (Ενότητα 2), ενώ οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των διατιθέμενων κραμάτων υπενθυμίζονται στον Πίνακα 11.7.

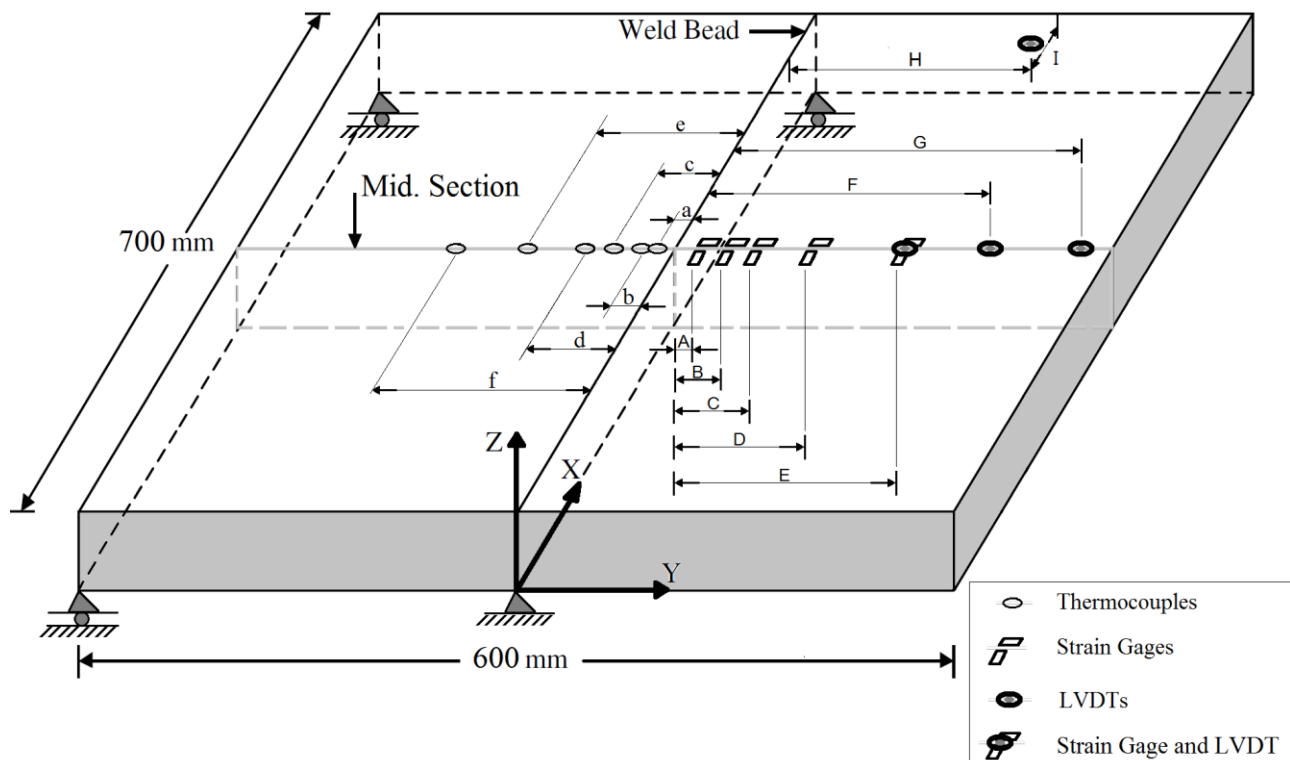
Πίνακας 11.6 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη

Κράμα - Πάχος	Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή αερίου προστασίας (lit/min)	Στρώσεις
AA5083-H116 (4mm)	24	160	65	20	1
AA5083-H111 (5mm)	25	170	65	20	1
AA5383-H116 (6mm)	28	190	65	20	1 ^η
			65		2 ^η

Πίνακας 11.7 Βασικές μηχανικές ιδιότητες των διατιθέμενων κραμάτων αλουμινίου

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε κόπωση (MPa)	Σκληρότητα (HV)
AA5083-H111	315	230	70,3	160	87
AA5083-H116	317	228	70,3	160	96
AA5383-H116	305	220	70,3	160	98

Πειραματική μελέτη των μεταβατικών θερμικών τάσεων, στρεβλώσεων - παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων πραγματοποιήθηκε σε ελάσματα πάχους 4 και 6mm, ενώ σε ελάσματα πάχους 5mm πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη στρεβλώσεων - παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων. Σημειώνεται ότι στο ένα από τα δύο υπό συγκόλληση ελάσματα (αυτό που ήταν εγκατεστημένα τα θερμοστοιχεία) υπήρχαν περιορισμοί στη μετατόπιση (Εικ. 11.2) ενώ στο άλλο (αυτό που ήταν εγκατεστημένες οι υπόλοιπες μετρητικές διατάξεις), δεν υπήρχε κανένας περιορισμός μετατόπισης (Εικ. 11.2). Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά στους περιορισμούς, στα δυο άκρα του άξονα συγκόλλησης η συγκράτηση των ελασμάτων ήταν τέτοια ώστε να αντιστοιχεί σε μια άρθρωση και σε μια κύλιση ενώ, στις δύο άλλες κορυφές του υπό συγκράτηση ελασματος η συγκράτηση ήταν τέτοια ώστε να αντιστοιχεί σε κύλιση, (Εικ. 11.2). Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπεται να αναπτυχθούν οι τυχόν διαμήκεις καμπικές παραμορφώσεις ενώ ταυτόχρονα, την αναπτυσσόμενη γωνιακή παραμόρφωση την παραλαμβάνει εξολοκλήρου η πλάκα στην οποία και είναι τοποθετημένες οι αντίστοιχες μετρητικές διατάξεις (LVDTs). Λόγω της συμμετρίας ως προς τον άξονα συγκόλλησης, οι καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, που παρατίθενται παρακάτω, προκύπτουν ως το διπλάσιο ή το ήμισυ (ανάλογα αν είναι αρνητικές ή θετικές αντίστοιχα) των τιμών κατακόρυφης μετατόπισης του ελεύθερου δοκιμίου.



Εικόνα 11.2 Γενική σχηματική διάταξη επιμηκυνσιομέτρων, γραμμικών αισθητήρων μετατόπισης και θερμοστοιχείων.

$a = 10\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $c = 40\text{mm}$, $d = 60\text{mm}$, $e = 100\text{mm}$, $f = 150\text{mm}$

$A = 20\text{mm}$, $B = 40\text{mm}$, $C = 60\text{mm}$, $D = 100\text{mm}$, $E = 150\text{mm}$, $F = 200\text{mm}$, $G = 250\text{mm}$,

$H = 150\text{mm}$, $I = 50\text{mm}$

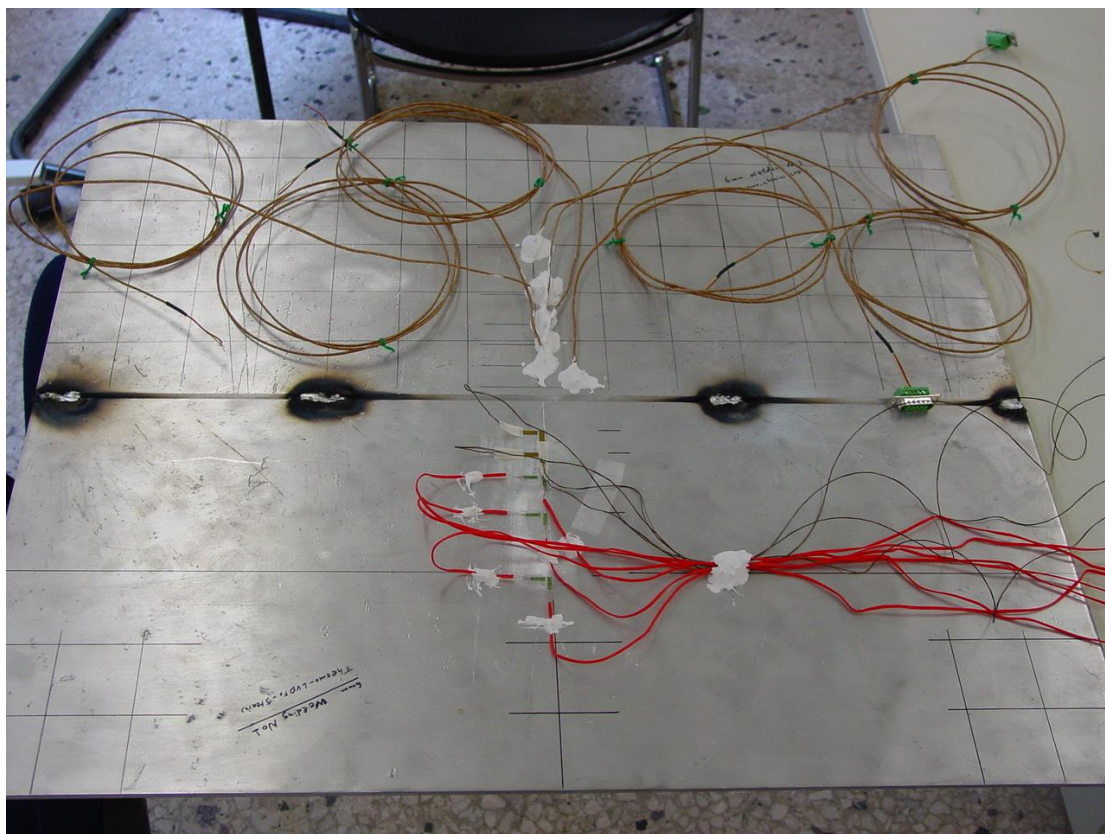
11.2.1 Μεταβατικές θερμικές τάσεις, στρεβλώσεις - παραμορφώσεις

Στην Εικόνα 11.2 φαίνεται σχηματικά η διάταξη των επιμηκνσιομέτρων και γραμμικών αισθητήρων μετατόπισης στο ελεύθερο κατά τη συγκόλληση έλασμα αλλά και αυτή των θερμοστοιχείων στο υπό περιορισμούς έλασμα (Ενότητα 2). Σημειώνεται ότι επιμηκνσιόμετρα υπήρχαν και στις δύο επιφάνειες του ελάσματος στις ίδιες ακριβώς θέσεις ενώ τα θερμοστοιχεία στο υπό περιορισμό έλασμα ήταν σε αντισυμμετρικές, ως προς τον άξονα συγκόλλησης, θέσεις με τις θέσεις των επιμηκνσιομέτρων.

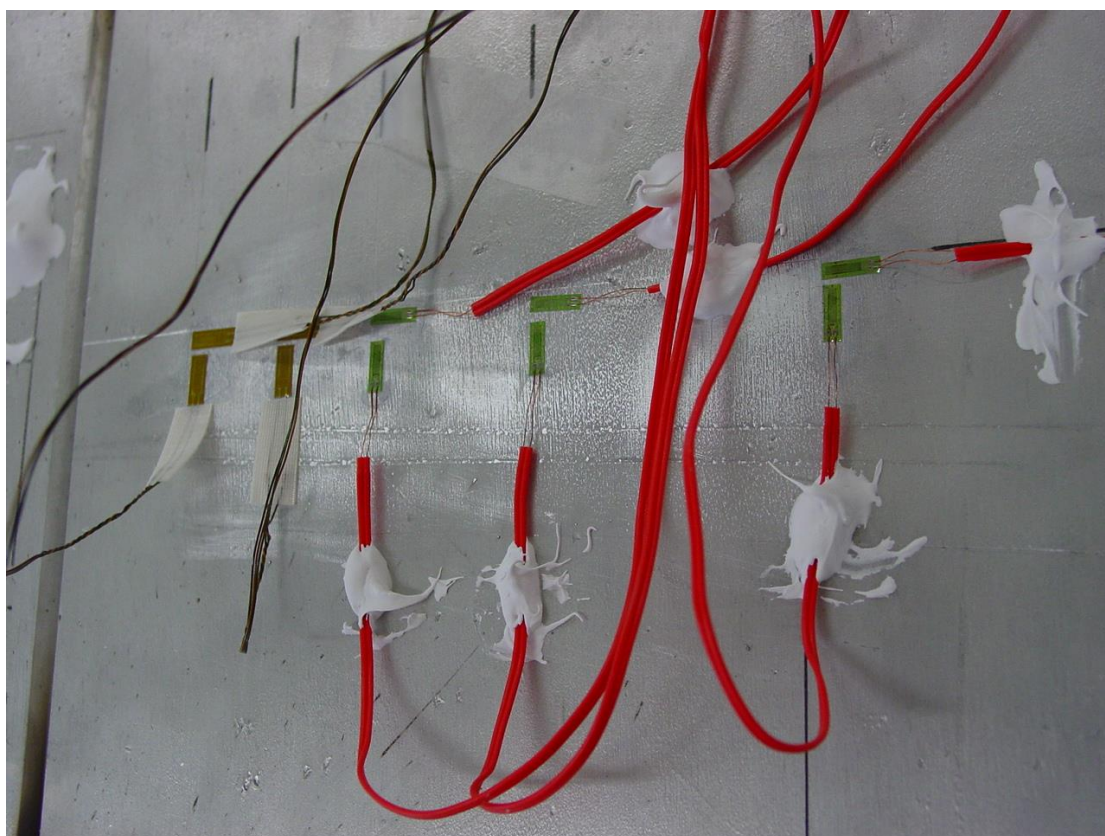
Στις Εικόνες που ακολουθούν (Εικ. 11.3 - 11.9), φαίνεται το σύνολο των χρησιμοποιούμενων μετρητικών διατάξεων λίγο πριν την πραγματοποίηση των δοκιμών.



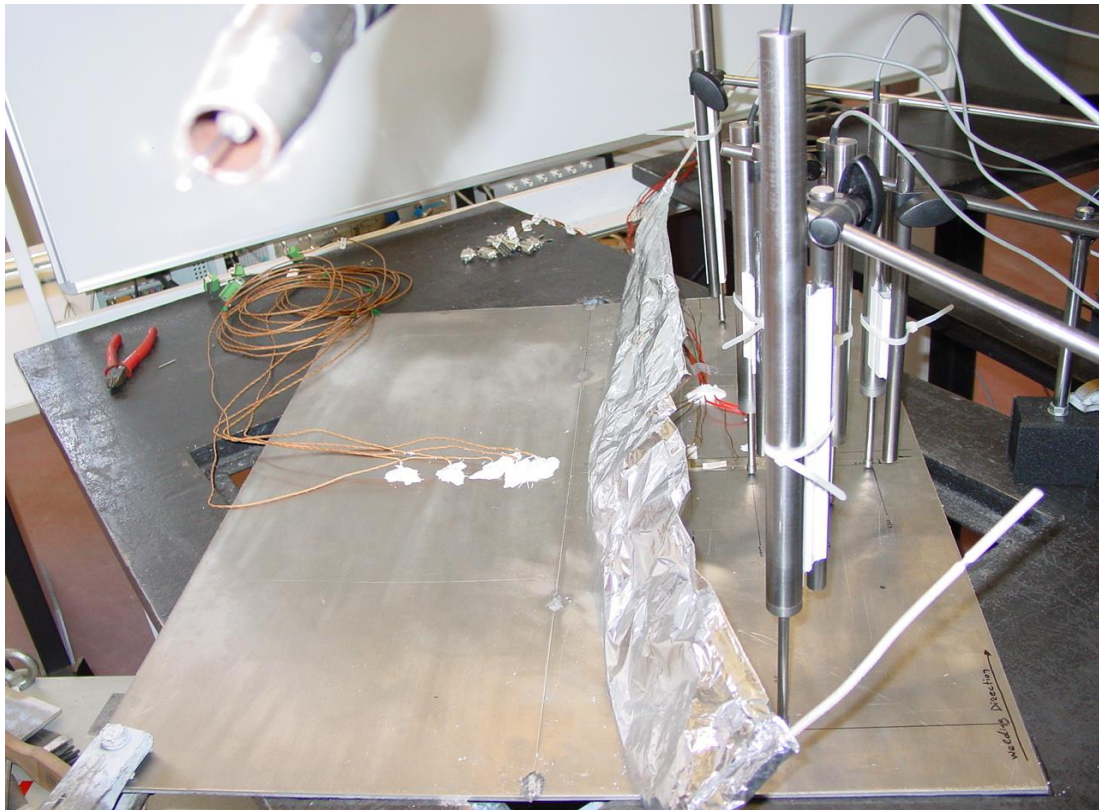
Εικόνα 11.3 Γενική άποψη του χώρου διεξαγωγής των πειραμάτων



Εικόνα 11.4 Ελάσματα πάχους 6mm με εγκατεστημένα τα επιμηκυσσιόμετρα και τα θερμοστοιχεία



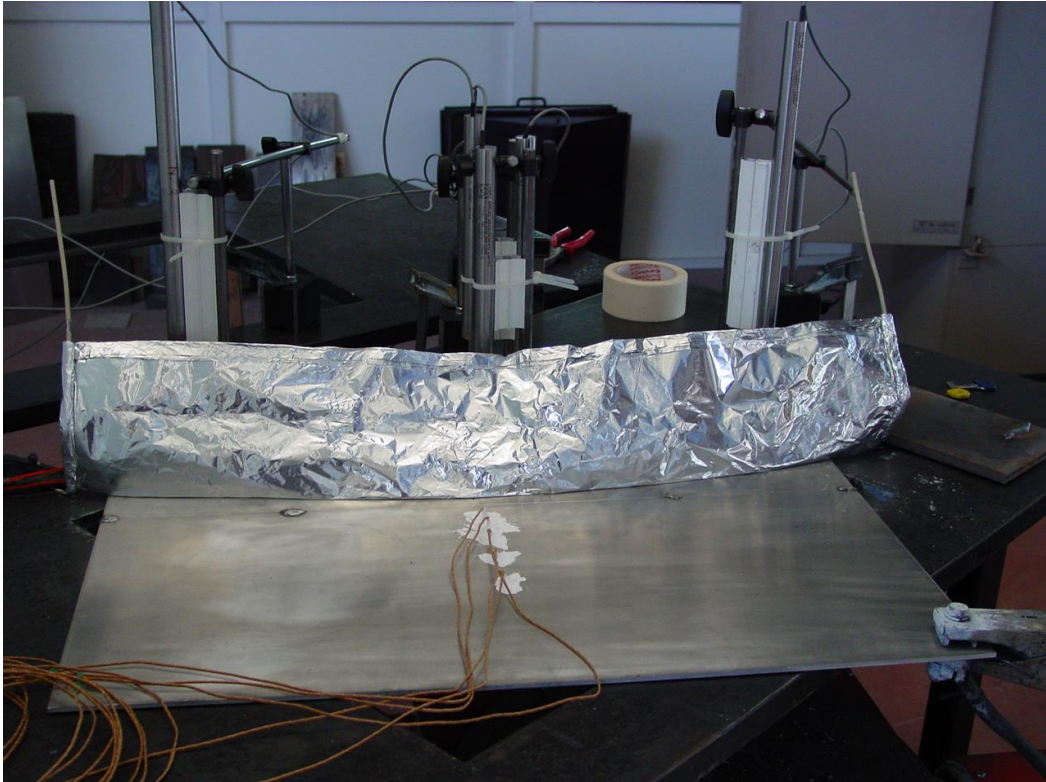
Εικόνα 11.5 Άποψη της περιοχής των εγκατεστημένων επιμηκυσσιόμετρων



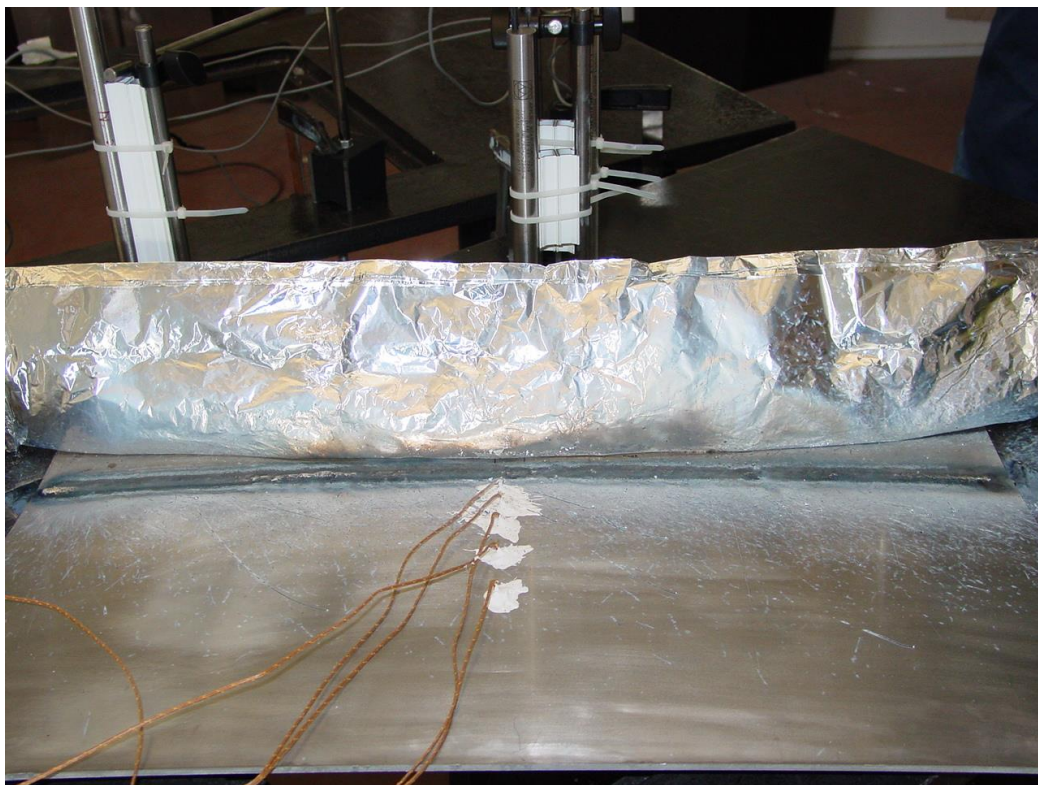
Εικόνα 11.6 Άποψη του συνόλου των διατάξεων λίγο πριν τη δοκιμή συγκόλλησης



Εικόνα 11.7 Άποψη του χωρίς περιορισμούς ελάσματος



Εικόνα 11.8 Άποψη του ελάσματος με τα εγκατεστημένα θερμοστοιχεία λίγο πριν την εφαρμογή των περιορισμών και τη δοκιμή συγκόλλησης



Εικόνα 11.9 Άποψη του ελάσματος με τα εγκατεστημένα θερμοστοιχεία αμέσως μετά τη δοκιμή συγκόλλησης

Έπειτα από τη διαδικασία των δοκιμών και πριν την επεξεργασία των ληφθέντων δεδομένων, ο έλεγχος στις μετρητικές διατάξεις και η μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων (Εικ. 11.10) έδειξε ότι:

- Κανένα από τα μετρητικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν φάνηκε να έχει καταστραφεί ή αλλοιωθεί από τη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε από τη συγκόλληση
- Η προστασία των επιμηκυνσιομέτρων και των γραμμικών αισθητήρων μετατόπισης κρίθηκε επαρκής καθώς δεν παρατηρήθηκε εκτόξευση εκχυτήρων στην περιοχή που αυτά ήταν εγκατεστημένα
- Τα συγκολλημένα δοκίμια και από τα τρία διατιθέμενα πάχη παρουσίασαν γωνιακή και διαμήκη καμπτική παραμόρφωση
- Τα συγκολλημένα δοκίμια πάχους 6mm (δύο στρώσεις συγκόλλησης) δείχνουν να έχουν μεγαλύτερη γωνιακή παραμόρφωση

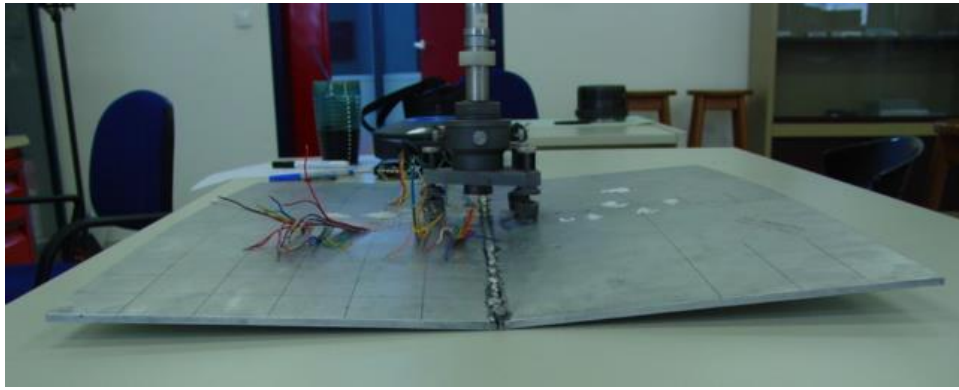
Στη συνέχεια, ακολούθησε επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν οπότε προέκυψαν οι καμπύλες που ακολουθούν και οι συνεπαγόμενες από αυτές παρατηρήσεις. Στα διαγράμματα:

X1 - 150 : Θέση μέτρησης LVDT 150mm από τον άξονα συγκόλλησης, 50mm από την ακμή του δοκιμίου(Εικ. 11.2)

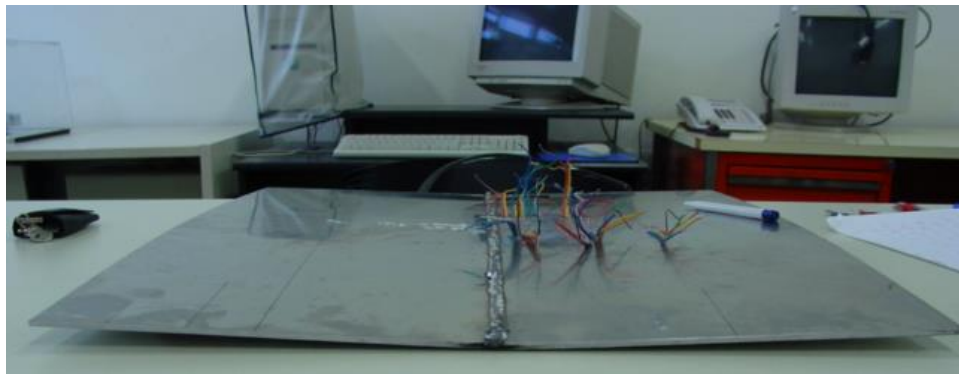
Y1 - 150 : Θέση μέτρησης LVDTs 150mm από τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή των συγκολλημένων δοκιμίων (Εικ. 11.2)

Y2 - 200 : Θέση μέτρησης LVDT 200mm από τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή των συγκολλημένων δοκιμίων (Εικ. 11.2)

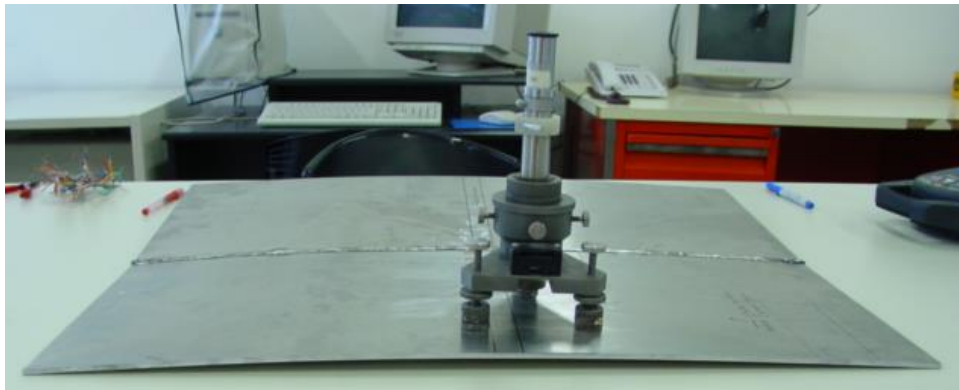
Y3 - 250 : Θέση μέτρησης LVDTs 250mm από τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή των συγκολλημένων δοκιμίων (Εικ. 11.2)



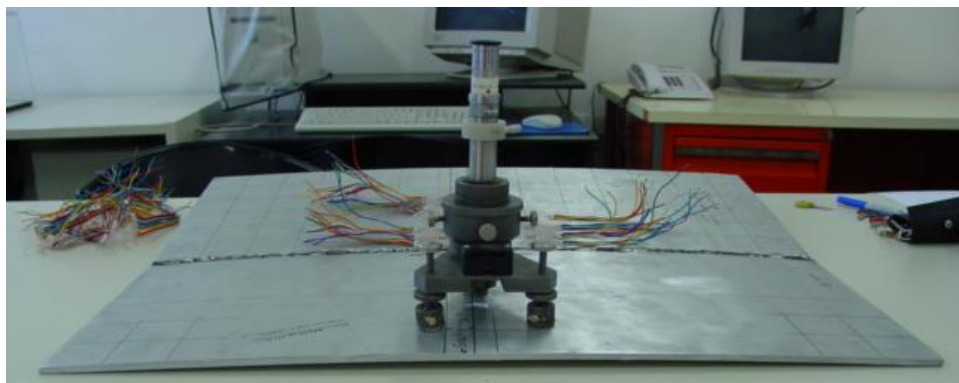
(α)



(β)



(γ)

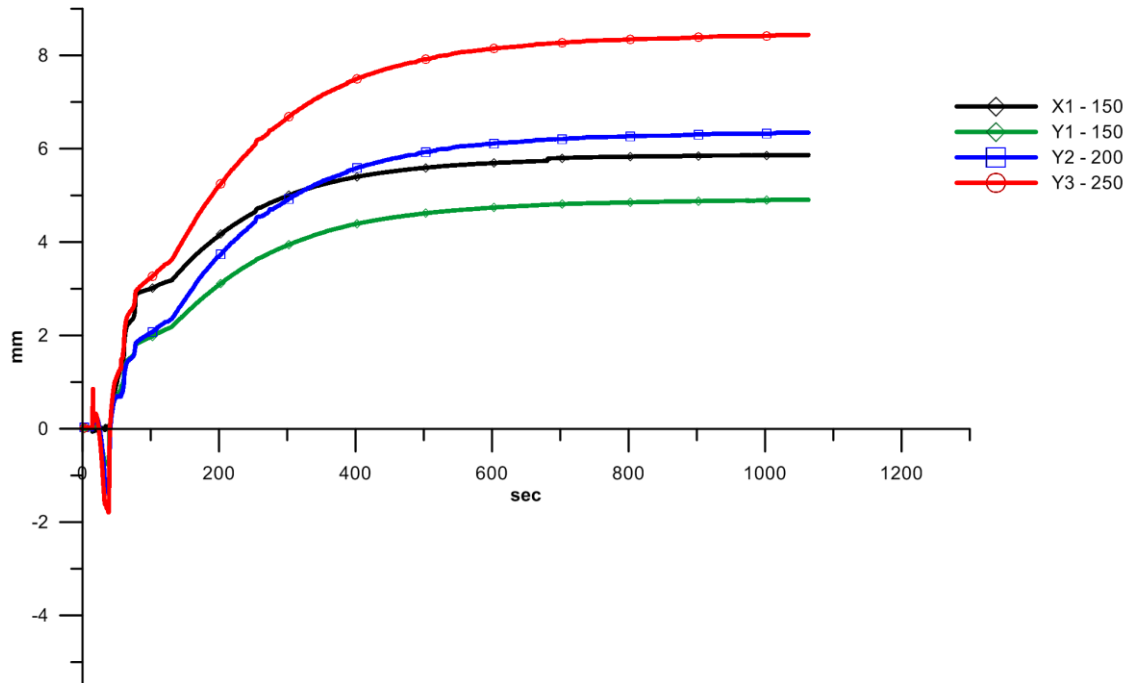


(δ)

Εικόνα 11.10 Γωνιακή μετατόπιση σε συγκολλημένα ελάσματα α) πάχους 4mm, β) πάχους 6mm
Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση σε συγκολλημένα ελάσματα γ) πάχους 4mm, δ) πάχους 6mm

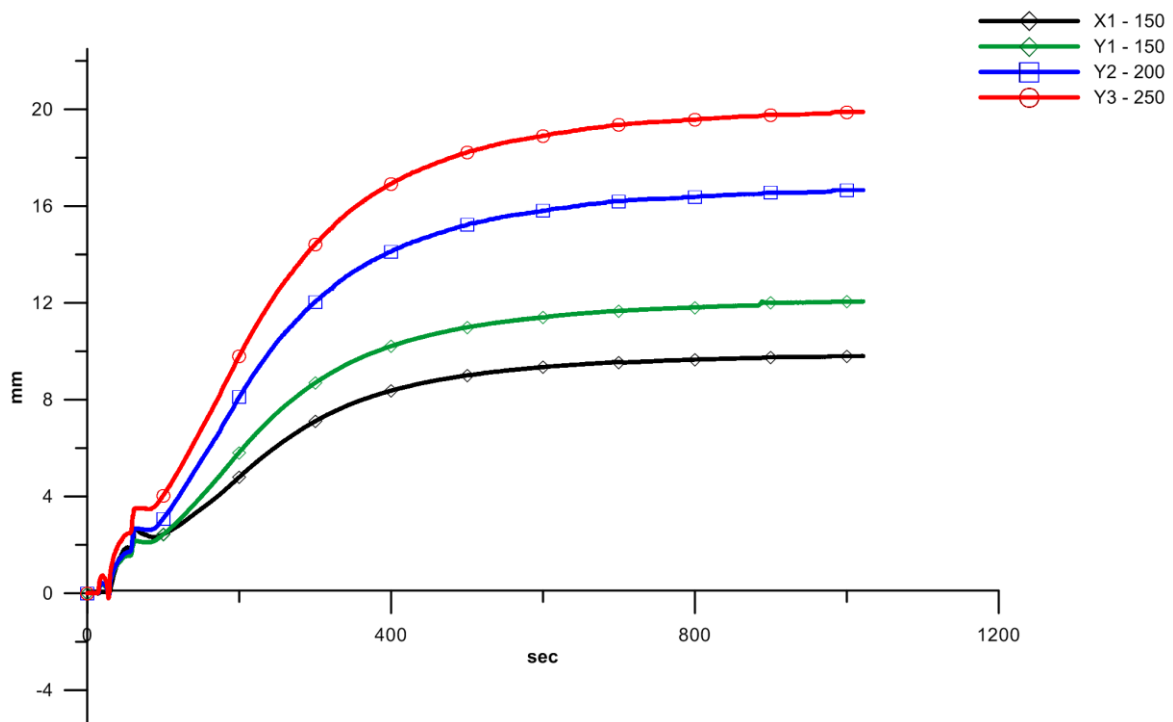
11.2.1.1 Καμπύλες Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου

Συγκόλληση ελασμάτων πάχους 4mm



Εικόνα 11.11 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης – Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 4mm

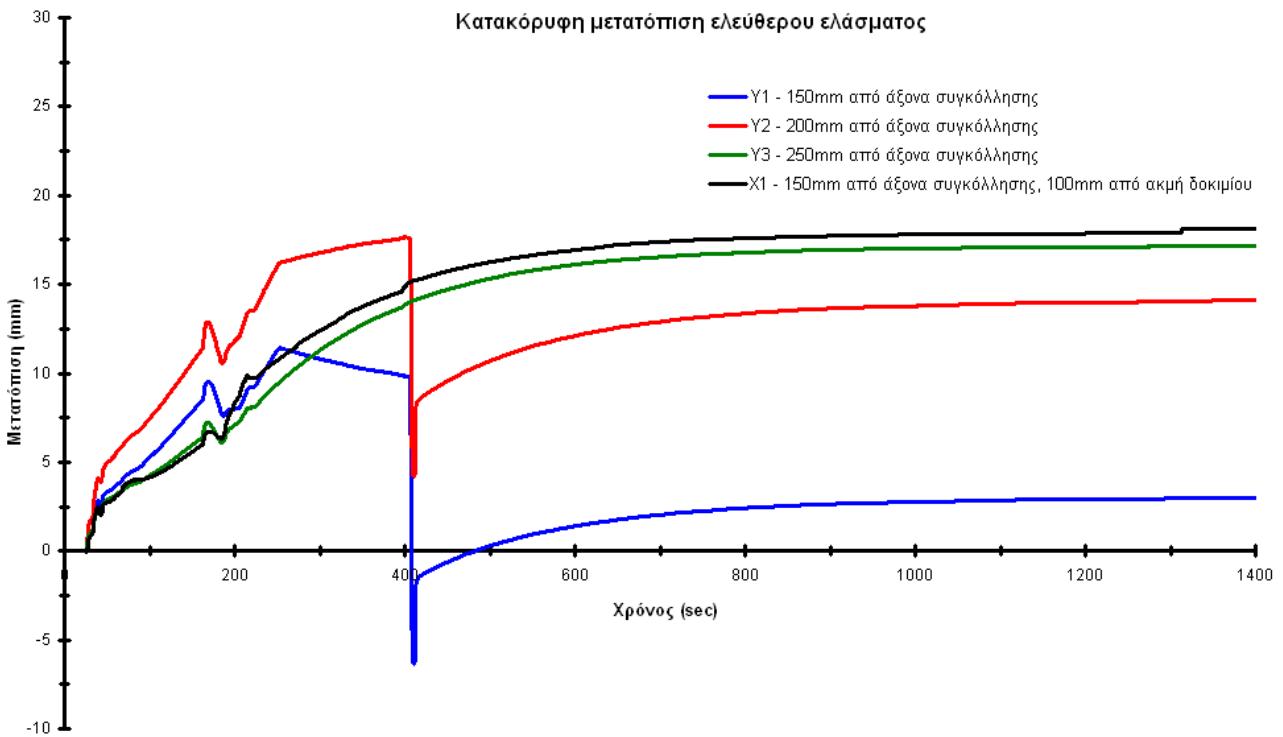
Συγκόλληση ελασμάτων πάχους 5mm



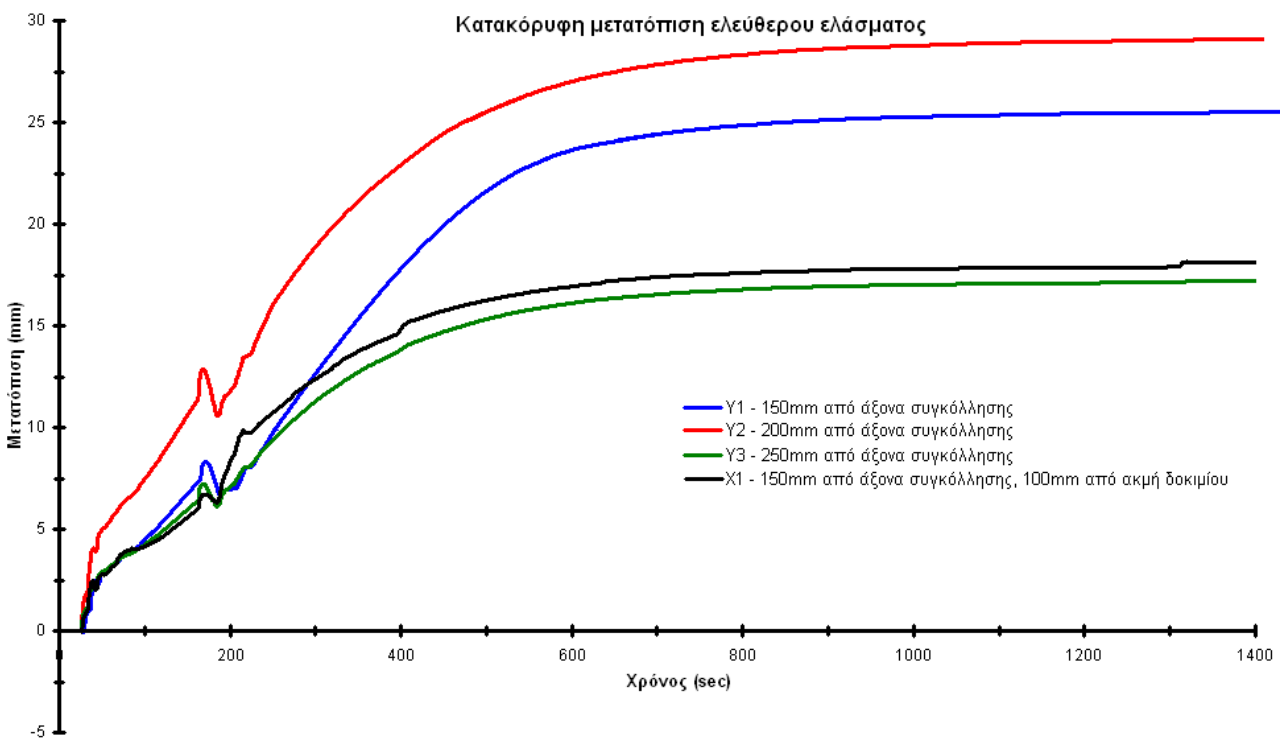
Εικόνα 11.12 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης – Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 5mm



Συγκόλληση ελασμάτων πάχους 6mm



Εικόνα 11.13 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης – Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 6mm. Όπως προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα



Εικόνα 11.14 Καμπύλη Κατακόρυφης μετατόπισης – Χρόνου σε συγκολλήσεις πάχους 6mm. Μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων

Παρατηρήσεις

➤ Οι μετρήσεις στα σημεία '9' και '10' (Εικ. 11.2), έδωσαν σε κάθε περίπτωση σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα γεγονός που υποδηλώνει ότι τα συγκολλημένα ελάσματα δεν εμφάνισαν στρεπτική παραμόρφωση. Έτσι για λόγους καλύτερης ανάγνωσης των καμπυλών 'Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου', εμφανίζονται στα διαγράμματα μόνο οι μετρήσεις από το σημείο '9' (Εικ. 11.2) ως X1 - 150.

➤ Από τα διαγράμματα Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου (Εικ. 11.11 - 11.14) προκύπτουν τα εξής:

○ Σε ότι αφορά στη συγκόλληση ελασμάτων πάχους 4mm (Εικ. 11.11), αρχικά, καθώς η διαδικασία συγκόλλησης αρχίζει να εξελίσσεται, η κατακόρυφη μετατόπιση, οφειλόμενη σε γωνιακή παραμόρφωση, παίρνει αρνητικές τιμές (όπου ως αρνητικός ορίζεται ο άξονας με κατεύθυνση προς τη ρίζα της συγκόλλησης) εξαιτίας της υπερθέρμανσης και τήξης των ακμών συγκόλλησης, που συνεπάγεται και διαστολή του υλικού. Η αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση αποκτά τη μέγιστη αρνητική τιμή της, περίπου 2mm, τη στιγμή που το τόξο περνά από τον εγκάρσιο (σε σχέση με τον άξονα συγκόλλησης) άξονα στον οποίο είναι εγκατεστημένα τα LVDTs.

Καθώς το τόξο απομακρύνεται από την περιοχή αυτή το μέταλλο στερεοποιείται και ξεκινά η απόψυξη και η συστολή του. Κατά συνέπεια, σταδιακά η κατακόρυφη μετατόπιση αρχίζει να αυξάνει, αποκτά θετικές τιμές (θετικός άξονας αυτός με κατεύθυνση το όπλο συγκόλλησης) και τελικά στο τέλος του κύκλου απόψυξης των δοκιμίων και μετά την πάροδο περίπου 1000sec από την έναρξη της συγκόλλησης καταγράφεται η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της τάξης των 8,25mm. Λόγω της ύπαρξης διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης, τα LVDTs που βρίσκονται στη θέση '6' και '9', (Εικ. 11.2) παρόλο που βρίσκονται στον ίδιο διαμήκη άξονα, παράλληλο με τη γραμμή συγκόλλησης, παρουσιάζουν μια διαφορά στην κατακόρυφη μετατόπιση της τάξης του 1mm.

○ Σε ότι αφορά στη συγκόλληση ελασμάτων πάχους 5mm (Εικ. 11.12), δεν παρατηρείται αρχική αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση, οφειλόμενη σε γωνιακή παραμόρφωση, πιθανότατα εξαιτίας της μεγαλύτερης αντίστασης του υλικού λόγω του μεγαλύτερου πάχους του. Η μετατόπιση είναι, καθ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης, αλλά και κατά τον κύκλο απόψυξης των ελασμάτων, θετική και παίρνει τη μέγιστη τιμή της μετά την πάροδο περίπου 1000sec από την έναρξη της συγκόλλησης, η οποία είναι της τάξης των 20mm. Η διακύμανση των τιμών (αλλά όχι της μορφής) των καμπυλών οφείλεται προφανώς στις διαφορετικές θέσεις μέτρησης και όπως και στην περίπτωση των ελασμάτων πάχους 4mm, στη δημιουργία διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης.

ο Σε ότι αφορά στη συγκόλληση των ελασμάτων πάχους 6mm (Εικ. 11.13 – 11.14), η κατακόρυφη μετατόπιση, οφειλόμενη σε γωνιακή παραμόρφωση, που δημιουργήθηκε ήταν υπερβολική και πέρα από την εκτίμηση του ερευνητή. Κατά συνέπεια, σε δύο θέσεις μέτρησης η κατακόρυφη μετατόπιση έγινε ίση με το εύρος μέτρησης των LVDTs με αποτέλεσμα ουσιαστικά να δημιουργηθεί στο σημείο εκείνο περιορισμός της μετατόπισης του ελάσματος (Εικ. 11.13). Προκειμένου να αποφευχθεί καταστροφή των αισθητήρων, αυτοί ρυθμίστηκαν εκ νέου οπότε και συνεχίστηκε η λήψη μετρήσεων μέχρι να υπάρξει τελική ισορροπία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επεξεργάστηκαν και παρουσιάζονται στην Εικόνα 11.14. Παρόλο που δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί το εύρος σφάλματος στις επεξεργασμένες καμπύλες, ωστόσο, είναι φανερή η υπερβολική τελική κατακόρυφη μετατόπιση της τάξης των 32mm. Σε ότι αφορά την πρώτη στρώση συγκόλλησης οι παρατηρήσεις που ισχύουν είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν τις συγκολλήσεις των ελασμάτων πάχους 5mm, δηλαδή, δεν παρατηρείται αρχική αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση, πιθανότατα εξαιτίας της μεγαλύτερης αντίστασης του υλικού λόγω του μεγαλύτερου πάχους του. Κατά τη δεύτερη στρώση ωστόσο, παρατηρείται αρχικά, μείωση των τιμών της κατακόρυφης μετατόπισης η οποία αποκτά και πάλι θετικό ρυθμό μετά το πέρασμα του τόξου από το μέσο μήκος των δοκιμίων. Η ισορροπία στα ελάσματα επέρχεται μετά την πάροδο περίπου 1500sec.

11.2.1.2 Καμπύλες Μεταβατικών Παραμορφώσεων - Χρόνου

Σημειώνεται ότι, οι κωδικοί που φαίνονται στις επεξηγηματικές λεζάντες των διαγραμμάτων που ακολουθούν (π.χ. X20U, Y40D, X100U, Y150D, ..., κ.λπ.) προκύπτουν σύμφωνα με τις συμβάσεις που φαίνονται στις επόμενες γραμμές (Βλ. Εικ. 11.2).

Κάθε κωδικός αποτελείται από τρία μέρη:

▪ Το πρώτο μέρος (σύμβολο Χ ή Υ), δείχνει τον άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το επιμηκυνσιόμετρο:

X: Διαμήκης άξονας, παράλληλος με τη γραμμή συγκόλλησης

Y: Εγκάρσιος άξονας, κάθετος στη γραμμή συγκόλλησης

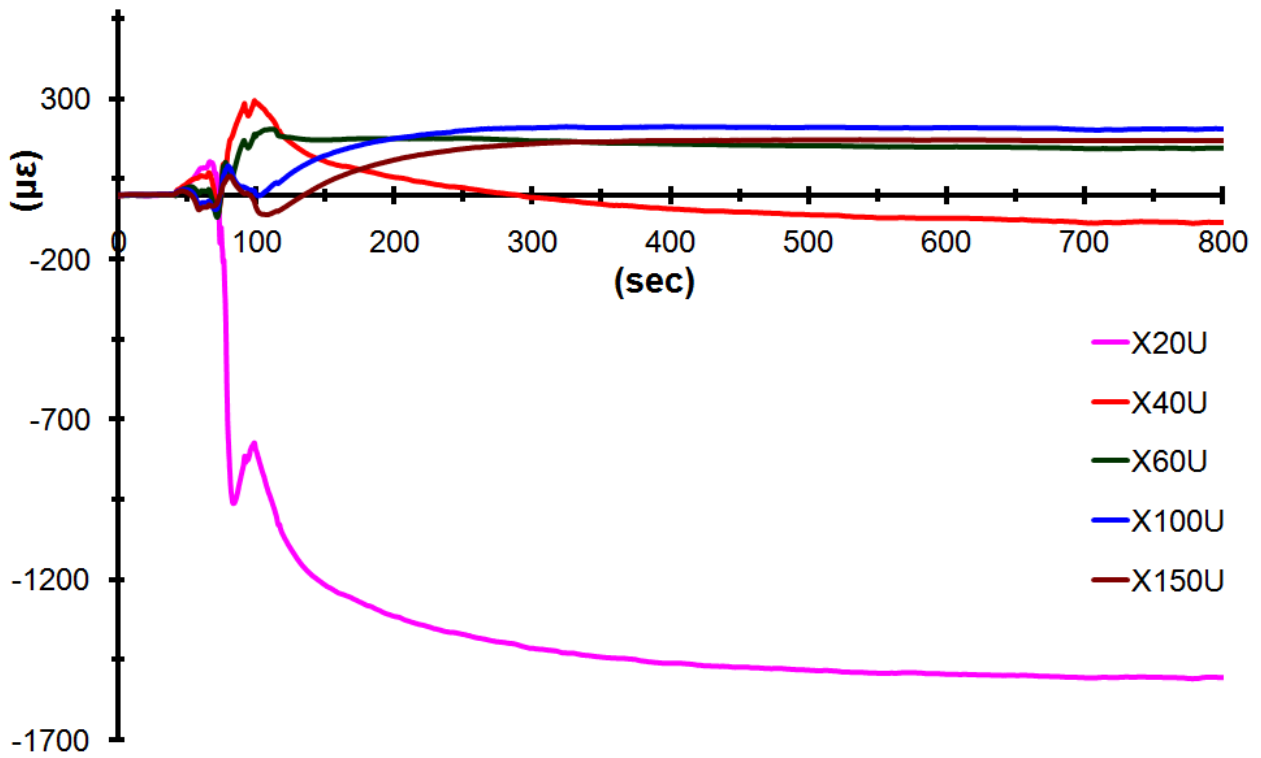
▪ Το δεύτερο μέρος (αριθμός) που ακολουθεί, δείχνει την απόσταση της θέσης που είναι εγκατεστημένο το επιμηκυνσιόμετρο, από τον άξονα συγκόλλησης (Εικ. 11.2).

▪ Το τρίτο μέρος (λατινικό σύμβολο), δείχνει την επιφάνεια του ελάσματος στο οποίο είναι τοποθετημένο το επιμηκυνσιόμετρο:

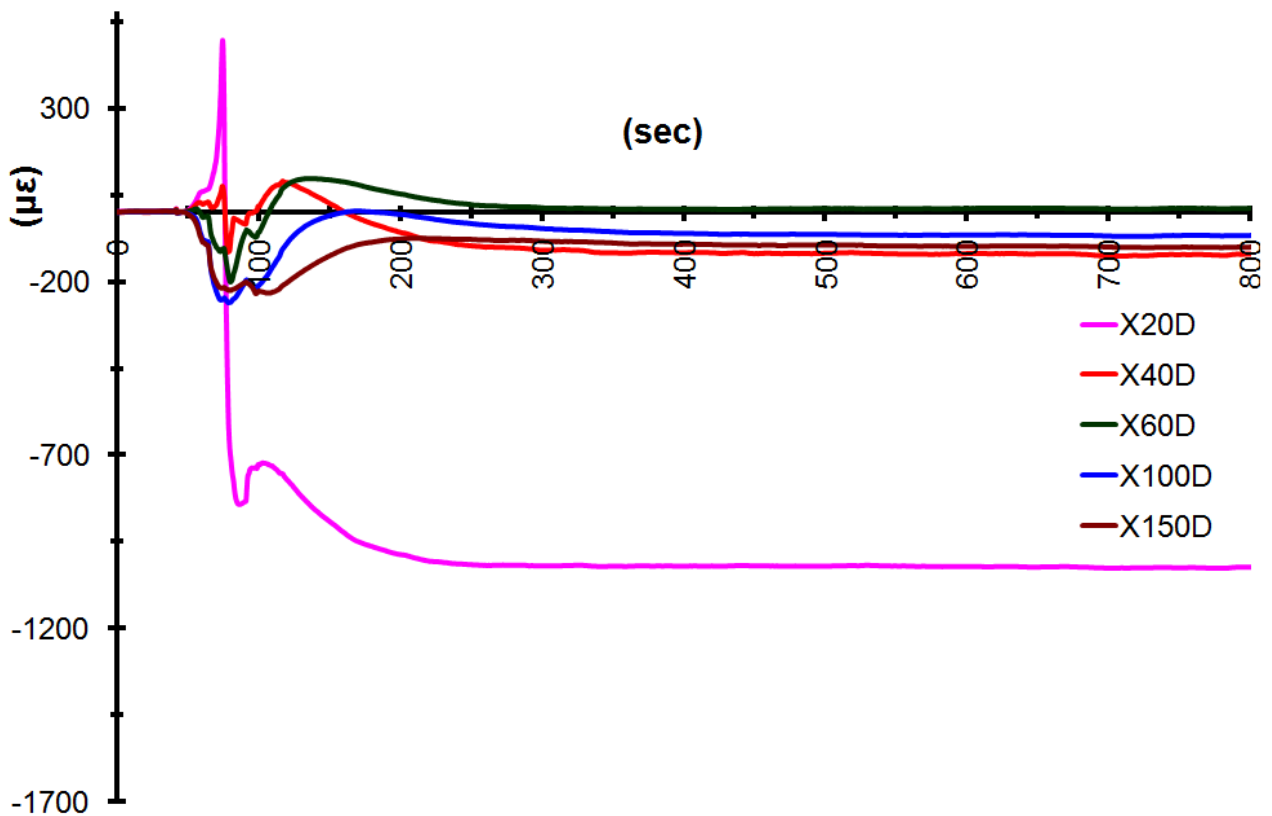
U: Πάνω επιφάνεια ελάσματος ή επιφάνεια συγκόλλησης

D: Κάτω επιφάνεια ελάσματος ή επιφάνεια ρίζας

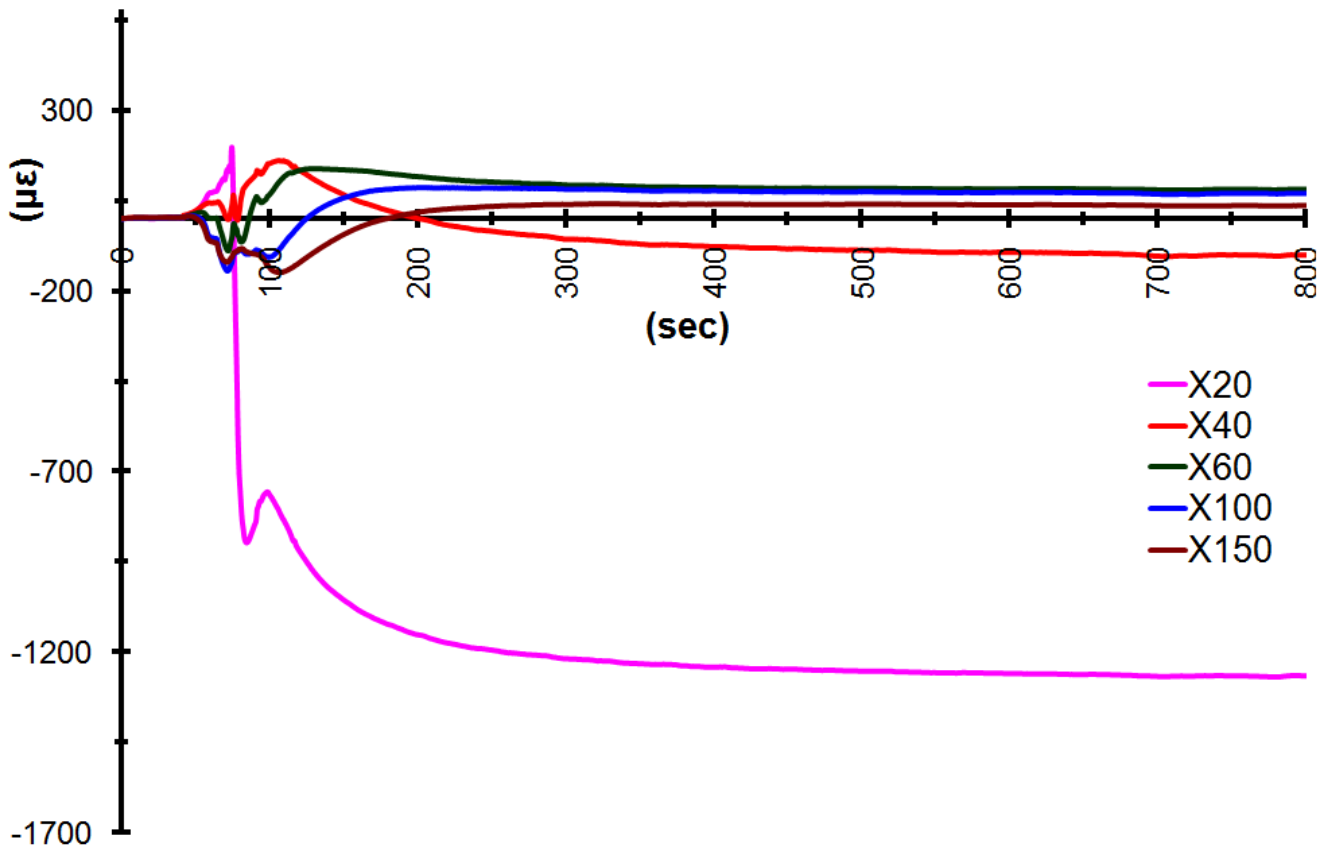
↙ Συγκόλληση ελασμάτων πάχους 4mm



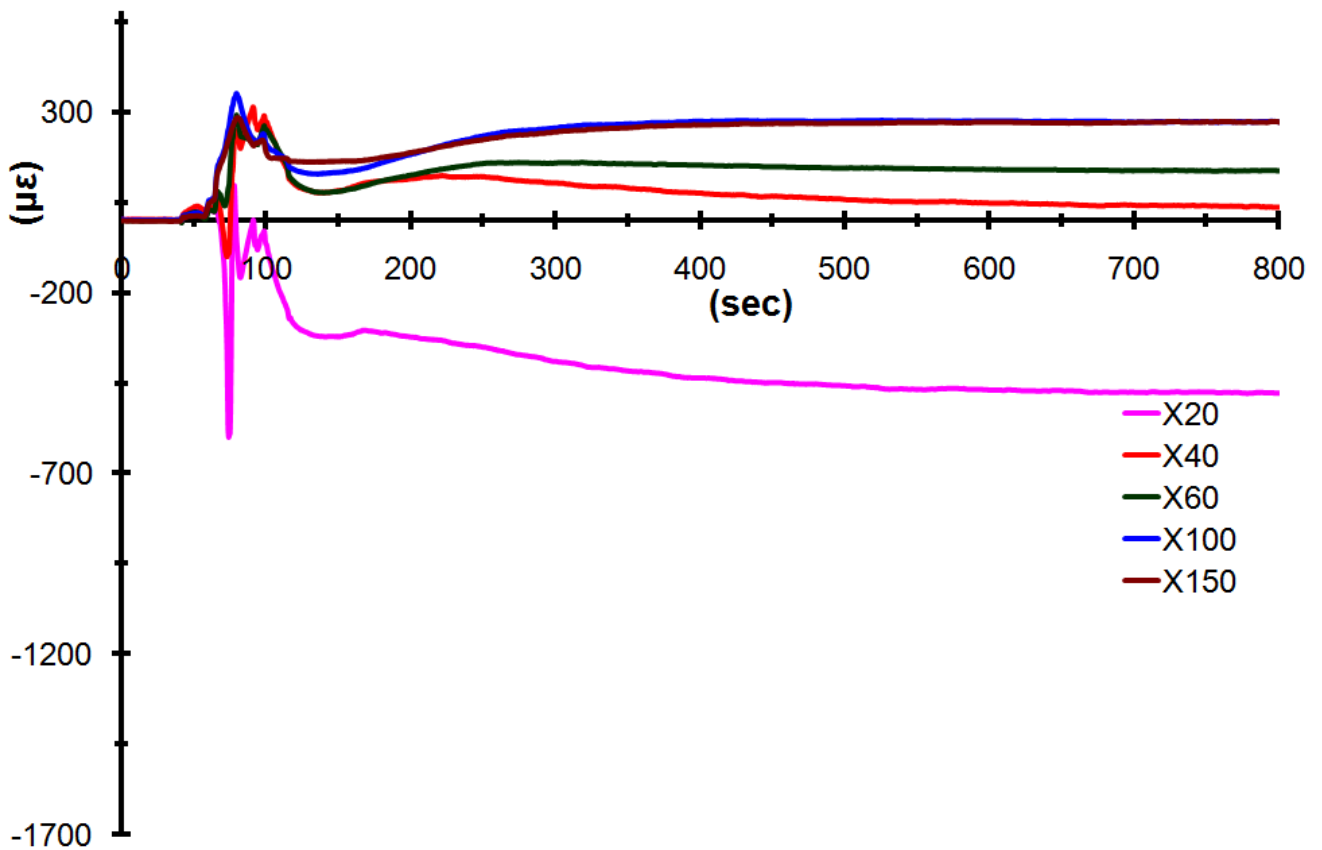
Εικόνα 11.15 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα X στην επάνω επιφάνεια (U)



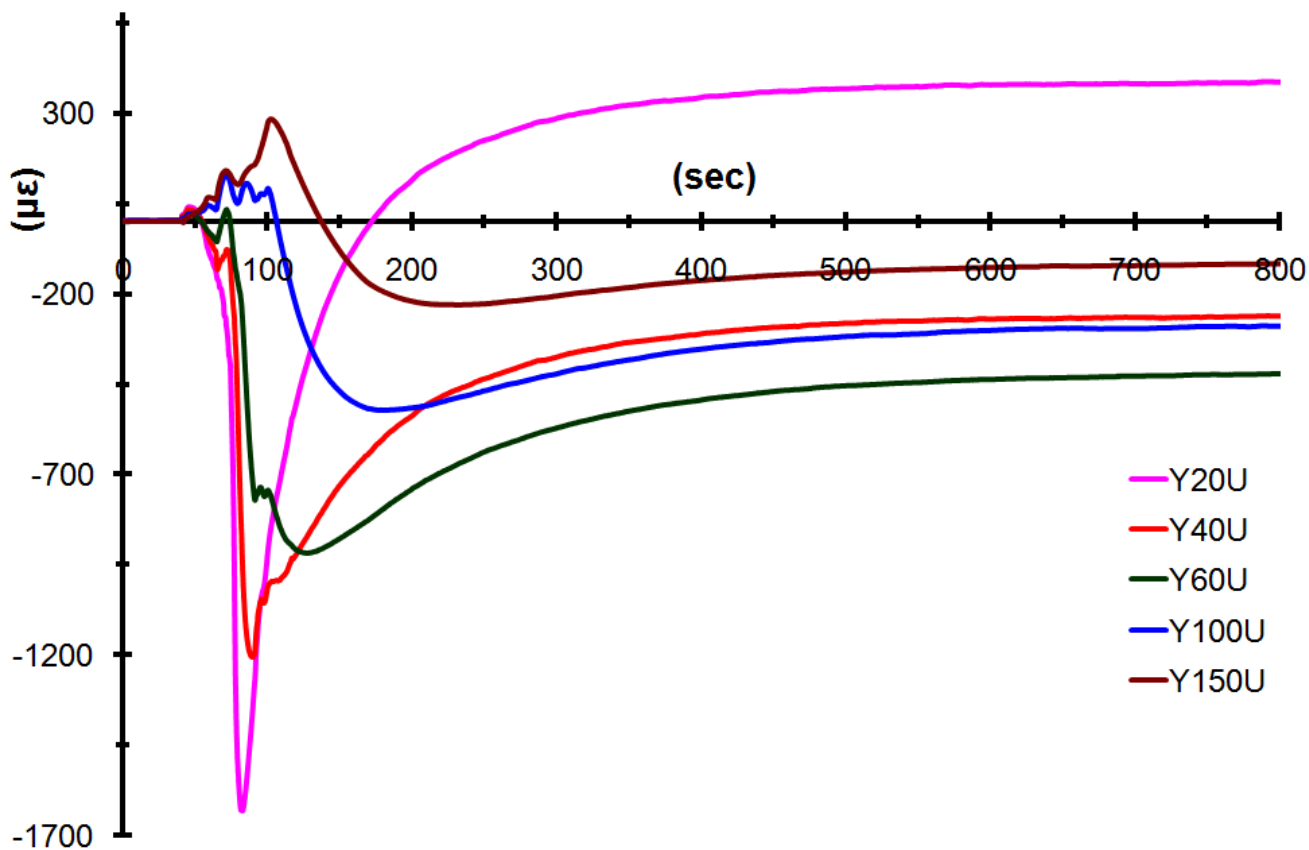
Εικόνα 11.16 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα X στην επιφάνεια ρίζας (D)



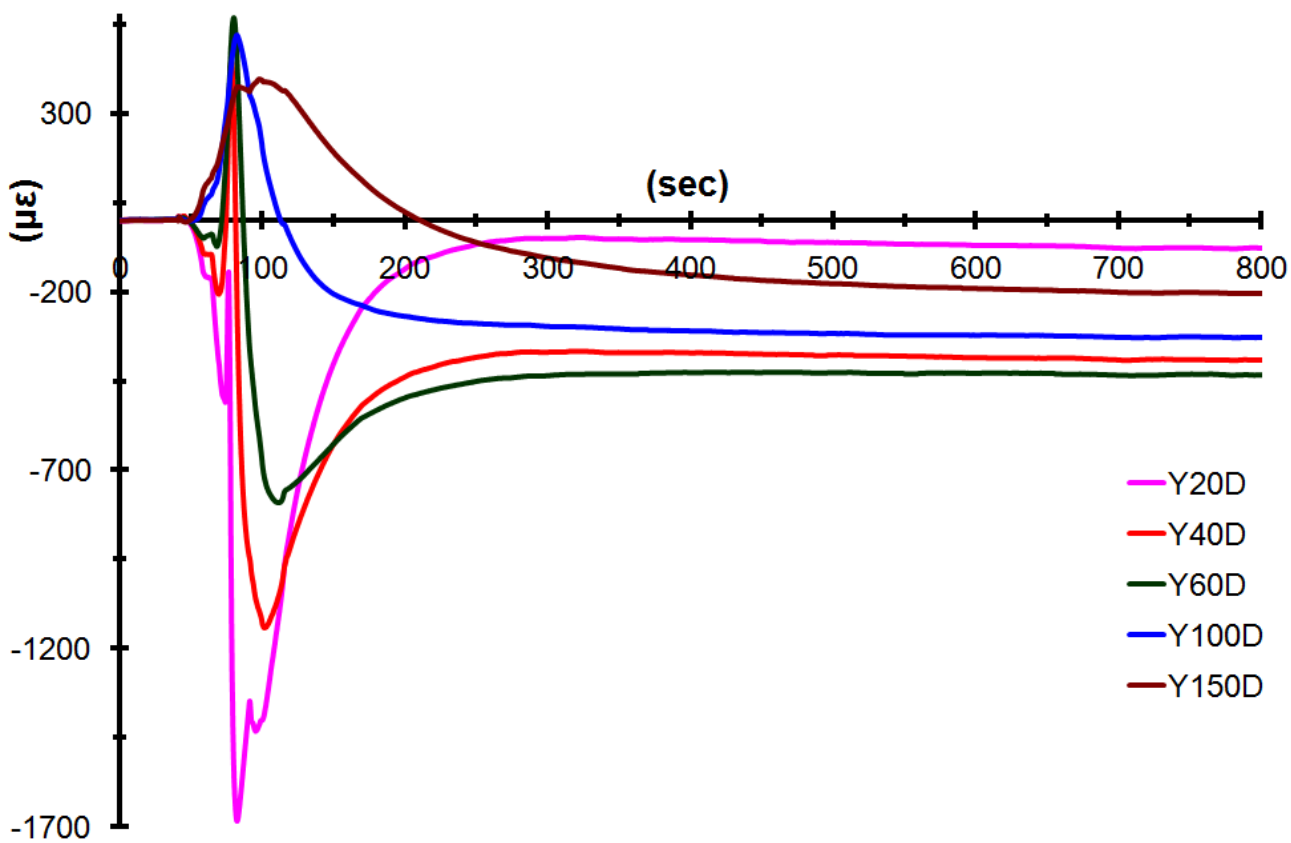
Εικόνα 11.17 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα X



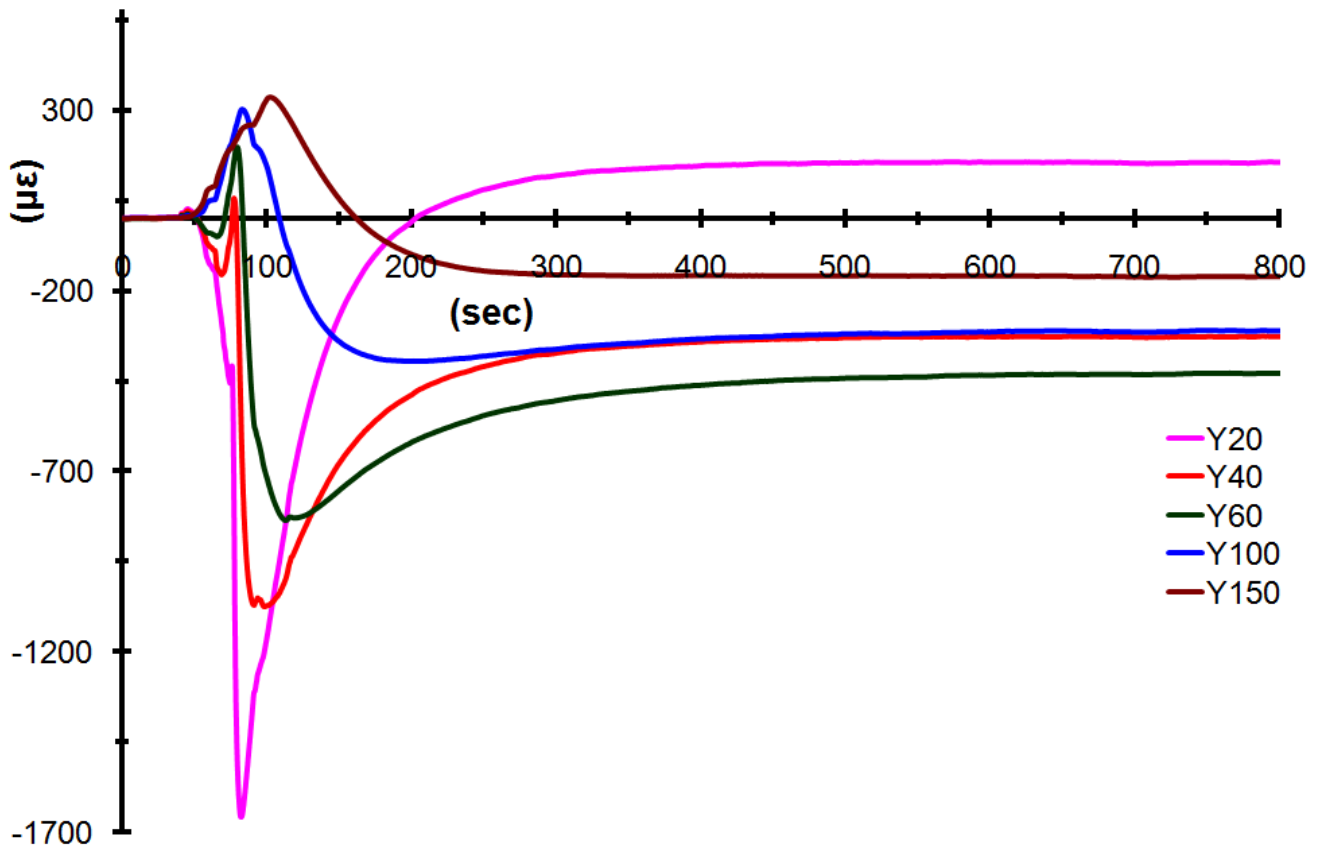
Εικόνα 11.18 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα X



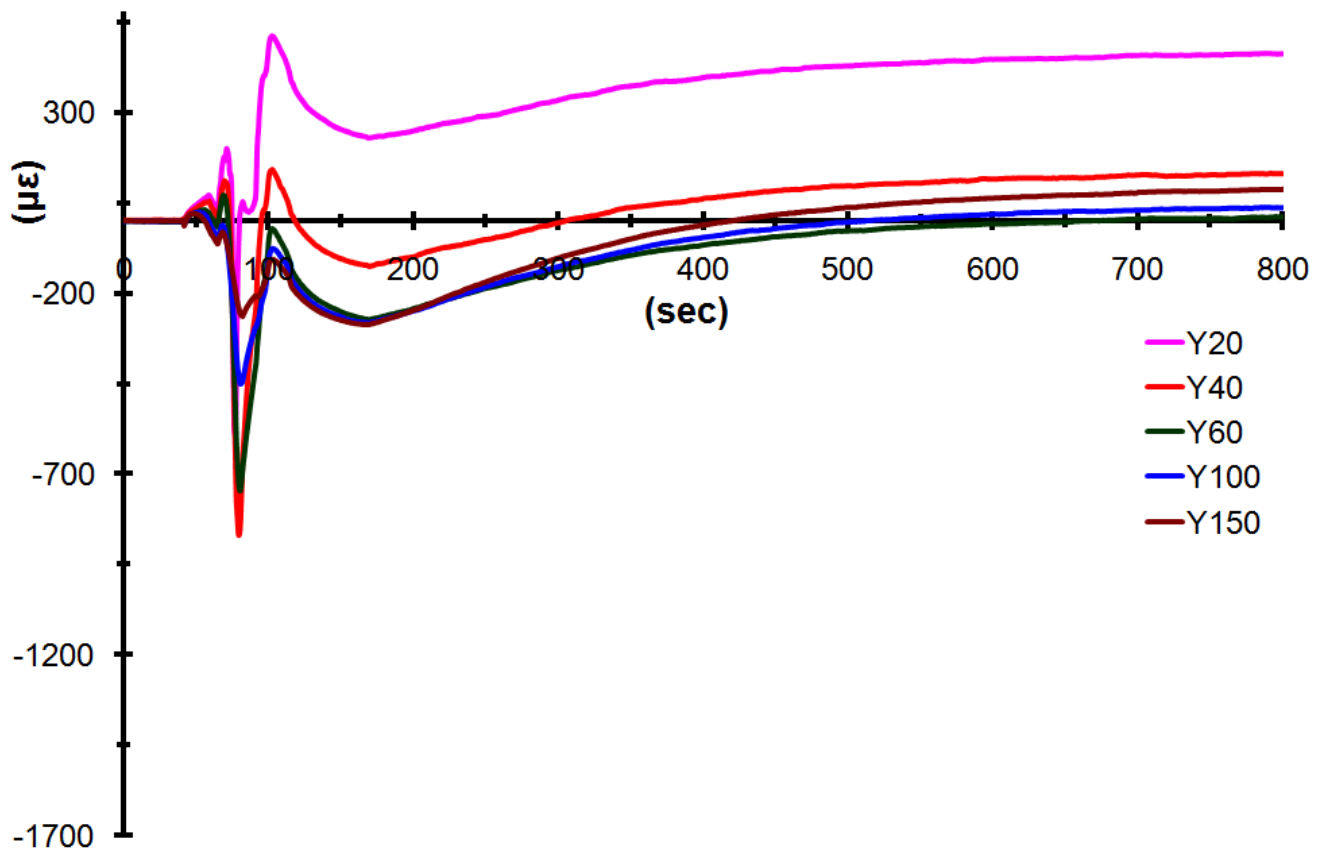
Εικόνα 11.19 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επάνω επιφάνεια (U)



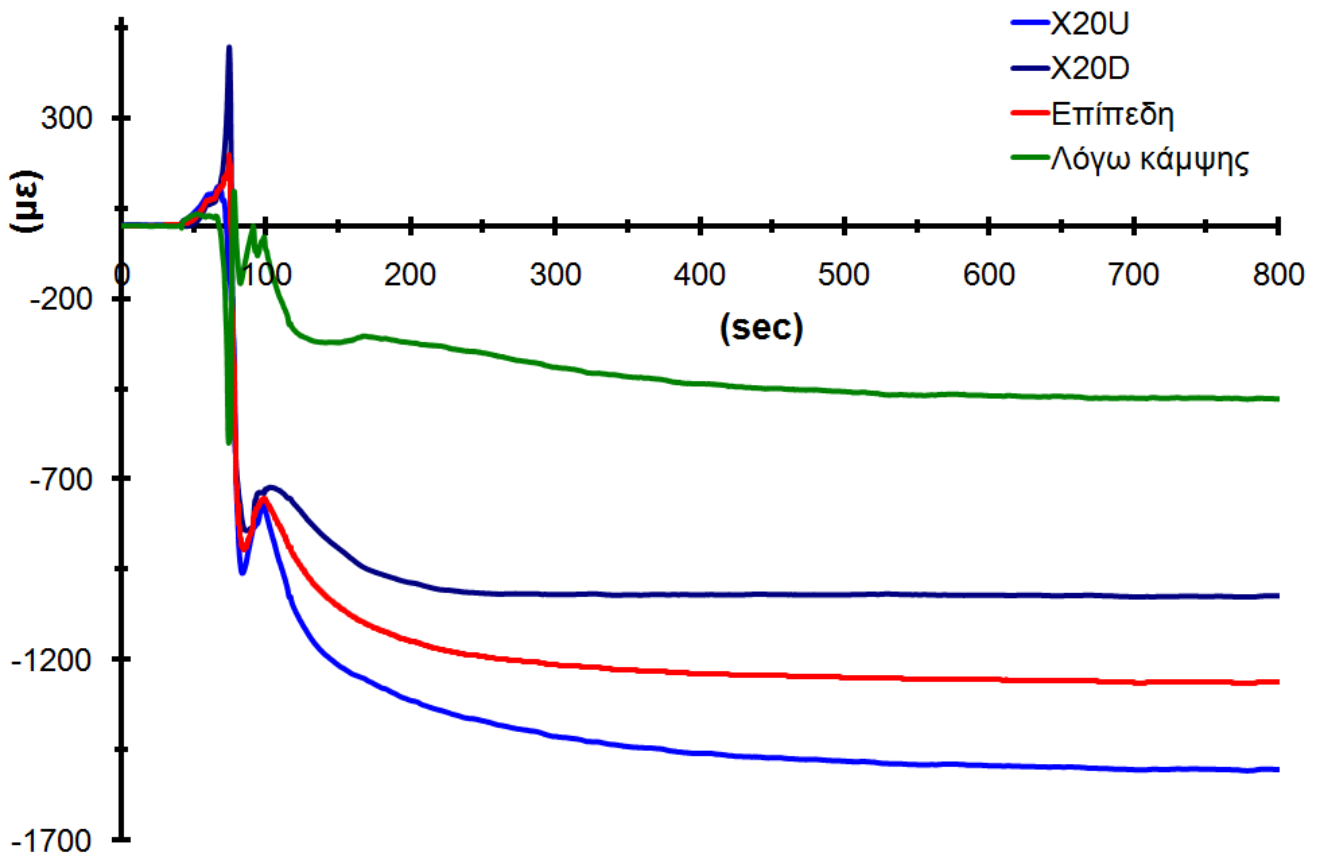
Εικόνα 11.20 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Υ στην επιφάνεια ρίζας (D)



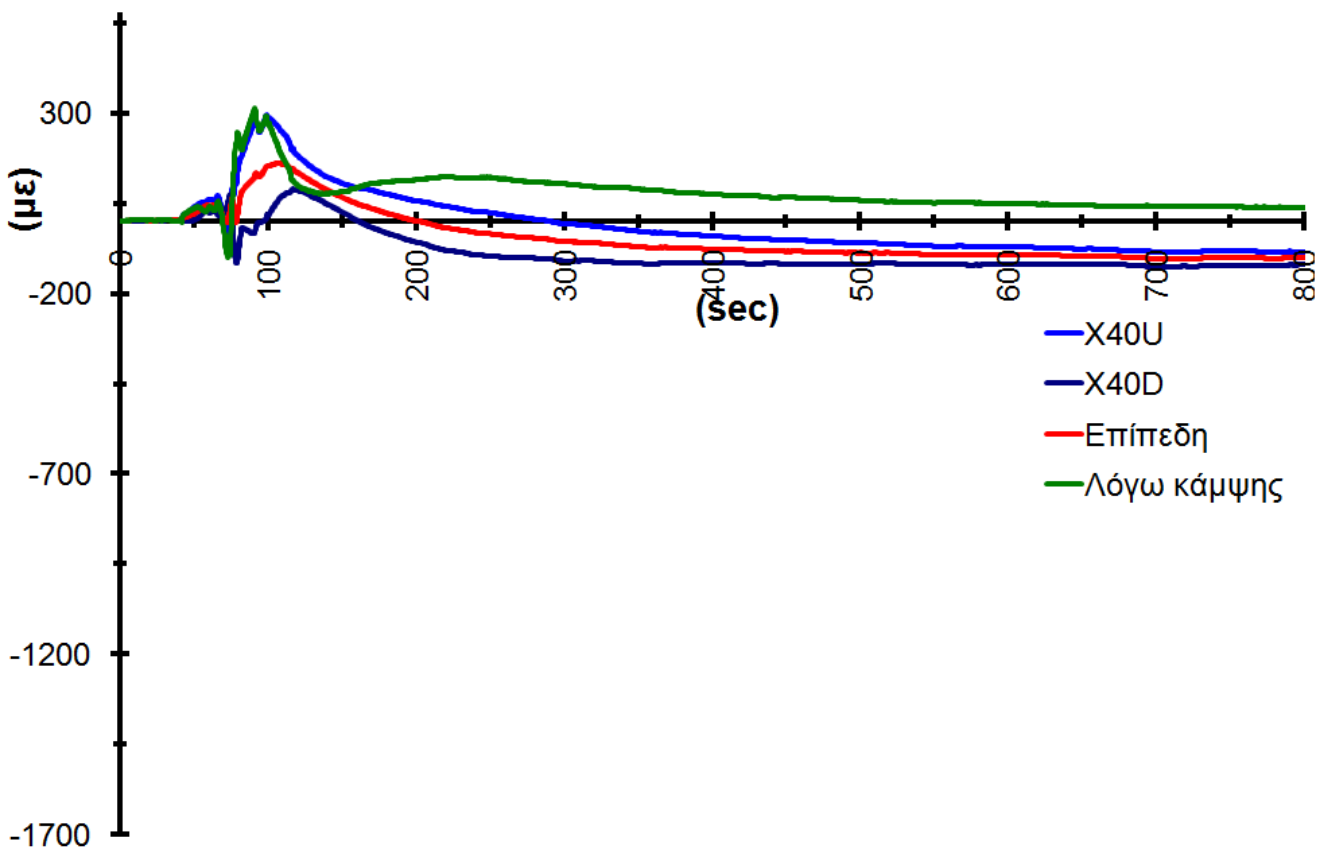
Εικόνα 11.21 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Y



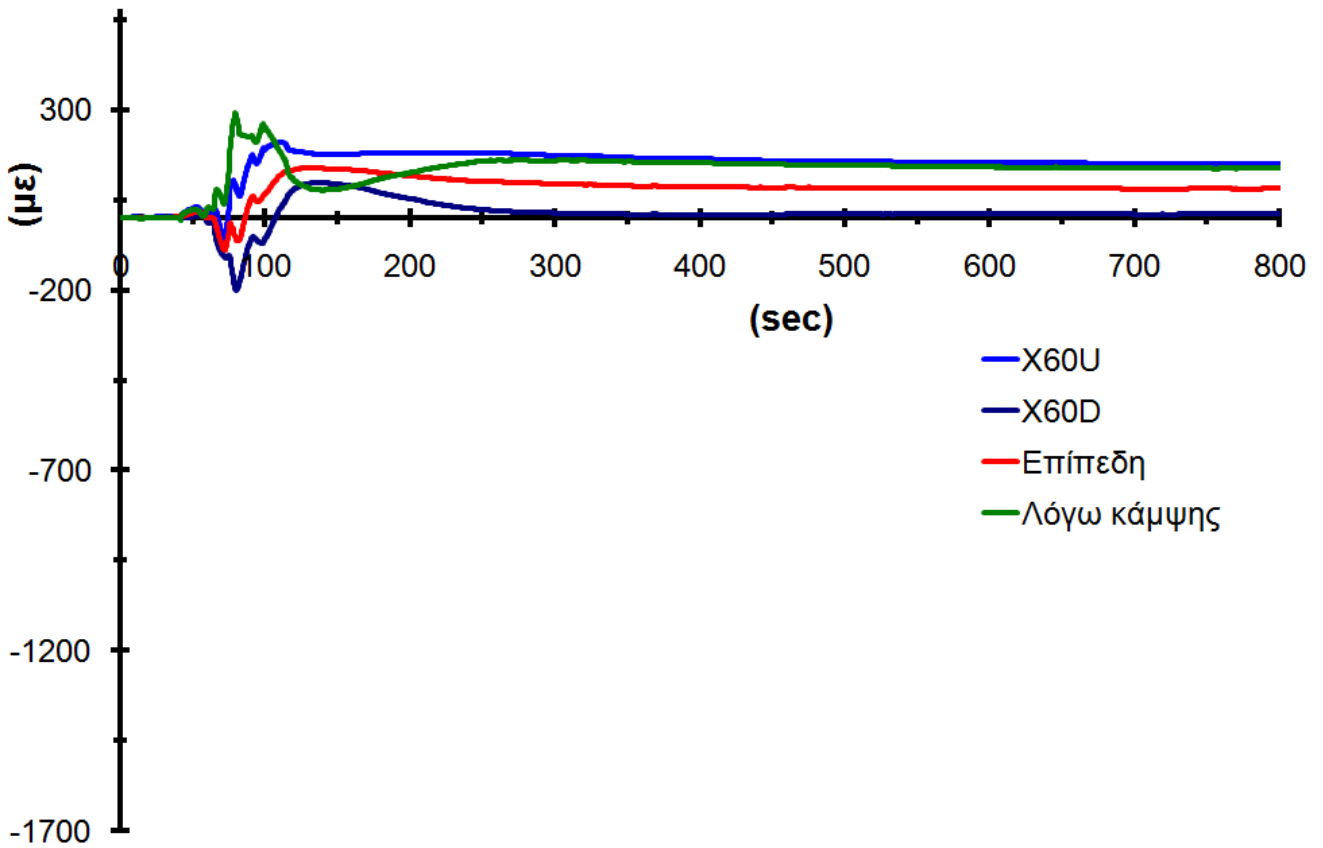
Εικόνα 11.22 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Y



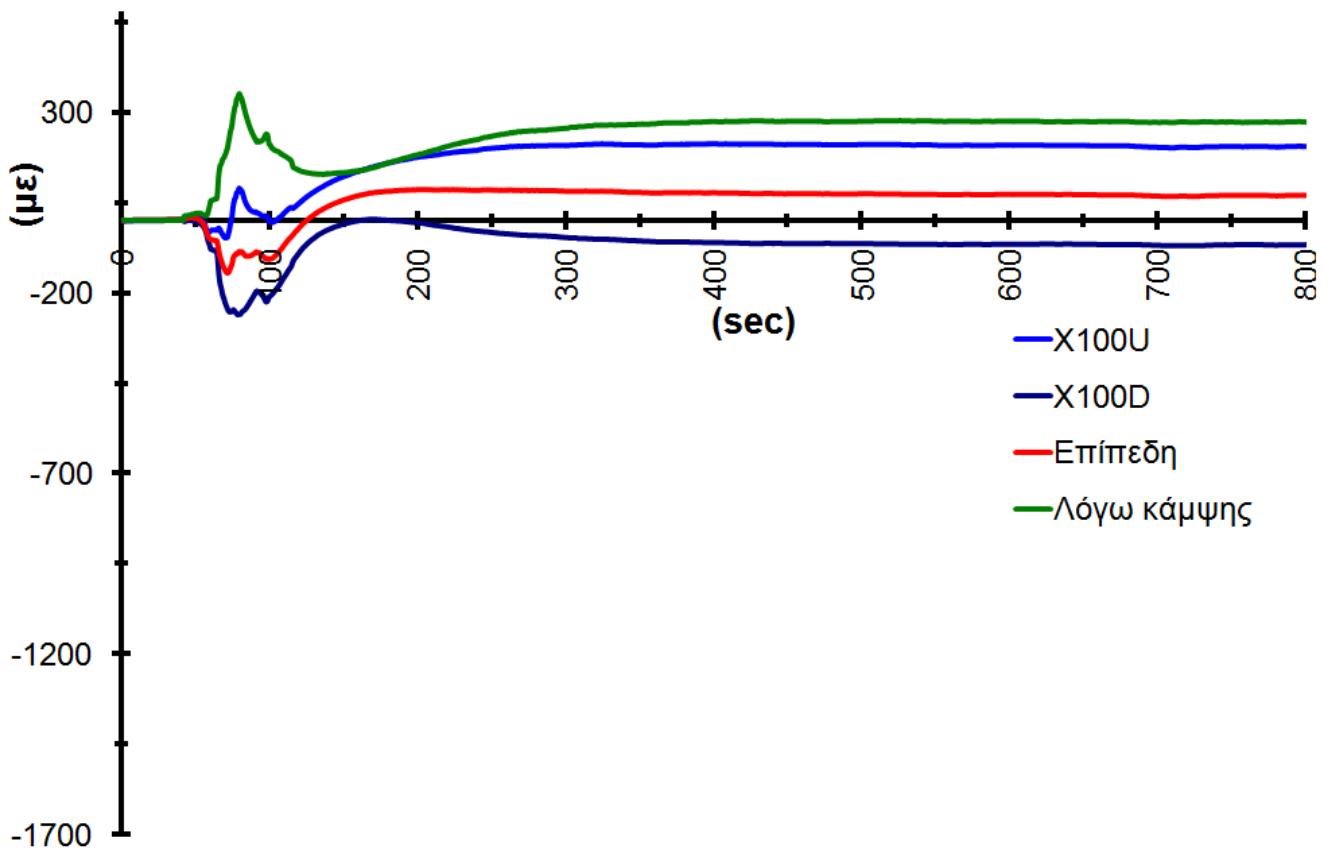
Εικόνα 11.23 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης



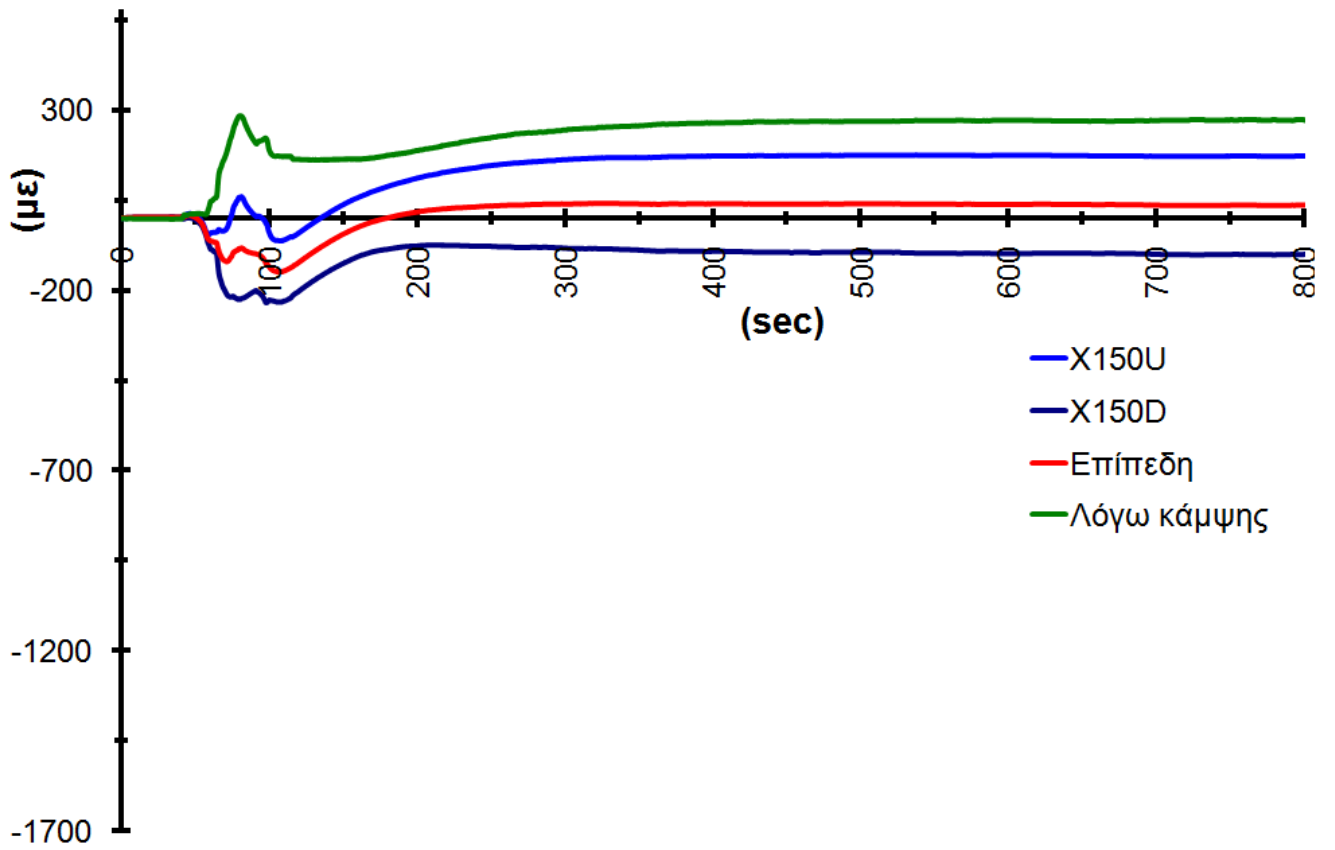
Εικόνα 11.24 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης



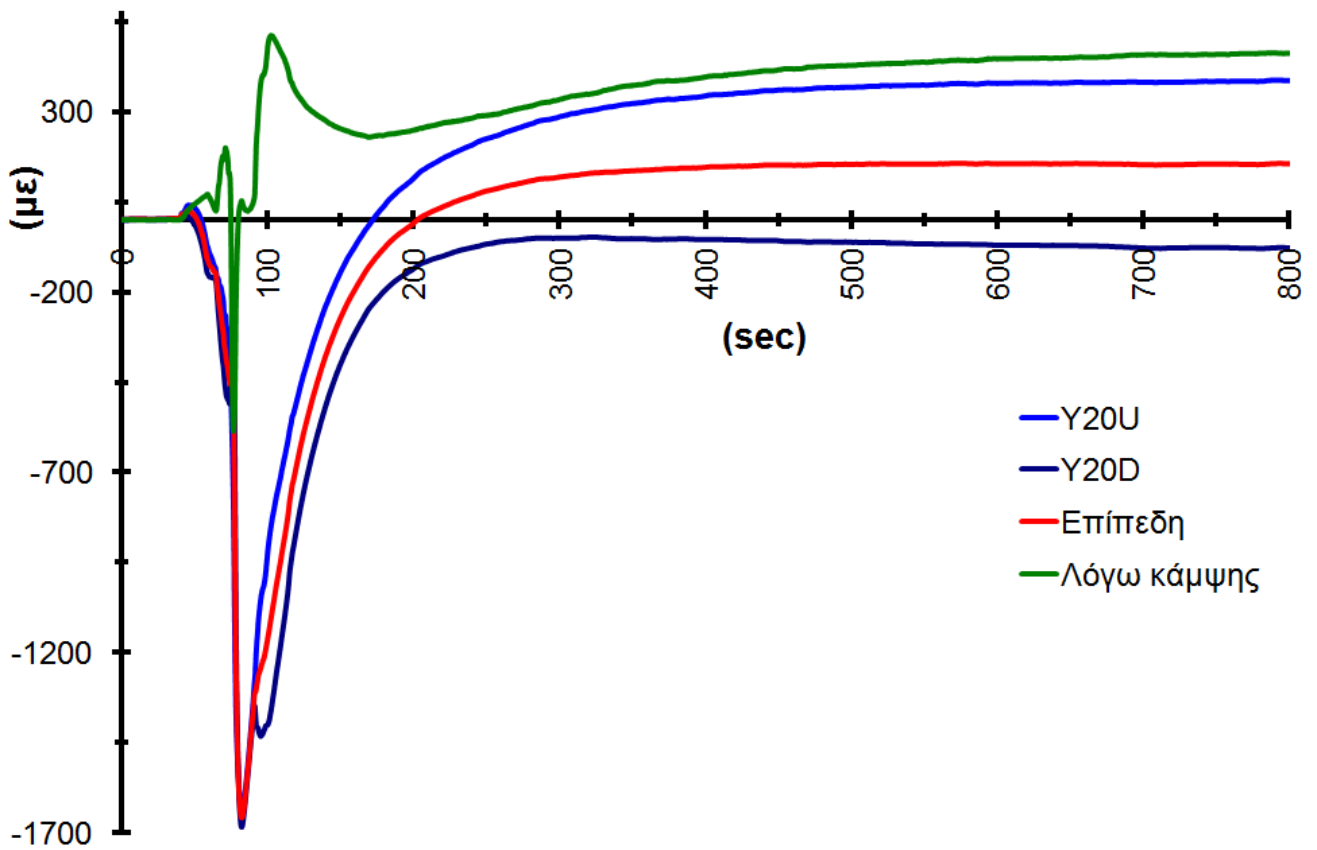
Εικόνα 11.25 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης



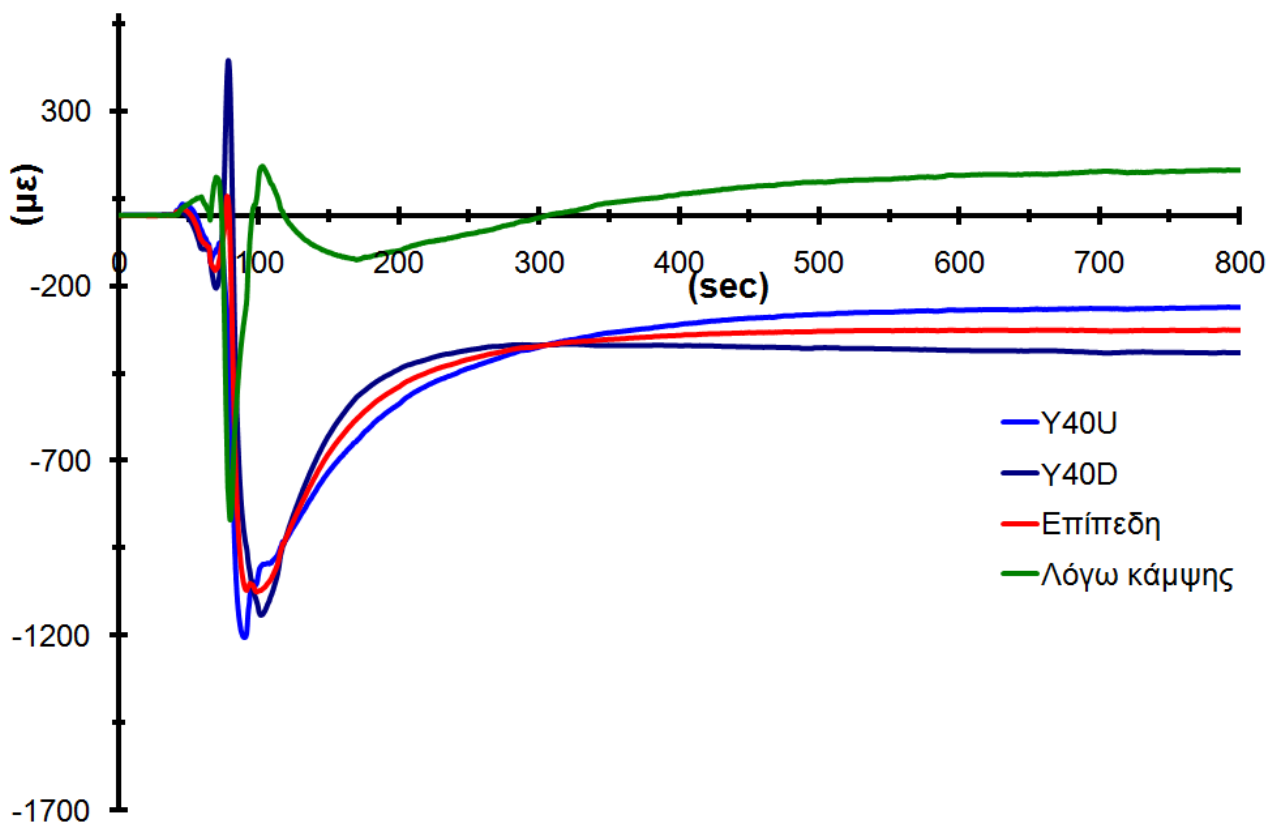
Εικόνα 11.26 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης



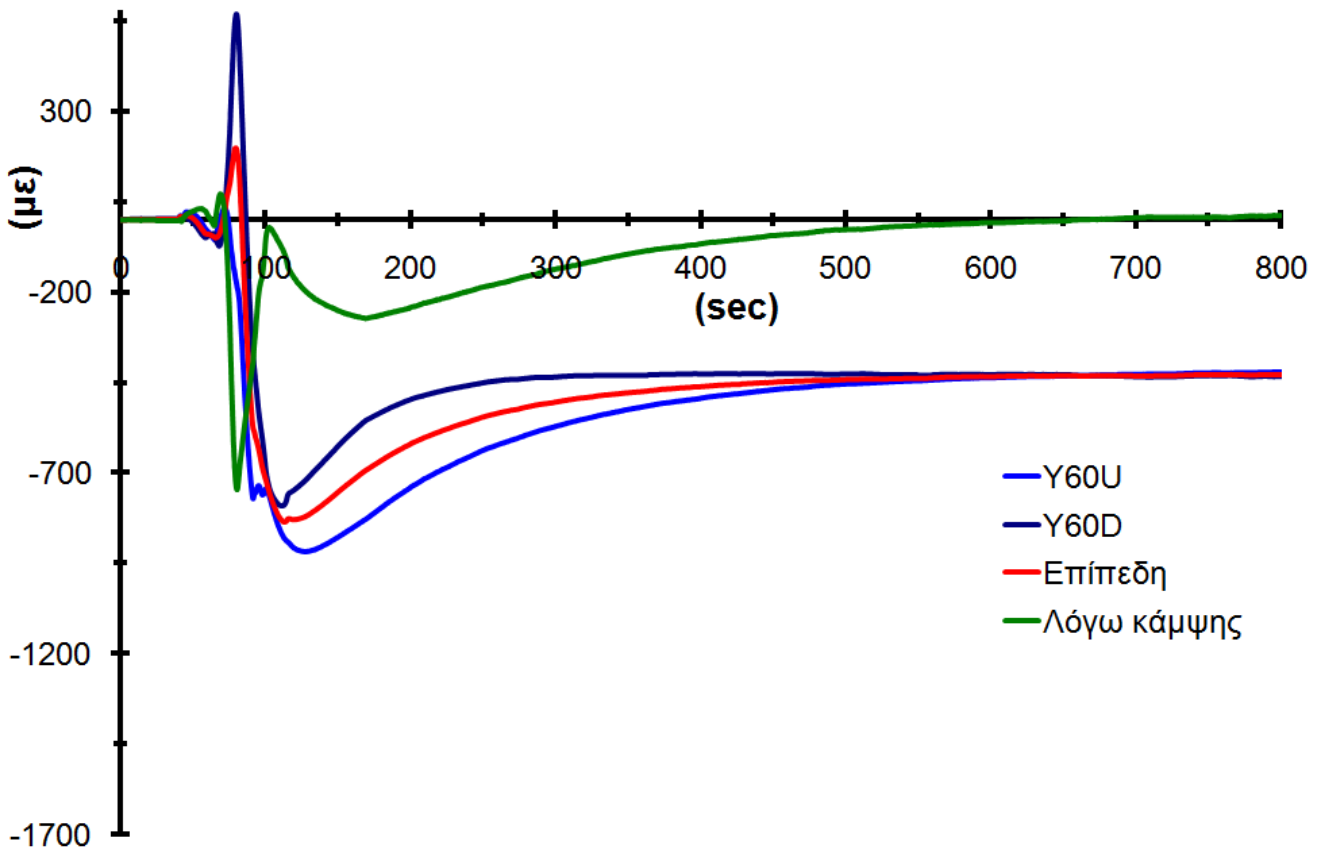
Εικόνα 11.27 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης



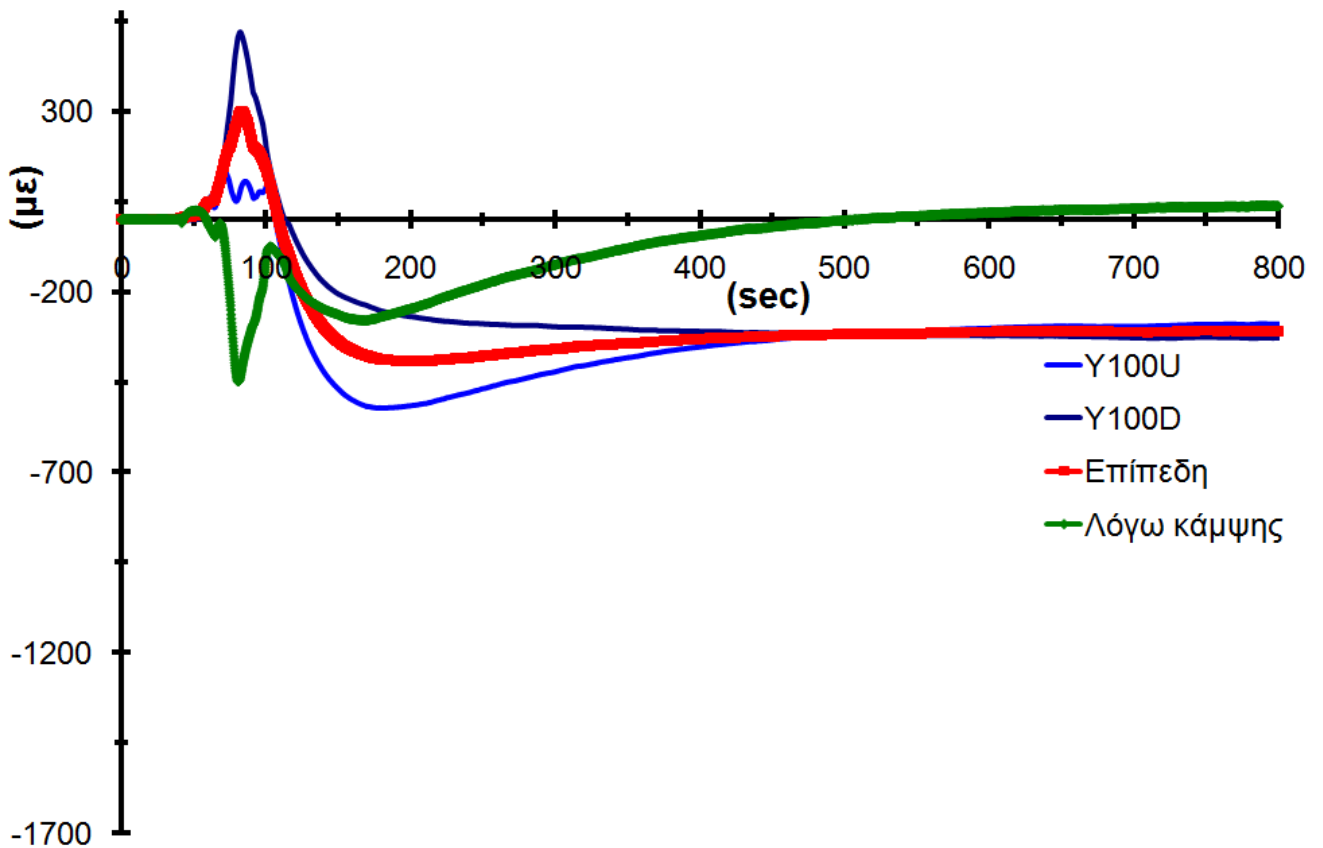
Εικόνα 11.28 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης



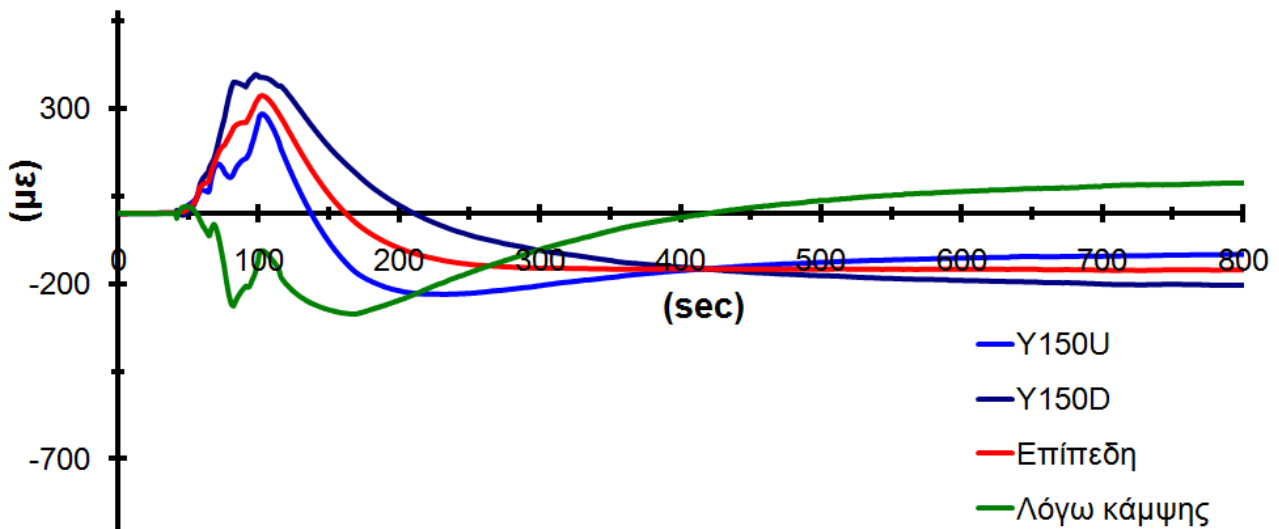
Εικόνα 11.29 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.30 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.31 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.32 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης

Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα (Εικ. 11.15 - 11.32) προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι θερμικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι αποτέλεσμα σύνθετων μηχανισμών καθώς περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων πλαστική παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών από τη θερμοκρασία δωματίου ως τη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου.
- Με την εξέλιξη της διαδικασίας συγκόλλησης, η θερμοκρασιακή κατανομή μεταβάλλεται συνεχώς και κατά συνέπεια μεταβάλλεται συνεχώς και μια κατανομή «ασύμβατων» παραμορφώσεων προκαλώντας αλλαγές στη συστολή και την παραμόρφωση των συγκολλημένων δοκιμίων.
- Από την έναρξη της συγκόλλησης και κατά την προσέγγιση του τόξου στην περιοχή όπου είναι εγκατεστημένα τα επιμηκονσιόμετρα (στο μέσο μήκος των ελασμάτων) δημιουργούνται θλιπτικές παραμορφώσεις (θετικό πρόσημο στα διαγράμματα), λόγω του ότι η διαστολή στις περιοχές αυτές, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας, περιορίζεται από τις γειτονικές περιοχές που

βρίσκονται σε χαμηλότερο θερμοκρασιακό πεδίο. Καθώς η θερμοκρασία λίγο πιο πέρα από το τόξο είναι αρκετά υψηλή, το όριο διαρροής του υλικού είναι χαμηλό κι έτσι, θεωρητικά, οι τάσεις στην περιοχή αυτή είναι της τάξης του ορίου διαρροής για τις αποκρινόμενες θερμοκρασίες.

- ο Όταν το τόξο περάσει από τον άξονα στον οποίο είναι εγκατεστημένα τα επιμηκυνσιόμετρα, αρχίζει η ψύξη του υλικού και συνεπώς η συστολή του, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές κοντά στη συγκόλληση (αρνητικό πρόσημο στα διαγράμματα). Καθώς το έλασμα συνεχίζει να ψύχεται, πίσω από το τόξο, οι εφελκυστικές τάσεις αυξάνονται κοντά στη γραμμή συγκόλλησης καθώς αυξάνει και το όριο διαρροής. Μετά από κάποιο σημείο και καθώς η θερμοκρασία πέφτει σε χαμηλά επίπεδα, η παραμόρφωση παύει να εξελίσσεται και επέρχεται ισορροπία. Οι περιοχές θλιπτικών τάσεων δημιουργούνται σε πιο απομακρυσμένες από τη συγκόλληση περιοχές μέχρι να επιτευχθεί συνολική ισορροπία.

- ο Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας συγκόλλησης, οι «ασύμβατες» παραμορφώσεις παραμένουν στο υλικό σε περιοχές κοντά στη συγκόλληση. Οι «ασύμβατες» αυτές παραμορφώσεις, που περιλαμβάνουν διαστασιακές μεταβολές που σχετίζονται με τη στερεοποίηση του μετάλλου, τις αλλαγές στη μικροδομή και την πλαστική παραμόρφωση, αποτελούν τις πηγές των παραμενουσών τάσεων και των στρεβλώσεων - παραμορφώσεων.

- ο Η τελική κατανομή των παραμορφώσεων που μορφοποιείται, στο μέσο μήκος του δοκιμίου και κατά άξονα εγκάρσιο προς τον άξονα συγκόλλησης, είναι αποτέλεσμα της συστολής της ραφής της συγκόλλησης που προκαλεί υψηλές εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές κοντά στη ραφή και σχετικά χαμηλές θλιπτικές τάσεις μακριά από αυτή και της συστολής της ραφής κατά μήκος των ακμών που προκαλεί διαμήκη καμπτική παραμόρφωση. Η τελευταία, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θλιπτικών τάσεων σε περιοχές μεταξύ του ουδέτερου άξονα και της γραμμής συγκόλλησης και εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές έξω από τον ουδέτερο άξονα.

- ο Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η μορφοποίηση εφελκυστικών τάσεων σε περιοχές κοντά στη συγκόλληση, αλλά με τιμές σχετικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού, σε θερμοκρασία δωματίου και θλιπτικών τάσεων σε πιο απομακρυσμένες περιοχές προκειμένου να επέλθει συνολική ισορροπία. Οι εφελκυστικές τάσεις σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση, οφείλονται στη διαμήκη καμπτική παραμόρφωση.

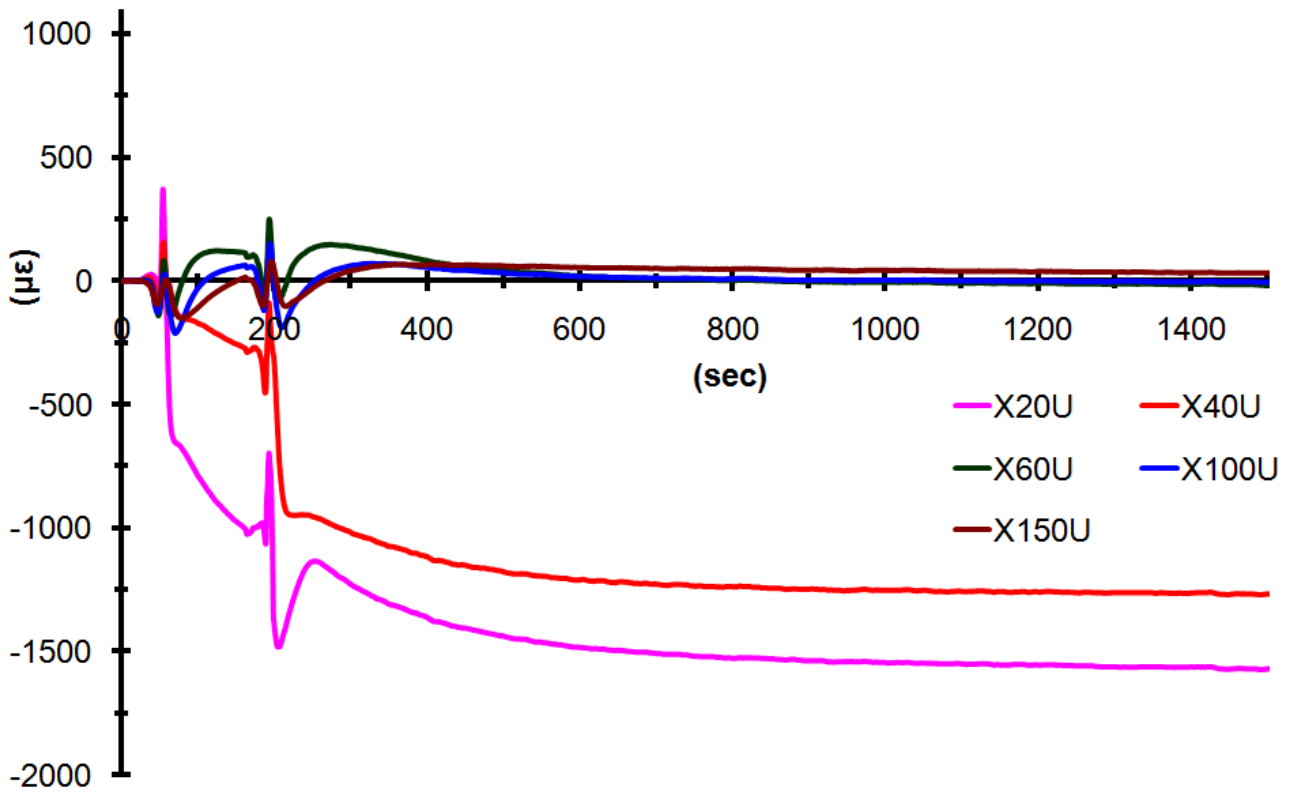
- ο Όπως προκύπτει από τις καμπύλες, κυρίαρχη παραμόρφωση (συνεπώς και τάση) είναι η διαμήκης καθώς είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εγκάρσια, σε κάθε θέση μέτρησης.

- ο Οι παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διαφορά, σε σύγκριση με τις τιμές στις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης και είναι σε κάθε

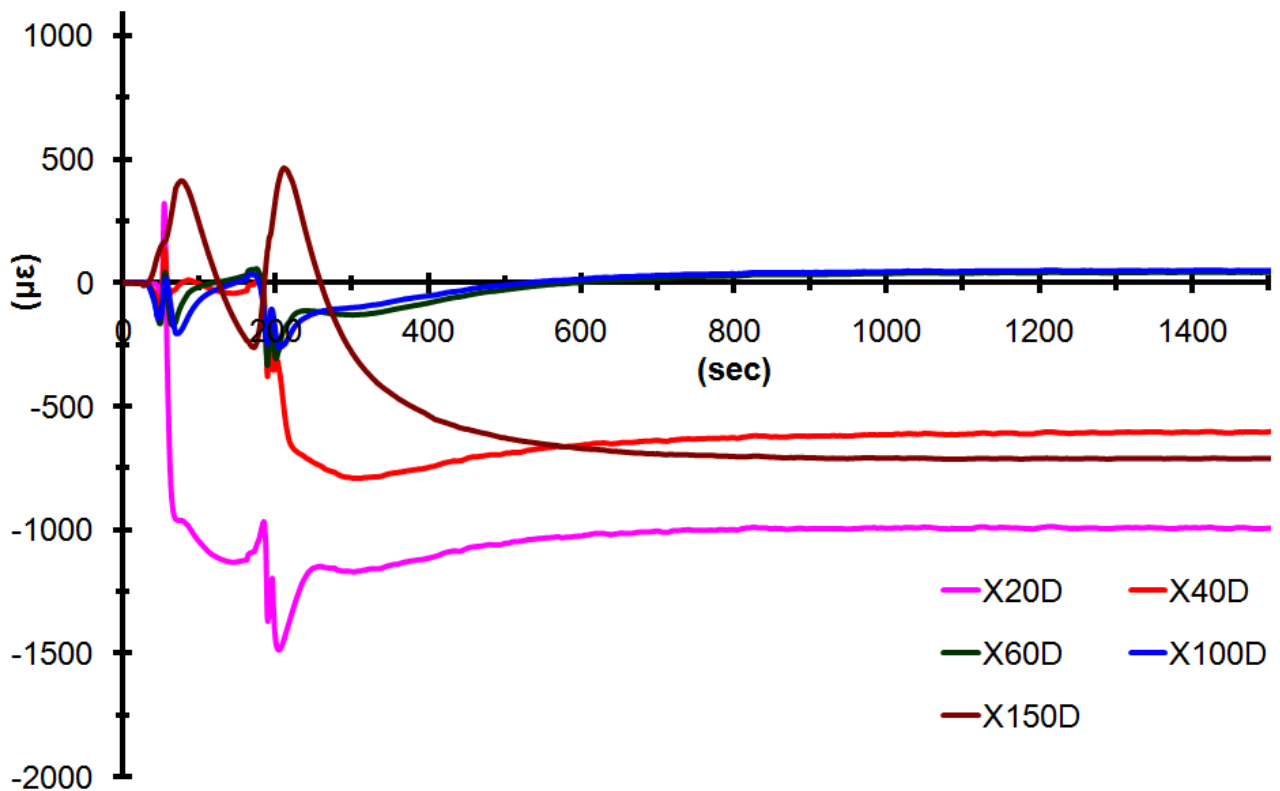
περίπτωση αρκετά μεγαλύτερες από αυτές. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την μορφοποίηση σημαντικών παραμενουσών τάσεων μέχρι αυτή την απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης οι οποίες, όπως προκύπτει, είναι εφελκυστικές.

- Από τις καμπύλες Θερμικών καμπτικών παραμορφώσεων - Χρόνου, προκύπτουν τιμές οι οποίες δεν μπορούν να αμεληθούν κατά τη μελέτη.

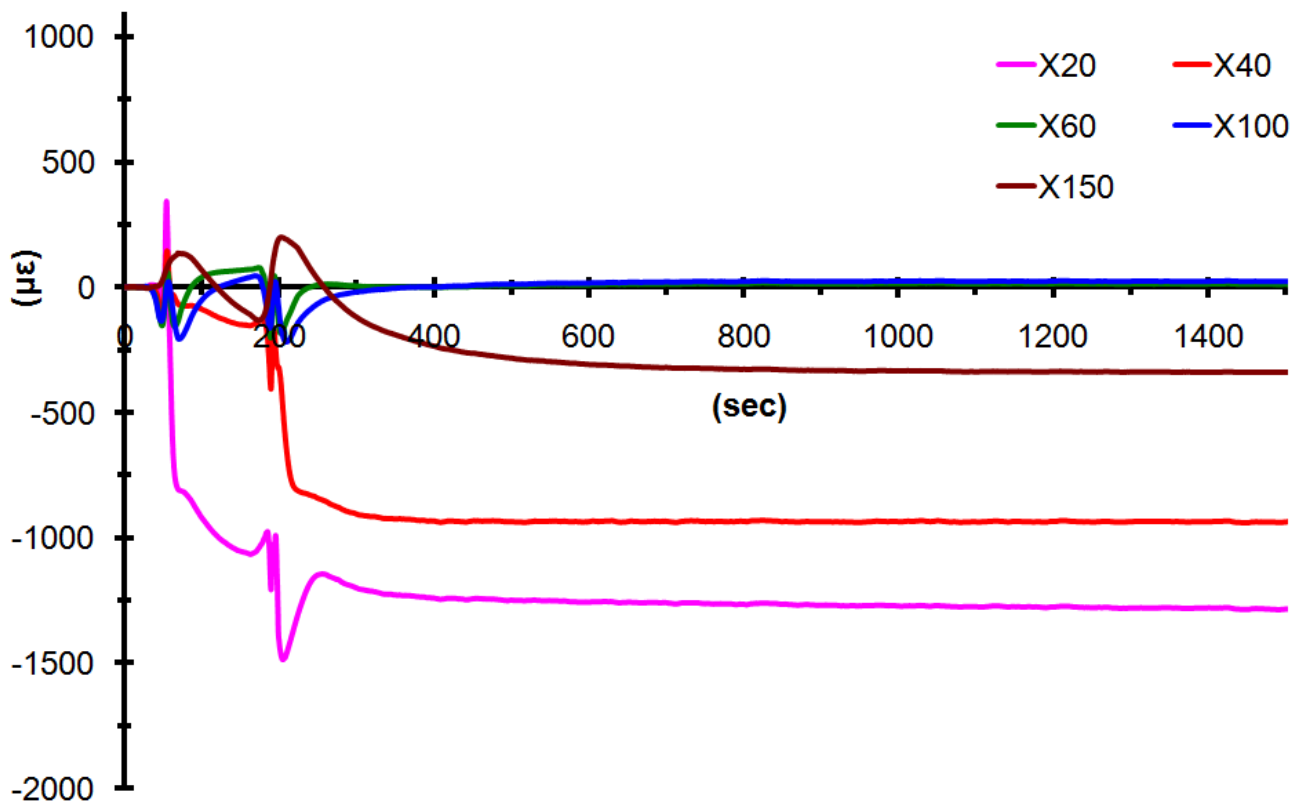
↙ Συγκόλληση ελασμάτων πάχους 6mm



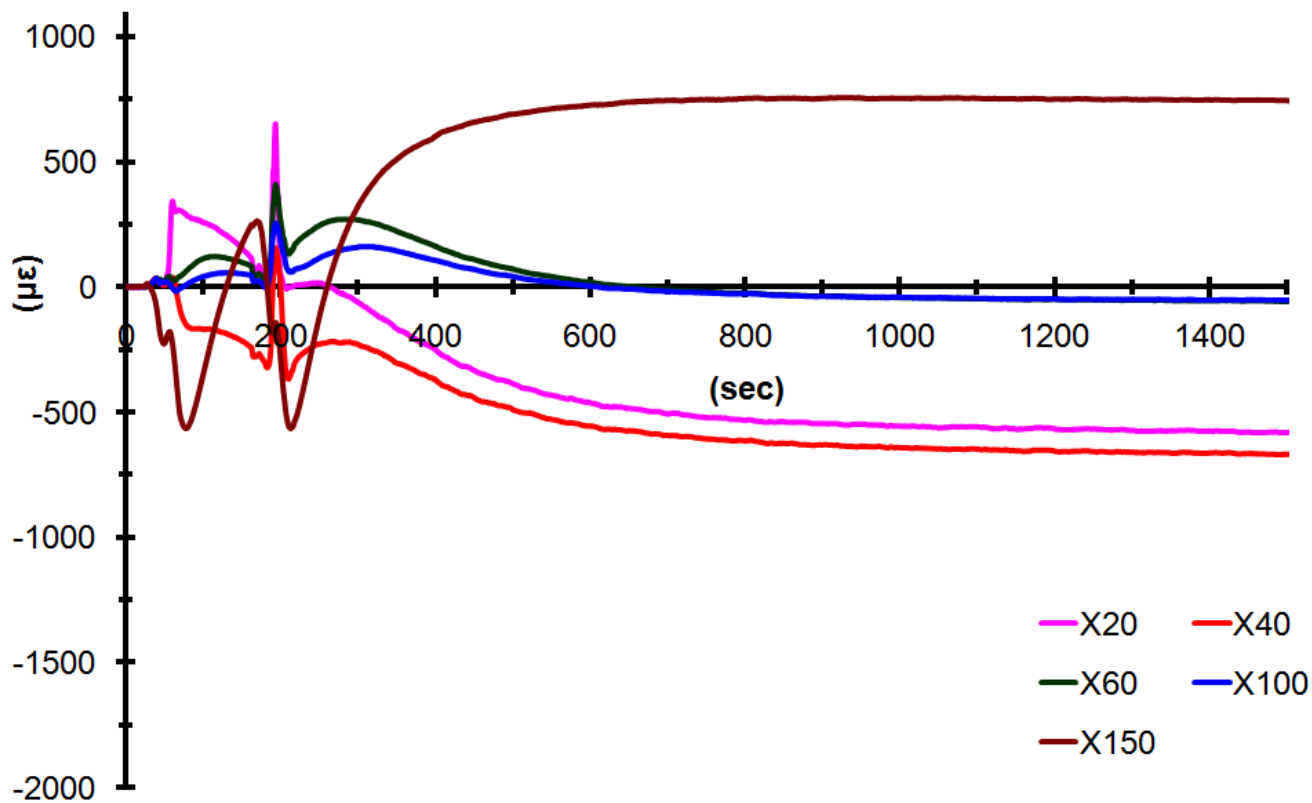
Εικόνα 11.33 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα X στην επάνω επιφάνεια (U)



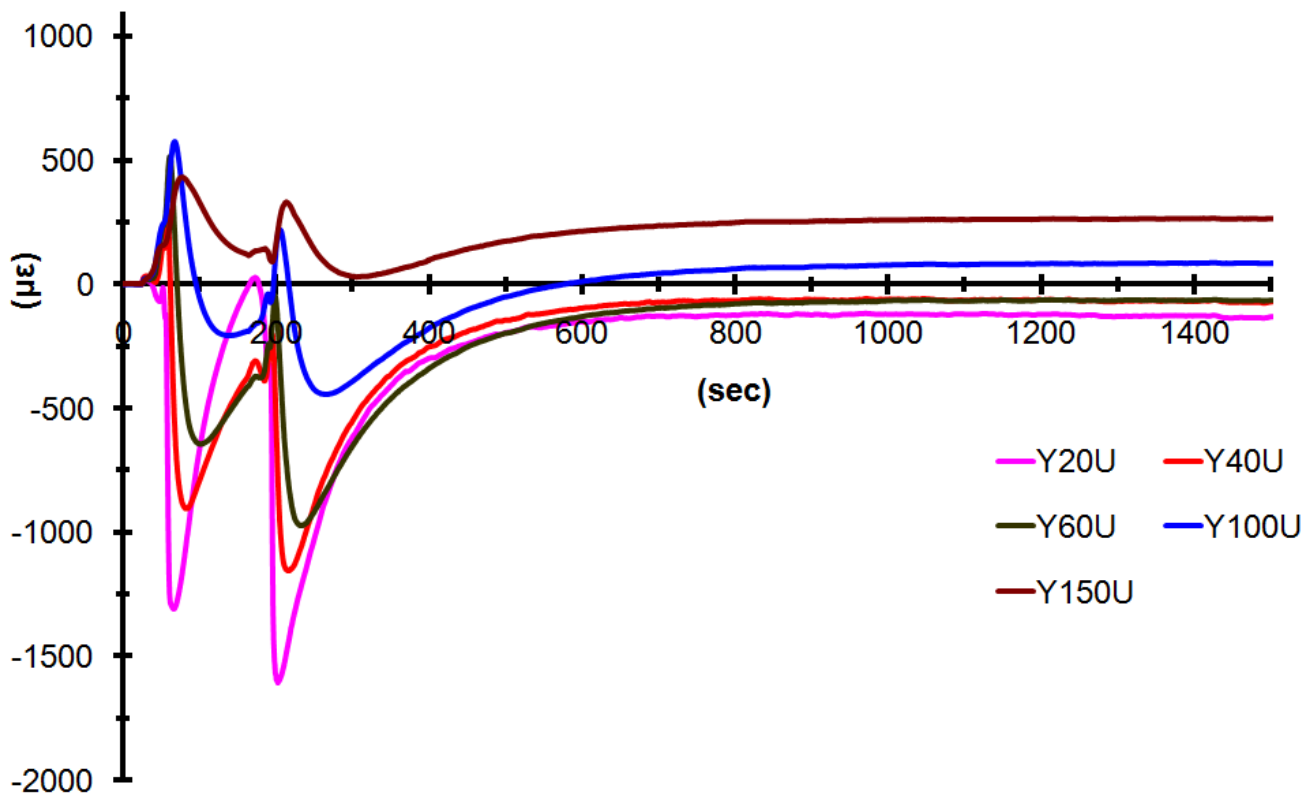
Εικόνα 11.34 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα X στην επιφάνεια ρίζας (D)



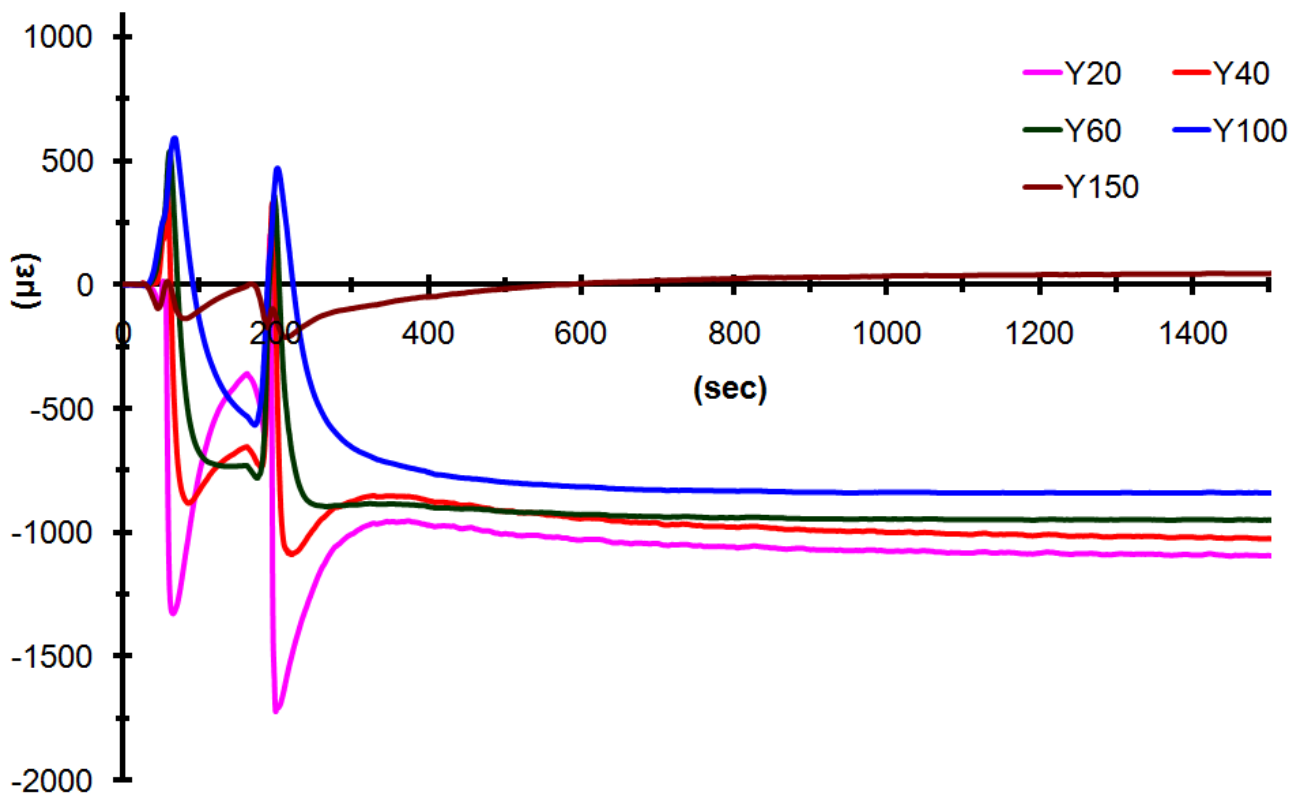
Εικόνα 11.35 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα X



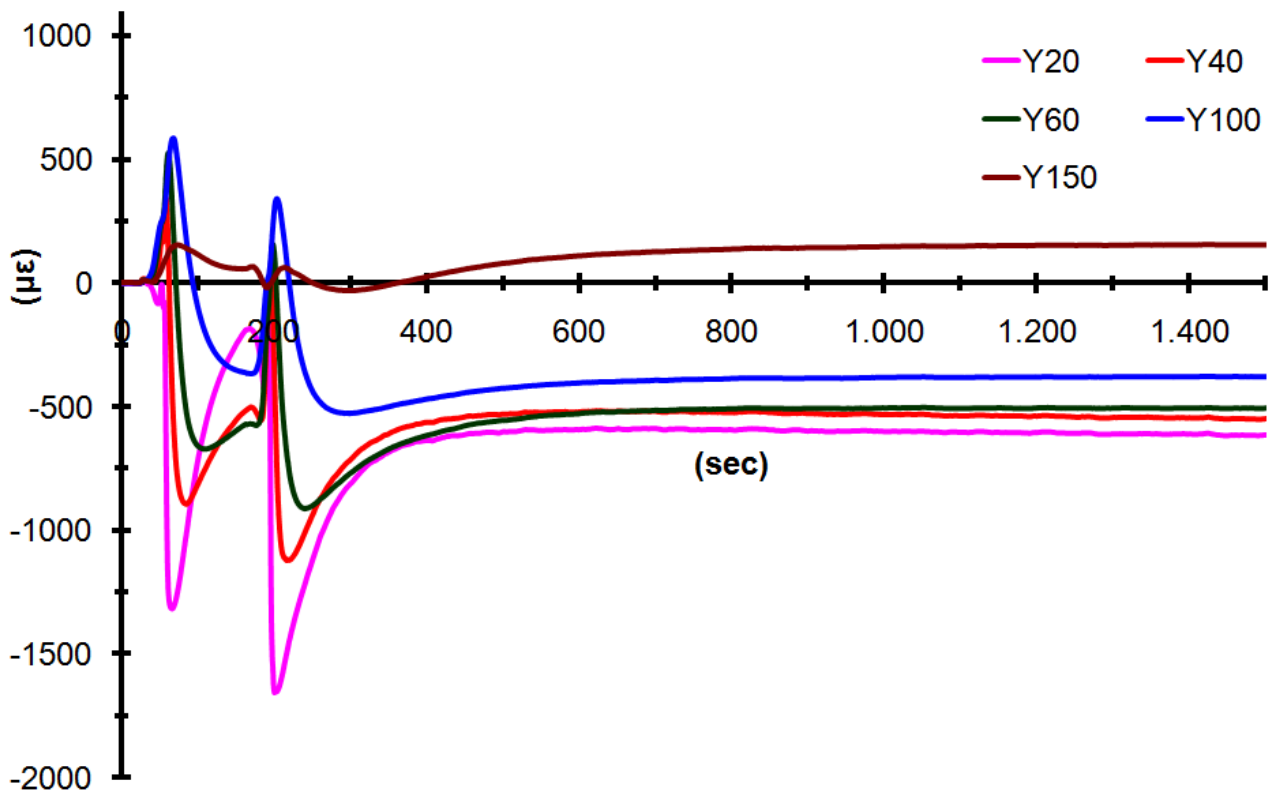
Εικόνα 11.36 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα X



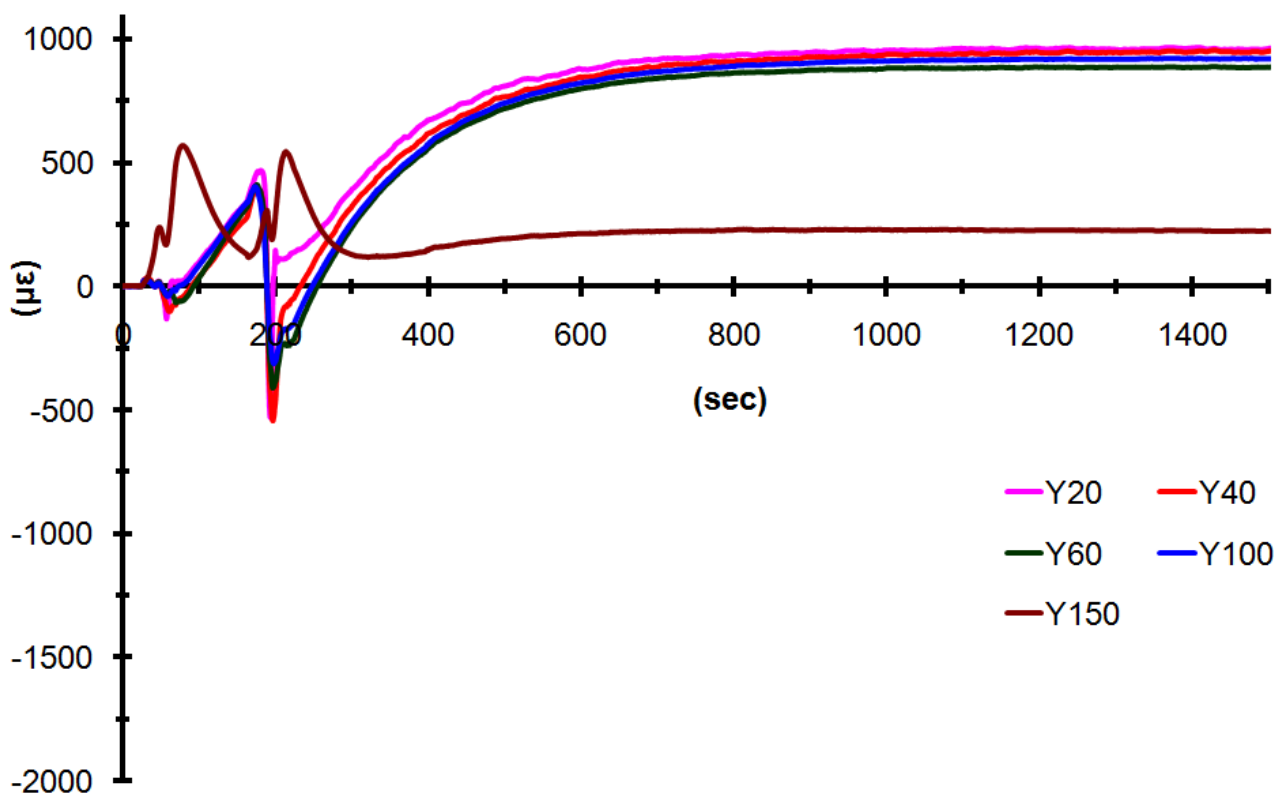
Εικόνα 11.37 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Y στην επάνω επιφάνεια (U)



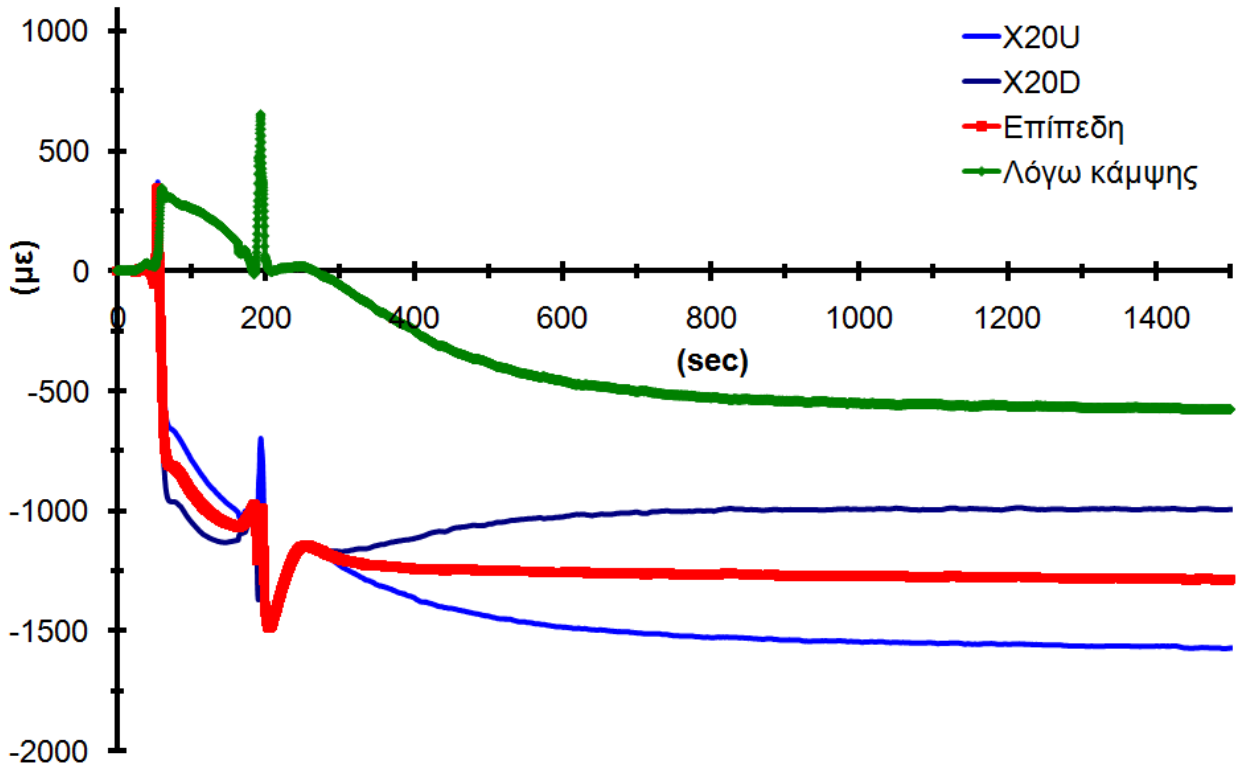
Εικόνα 11.38 Θερμικές παραμορφώσεις κατά άξονα Y στην επιφάνεια ρίζας (D)



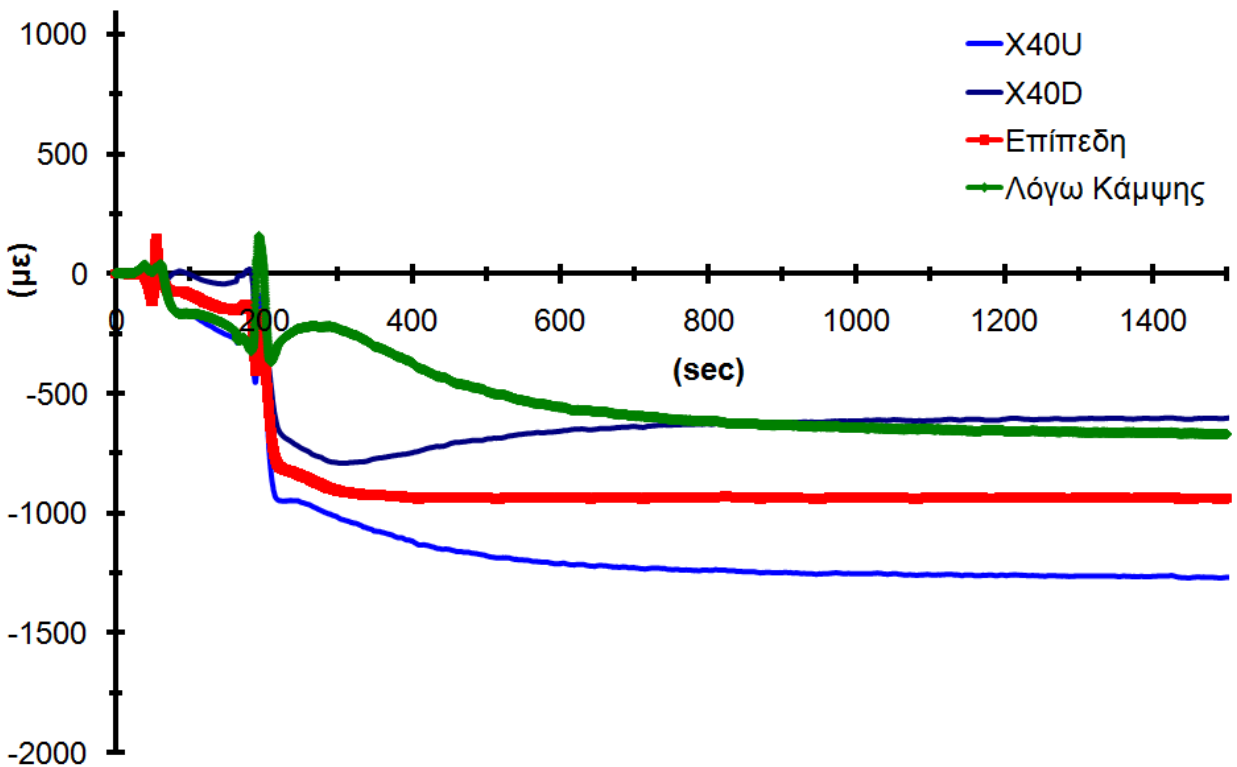
Εικόνα 11.39 Θερμική επίπεδη παραμόρφωση κατά άξονα Y



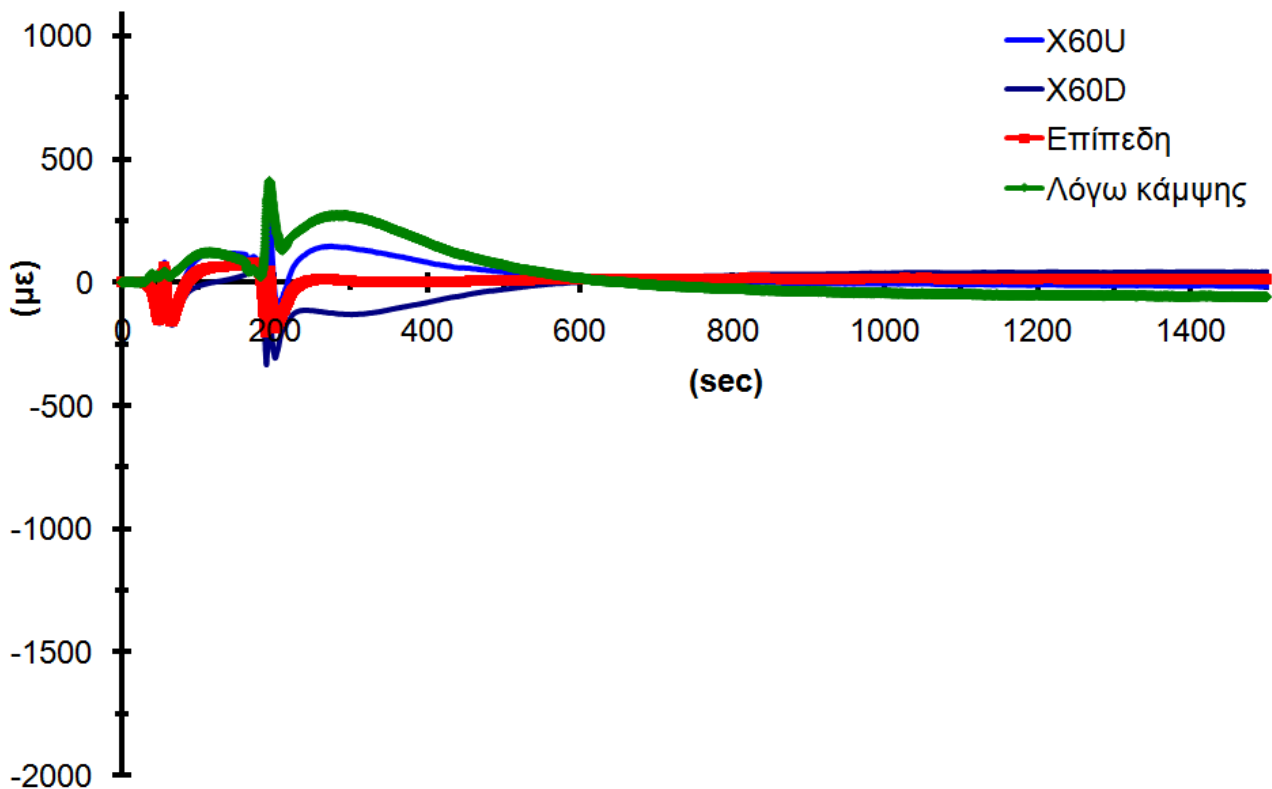
Εικόνα 11.40 Θερμική καμπτική παραμόρφωση κατά άξονα Y



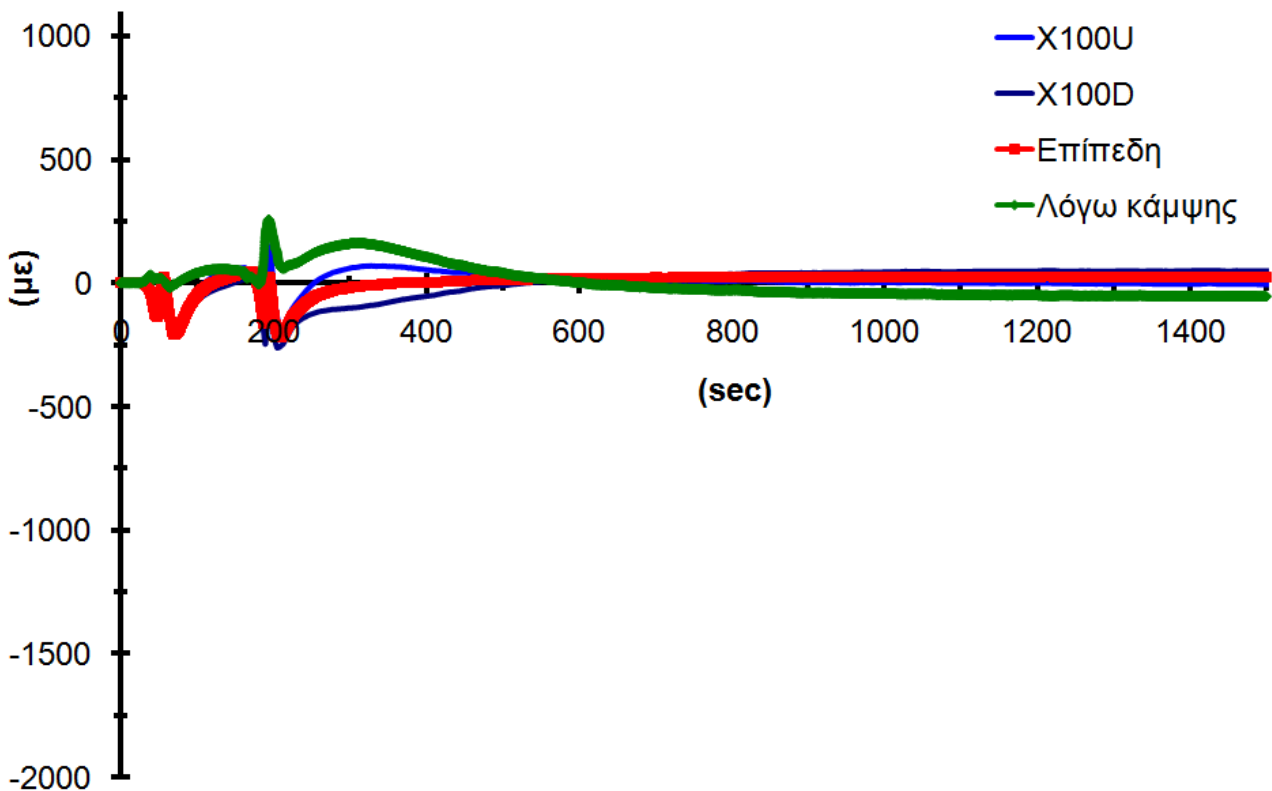
Εικόνα 11.41 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης



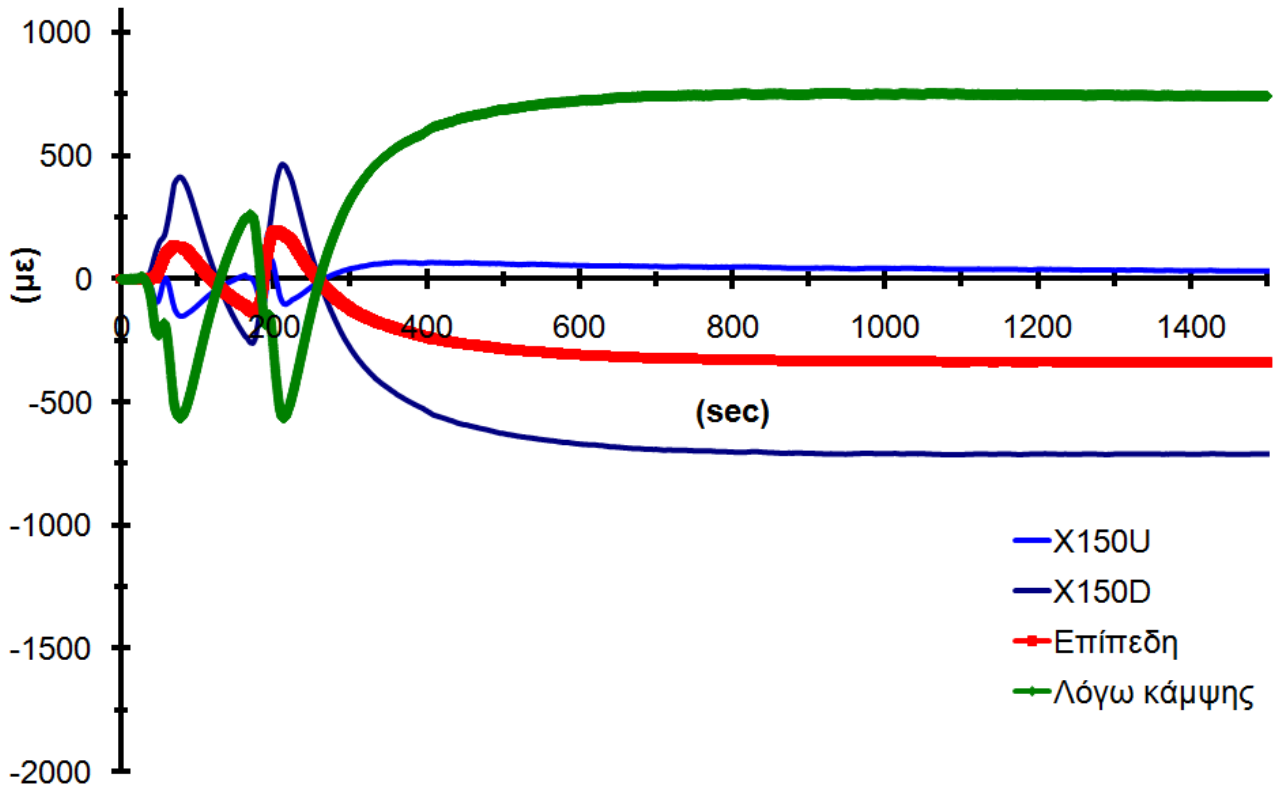
Εικόνα 11.42 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης



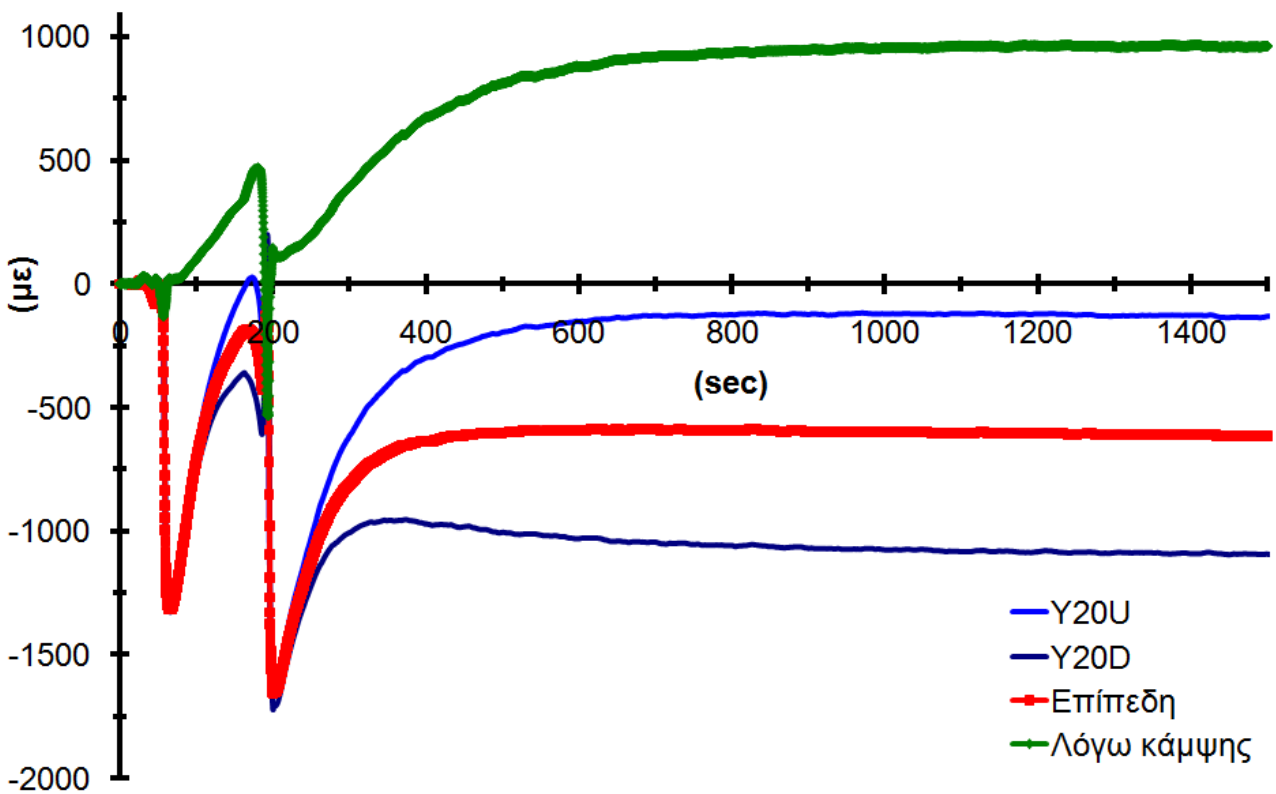
Εικόνα 11.43 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης



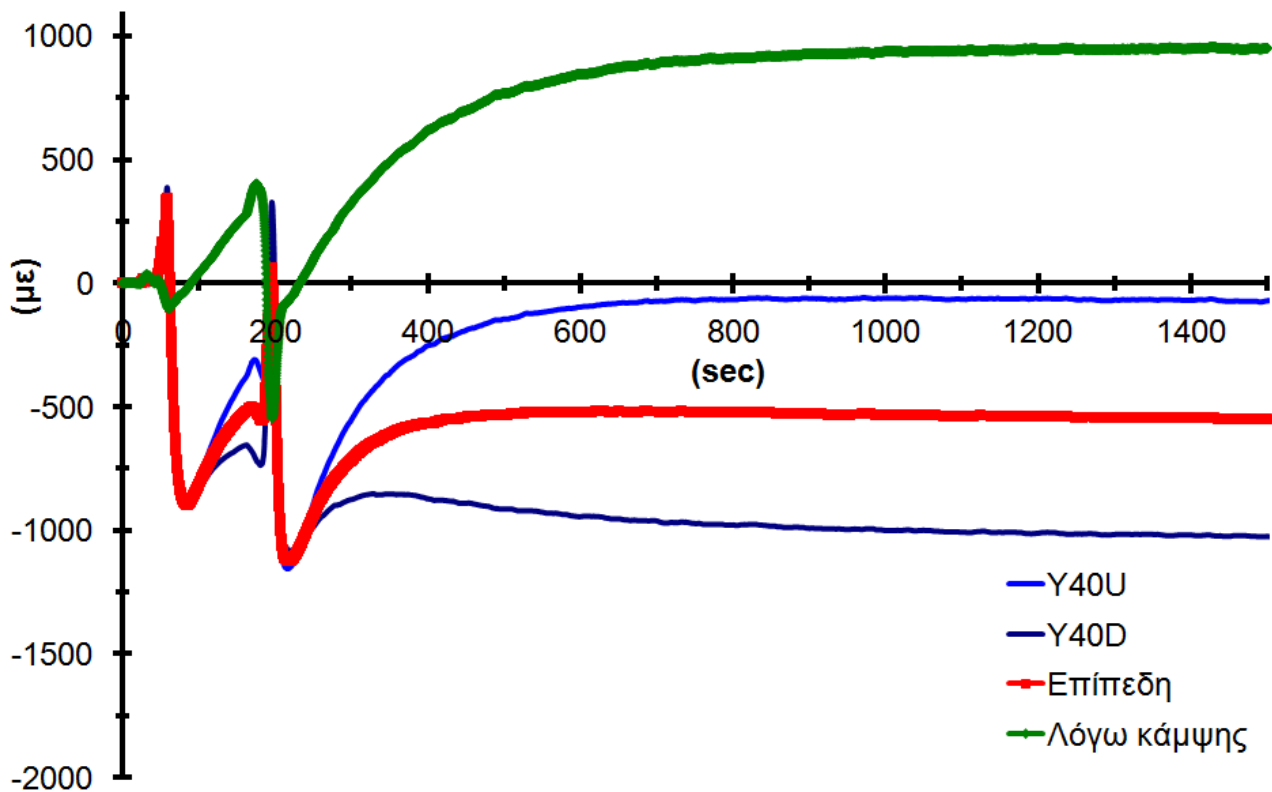
Εικόνα 11.44 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης



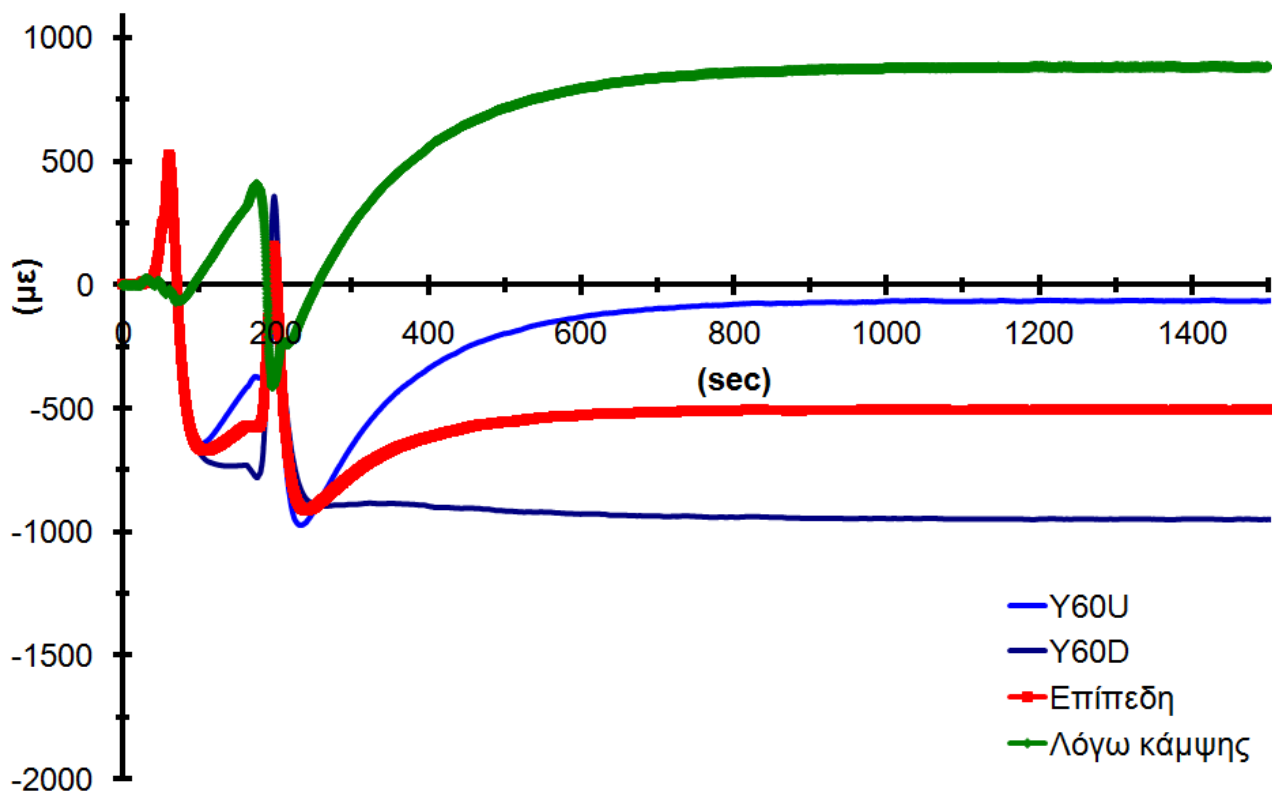
Εικόνα 11.45 Διαμήκης θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης



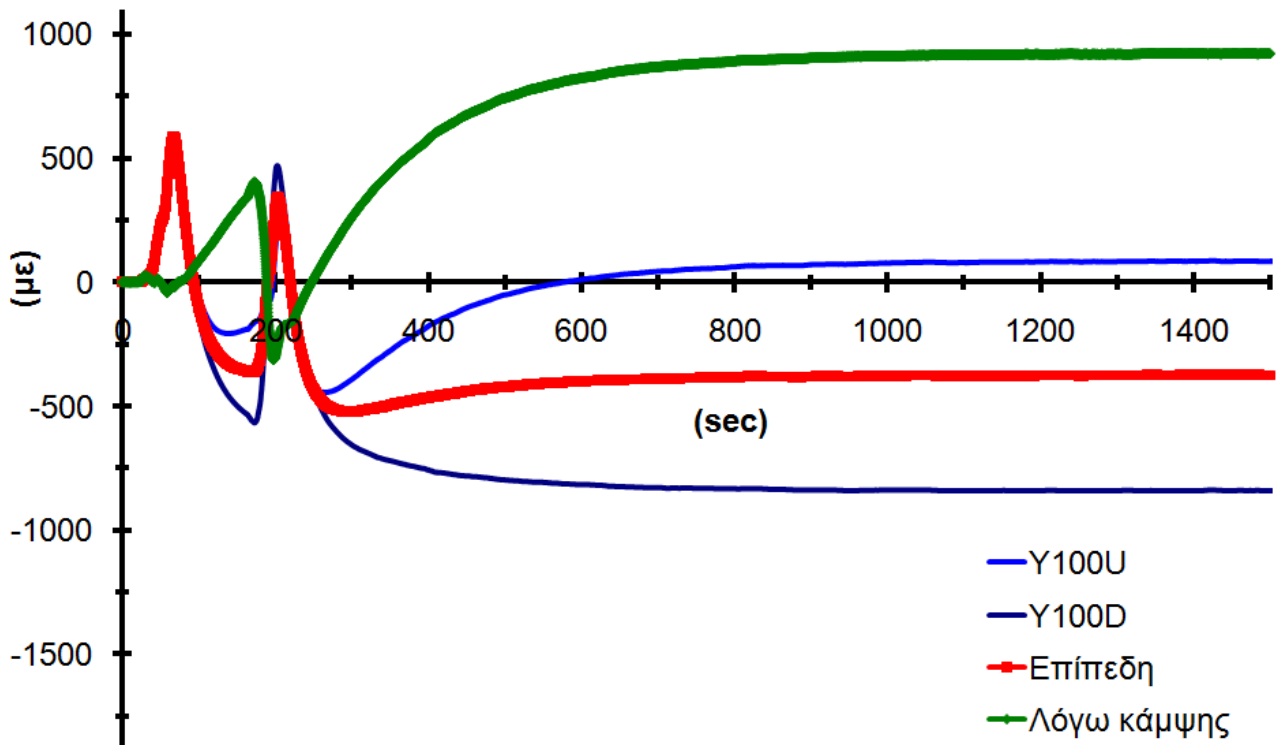
Εικόνα 11.46 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 20mm από τον άξονα συγκόλλησης



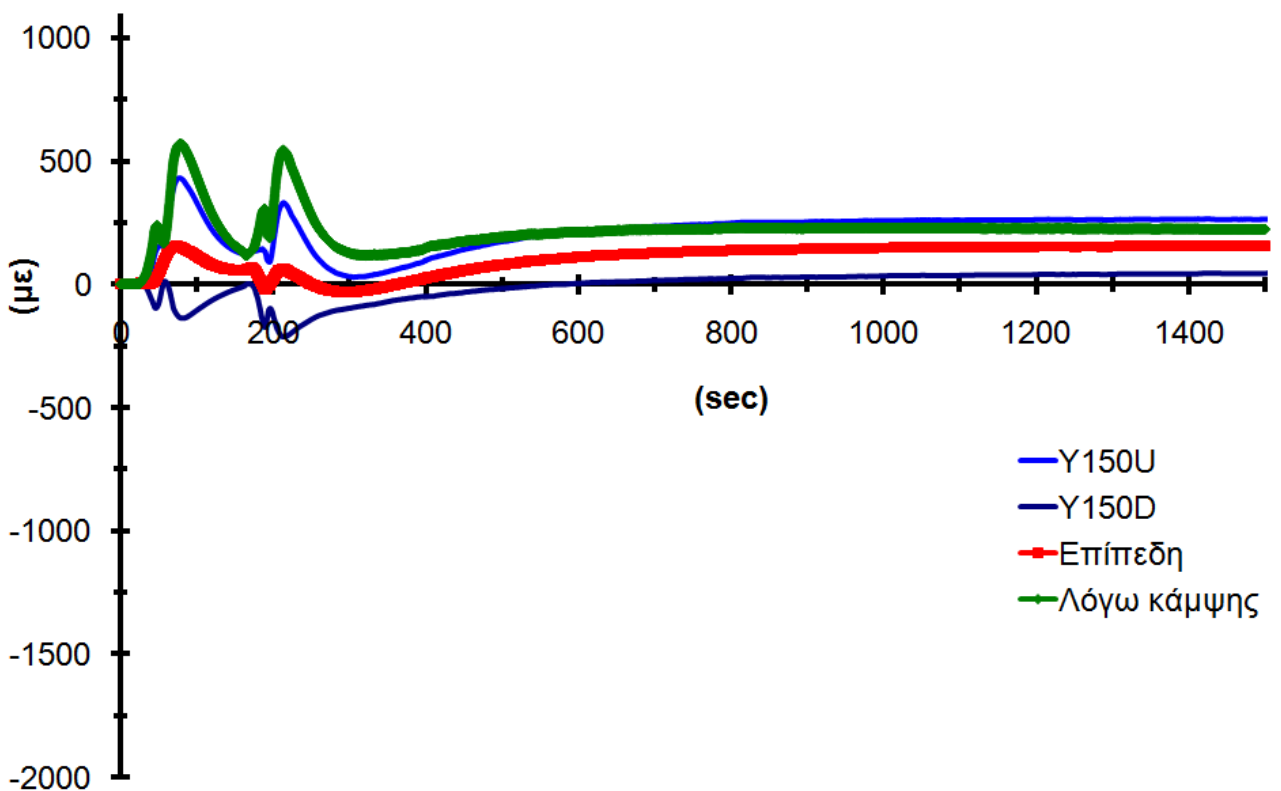
Εικόνα 11.47 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.48 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 60mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.49 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 100mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 11.50 Εγκάρσιες θερμικές παραμορφώσεις σε απόσταση 150mm από τον άξονα συγκόλλησης

Παρατηρήσεις

Το πρόβλημα που δημιουργήθηκε λόγω της υπερβολικής κατακόρυφης μετατόπισης του ελεύθερου ελάσματος και που αναφέρθηκε στην Παράγραφο 11.2.1.1 είχε σαν συνέπεια τη δημιουργία μιας αρκετά περίπλοκης μορφής καμπυλών Θερμικών παραμορφώσεων - Χρόνου. Κατά συνέπεια, ελάχιστες ασφαλείς παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν για την εξέλιξη των μεταβατικών παραμορφώσεων με το χρόνο και μόνο συμπεράσματα για την τελική κατάσταση ισορροπίας μπορούν να εξαχθούν.

- Γενικά ισχύουν οι παρατηρήσεις που έγιναν και στις συγκολλήσεις των ελασμάτων πάχους 4mm με τις τελικές παραμορφώσεις ωστόσο έχουν υψηλές τιμές ακόμα και σε απόσταση 40mm από τον άξονα συγκόλλησης.

- Σε αξιοσημείωτη παρατήρηση οδηγεί το γεγονός ότι η δεύτερη στρώση συγκόλλησης, πέρα από τις πρόσκαιρες εναλλαγές στο πρόσημο των μεταβατικών παραμορφώσεων (θλιπτικές κατά τη θέρμανση, εφελκυστικές κατά την απόψυξη) κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, δεν μεταβάλλει τη μορφή της συνολικής καμπύλης Θερμικών παραμορφώσεων - Χρόνου. Το γεγονός αυτό είναι περισσότερο ευδιάκριτο στις καμπύλες των διαμηκών παραμορφώσεων με το χρόνο καθώς το πρόβλημα από την υπερβολική κατακόρυφη μετατόπιση που δημιουργήθηκε επιδρά περισσότερο στις παραμορφώσεις κατά τον εγκάρσιο άξονα και λιγότερο κατά τον διαμήκη.

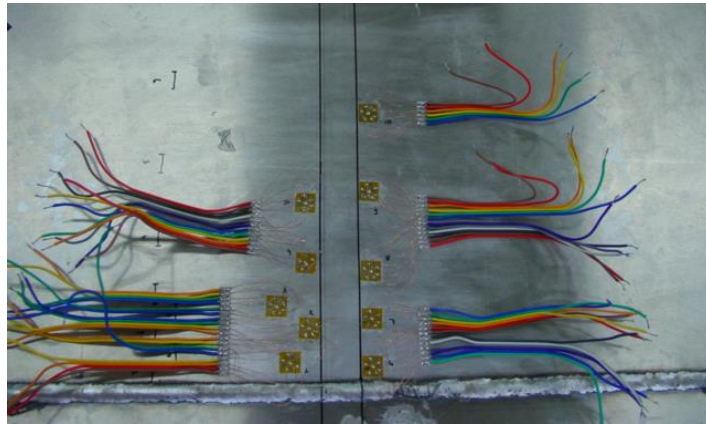
11.2.2 Παραμένουσες τάσεις

11.2.2.1 Τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής

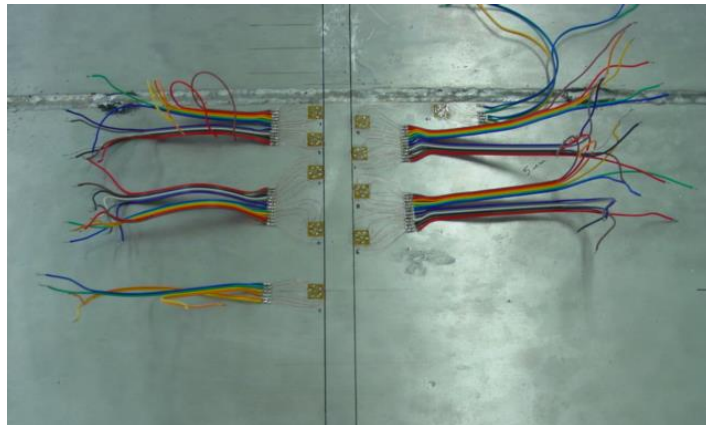
Στην Εικόνα 11.51 φαίνεται ο τρόπος διάταξης των ροζετών, σε ελάσματα από τα τρία διατιθέμενα πάχη. Καθώς οι περιορισμοί της μεθόδου επιβάλουν η απόσταση μεταξύ δύο μετρήσεων να είναι μεγαλύτερη του μεγέθους μιας ροζέτας (~10mm) προκειμένου να ληφθούν και ενδιάμεσες μετρήσεις, εγκαταστάθηκαν δύο σειρές ροζετών σε άξονα εγκάρσιο προς τον άξονα συγκόλλησης.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια συγκόλλησης των ελασμάτων και η πρώτη μέτρηση έγινε σε απόσταση περίπου 10mm από τον άξονα συγκόλλησης

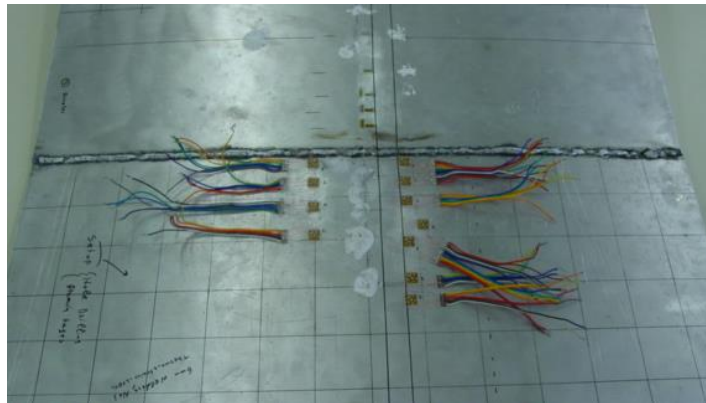
Σημειώνεται ότι ανάμεσα στις παράλληλες γραμμές που διακρίνονται στην Εικόνα 11.51 εγκαταστάθηκαν, μετέπειτα, τα επιμηκυνσιόμετρα για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του τεμαχισμού.



(α)



(β)



(γ)

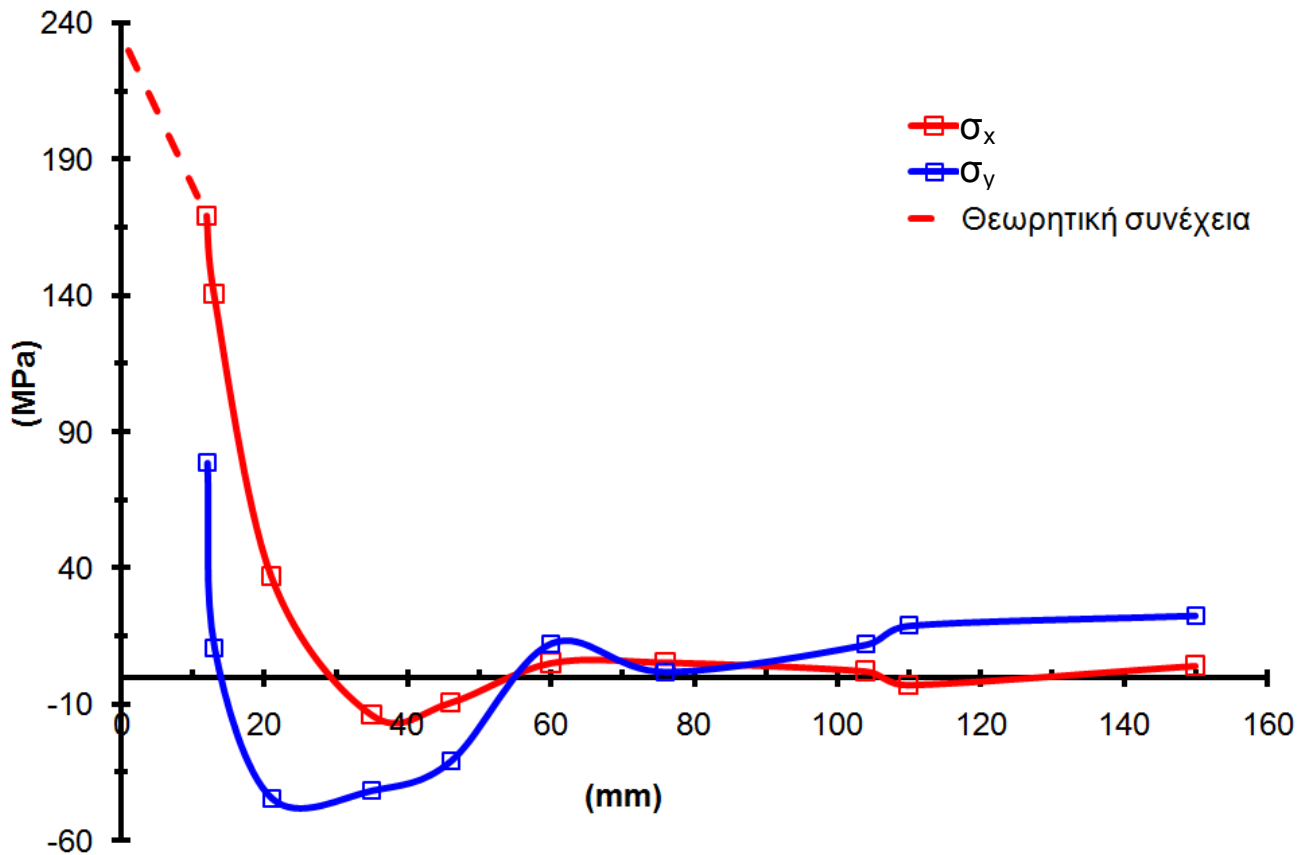
Εικόνα 11.51 Εγκατεστημένες ροζέτες, στα συγκολλημένα ελάσματα, για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων. Ελάσματα πάχους α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm

Στον Πίνακα 11.8 και στα διαγράμματα των Εικόνων 11.52 ως 11.54, φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων παραμενουσών τάσεων με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής.

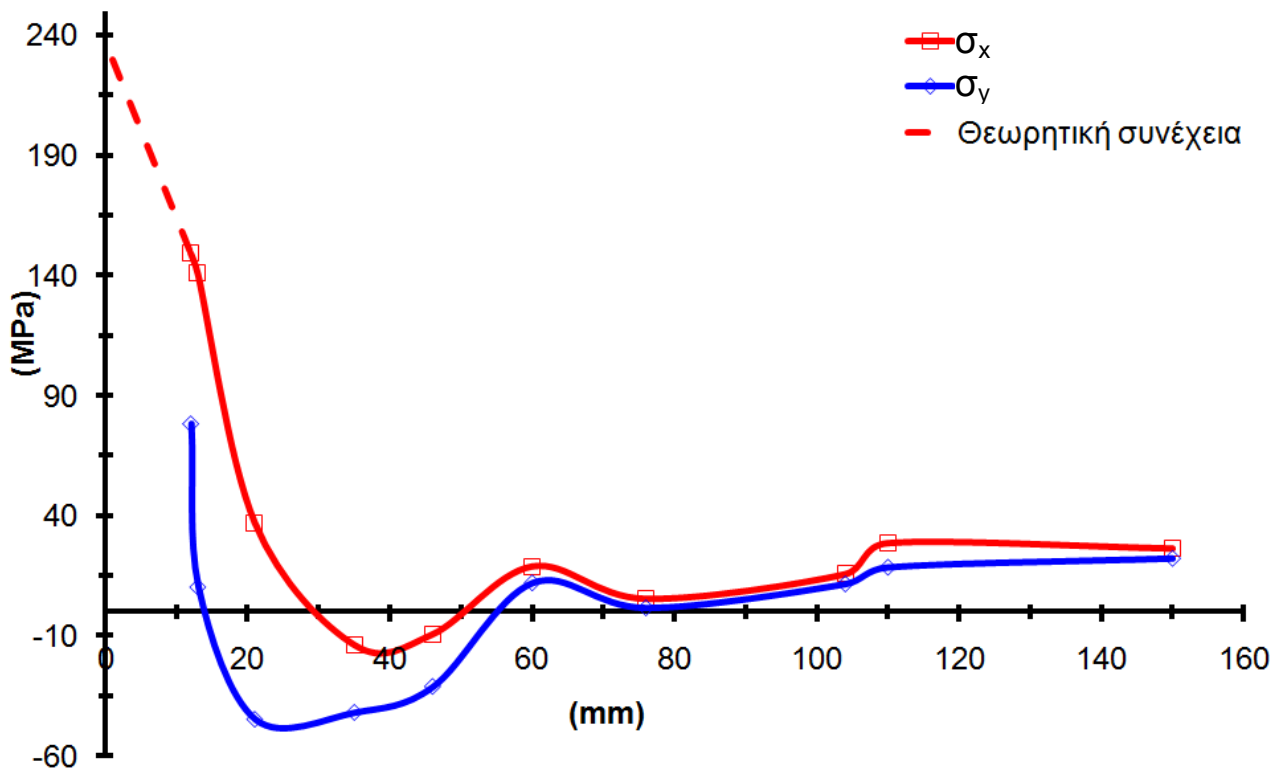
Σημειώνεται ότι έχει γίνει η θεώρηση πως σε μηδενική απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές της τάξης του ορίου διαρροής του υλικού σε θερμοκρασία δωματίου.

Πίνακα 11.8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων παραμένουσών τάσεων με χρήση της τεχνικής τεμαχισμού

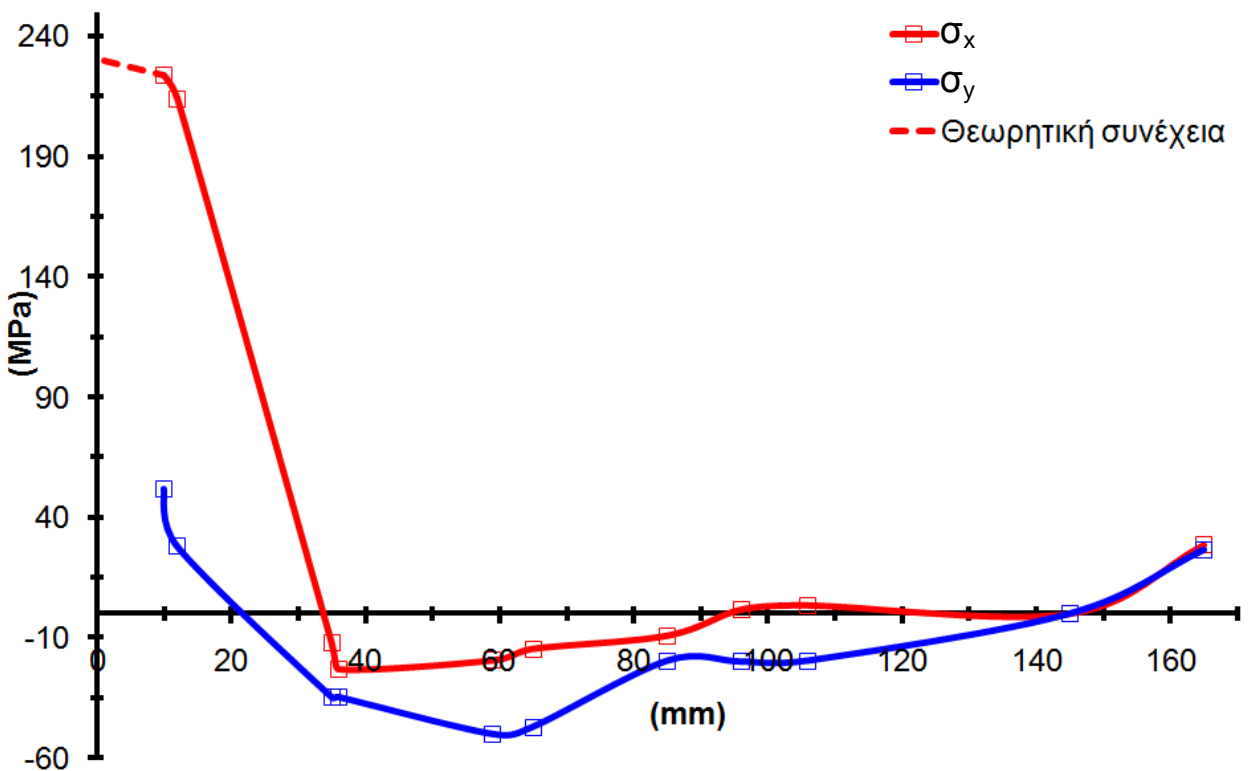
Τεχνική διάτρησης τυφλής οπής								
Παραμένουσες τάσεις								
Πάχος ελασματος 4mm			Πάχος ελασματος 5mm			Πάχος ελασματος 6mm		
Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης	σ_x	σ_y	Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης	σ_x	σ_y	Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης	σ_x	σ_y
12	169,23	78,44	12	78,44	149,23	10	51,72	223,81
13	140,68	10,42	13	10,42	140,68	12	27,91	214,11
21	37,01	-44,63	21	-44,62	37,01	35	-34,74	-12,13
35	-13,95	-41,77	35	-41,77	-13,95	36	-34,68	-22,98
46	-9,53	-30,97	46	-30,96	-9,53	59	-50,08	-19,34
60	5,00	12,21	60	12,21	18,76	65	-47,08	-14,51
76	5,25	1,81	76	1,81	5,25	85	-19,61	-9,09
104	2,00	18,72	104	11,75	15,54	96	-19,97	1,75
110	-3,00	22,40	110	18,72	28,46	106	-19,56	3,53
150	4,00	78,44	150	22,40	26,21	145	-1,00	1,12
-	-	-	-	-	-	165	26,52	28,56



Εικόνα 11.52 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)



Εικόνα 11.53 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)



Εικόνα 11.54 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής διάτρησης τυφλής οπής)

Όπως προκύπτει:

- ο Σε ότι αφορά στις μετρήσεις σε συγκολλημένα ελάσματα πάχους 4mm, οι κατά τον άξονα συγκόλλησης παραμένουσες τάσεις, σ_x , είναι εφελκυστικές και συνεχώς φθίνουσες, όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα συγκόλλησης και μέχρι απόσταση 30mm από αυτόν. Σε απόσταση 10mm από τον άξονα συγκόλλησης όπου και βρίσκεται η πρώτη θέση μέτρησης, η σ_x έχει τιμή της τάξης των 169MPa. Μετά τα 30mm οι παραμένουσες τάσεις γίνονται θλιπτικές παίρνοντας ωστόσο μικρές τιμές και στη συνέχεια, σε απόσταση 55mm ξαναγίνονται εφελκυστικές εξαιτίας της διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το συγκολλημένο έλασμα. Οι σ_y , παραμένουσες τάσεις παρουσιάζουν την ίδια, γενικά, μορφή καμπύλης με περισσότερο περιορισμένη τη ζώνη εφελκυστικών τάσεων και ευρύτερη αυτή των θλιπτικών τάσεων.

- ο Σε ότι αφορά στις μετρήσεις σε συγκολλημένα ελάσματα πάχους 5mm, οι καμπύλες των σ_x παραμενουσών τάσεων σε συνάρτηση με την απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης έχουν την ίδια μορφή, με το εύρος όπου συναντώνται εφελκυστικές τάσεις να είναι της τάξης των 30mm ενώ το αντίστοιχο όπου εμφανίζονται θλιπτικές είναι 20 - 30mm. Σε μεγάλη απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης οι παραμένουσες τάσεις είναι και πάλι εφελκυστικές, λόγω της διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το συγκολλημένο έλασμα.

- ο Αντίστοιχα, σε συγκολλημένα ελάσματα πάχους 6mm οι μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων, με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής έδωσαν σαφώς μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων σε αποστάσεις κοντά στον άξονα συγκόλλησης. Ακόμα και 10 - 15mm από τον άξονα συγκόλλησης οι τιμές των μέγιστων, σ_x , παραμενουσών τάσεων ήταν κοντά στην τιμή του ορίου διαρροής. Συνολικά, το εύρος των εφελκυστικών τάσεων προκύπτει να είναι 35mm. Μακριά από τη συγκόλληση οι τάσεις γίνονται θλιπτικές, σε ένα εύρος 60mm και στη συνέχεια και πάλι εφελκυστικές για λόγους που έχουν αναφερθεί.

11.2.2.2 Τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων

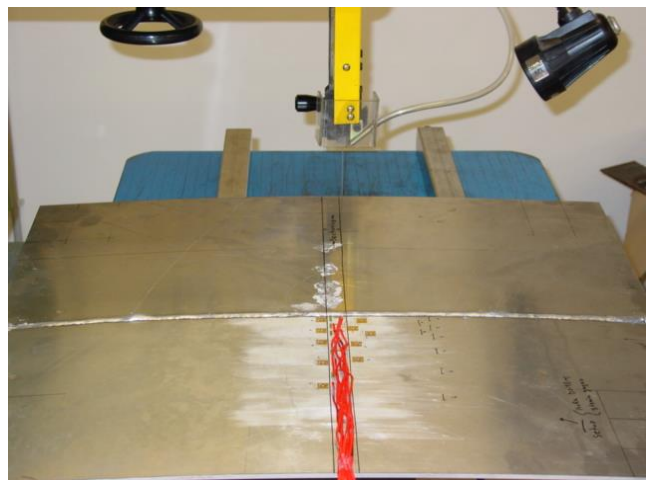
Στην Εικόνα 11.55, φαίνονται η διάταξη μέτρησης των παραμενουσών τάσεων με την τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων (Εικ. 11.55α και 11.55β) και τα εγκατεστημένα επιμηκυνσιομέτρα κοντά στον άξονα συγκόλλησης (Εικ. 11.55γ). Αντίστοιχα στην Εικόνα 11.56, φαίνονται τρία δοκίμια, από διαφορετικό το καθένα πάχος, αμέσως μετά την εφαρμογή της τεχνικής και τη λήψη των μετρήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 10.1.1.1 ως άξονας 'X' ορίζεται ο άξονας της συγκόλλησης και αντίστοιχα για τον υπολογισμό των σ_x λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των επιμηκυνσιομέτρων που είναι εγκατεστημένα παράλληλα σε αυτόν ενώ, ως άξονας 'Y' ορίζεται ο κάθετος στον άξονα συγκόλλησης άξονας οπότε και για τον υπολογισμό των σ_y λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των επιμηκυνσιομέτρων που είναι εγκατεστημένα κάθετα στον άξονα συγκόλλησης.

Σημειώνεται ακόμα πως για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων, ελήφθησαν οι τελικές τιμές που προέκυψαν από τα επιμηκυνσιομέτρα μετά την πλήρη ολοκλήρωση της διαδικασίας του τεμαχισμού.

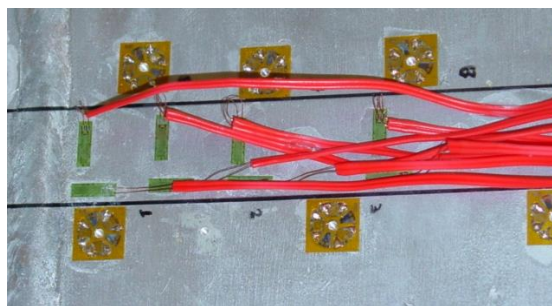


(α)

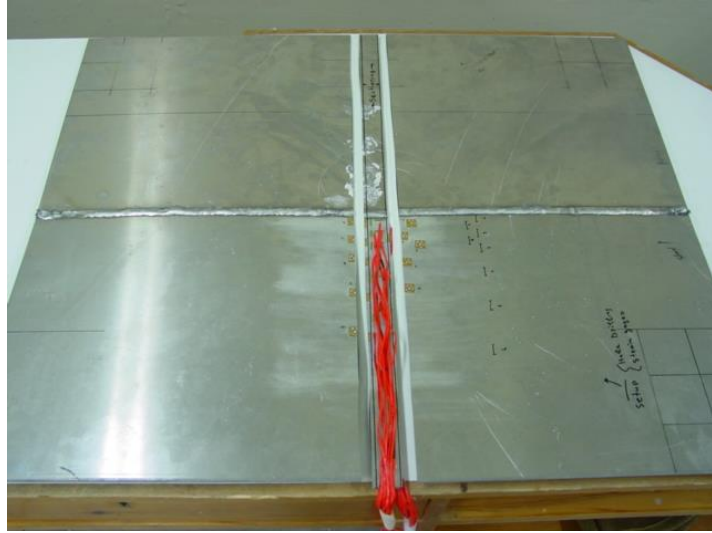


(β)

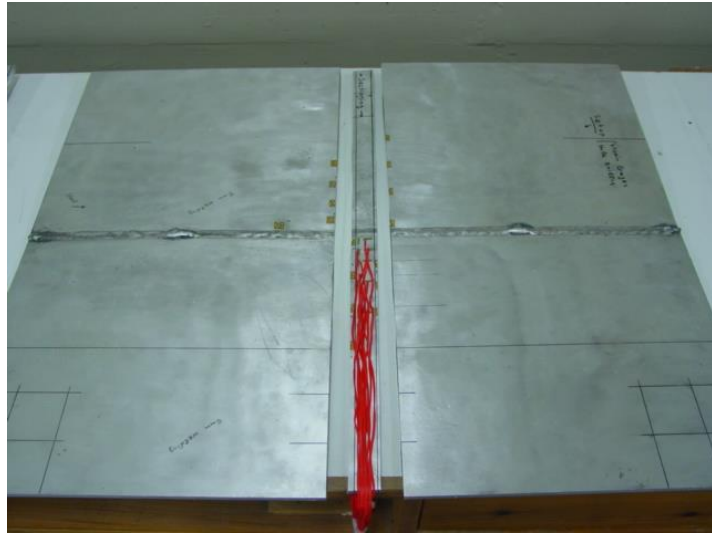
Εικόνα 11.55 α) Μετρητική διάταξη μέτρησης παραμενουσών τάσεων με την τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων, β) το έλασμα με εγκατεστημένα τα επιμηκυνσιομέτρα λίγο πριν τον τεμαχισμό στην κοπτική κορδέλα



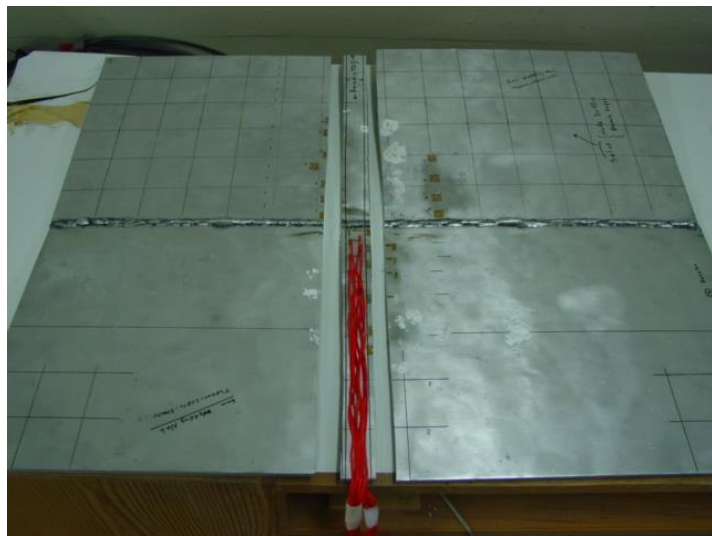
Εικόνα 11.56 Επιμηκυνσιομέτρα κοντά στην περιοχή συγκόλλησης



(α)



(β)



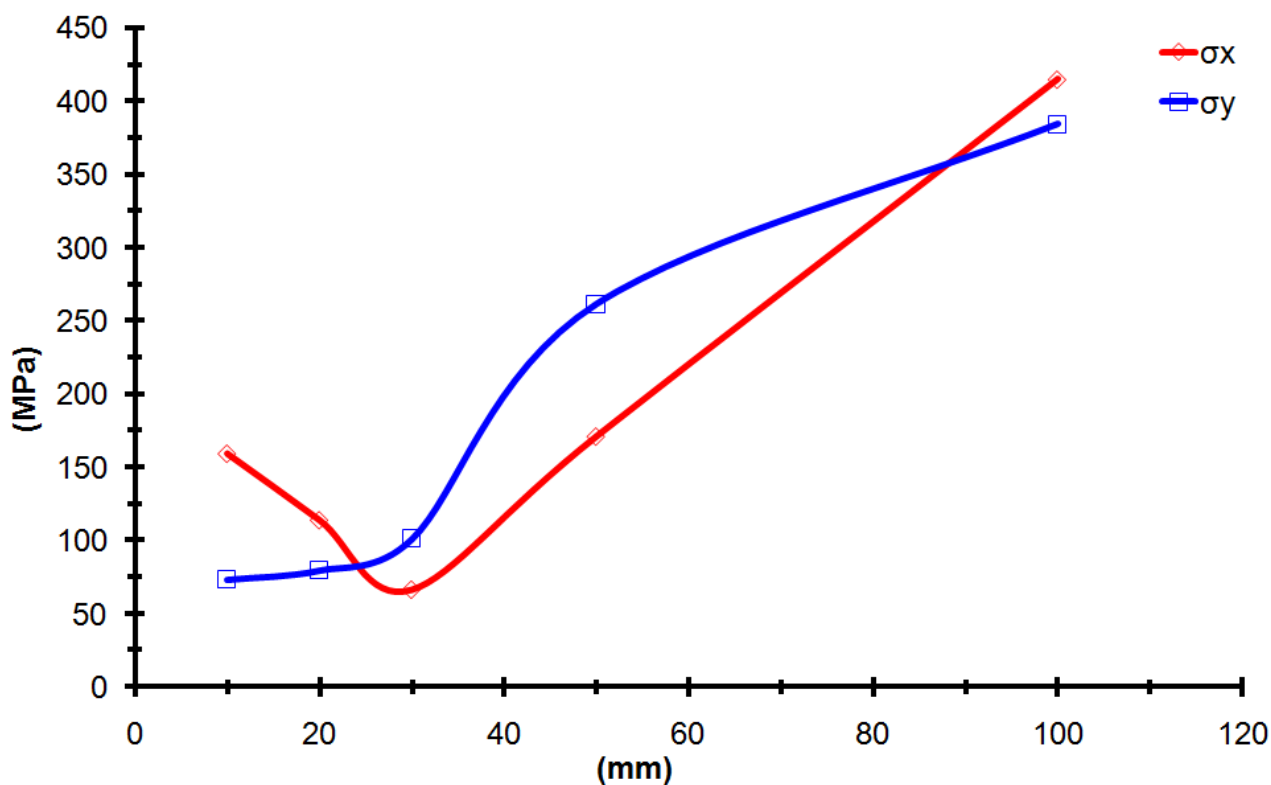
(γ)

Εικόνα 11.57 Δοκίμια μετά την εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού. Ελάσματα πάχους
α) 4mm, β) 5mm, γ) 6mm

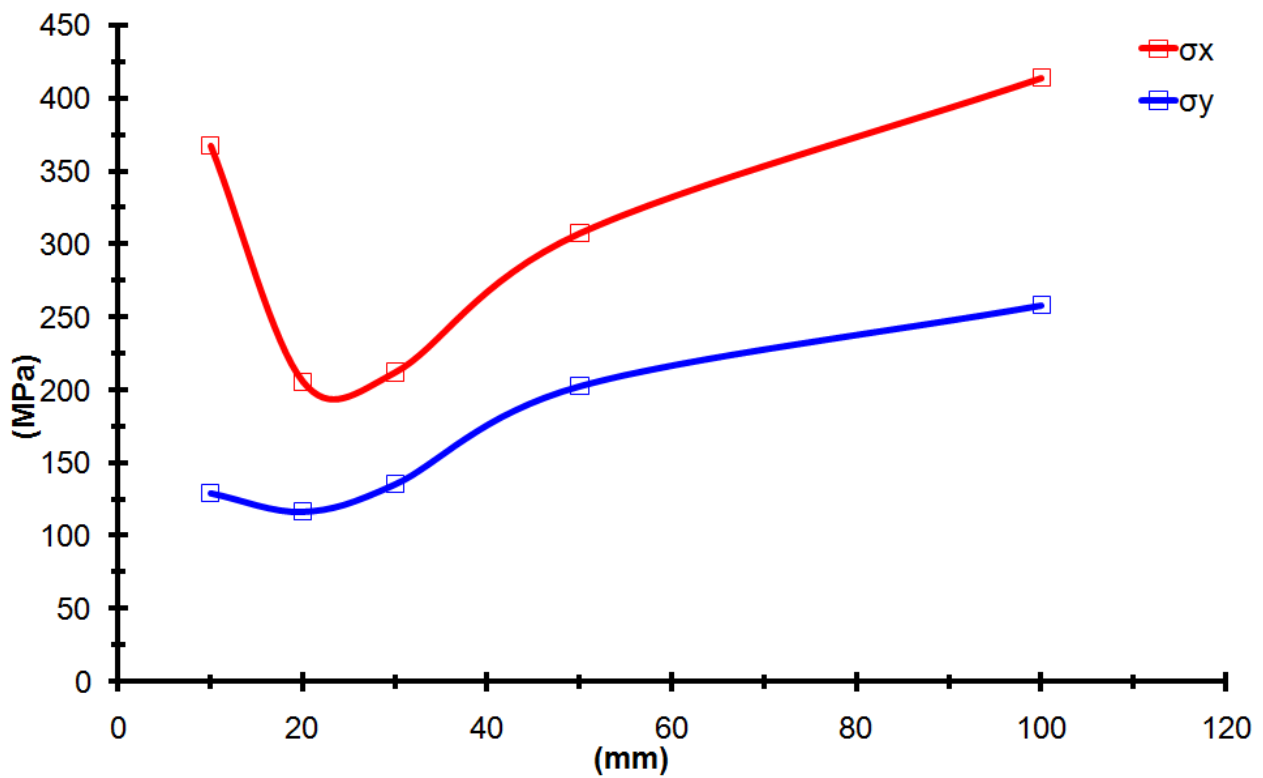
Στον Πίνακα 11.9 και στα διαγράμματα των Εικόνων 11.57 ως 11.59, φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων παραμενουσών τάσεων με την τεχνική τεμαχισμού του υλικού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων.

Πίνακα 11.9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων παραμενουσών τάσεων με χρήση της τεχνικής τεμαχισμού

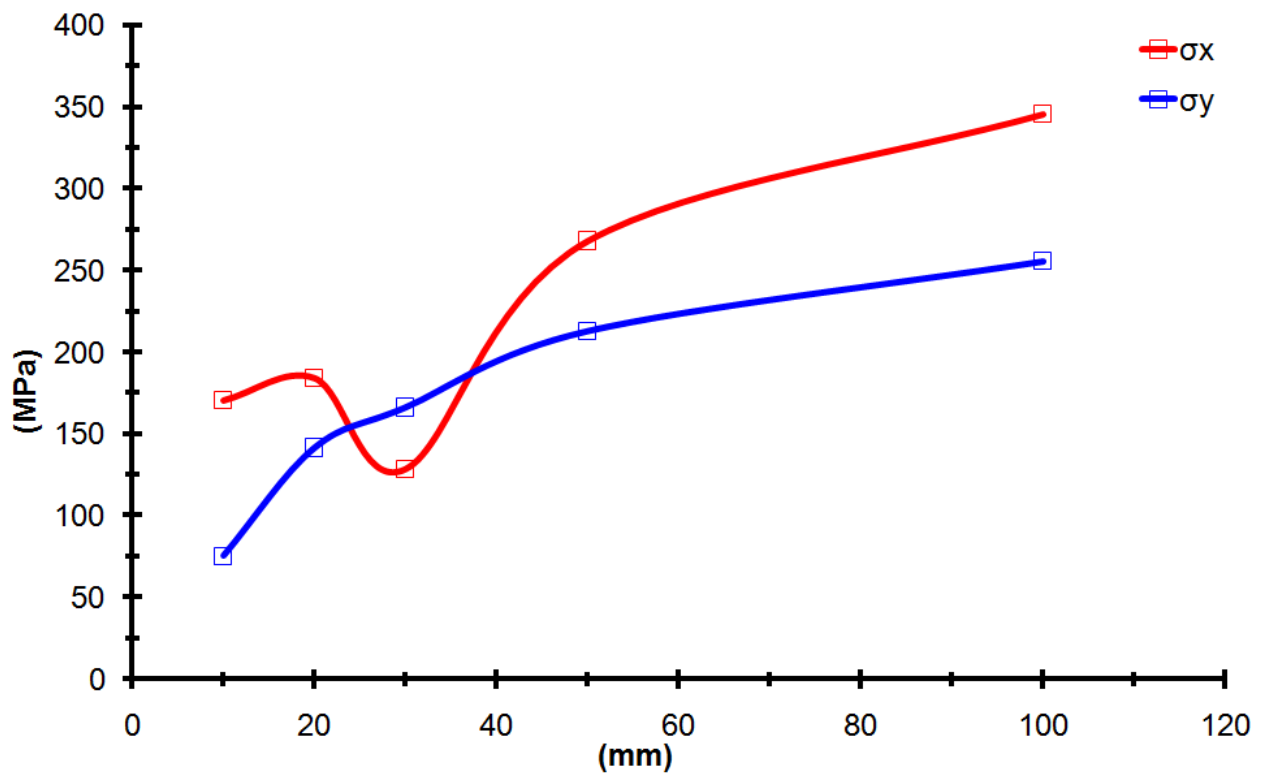
Τεχνική τεμαχισμού και χρήση επιμηκυνσιομέτρων						
Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης (mm)	Πάχος ελασμάτων 4mm		Πάχος ελασμάτων 5mm		Πάχος ελασμάτων 6mm	
	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_x (MPa)	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_y (MPa)	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_x (MPa)	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_y (MPa)	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_x (MPa)	Επίπεδες παραμένουσες τάσεις σ_y (MPa)
10	159,02	73,40	367,54	129,34	170,24	75,24
20	113,52	79,76	205,58	116,75	183,90	141,47
30	65,98	101,06	212,19	135,62	128,32	166,22
50	170,75	261,44	307,59	202,61	267,74	213,00
100	414,91	384,19	413,98	257,75	345,28	255,66



Εικόνα 11.58 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 4mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού)



Εικόνα 11.59 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 5mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού)



Εικόνα 11.60 Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος εγκάρσιου άξονα ως προς τον άξονα συγκόλλησης, στη μέση τομή της συγκόλλησης ελασμάτων πάχους 6mm (εφαρμογή της τεχνικής τεμαχισμού)

Όπως προκύπτει:

↪ Σε όλες τις περιπτώσεις (Πιν. 11.9, Εικ. 11.58 - 11.60) ενώ οι τιμές των διαμηκών παραμενουσών τάσεων σ_x , για τις δύο πρώτες θέσεις μέτρησης (κοντά στον άξονα συγκόλλησης) είναι ποιοτικά συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής διάνοιξης τυφλής οπής, οι τιμές που προκύπτουν για τις πιο απομακρυσμένες θέσεις από τον άξονα συγκόλλησης είναι πολύ μακριά από τις αναμενόμενες και προφανώς δεν σχετίζονται ποιοτικά με τις αντίστοιχες που ελήφθησαν από τις μετρήσεις με την τεχνική διάνοιξης τυφλής οπής.

↪ Καθώς η έναρξη της διαδικασίας τεμαχισμού έγινε από την πλευρά του συγκολλημένου δοκιμίου, όπου ήταν εγκατεστημένα τα επιμηκυνσιόμετρα (συνεπώς κοντά στα πιο απομακρυσμένα από τον άξονα συγκόλλησης επιμηκυνσιόμετρα) και λαμβάνοντας υπόψη τη γωνιακή παραμόρφωση και τη διαμήκη καμπτική παραμόρφωση, λόγω συγκόλλησης, των δοκιμίων, θεωρείται ότι οι εξαιρετικά υψηλές τιμές τάσης που έδωσαν αυτά είναι αποτέλεσμα των τάσεων που παρήχθησαν από την διαδικασία κοπής, συνυπολογιζόμενης και της κακής στήριξης του ελάσματος στην τράπεζα κοπής.

↪ Καθώς η διαδικασία τεμαχισμού εξελισσόταν και η κορδέλα κοπής πλησίαζε προς τον άξονα συγκόλλησης, το υπό τεμαχισμό έλασμα στηριζόταν καλύτερα στην τράπεζα κοπής κι έτσι οι τιμές που προέκυψαν για τα δύο πιο κοντινά στον άξονα συγκόλλησης ελάσματα ήταν περισσότερο αξιόπιστες.

↪ Ωστόσο, καθώς τα εγκαταστημένα σε κάθε θέση μέτρησης επιμηκυνσιόμετρα καταγράφουν τη χαλάρωση των τάσεων σε ολόκληρη την αφαιρούμενη ζώνη του υλικού, θεωρείται ότι ακόμα και οι τιμές που προέκυψαν από τα δύο πρώτα επιμηκυνσιόμετρα εμπεριέχουν σημαντικό ποσοστό σφάλματος.

Συνολικά, από την εμπειρία εκτέλεσης της τεχνικής με την διαδικασία που περιγράφηκε αλλά και από τη μορφή των εξαγόμενων αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η τεχνική του τεμαχισμού με χρήση κορδέλας κοπής, κρίνεται αναξιόπιστη να εφαρμοστεί σε τόσο λεπτά συγκολλημένα ελάσματα, τόσο μεγάλων διαστάσεων (συνολικές διαστάσεις συγκολλημένης πλάκας 700mm x 600mm) και με το βαθμό των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης (γωνιακών και διαμήκους καμπτικών) των διαθέσιμων ελασμάτων. Η δυσκολία συγκράτησης των δοκιμίων κατά τη διαδικασία λόγω των ανωτέρω είχε σαν συνέπεια την εμφάνιση σημαντικών ταλαντώσεων αλλά και κρουστικών δυνάμεων με δυσμενή συνέπεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Παρόλο που κατά

τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι τελικές τιμές των ενδείξεων που ελήφθησαν από τα επιμηκυνσιόμετρα, θεωρείται σχεδόν βέβαιο ότι κατά την εκτέλεση της τεχνικής, είτε προστέθηκαν τάσεις (π.χ. λόγω κρουστικών φορτίων ή λόγω της υπερβολικής συγκράτησης των δοκιμίων - προκειμένου να επιτευχθεί με ασφάλεια ο τεμαχισμός - που μπορεί να οδηγήσει σε πλαστική παραμόρφωση), είτε τοπικά, σε μη ελέγξιμες περιοχές, προκλήθηκε χαλάρωση των τάσεων λόγω των σημαντικών ταλαντώσεων.

Η εφαρμογή της τεχνικής σε ελάσματα μεγαλύτερου πάχους (π.χ. 10mm - 12mm και άνω) κρίνεται ότι μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερα αξιόπιστα αποτελέσματα ενώ, πιθανότατα η χρήση δίσκου κοπής ακόμα και με προσθήκη λίπανσης (εφόσον εξασφαλιστεί η προστασία των επιμηκυνσιόμετρων) αντί για κορδέλα κοπής, μπορεί να συνεισφέρει στην ευκολία τεμαχισμού χωρίς σημαντικούς κραδασμούς.

Βιβλιογραφία

1. Β.Ι. Παπάζογλου, Γ. Παπαδημητρίου, 'Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994
2. K. Masubuchi, Analysis of welded structures, Pergamon Press, Oxford, 1980
3. G.R. Bradley, M.N. James, 'Residual Stresses/Strains Induced by the Metal Inert Gas and Friction Stir Welding Processes', Department of Mechanical and Marine Engineering, University of Plymouth, England, February 2000
4. V.J. Papazoglou, K. Masubuchi, E. Gonçalves, A. Imakita, 'Residual Stresses due to welding: Computer aided analysis of their formation and consequences', SNAME Transactions, Vol. 90 (1982), pp. 365-390
5. J.B. Andrews, M. Arita, K. Masubuchi, 'Analysis of thermal stress and metal movement during welding', NASA Contract Report, NASA CR-61351, Prepared for the G.C. Marsall Space Flight Centre, Dec. 1970
6. K. Masubuchi et al., 'Analysis of thermal stresses and metal movements of weldments: A basic study toward computer-aided analysis and control of welded structures', TRANS SNAME, Vol. 83, 1975
7. A. Imakita, V.J. Papazoglou, K. Masubuchi, 'One-dimensional computer programs for analyzing heat flow, transient thermal strains, residual stresses, and distortion in weldments', Report to O.N.R. from M.I.T., prepared under Contract No. 00014-75-C-0469 (M.I.T. O.S.P. No. 82558), Cambridge, Mass., Dec. 1981
8. C.L. Tsai, S.C. Park, W.T. Cheng, 'Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure', Welding Journal, Vol. 78, No. 5 (1999), pp. 156s-165s
9. G.B. Jang, H.K. Kim, S.S. Kang, 'The Effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldments', Welding Journal, Vol. 80, No. 3 (2001), pp. 80s-89s
10. J. Canas, R. Picon, F. Paris, A. Blazquez and J. C. Marin, 'A Simplified Numerical Analysis of Residual Stresses in Aluminum Welded Plates', Computers & Structures, Vol. 58, No. 1 (1996), pp. 59-69

- 11.** G.C. Luh, R.M. Hwang, 'Measuring Non-Uniform Residual Stress in Thin Plates by a Proposed Hole-Drilling Strain Gauge Method', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15 (1999), pp.103-113
- 12.** A. Berkovits, D.W. Kelly, S. Di, 'Considerations of the Effect of Residual Stresses on Fatigue of Welded Aluminium Alloy Structures', *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 21 (1998), pp. 159-170
- 13.** D. Vangi, 'Data Management for the Evaluation of Residual Stresses by the Incremental Hole-Drilling Method', *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 116, Issue 4 (1994), pp. 561-566
- 14.** D. Vangi, 'Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method with Off-Center Hole: An Extension of the Integral Method', *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 119, Issue 1 (1997), pp. 79-85
- 15.** G.S. Schajer, E. Altus, 'Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements', *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 118, Issue 1 (1996), pp. 120-126
- 16.** B. Zuccarello, 'Optimal Calculation Steps for the Evaluation of Residual Stress by the Incremental Hole-drilling Method', *Experimental Mechanics*, Vol. 39, No2 (1999), pp.116-124
- 17.** K. Sasaki, M. Kishida and T. Itoh, 'The Accuracy of Residual Stress Measurement by the Hole-drilling Method', *Experimental Mechanics*, Vol. 37 (1997), pp250-257
- 18.** M . Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli, 'Numerical Analysis of Plasticity Effects in the Hole-Drilling Residual Stress Measurement', *Journal of Testing & Evaluation*, Vol. 22, Issue 6 (1994), pp. 522-529
- 19.** M. Beghini, L. Bertini, 'Recent Advances in the Hole Drilling Method for Residual Stress Measurement', *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7, Issue 2 (1998), pp. 163-172
- 20.** H. Wern, 'Finite Element Solutions for Mechanical Drilling Methods: A New Integral Formalism', *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 63 (1995), pp. 365-372

- 21.** J. Lu, C. Bouhelier, H.P. Lieurade, D. Baralle, B. Miede, J.F. Flavenot, 'Study of Residual Welding Stress Using the Step by Step Hole Drilling and X-ray Diffraction', *Welding In the World*, Vol. 33, No. 2 (1994), pp. 118-128
- 22.** V.S. Pisareva, V.V. Balalov, V.S. Aistova, M.M. Bondarenko, M.G. Yustusa, 'Reflection Hologram Interferometry Combined With Hole Drilling Technique as an Effective Tool for Residual Stresses Fields Investigation in Thin-Walled Structures', *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 36 (2001), pp. 551-597
- 23.** V.S. Pisarev, V.S. Aistov, V.V. Balalov, M.M. Bondarenko, S.V. Chumak, V.D. Grigoriev, M.G. Yustus, 'Metrological Justification of Reflection Hologram Interferometry With Respect to Residual Stresses Determination by Means of Blind Hole Drilling', *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 41 (2004), pp. 353-410
- 24.** M. Honner, P. Lito, M. Svantner, 'Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique', *Infrared Physics & Technology*, Vol. 45 (2004), pp. 131-142
- 25.** S.Y. Wu, Y.W. Qin, 'Determination of Residual Stresses Using Large Shearing Speckle Interferometry and the Hole Drilling Method', *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 23 (1995), pp. 233-244
- 26.** D.V. Nelson, A. Makino, E.A. Fuchs, 'The Holographic-hole Drilling Method for Residual Stress Determination', *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 27 (1997), pp. 3-23
- 27.** M. Ya, P. Marquette, F. Belahcene, J. Lu, 'Residual Stresses in Laser Welded Aluminium Plate by Use of Ultrasonic and Optical Methods', *Materials Science and Engineering A*, Vol. 382 (2004), pp. 257-264
- 28.** M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers, 'Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminium AA5083 Friction Stir Welds', *Acta Materialia*, Vol. 51 (2003), pp. 4791-4801
- 29.** Y. Zhang, S. Ganguly, L. Edwards, M.E. Fitzpatrick, 'Cross-sectional mapping of residual stresses in a VPPA weld using the contour method', *Acta Materialia*, Vol. 52, Issue 17 (2004), pp. 5225-5232

- 30.** P.J. Webster, N. Ananthaviravakumar, D.J. Hughes, G. Mills, R.V. Preston, H.R. Shercliff, P.J. Withers, 'Measurement and Modelling of Residual Stresses in a TIG Weld', *Applied Physics A*, Vol. 74 (2002), pp. S1421–S1423
- 31.** P. Staron, M. Koçak, S.Williams, A.Wescott, 'Residual Stresses in Friction Stir Welded Al Sheets', *Physica B*, Vol. 350 (2004), pp. e491–e493
- 32.** P. Staron, M. Koçak, S.Williams, 'Residual Stresses in Friction Stir Welded Al Sheets', *Applied Physics A*, Vol. 74 (2002), pp. s1161–s1162
- 33.** M.N. James, D.G. Hattingh, D.J. Hughes, L.-W. Wei, E.A. Patterson and J.Q. Da Fonseca, 'Synchrotron diffraction investigation of the distribution and influence of residual stresses in fatigue', *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*, Vol. 27 (2004), pp. 609–622
- 34.** J.B. Poelens, 'Numerical Simulation of Some Multipass Submerged Arc Welding-Determination of the Residual Stresses and CoMParison with Experimental Measurements', *Welding In the World*, Vol. 35, No. 2 (1995), pp. 110-117
- 35.** Y.-B. Lee, C.-S. Chung, Y.-K. Park, H.-K. Kim, 'Effects of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behaviour of SS330 Weldment', *International Journal of Fatigue*, Vol. 20 (1998), No. 8, pp. 565–573
- 36.** A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, 'Effects of the Stress Relief Conditions on a Martensite Stainless Steel Welded Component', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77 (1998), pp. 216–225
- 37.** F. Faure, R.H. Leggatt, 'Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Primary Coolant Pipes and Welds of Pressurized Water Reactors', *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, Vol. 65 (1996), pp. 265-275
- 38.** G. Roy, M. Braid, G. Shen, 'Application of ADINA and Hole Drilling Method to Residual Stress Determination in Weldments', *Computers and Structures* Vol. 81 (2003), pp.929–935
- 39.** P.-H. Chang, T.-L. Teng, 'Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints', *Computational Materials Science*, Vol. 29 (2004), pp. 511–522

- 40.** Y.C. Lin, K.H. Lee, 'Effect of Preheating on the Residual Stress in type 304 Stainless Steel Weldment', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63 (1997), pp. 797-801
- 41.** ASTM E837-89, 'Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method', ASTM E837-95, American Society for Testing and Materials, 1995.
- 42.** R. Oettel, 'The Determination of Uncertainties in Residual Stress Measurement (Using the hole drilling technique): Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials', *Standards Measurement & Testing Project No. SMT4-CT97-2165*, Issue 1, September 2000
- 43.** Jerry Lord, 'Hole Drilling Techniques', *BCA Structural Materials Workshop*, The NPL Materials Centre, 12th September 2000
- 44.** M. Salcudean, M. Choi, R. Greif, 'A study of heat transfer during arc welding' *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 29 No. 2 (1986), pp. 215-225,
- 45.** Teresa Sibillano, Antonio Ancona, Vincenzo Berardi, Emanuela Schingaro, Giuseppe Basile, Pietro Mario Lugara, 'A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation' *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44 (2006), pp. 1039-1051
- 46.** P. Donga, J.K. Hong, P.J. Bouchard, 'Analysis of residual stresses at weld repairs' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82 (2005), pp. 258-269
- 47.** Q.G. Meng, H.Y. Fang, J.G. Yang, S.D. Ji, 'Analysis of temperature and stress field in Al alloys twin wire welding' *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 44 (2005), pp. 178-186
- 48.** E.M. Anawa, A.G. Olabi, 'Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials' *Journal of materials processing technology*, Vol. 204 (2008), pp. 22-33
- 49.** M.N. James, P.J. Webster, D.J. Hughes, Z. Chen, N. Ratel, S.-P. Ting, G. Bruno, A. Steuwer, 'Correlating weld process conditions, residual strain and stress, microstructure and mechanical properties for high strength steel – the role of neutron diffraction strain scanning' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 427 (2006), pp. 16-26

- 50.** Dean Denga, Wei Liang, Hidekazu Murakawa, 'Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and coMParison with experimental measurements' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183 (2007), pp. 219-225
- 51.** Da-Quan Zhang, Xin Jin, Li-Xin Gao, Hyung Goun Joo, Kang Yong Lee, 'Effect of laser-arc hybrid welding on fracture and corrosion behaviour of AA6061-T6 alloy' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528 (2011), pp. 2748-2754
- 52.** V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G. Madhusudhan Reddy, 'Effect of pulsed current and post weld aging treatment on tensile properties of argon arc welded high strength aluminium alloy' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 459 (2007), pp. 19-34
- 53.** V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G. Madhusudhan Reddy, 'Effect of pulsed current welding on fatigue behaviour of high strength aluminium alloy joints' *Materials and Design*, Vol. 29 (2008), pp. 492-500
- 54.** D. Akbari, I. Sattari-Far, 'Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86 (2009), pp. 769-776
- 55.** V. Caccese, □, P.A. Blomquist, K.A. Berube, S.R. Webber, N.J. Orozco, 'Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes' *Marine Structures*, Vol. 19 (2006), pp. 1-22
- 56.** Tso-Liang Teng, Chih-Cheng Lin, 'Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75 (1998), pp. 857-864
- 57.** Tso-Liang Teng, Peng-Hsiang Chang, Wen-Cheng Tseng, 'Effect of welding sequences on residual stresses' *Computers and Structures*, Vol. 81 (2003), pp. 273-286
- 58.** Jun Yan, Xiaoyan Zeng, Ming Gao, Jian Lai, Tianxiao Lin, 'Effect of welding wires on microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminum alloy in CO₂ laser-MIG hybrid welding' *Applied Surface Science*, Vol. 255 (2009), pp. 7307-7313
- 59.** T.Y. Kuo, H.C. Lin, 'Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 416 (2006), pp. 281-289

- 60.** Ji-Hua Zhu, Ben Young, 'Experimental investigation of aluminum alloy circular hollow section columns' *Engineering Structures*, Vol. 28 (2006), pp. 207-215
- 61.** N. Geoffroy, E. Vittecoq, A. Birr, F. de Mestral, and J.-M. Martin, 'Fatigue behaviour of an arc welded Al-Si-Mg Alloy' *Scripta Materialia*, Vol. 57 (2007), pp. 349-352
- 62.** P.M.G.P. Moreira, M.A.V. de Figueiredo, P.M.S.T. de Castro, 'Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys' *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 48 (2007), pp. 169-177
- 63.** M. Benachour, M. Benguediab, A. Hadjoui, F. Hadjoui, N. Benachour, 'Fatigue crack growth of a double fillet weld' *Computational Materials Science*, Vol. 44 (2008), pp. 489-495
- 64.** Bard Wathne Tveiten, Arne Fjeldstad, Gunnar Harkegard, Ole Runar Myhr, Borge Bjorneklett, 'Fatigue life enhancement of aluminium joints through mechanical and thermal pre-stressing' *International Journal of Fatigue*, Vol. 28 (2006), pp. 1667-1676
- 65.** D.G. Richards, P.B. Prangnell, S.W. Williams, P.J. Withers, 'Global mechanical tensioning for the management of residual stresses in welds' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 489 (2008), pp. 351-362
- 66.** E. Cicala, G. Duffet, H. Andrzejewski, D. Grevey, S. Ignat, 'Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding - operating parameters and their effects' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 395 (2005), pp. 1-9
- 67.** D. Fabrègue, A. Deschamps, M. Suéry, 'Influence of the silicon content on the mechanical properties of AA6xxx laser welds' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 506 (2009), pp. 157-164
- 68.** I. Sattari-Far, Y. Javadi, 'Influence of welding sequence on welding distortions in pipes' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85 (2008), pp. 265-274
- 69.** V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G. Madhusudhan Reddy, 'Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints' *International Journal of Fatigue*, Vol. 30 (2008), pp. 405-416

- 70.** S. Pratihari, V. Stelmukh, M.T. Hutchings, M.E. Fitzpatrick, U. Stuhr, L. Edwards, 'Measurement of the residual stress field in MIG-welded Al-2024 and Al-7150 aluminium alloy compact tension specimens' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 437 (2006), pp. 46-53
- 71.** A. Ancona, P.M. Lugara, D. Sorgente, L. Tricarico, 'Mechanical characterization of CO2 laser beam butt welds of AA5083' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191 (2007), pp. 381-384
- 72.** D.G. Karalis, V.J. Papazoglou, D.I. Pantelis, 'Mechanical response of thin SMAW arc welded structures: Experimental and numerical investigation' *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 51 (2009), pp. 87-94
- 73.** F. Lefebvre, I. Sinclair, 'Micromechanical aspects of fatigue in a MIG welded aluminium airframe alloy Part 2. Short fatigue crack behaviour' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 407 (2005), pp. 265-272
- 74.** M. Asle Zaeem, M.R. Nami, M.H. Kadivar, 'Prediction of welding buckling distortion in a thin wall aluminum T joint' *Computational Materials Science*, Vol. 38 (2007), pp. 588-594
- 75.** Dean Deng, Hidekazu Murakawa, 'Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint' *Computational Materials Science*, Vol. 43 (2008), pp. 353-365
- 76.** Dean Denga, Hidekazu Murakawa, Wei Liang, 'Prediction of welding distortion in a curved plate structure by means of elastic finite element method' *Journal of materials processing technology*, Vol. 203 (2008), pp. 252-266
- 77.** H. Long, D. Gery, A. Carlier, P.G. Maropoulos, 'Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates' *Materials and Design*, Vol. 30 (2009), pp. 4126-4135
- 78.** T.B. Brown, T.A. Dauda, C.E. Truman, D.J. Smith, D. Memhard, W. Pfeiffer, 'Predictions and measurements of residual stress in repair welds in plates' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83 (2006), pp. 809-818
- 79.** P.J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle, 'Recent advances in residual stress measurement' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85 (2008), pp. 118-127

80. M.N. James, D.J. Hughes, D.G. Hattingh, G. Mills, P.J. Webster, 'Residual stress and strain in MIG butt welds in 5083-H321 aluminium: As-welded and fatigue cycled' *International Journal of Fatigue*, Vol. 31 (2009), pp. 28–40

81. John W.H. Price, Anna Paradowska, Suraj Joshi, Trevor Finlayson, 'Residual stresses measurement by neutron diffraction and theoretical estimation in a single weld bead' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83 (2006), pp. 381–387

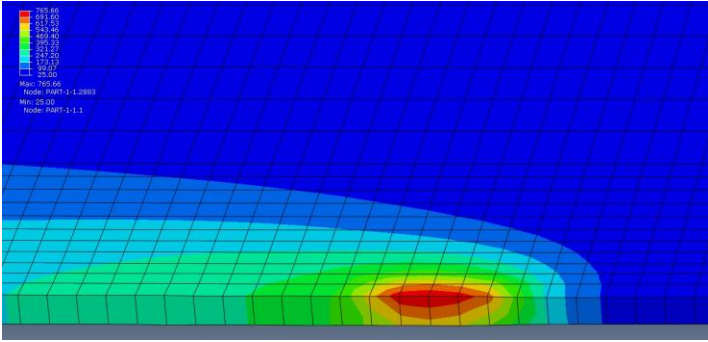
82. M.J. Attarha, I. Sattari-Far, 'Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211 (2011), pp. 688–694

83. D.G. Karalis, D.I. Pantelis, V.J. Papazoglou, 'Transient stress of steel phase transformation and transformation-induced fatigue' *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 54 (2010), pp. 37–43

84. M. Ahmadzadeh, A. Hoseini Farda, B. Saranjam, H.R. Salimi, 'Prediction of residual stresses in gas arc welding by back propagation neural network', *NDT&E International*, Vol. 52 (2012), pp. 136–143

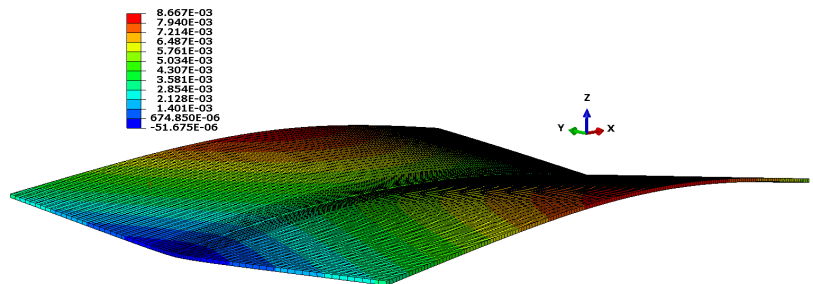
85. C.K. Lee, S.P. Chiew, Jin Jiang, 'Residual stress study of welded high strength steel thin-walled plate-to-plate joints, Part1:Experimental study', *Thin-Walled Structures*, Vol.56 (2012), pp.103–112

86. N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, 'Methods of measuring residual stresses in components', *Materials and Design*, Vol.35 (2012), pp. 572–588



ΕΝΟΤΗΤΑ 4^η

Μοντελοποίηση της Συγκόλλησης



Κεφάλαιο 12°

Τεχνικές προσομοίωσης συγκολλήσεων – Θεωρητική προσέγγιση

12.1 Γενικά

Η πολύπλοκη φύση της διαδικασίας συγκόλλησης προκαλεί δυσκολίες στην ανάλυση και μοντελοποίησή της με τις διάφορες επιστημονικές μεθόδους.

Οι πολυπλοκότητες αυτές αφορούν για παράδειγμα, κινούμενες πηγές θερμότητας, μεταβολές φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με τη θερμοκρασία, αλλαγές και μετασχηματισμούς φάσεων, πολύπλοκες μορφές παραμορφώσεων και κατανομών παραμενουσών τάσεων κ.α..

Η επιστημονική εμπειρία σε συνδυασμό με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει οδηγήσει σε μοντέλα που περιλαμβάνουν ολοένα και περισσότερα στοιχεία του πραγματικού προβλήματος.

Οι σύγχρονες προσπάθειες μοντελοποίησης της συγκόλλησης γίνονται είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά, κυρίως με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, συναντάται πλέον πληθώρα διαφορετικής φύσης μοντελοποιήσεων που γενικά αφορούν στη:

- Μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης γενικά
- Μοντελοποίηση συγκεκριμένης τεχνικής συγκόλλησης
- Μοντελοποίηση με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων μιας συγκόλλησης
 - Μοντελοποίηση που σκοπό έχει τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας και ροής του τηγμένου υλικού
 - Μοντελοποίηση με σκοπό να μελετηθούν οι παραμένουσες τάσεις και οι στρεβλώσεις – παραμορφώσεις
 - Μοντελοποίηση της κόπωσης ή άλλων μηχανικών ιδιοτήτων συγκολλημένων τμημάτων
 - Μοντελοποίηση διάδοσης ρωγμών ή άλλων ατελειών λόγω συγκόλλησης

12.2 Θερμικά φαινόμενα – Μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας

Το σύνολο των προσεγγίσεων που αφορά στην μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας έχει ταξινομηθεί σε πέντε κατηγορίες του τύπου «Πρώτη Γενιά» έως «Πέμπτη Γενιά» ακολουθώντας, χοντρικά, χρονολογικά κριτήρια.

Έτσι, ως «αρχαιότερη», χαρακτηρίζεται η «Πρώτη Γενιά» ενώ, η πλέον σύγχρονη είναι η «Πέμπτη Γενιά». Προφανώς, η «Πρώτη Γενιά» είναι η απλούστερη και η «Πέμπτη Γενιά» η πιο σύνθετη ενώ, κάθε μεταγενέστερη «Γενιά» θεωρείται επέκταση της προηγούμενης και την εμπεριέχει. Αφαιρώντας δηλαδή στοιχεία και παραδοχές από μια νεότερη «Γενιά» μεταφερόμαστε σε μια προηγούμενη και το αντίστροφο.

Όλες στηρίζονται στις εξής γενικές θεωρήσεις – παραδοχές:

- Το θερμοκρασιακό πεδίο που οδηγείται από την πηγή θερμότητας (ηλεκτρικό τόξο, δέσμη ηλεκτρονίων, δέσμη πλάσματος, δέσμη laser κ.λπ.) αποτελεί την κυρίαρχη δύναμη της κατεργασίας της συγκόλλησης.
- Για την ανάλυση και την πρόβλεψη της επίδρασης της συγκόλλησης στη συμπεριφορά της κατασκευής, το μεταβατικό θερμοκρασιακό πεδίο θα πρέπει να υπολογιστεί με την επιθυμητή κατά περίπτωση ακρίβεια.
- Οι μεταβατικές θερμοκρασίες έξω από τη λίμνη συγκόλλησης εξαρτώνται κυρίαρχα από την κατανομή της θερμότητας που προέρχεται από την πηγή πάνω στο υπό συγκόλληση υλικό και τη αγωγή της θερμότητας από τη λίμνη συγκόλλησης και πέρα από αυτή.
- Η εξίσωση θερμότητας μπορεί να επιλυθεί με τις κατάλληλες κατά περίπτωση παραδοχές ώστε να οδηγήσει στα επιθυμητά αποτελέσματα αγνοώντας αντίστοιχα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την κατεργασία της συγκόλλησης.
- Στην περίπτωση όπου τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στη λίμνη συγκόλλησης είναι κυρίαρχου ενδιαφέροντος, τότε η μοντελοποίηση πρέπει υποχρεωτικά να ξεκινά από την περιοχή αυτή λύνοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα που συμβαίνουν εκεί (π.χ. ανάδευση του ρευστού μετάλλου).

12.2.1 Γενικές εξισώσεις

Η θεμελιώδης αρχή της αγωγής θερμότητας είναι ότι η θερμική ενέργεια, $Q'' \left(\frac{W}{m^2} \right)$, ρέει από μια θερμή περιοχή προς ψυχρότερες, εξαρτώμενη γραμμικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, ∇T :

$$Q'' = -k\nabla T \quad (12.1)$$

Όπου, k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right).$$

Το αρνητικό πρόσημο είναι απαραίτητο ώστε να είναι το Q'' θετικό, καθότι η ροή θερμότητας συμβαίνει πάντοτε προς τη μικρότερη θερμοκρασία.

Η ενέργεια που απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του υλικού, καθορίζεται από μια άλλη παράμετρο του υλικού, την ειδική θερμότητα c (ή την ενθαλπία H).

Σε συνάρτηση με την ειδική θερμότητα, τη ροή θερμότητας και την πηγή θερμότητας, με κατανεμημένο όγκο $Q''' \left(\frac{W}{m^3} \right)$, η διατήρηση της ενέργειας σε διαφορική μορφή προκύπτει:

$$\rho c \dot{T} - \nabla \cdot (k \nabla T) - Q''' = 0 \quad (12.2)$$

$$\text{Όπου, } \dot{(\quad)} = \frac{d}{dt},$$

Με t , την παράμετρο του χρόνου και ρ την πυκνότητα του υλικού.

Για να επιλυθεί η Εξίσωση 12.2, πρέπει να καθοριστούν οι συνοριακές και αρχικές συνθήκες. Μια τέτοια συνθήκη μπορεί να είναι για παράδειγμα είτε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία, είτε κάποιες προκαθορισμένες θερμικές ροές ή ακόμα και μια συνάρτηση του χρόνου.

Οι συνοριακές συνθήκες για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διακρίνονται σε συνοριακές συνθήκες ακτινοβολίας και συνοριακές συνθήκες συναγωγής. Δεδομένης της θερμοκρασίας ενός σώματος, T , η ακτινοβολία του περιβάλλοντος στη θερμοκρασία T_0 ακολουθεί το νόμο του Stefan - Boltzmann έτσι ώστε η μεταβολή της θερμοκρασίας να προκαλεί ροή θερμότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} Q''_{rad} &= \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) \\ &= \sigma \epsilon (T^2 + T_0^2)(T + T_0)(T - T_0) \\ &= h_{rad} (T - T_0) \end{aligned} \quad (12.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ϵ , είναι ο συντελεστής εκπομπής του υλικού, σ , η σταθερά Stefan - Boltzmann και h_{rad} , ο προκύπτων εξαρτημένος από τη θερμοκρασία συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Δεδομένου ενός σώματος με θερμοκρασία T , που περιβάλλεται από ένα ρευστό ή αέριο σε θερμοκρασία T_0 , η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής θεωρεί ότι υπάρχει ένα θερμό στρώμα με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h_{con} , έτσι ώστε η μεταβολή της θερμοκρασίας δια μέσου του συνοριακού στρώματος να προκαλεί ροή Q''_{con} , που δίνεται από τη σχέση:

$$Q''_{con} = h_{con} (T - T_0) \quad (12.4)$$

Αν το ρευστό ρέει με ταχύτητα u πάνω σε μία πλάκα με αριθμό Prandtl, Pr , και αριθμό Reynolds, Re , τότε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{con} , μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση^[19]:

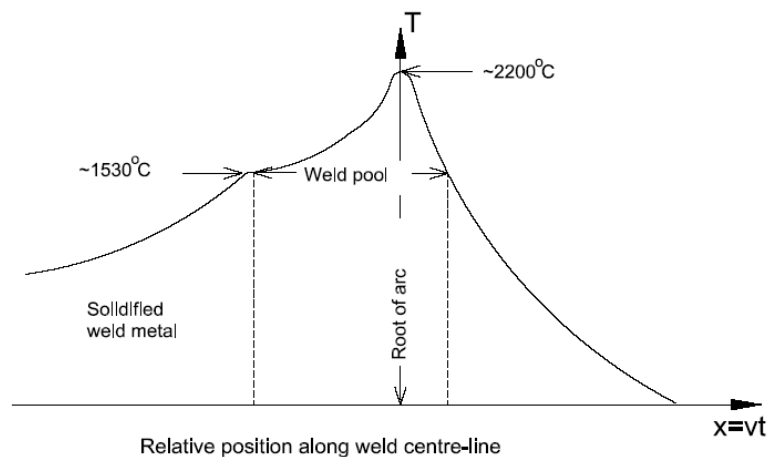
$$h_{con} = 0.332 \frac{k}{m} Re^{1/3} Pr^{1/3} \quad (12.5)$$

Όπου, k , είναι η θερμική αγωγιμότητα $\left(\frac{W}{mk}\right)$ και

m , είναι το πάχος του συνοριακού στρώματος.

Η ελεύθερη αγωγή με τον αέρα συνήθως παίρνει τιμές στο διάστημα $2 - 10 \frac{W}{mk}$.

Στις αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται στο μοντέλο καθορίζοντας το μέγεθος του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τις περιβάλλουσες θερμοκρασίες στα στοιχεία και στους κόμβους αντίστοιχα, των στοιχείων κελυφών, που επιλέγονται κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος, στα όρια της περιοχής που μελετάται. Συνήθως, οι απώλειες συναγωγής θεωρούνται ότι είναι της τάξης των $25 \frac{W}{m^2}$.



Εικόνα 12.1 Σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής καμπύλης ως συνάρτηση του χρόνου για μια συγκόλληση χαλύβδινου ελάσματος. Σχετική θέση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της συγκόλλησης

12.2.2 Πρώτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας

Η πρώτη γενιά μοντελοποίησης πηγής θερμότητας (Rosenthal^{[47],[48],[98]} και Rykalin^[99]) περιλαμβάνει τα σημειακά, γραμμικά και επίπεδα μοντέλα πηγών θερμότητας. Η μοντελοποίηση με χρήση σημειακής πηγής είναι χρήσιμη για την μοντελοποίηση μιας ρηχής λίμνης συγκόλλησης σε μεγάλου πάχους ελάσματα. Η μοντελοποίηση με χρήση γραμμικής πηγής θερμότητας είναι χρήσιμη για την μοντελοποίηση συγκολλήσεων πλήρους διεύθυνσης δέσμης Laser ή δέσμης ηλεκτρονίων φύλλων ή λεπτών ελασμάτων ενώ, η μοντελοποίηση με χρήση επίπεδης πηγής

θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί δίνοντας ακριβή αποτελέσματα σε προσομοιώσεις συγκολλήσεων απόθεσης σε ελάσματα μεγάλου πάχους.

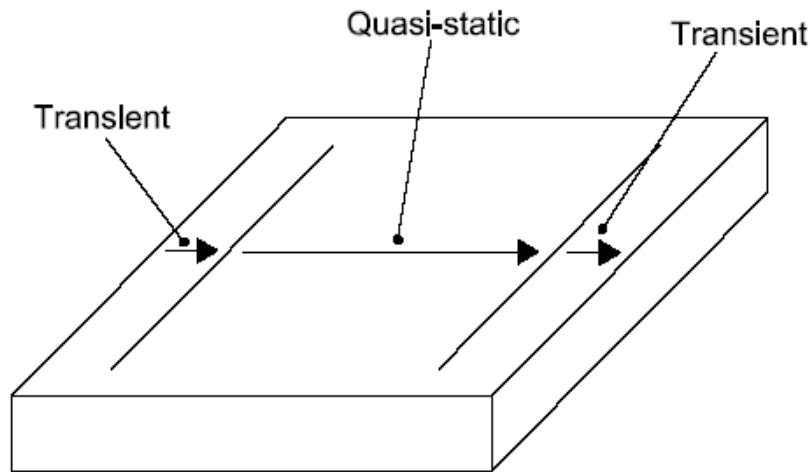
Σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα που προκύπτουν από τέτοιου είδους μοντέλα είναι χρήσιμα μόνο για περιοχές μακριά από τη λίμνη συγκόλλησης καθώς δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν επαρκώς την κατανομή της θερμικής ισχύος κοντά σε αυτή. Με υπαρκτό τον περιορισμό αυτό, άλλοι εξίσου σημαντικοί περιορισμοί όπως, για παράδειγμα, το γεγονός ότι οι εξισώσεις που τα διέπουν είναι γραμμικές, αποκλείοντας έτσι την εισαγωγή μεταβλητών με τη θερμοκρασία ιδιοτήτων υλικού, θεωρούνται δευτερεύουσας αξίας.

Ημι - μόνιμη θερμοκρασιακή κατανομή

Προαπαιτήση για τη λήψη απλών αναλυτικών λύσεων της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας είναι ότι οι θερμικές ιδιότητες του βασικού μετάλλου είναι σταθερές και ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία. Για τα περισσότερα μέταλλα και κράματα αυτή είναι μια μάλλον μη ρεαλιστική υπόθεση, αφού τόσο η θερμική αγωγιμότητα, k , όσο και η θερμική διαχυτότητα, a ($= \frac{k}{\rho C}$) αλλά και η κατ' όγκο θερμοχωρητικότητα ρC , μπορούν να μεταβάλλονται σημαντικά με τη θερμοκρασία. Στις διάφορες τεχνικές συγκόλλησης η πηγή θερμότητας κινείται σε σχέση με το υλικό. Αν υποθεθεί ότι η πηγή κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος μιας γραμμής, τότε η θερμοκρασιακή κατανομή που αντιστοιχεί σε ένα σημείο που ακολουθεί την πηγή θερμότητας θα γίνει ημι - μόνιμη. Ορισμός της ημι-μόνιμης κατάστασης είναι ότι η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται με το χρόνο για ένα σημείο που ακολουθεί την πηγή θερμότητας.

Ένας τρόπος περιγραφής μιας τέτοιας κατάστασης είναι η σύγκριση του θερμοκρασιακού πεδίου γύρω από την πηγή θερμότητας με τη θερμοκρασιακή καμπύλη που κινείται κατά τη διεύθυνση της συγκόλλησης^[21]. Για σημεία που βρίσκονται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής συγκόλλησης, η θερμοκρασία σε διαφορετικές θέσεις μακριά από την πηγή θερμότητας, μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διδιάστατο γράφημα σαν αυτό της Εικόνας 12.1. Σε αυτή (Εικ. 12.1) παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής καμπύλης ως συνάρτηση του χρόνου για μια συγκόλληση χαλύβδινου ελάσματος. Τμήμα του μετάλλου στην περιοχή του τόξου θερμαίνεται, τήκεται και δημιουργεί τη λίμνη συγκόλλησης.

Στην εγκάρσια διεύθυνση, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της ζώνης συγκόλλησης, της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και του μετάλλου βάσης. Η μέγιστη θερμοκρασία και οι επακόλουθοι ρυθμοί απόψυξης καθορίζουν τη μικροδομή στη ΘΕΖ, ενώ οι ρυθμοί θέρμανσης, οι ρυθμοί στερεοποίησης και οι ρυθμοί απόψυξης στη διεπιφάνεια του υγρού - στερεού καθορίζουν τη μικροδομή της στερεοποίησης της ζώνης συγκόλλησης.



Εικόνα 12.2 Τα τρία στάδια του χρόνου συγκόλλησης

Η θέρμανση κατά τη διαδικασία συγκόλλησης περιλαμβάνει τρία στάδια, όπως περιγράφονται στην Εικόνα 12.2:

- 1) Ένα μεταβατικό στάδιο κατά το οποίο η θερμοκρασία γύρω από την πηγή θερμότητας εξακολουθεί να αυξάνει, το οποίο ονομάζεται στάδιο έναρξης.
- 2) Το ημι-μόνιμο στάδιο κατά το οποίο η κατανομή της θερμοκρασίας είναι μόνιμη σε ένα σύστημα συντεταγμένων κινούμενο με την πηγή θερμότητας.
- 3) Ένα δεύτερο μεταβατικό στάδιο στο οποίο η θερμοκρασία μειώνεται αμέσως μόλις το τόξο συγκόλλησης σβήσει.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής διαστολής και της συστολής στο βασικό μέταλλο και στη ΘΕΖ συμβαίνει κατά το ημι-μόνιμο στάδιο.

Η αρχή μιας σημειακής και σταθερής πηγής θερμότητας χρησιμοποιείται ευρέως στη θεωρία της θερμικής αγωγιμότητας. Κατ' αυτή, θεωρείται ότι η θερμότητα απελευθερώνεται στιγμιαία στο χρόνο $t=0$ σε ένα άπειρο μέσο, αρχικής θερμοκρασίας T_0 . Λύνοντας την Εξίσωση 12.2 με τις κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες προκύπτει, για γραμμή πηγής θερμότητας σε πλάκα μεγάλου πλάτους ($r \geq 0$):

$$T - T_0 = \frac{J}{gk4\pi t} \exp\left[-\frac{r^2}{4\alpha t}\right] \quad (12.6)$$

Όπου, J είναι η εισερχόμενη θερμότητα (J), g είναι το πάχος της πλάκας, $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ και t είναι ο χρόνος. Το r δίνεται ως $\sqrt{x^2 + y^2}$.

Για σημειακή πηγή σε στερεό σώμα τριών διαστάσεων, ($R>0$):

$$T - T_0 = \frac{J}{\rho c (4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4\alpha t}\right] \quad (12.7)$$

Το R για την περίπτωση των τριών διαστάσεων καθορίζεται ως $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Οι Εξισώσεις 12.6 και 12.7 παρέχουν την απαιτούμενη θεμελίωση για κάλυψη σε μεγάλο εύρος των θεωρητικών χειρισμών των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στις συγκολλήσεις.

Κινούμενη σημειακή πηγή

Η βασική θεωρία της ροής θερμότητας σε κινούμενες σημειακές πηγές του Rosenthal^[48] (τέλη δεκαετίας του 1930) παραμένει μια αρκετά δημοφιλής αναλυτική προσέγγιση των θερμικών φαινομένων στις συγκολλήσεις.

Στη θεωρία που ανέπτυξε ο Rosenthal, μια σταθερή πηγή θερμότητας εφαρμόζεται στην αρχή ενός ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων (x', y', z') και κινείται με σταθερή ταχύτητα u σε σχέση με το σταθερό ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων (x, y, z). Η ταχύτητα u είναι στη θετική x -διεύθυνση και τα δύο συστήματα συντεταγμένων είναι παράλληλα, ενώ $y' = y, z' = z$.

Παρατηρητής στο σταθερό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) δέχεται μεταβολή στο θερμοκρασιακό πεδίο των περιβαλλόντων σημείων του καθώς διέρχεται από αυτόν η πηγή θερμότητας. Αντίθετα, παρατηρητής που σε βρίσκεται σημείο του κινούμενου συστήματος συντεταγμένων (x', y', z'), δεν παρατηρεί καμία θερμοκρασιακή μεταβολή.

Εάν η συγκόλληση πραγματοποιείται σε επαρκές μήκος, σύντομα δημιουργείται μια κατάσταση στο συγκολλημένο κομμάτι η οποία ονομάζεται ημι - μόνιμη. Αυτή η κατάσταση εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x'=\text{constant}} = 0$ για το κινούμενο σύστημα συντεταγμένων.

Εάν υποθεθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα του συστήματος είναι ομοιόμορφη, τότε το θερμοκρασιακό πεδίο $T(x, y, z, t)$ πρέπει να ικανοποιεί την Εξίσωση 12.2 για $Q''' = 0$, (σημειακή πηγή θερμότητας):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12.8)$$

Όπου, α είναι η θερμική διαχυσιμότητα ορισμένη ως:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (12.9)$$

Έτσι,

$$x' = x - vt \text{ και } y' = y \text{ και } z' = z$$

Με τη χρήση των παραπάνω σχέσεων και με την υπόθεση της ημι - μόνιμης κατάστασης που δίνεται από την $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x'=\text{constant}} = 0$, λαμβάνεται η παρακάτω τελική μερική διαφορική εξίσωση για

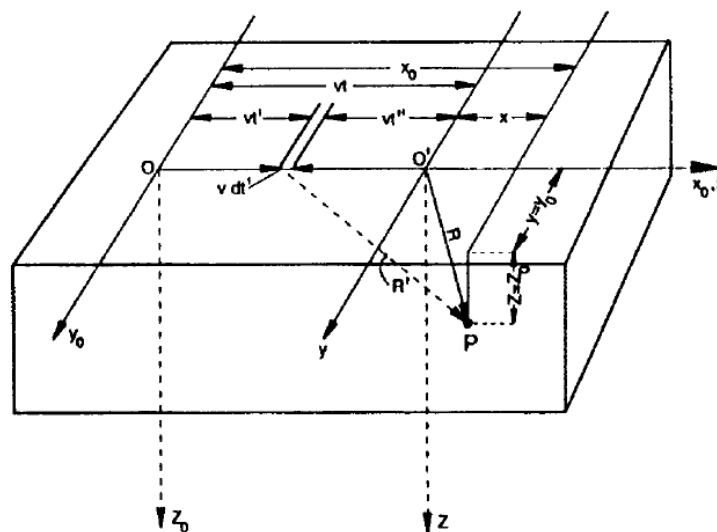
ημι - μόνιμη κατάσταση:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x'} \quad (12.10)$$

Βασικό μειονέκτημα της Εξίσωσης 12.10, είναι ότι η πηγή θερμότητας συγκεντρώνεται σε ένα σημείο ενώ στην πραγματικότητα η θερμότητα από τον δαυλό συγκόλλησης κατανέμεται σε μία πεπερασμένη περιοχή. Άλλο μειονέκτημα αποτελεί η υπόθεση ότι οι φυσικές ιδιότητες της θερμαινόμενης πλάκας είναι σταθερές. Τέλος, η ημι - μόνιμη λύση του Rosenthal δεν μπορεί να εκφράσει με αξιοπιστία τα μεταβατικά φαινόμενα κοντά στις άκρες της πλάκας.

Λύση για πλάκα μεγάλου πάχους

Σύμφωνα με την Εικόνα 12.3 ένα γενικό μοντέλο πλάκας μεγάλου πάχους αποτελείται από ένα ισότροπο ημι - άπειρο σώμα με αρχική θερμοκρασία T_0 περιορισμένο κατά τη μία διεύθυνση από ένα αδιαβατικό επίπεδο. Τη χρονική στιγμή $t=0$, μια σημειακή πηγή με σταθερή ροή θερμότητας Q_0 αρχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα v στην επιφάνεια στη θέση O του θετικού άξονα x . Αναζητείται η αύξηση της θερμοκρασία $T-T_0$ στο σημείο P τη χρονική στιγμή t .



Εικόνα 12.3 Κινούμενη σημειακή πηγή σε ημι - άπειρη πλάκα^[21]

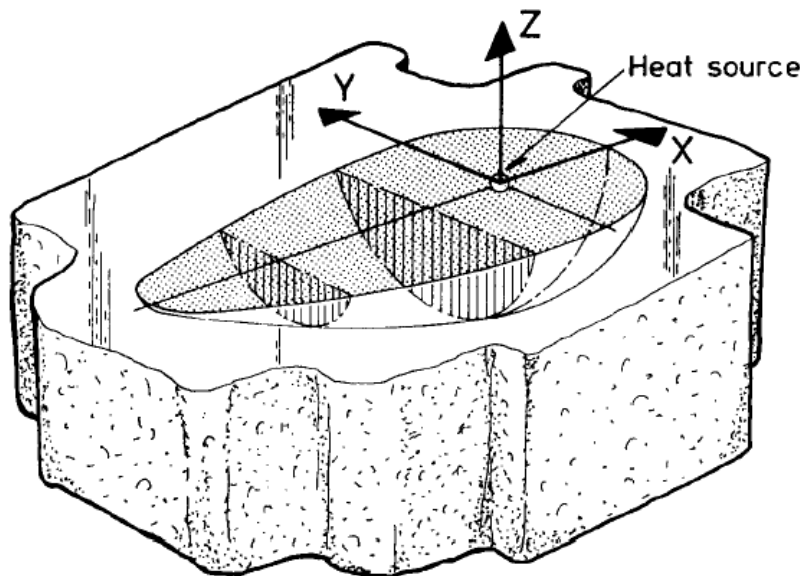
Κατά τη διάρκεια ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος από t' σε $t' + dt'$ η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται στην επιφάνεια είναι $dJ = Qdt'$. Σύμφωνα με την εξίσωση 12.7 αυτό προκαλεί μια απειροελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο P τη χρονική στιγμή t:

$$dT = \frac{2Qdt'}{\rho c [4\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(R')^2}{4\alpha(t-t')}\right] \quad (12.11)$$

Ύστερα από μετατροπές και απλοποιήσεις, η ημι - μόνιμη θερμοκρασιακή κατανομή γίνεται^[21]:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \left(\frac{1}{R}\right) \exp\left[-\frac{\nu}{2\alpha}(R+x)\right] \quad (12.12)$$

Η εξίσωση αυτή, συχνά αναφέρεται ως λύση του Rosenthal για πλάκα μεγάλου πάχους.



Εικόνα 12.4 Τρισδιάστατη παρουσίαση της λύσης του Rosenthal για μεγάλου πάχους πλάκα

Μια γραφική παρουσίαση των τρισδιάστατων ισοθερμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.4 όπου παρουσιάζεται μια καλή συνολική ένδειξη των θερμικών συνθηκών κατά τη συγκόλληση πλάκας μεγάλου πάχους. Λόγω του R, πρέπει να τεθεί ένας περιορισμός στην Εξίσωση 12.12. Αν η φυσική κατάσταση της πλάκας δεν υποστεί καμία μεταβολή στην περιοχή γύρω από την πηγή θερμότητας, τότε η Εξίσωση 12.12 θα δώσει $T = \infty$, για $R=0$, κάτι που είναι αδύνατο. Μια πιο ακριβής προσέγγιση είναι απαραίτητη λαμβάνοντας υπόψη το πεπερασμένο μέγεθος της πηγής θερμότητας. Στην πραγματικότητα, το μέταλλο που βρίσκεται γύρω από την πηγή τήκεται, αλλιώς δεν θα υπήρχε συγκόλληση. Αυτό υποδεικνύει ότι η λύση της εξίσωσης 12.12 εφαρμόζεται μόνο εξωτερικά της ζώνης διάχυσης, π.χ. μόνο κάτω από $T = T_{\text{fusion line}}$, (Εικ. 12.1).

Λύση για λεπτή πλάκα

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.5, το γενικό μοντέλο λεπτής πλάκας θεωρεί γραμμική πηγή σε ένα πλατύ έλασμα πάχους g για αρχική θερμοκρασία T_0 . Τη χρονική στιγμή $t=0$ η πηγή αρχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα u στον θετικό άξονα x . Αναζητείται η αύξηση της θερμοκρασίας $T-T_0$ στο σημείο P τη χρονική στιγμή t . Η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή κατά το πάχος της πλάκας. Σύμφωνα με την Εξίσωση 12.6, η στοιχειώδης ενέργεια, $dJ = Qdt'$ που ελευθερώνεται στη θέση ut' θα προκαλέσει μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας dT στο σημείο P τη χρονική στιγμή t :

$$dT = \frac{Qdt'}{gk4\pi(t-t')} \exp\left[-\frac{r'^2}{4\alpha(t-t')}\right] \quad (12.13)$$

$$= \frac{Qdt''}{gk4\pi t''} \exp\left[-\frac{r'^2}{4\alpha t''}\right] \quad (12.14)$$

όπου $t'' = t - t'$ είναι ο διαθέσιμος χρόνος για την αγωγή της θερμότητας σε μια απόσταση r' από το σημείο P . Θεωρώντας το σημείο P , ως το σημείο όπου βρίσκεται η πηγή θερμότητας τη στιγμή t , θα πρέπει να αναμένουμε μια λύση ανεξάρτητη του χρόνου. Αυτό επιτυγχάνεται αν αλλάξουμε το σύστημα συντεταγμένων από O σε O' . Έτσι:

$$dT = \frac{Qdt''}{gk4\pi t''} \exp\left[-\frac{(x+ut'')^2 + y^2}{4\alpha t''}\right]$$

$$= \frac{Qdt''}{gk4\pi t''} \exp\left[-\frac{ux^2}{2\alpha} - \frac{r^2}{4\alpha t''} - \frac{v^2 t''}{4\alpha}\right] \quad (12.15)$$

Όπου,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (12.16)$$

Για την ολοκλήρωση όλων των συνιστωσών από $t'' = t$ ($t' = 0$) σε $t'' = 0$ ($t' = t$), προτείνεται η παρακάτω σημείωση:

$$(r^*)^2 = \frac{v^2 r^2}{4\alpha^2}, \quad \omega = \frac{v^2 t''}{4\alpha} \quad (12.17)$$

Επιπλέον,

$$t'' = \frac{4\alpha}{v^2} \omega, \quad dt'' = \frac{4\alpha}{v^2} d\omega, \quad \frac{r^2}{4\alpha t''} = \frac{r^{*2}}{4\omega} \quad (12.18)$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις παραμέτρους στην Εξίσωση 12.15 προκύπτει με ολοκλήρωση:

$$T - T_0 = \frac{Q}{g4\pi k} \exp\left[-\frac{ux}{2\alpha}\right] \int_{\omega=0}^{\omega=\frac{v^2 t}{4\alpha}} \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \quad (12.19)$$

Κατά τον Grong^[21]:

$$\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} = 2K_0(r^*) = 2K_0\left(\frac{\nu r}{2\alpha}\right) \quad (12.20)$$

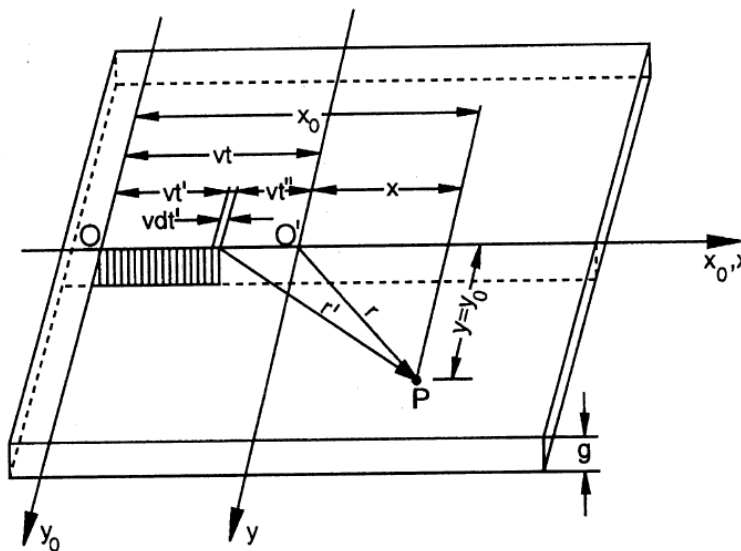
Όπου, $K_0(r^*)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου τύπου και μηδενικής τάξης.

Επομένως η γενική λύση πλάκας μικρού πάχους μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2g\pi k} \exp\left[-\frac{\nu x}{2\alpha}\right] \left[K_0\left(\frac{\nu r}{2\alpha}\right) - \frac{1}{2} \int_{\omega}^{\infty} \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \right] \quad (12.21)$$

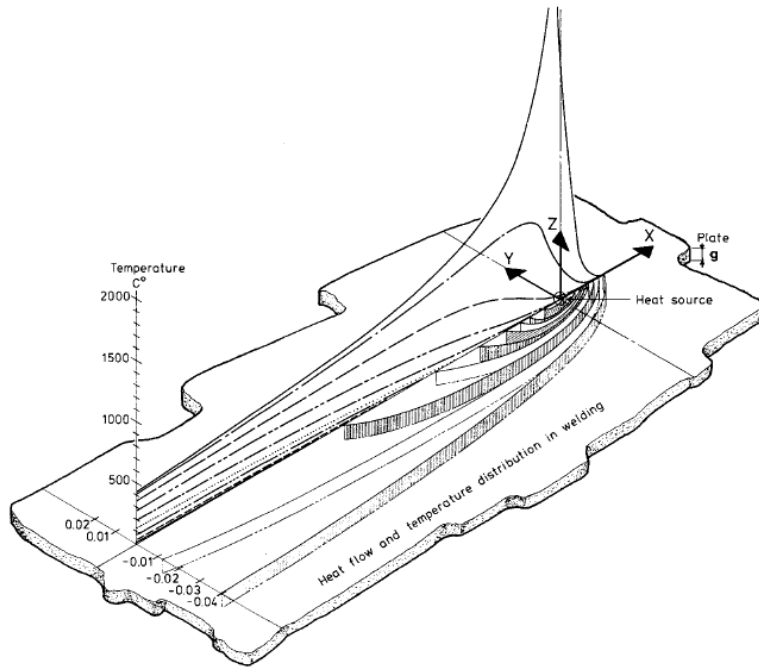
Όταν το $\omega = \frac{\nu^2 t''}{4\alpha}$ είναι αρκετά μεγάλο (π.χ. όταν η συγκόλληση έχει πραγματοποιηθεί σε επαρκή χρονική διάρκεια), λαμβάνεται η θερμοκρασιακή κατανομή ψευδο - μόνιμης κατάστασης:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2g\pi k} \exp\left(-\frac{\nu x}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{\nu r}{2\alpha}\right) \quad (12.22)$$



Εικόνα 12.5 Κινούμενη πηγή γραμμής σε λεπτό έλασμα, Grong^[21]

Η Εξίσωση 12.22 αναφέρεται ως λύση του Rosenthal για πλάκα μικρού πάχους. Αυτό το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους συγκολλήσεων (συμπεριλαμβανομένης της δέσμης ηλεκτρονίων, του τόξου πλάσματος και της συγκόλλησης με laser), με την προϋπόθεση ότι επιτυγχάνεται διείσδυση σε πλήρες βάθος με ένα πέρασμα και καμία θερμική μεταβολή κατά το πάχος. Από την Εικόνα 12.6 παρατηρείται ότι οι ισόθερμες πίσω την πηγή θερμότητας επιμηκώνονται όλο και περισσότερο αντίθετα από την κίνηση.



Εικόνα 12.6 Γραφική αναπαράσταση της λύσης Rosenthal για λεπτή πλάκα

Λύση για πλάκα μεσαίου πάχους

Στην πραγματική διαδικασία συγκόλλησης η υπόθεση τρισδιάστατης ή διοδιάστατης ροής θερμότητας που εμπεριέχονται στις εξισώσεις Rosenthal, δεν εκπληρώνεται πάντα λόγω διάφορων θερμοκρασιακών μεταβολών κατά το πάχος, τον άξονα z.

Το γενικό μοντέλο μεσαίου πάχους πλάκας θεωρεί μια σημειακή πηγή θερμότητας που κινείται με σταθερή ταχύτητα εγκάρσια σε μεγάλο πλάτους πλάκα με πεπερασμένο πάχος g. Σύμφωνα με μελέτες^[47], είναι λογική η υπόθεση να θεωρηθούν οι επιφάνειες της πλάκας αδιαβατικές. Επομένως, για να διατηρηθεί το δίκτυο ροής θερμότητας κατά μήκος των ορίων ίσο με μηδέν, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ανακλάσεις της πηγής σε σχέση με τα επίπεδα z=0 και z=g. Από την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών προκύπτει ότι:

$$\frac{Q}{2\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) \frac{1}{R_i} \left(\exp\frac{-vR_i}{2\alpha}\right) \quad (12.23)$$

Όπου,

$$R_i = \sqrt{x^2 + y^2 + (z \pm 2id)^2} \quad (12.24)$$

Επομένως,

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{-vR_i}{2\alpha}\right)}{R_i} \quad (12.25)$$

Η Εξίσωση 12.25 μπορεί να μετασχηματιστεί σε σειρές Fourier ως:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2g\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) \left\{ K_0 \frac{vr}{2\alpha} + 2 \sum_{i=-\infty}^{\infty} K_0 \left[r \sqrt{\left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\pi i}{g}\right)^2} \right] \cos \frac{\pi i z}{g} \right\} \quad (12.26)$$

Οι ομοιότητα μεταξύ των Εξισώσεων 12.26 και 12.22 (λύση για λεπτή πλάκα) είναι προφανής, για σημεία που βρίσκονται αρκετά μακριά από το κέντρο της πηγής θερμότητας, π.χ. για μεγάλες τιμές του r . Για μικρές τιμές του r , π.χ. σημεία που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της πηγής θερμότητας, οι θερμικές συνθήκες θα είναι παρόμοιες με εκείνες για πλάκα μεγάλου πάχους. Ωστόσο, για ενδιάμεσες αποστάσεις από την πηγή θερμότητας, η θερμοκρασιακή κατανομή ημιμόνιμης κατάστασης θα αποκλίνει σημαντικά από αυτήν που παρατηρήθηκε στη συγκόλληση πλάκας μεγάλου πάχους ή λεπτής πλάκας, λόγω των διαφορετικών μεταβολών της θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας. Σε αυτήν τη μεταβατική περιοχή, η θερμική λύση μπορεί να καθοριστεί μόνο από τη λύση για πλάκα μεσαίου πάχους, δηλαδή με την Εξίσωση 12.26.

Σε επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις για τις δύο (λεπτή πλάκα) και τρεις διαστάσεις (πλάκα μεγάλου πάχους) προκειμένου να εκτιμηθεί η ανάγκη δισδιάστατης ή τρισδιάστατης μοντελοποίησης.

Άλλες μορφές

Στη βιβλιογραφία, έχουν παρουσιαστεί διάφοροι τύποι ημι - μόνιμων θερμοκρασιακών πεδίων. Οι περισσότεροι από αυτούς αποτελούν ουσιαστικά διαφοροποιήσεις των Εξισώσεων 12.12 και 12.22 του Rosenthal. Ο Adams^[1] για παράδειγμα χρησιμοποιεί την εξίσωση του Rosenthal, με τη διαφορά ότι ο θετικός άξονας x είναι αντίθετος της διεύθυνσης κίνησης της πηγής.

Ο Satoh^[52] παρουσίασε μια παρόμοια, με την Εξίσωση 12.22, έκφραση λαμβάνοντας υπόψη τη θερμότητα ακτινοβολίας. Αυτό έγινε με τη χρήση του h_{rad} για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου, π.χ. σαν τροποποίηση της λύσης για λεπτή πλάκα:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi g k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_0 \left[r \sqrt{\frac{2h_{rad}}{kg} + \left(\frac{v}{2\alpha}\right)^2} \right] \quad (12.27)$$

Όπου, h_{rad} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, ο οποίος καθορίζεται από την Εξίσωση 12.4. Το h_{rad} λαμβάνεται, συνήθως, $58,8 \frac{J}{m^2 s K}$ ^[51]. Αυτή η μορφή δίνει μία θερμοκρασιακή κατανομή, η οποία είναι αρκετά κοντά στην κατανομή που δίνει η δισδιάστατη λύση του Rosenthal.

Ο Hrivnak^[25] παρουσίασε δύο αρκετά απλές εκφράσεις για το θερμοκρασιακό πεδίο:

για λεπτές πλάκες,
$$T - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{Q}{2g\rho c v} \quad (12.28)$$

$$\text{και για μεγάλου πάχους πλάκες, } T - T_0 = \frac{2}{\pi e} \frac{Q}{\rho c r^2 v} \quad (12.29)$$

Στις εξισώσεις αυτές, e είναι ο νεπερίος λογάριθμος, $e=2,72$. Όπως και η Εξίσωση 12.27, η Εξίσωση αυτή δίνει μια αρκετά «στενή» κατανομή θερμότητας.

12.2.3 Δεύτερη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας

Στη δεύτερη γενιά μοντελοποίησης πηγών θερμότητας η σημειακή, γραμμική ή επίπεδη προσέγγιση αντικαθίσταται από συναρτήσεις κατανομής. Οι πρώτοι ερευνητές που παρουσίασαν μοντέλο δεύτερης γενιάς (μοντέλα κατανεμημένης θερμικής ροής) ήταν ο Pavelic^[44] και ο Rykalin^[102]. Οι προσομοιώσεις τους δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν η πυκνότητα της θερμικής ισχύος είναι σχετικά χαμηλή και το σχήμα της λίμνης συγκόλλησης δεν είναι ιδιαίτερα στενό.

Παρόλο που αργότερα (Goldak^{[19],[20],[101],[102]}) αναπτύχθηκαν περισσότερο πολύπλοκα μοντέλα πηγής θερμότητας μέσω συναρτήσεων κατανομής, που μπορούν να εφαρμοστούν σε συγκολλήσεις μεγάλης διεύθυνσης, ωστόσο, είναι σαφές ότι μοντέλα αυτής της γενιάς αδυνατούν να προσομοιώσουν, για παράδειγμα, δέσμες Laser ή ηλεκτρονίων, ή συγκολλήσεις τόξου πλήρους διεύθυνσης ελασμάτων μεγάλου πάχους τεχνικών όπως αυτή του βυθιζόμενου τόξου.

Τα μοντέλα δεύτερης γενιάς, εξαλείφουν τους περιορισμούς των μοντέλων πρώτης γενιάς καθώς μπορούν σε αυτά να συμπεριληφθούν μη-γραμμικότητες όπως αυτές που ορίζονται από την εισαγωγή ιδιοτήτων του υλικού εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία. Μπορεί να οριστεί σε αυτά περιοχή λίμνης συγκόλλησης αλλά αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Εφόσον η περιοχή ενδιαφέροντος είναι πέρα από τη λίμνη συγκόλλησης, οποιαδήποτε μορφή κατανομής θερμικής ισχύος, προερχόμενη από την πηγή θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί και να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ακόμα και όταν τα μοντέλα αυτά συμπεριλάβουν την λίμνη συγκόλλησης, η θερμοκρασιακή κατανομή σε αυτή δεν είναι παρά μια χονδρική προσέγγιση της πραγματικότητας.

Τελικά, στα μοντέλα δεύτερης γενιάς παρόλο που αγνοείται πλήρως η φυσική της λίμνης συγκόλλησης, ωστόσο το σχήμα και η θέση της κατά την προσομοίωση μπορεί να είναι ρεαλιστική.

Τα πιο γνωστά παραδείγματα συναρτήσεων κατανομής αυτής της γενιάς μοντέλων είναι η διπλή ελλειψοειδής και η κωνική. Ο γραμμικός συνδυασμός τους μάλιστα (καθώς και άλλων απλούστερων συναρτήσεων κατανομής) μπορεί να συνεισφέρει και στην προσομοίωση συγκολλήσεων μεγάλης διεύθυνσης. Αν είναι πλήρως γνωστό το θερμοκρασιακό πεδίο, τότε αυτό μπορεί να εισαχθεί στις εξισώσεις ενέργειας κι έτσι να προσδιοριστεί επακριβώς η ακριβής κατανομή της πηγής θερμότητας. Έτσι, η συνάρτηση κατανομής θερμότητας από την πηγή είναι

παρούσα ανεξάρτητα με το αν η επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου εντός της λίμνης συγκόλλησης είναι υπαρκτή.

Τέλος, είναι φανερό ότι, από τη στιγμή που δεν μελετάται η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης, δεν υπάρχει σαφής ανάγκη περιορισμού της εφαρμοζόμενης κατανομής θερμότητας στην περιοχή αυτής. Μάλιστα για την περίπτωση της ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, μεγαλύτερη, από την λίμνη συγκόλλησης, περιοχή εφαρμογής της κατανομής της θερμότητας σημαίνει μικρότερης πυκνότητας πλέγμα και συνεπώς μικρότερο υπολογιστικό χρόνο.

Η αρχική πρόταση του Pavelic^[44] ήταν μια κατανομή Gauss της ροής θερμότητας που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η μελέτη τους, όπως και άλλες^{[2],[17],[33]}, απέδωσε λύσεις που δίνουν καλύτερη θερμοκρασιακή κατανομή στη ζώνη διάχυσης και στη ΘΕΖ σε σχέση με αυτές που υπολογίζονται από το μοντέλο του Rosenthal.

Σύμφωνα με τη διπλή ελλειψοειδής κατανομή της πυκνότητας ισχύος^[20] το μέγεθος και η μορφή της καθορίζονται από ημι - άξονες. Το κέντρο της βρίσκεται στην αρχή της πηγής θερμότητας (Εικ. 12.7). Εισάγεται ένα σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) το οποίο ορίζεται στο σημείο έναρξης της συγκόλλησης του δοκιμίου. Επιπλέον, ένας παράγοντας χρόνου υστέρησης εισάγεται ώστε οι πηγές να ξεκινήσουν μεμονωμένα. Ο μετασχηματισμός σχετικά με το σταθερό και το κινούμενο σύστημα συντεταγμένων εκφράζεται από τη σχέση:

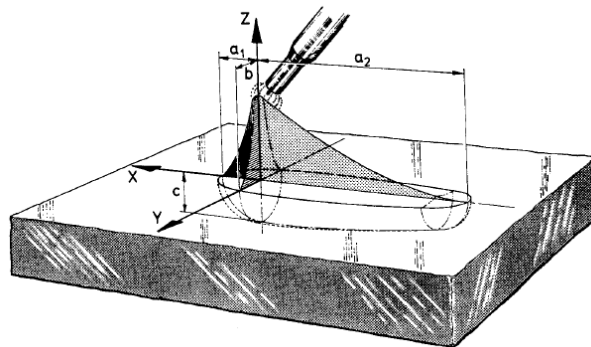
$$x' = x + v(t' - t) \quad (12.30)$$

Όπου, v είναι η ταχύτητα συγκόλλησης.

Η κατανομή Gauss της πυκνότητας ισχύος σε μια έλλειψη με κέντρο στο (0, 0, 0) και τους ημι - άξονες a, b, c παράλληλους στους άξονες συντεταγμένων x, y, z μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$Q'''(x', y, z) = Q_0''' e^{-Ax'^2} e^{-By^2} e^{-Cz^2} \quad (12.31)$$

όπου Q_0''' είναι η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ισχύος στο κέντρο της έλλειψης.



Εικόνα 12.7 Κατανομή της διπλής ελλειψοειδούς εισερχόμενης θερμότητας, $\left(\frac{W}{m^3}\right)$

Η διατήρηση της ενέργειας απαιτεί ότι:

$$Q = 4 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} Q_0''' e^{-Ax^2} e^{-By^2} e^{-Cz^2} dx' dy dz \quad (12.32)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ολοκλήρωση επιτυγχάνεται μόνο στο διάστημα 0 έως ∞ , π.χ. μόνο κατά το ένα όγδοο του όγκου, και συνεπώς η Εξίσωση 2.32 πολλαπλασιασμένη με 4, ως Q, δίνει το μισό του όγκου. Από την Εξίσωση 2.32 προκύπτει:

$$Q_0''' = \frac{2Q\sqrt{ABC}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (12.33)$$

Για τον υπολογισμό των σταθερών A, B, C, οι ημι - άξονες της έλλειψης a, b, c στις διευθύνσεις x', y, z ορίζονται έτσι ώστε η πυκνότητα ισχύος να μειώνεται στο $0.05Q_0'''$ στην επιφάνεια της έλλειψης. Στη διεύθυνση x:

$$Q'''(\alpha, 0, 0) = Q_0''' e^{-A\alpha^2} = 0.05Q_0''' \quad (12.34)$$

Για αυτό το λόγο,

$$A = \frac{\ln 20}{\alpha^2} \approx \frac{3}{\alpha^2} \quad (12.35)$$

Παρόμοια,

$$B \approx \frac{3}{b^2} \quad (12.36)$$

$$C \approx \frac{3}{c^2} \quad (12.37)$$

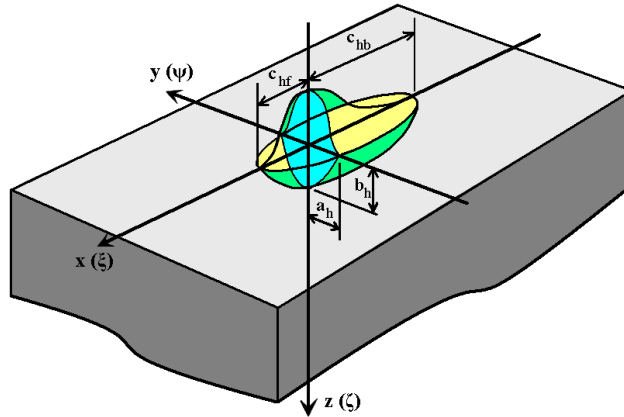
Αντικαθιστώντας τα A, B, C από τις Εξισώσεις 12.35 έως 12.37 και το Q_0''' από την Εξίσωση 12.34, στην Εξίσωση 2.43, προκύπτει:

$$Q'''(x', y, z) = \frac{6\sqrt{3}fQ}{\alpha b c \pi \sqrt{\pi_0}} e^{-\frac{3x'^2}{\alpha^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (12.38)$$

Όπου f, είναι παράγοντας που έχει να κάνει με την εισερχόμενη θερμότητα στο εμπρός (f_f) και στο πίσω τμήμα (f_r) της κατανομής, με $f_f + f_r = 2$. Αυτό γίνεται διότι η μεταβολή της θερμοκρασίας μπροστά από την πηγή είναι πιο απότομη σε σχέση με τη μεταβολή πίσω από την πηγή. Επομένως συνδυάζονται δύο ελλειψοειδείς πηγές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.7, η μία για το μπροστά μισό τμήμα και η δεύτερη για το πίσω μισό τμήμα, δίνοντας διαφορετικές τιμές στο α , α_1 και α_2 , για το μπροστά και το πίσω τμήμα αντίστοιχα.

Οι πλέον σύγχρονες αναλυτικές προσεγγίσεις της θερμοκρασιακής κατανομής λόγω συγκόλλησης, προέρχονται από ερευνητές με επικεφαλής τον N.T. Nguyen^[15] οι οποίοι βασιζόμενοι στην διπλή ελλειψοειδή καμπύλη του Goldak ανέπτυξαν αναλυτικές λύσεις τόσο για

την περίπτωση ημι-άπειρου σώματος όσο και για την περίπτωση πεπερασμένου σώματος μεγάλου πάχους που υπόκειται σε τρισδιάστατη κινούμενη πηγή θερμότητας.



Εικόνα 12.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπλής ελλειψοειδούς

Έτσι για την πρώτη περίπτωση, ημι-άπειρου σώματος, από την γενική εξίσωση του Goldak,

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\eta VI}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_h^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right)$$

Όπου,

$Q(x, y, z)$ η ροή θερμότητας σε ένα σημείο (x, y, z) , a_h, b_h, c_h : παράμετροι της ελλειψοειδούς πηγής θερμότητας, $c_{hf} = c_{hb} = c_h$, x, y, z : κινούμενες συντεταγμένες της πηγής θερμότητας, V, I και η : τάση, ένταση ρεύματος και δραστικότητα τόξου, αντίστοιχα, προκύπτουν οι Εξισώσεις 12.39α - 12.39γ που δίνουν τη λύση για τη μεταβατική θερμοκρασία σε ημι-άπειρο σώμα που υπόκειται σε τρισδιάστατη πηγή θερμότητας κατανομής διπλού ελλειψοειδούς.

$$T - T_o = \frac{3\sqrt{3}Q}{2\rho c \pi \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{(12a(t-t') + a_h^2)(12a(t-t') + b_h^2)}} \left(\frac{A}{\sqrt{12a(t-t') + c_{hf}^2}} + \frac{B}{\sqrt{12a(t-t') + c_{hb}^2}} \right) \quad (12.39\alpha)$$

Όπου,

$$A' = r_f \cdot \exp\left(-\frac{3(x - vt')^2}{12a(t-t') + c_{hf}^2} - \frac{3y^2}{12a(t-t') + a_h^2} - \frac{3z^2}{12a(t-t') + b_h^2}\right) \quad (12.39\beta)$$

$$B' = r_b \cdot \exp\left(-\frac{3(x-vt')^2}{12a(t-t') + c_{hb}^2} - \frac{3y^2}{12a(t-t') + a_h^2} - \frac{3z^2}{12a(t-t') + b_h^2}\right) \quad (12.39\gamma)$$

Αντίστοιχα η λύση για την περίπτωση πεπερασμένου σώματος μεγάλου πάχους, D , μήκους, $2L$, και πλάτους, $2B$, που προτείνει ο Nguyen^[16] δίνεται από τις σχέσεις 12.40α - 12.40δ που ακολουθούν.

$$T(x,y,z,t)-T_o = \frac{3\sqrt{3}Q}{2\rho c_p \sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\frac{\exp\left(-\frac{3y^2}{12a(t-t') + \alpha_h^2} - \frac{3z^2}{12a(t-t') + b_h^2}\right) \cdot E(B,y,a_h) \cdot E(D,z,\beta_h)}{\sqrt{12a(t-t') + \alpha_h^2} \sqrt{12a(t-t') + b_h^2}} \right] \cdot \left[\frac{r_f E(L,x-vt',c_{hf}) \exp\left(-\frac{3(x-vt')^2}{12a(t-t') + c_{hf}^2}\right)}{\sqrt{12a(t-t') + \alpha_{hf}^2}} + \frac{r_b E(L,x-vt',c_{hb}) \exp\left(-\frac{3(x-vt')^2}{12a(t-t') + c_{hb}^2}\right)}{\sqrt{12a(t-t') + \alpha_{hb}^2}} \right] \cdot dt' \quad (12.40\alpha)$$

$$E(L,x,c_h) = \frac{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{(12a(t-t') + c_h^2)(L-x) - c_h^2 y}{c_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + c_h^2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{(12a(t-t') + \alpha_h^2)(L+x) - c_h^2 y}{c_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + c_h^2}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{(L-x)\sqrt{3}}{c_h}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{(L+x)\sqrt{3}}{c_h}\right) \right]} \quad (12.40\beta)$$

$$E(B,y,a_h) = \frac{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{(12a(t-t') + a_h^2)(B-y) - a_h^2 y}{a_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + a_h^2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{(12a(t-t') + \alpha_h^2)(B+y) - a_h^2 y}{a_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + \alpha_h^2}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{(B-y)\sqrt{3}}{a_h}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{(B+y)\sqrt{3}}{a_h}\right) \right]} \quad (12.40\gamma)$$

$$E(D,z,b_h) = \left[\operatorname{erf}\left(\frac{(12a(t-t'))D + (D-z)b_h^2}{b_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + b_h^2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_h z}{c_h \sqrt{4a(t-t')} \sqrt{12a(t-t') + b_h^2}}\right) \right] \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{D\sqrt{3}}{b_h}\right) \quad (12.40\delta)$$

Φυσικά, ερευνητές, όπως για παράδειγμα ο D. Couédel και συνεργάτες^[18] ή οι T.W. Eagar και N.-S. Tsai^[28], συνεχίζουν την προσπάθεια εξέλιξης γραμμικών ή γκαουσιανών κατανομών πηγών

θερμότητας ενώ άλλοι^[22], παρουσιάζουν αναλυτικές λύσεις της θερμοκρασιακής κατανομής σε συγκολλήσεις διαφορετικού τύπου από τις 'bead on plate' ή τις 'επίπεδες μετωπικές' (π.χ. συγκολλήσεις T).

12.2.4 Τρίτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας

Το πέρασμα στην τρίτη γενιά μοντέλων πηγής θερμότητας έγινε μέσω της μελέτης ερευνητών^[103] οι οποίοι προέβλεψαν το σχήμα του ρευστού μετάλλου στη λίμνη συγκόλλησης. Η χαρακτηριστική προοπτική της τρίτης γενιάς μοντέλων είναι ότι πρώτα επιλύονται οι εξισώσεις Stefan-Boltzmann στο σύνορο στερεού-ρευστού της λίμνης συγκόλλησης. Επιπρόσθετα με την εξίσωση της ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψη το ελεύθερο σύνορο στερεού-υγρού (ασυνεχής ειδική ενθαλπία κατά μήκος του συνόρου στερεού-υγρού), στα μοντέλα αυτά συμπεριλαμβάνονται και φαινόμενα όπως οι υδροστατικές πιέσεις στο τήγμα της λίμνης συγκόλλησης, η κατανεμημένη πίεση στη λίμνη συγκόλλησης λόγω της φυσικής του βολταϊκού τόξου, εντατικές επιφανειακές δυνάμεις και ένας χωρικός περιορισμός που επιβάλλεται από την αρχή διατήρησης της μάζας (όση μάζα εισέρχεται στη λίμνη συγκόλλησης είναι ίση με τη μάζα που εξέρχεται από αυτή).

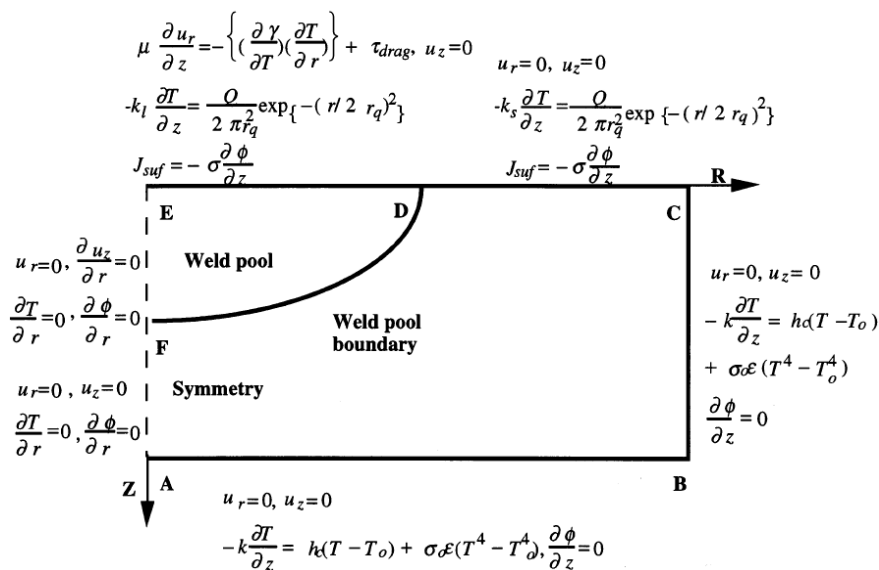
Στην ουσία τα μοντέλα αυτά συνδυάζουν την εξίσωση θερμότητας με την εξίσωση ορμής που ισχύει για ένα υδροστατικό ρευστό αγνοώντας την κινητική του ρευστού (επίδραση δυνάμεων Marangoni και Lorenz) και τις τυχόν δυνάμεις λόγω μεταφοράς σταγονιδίων στη λίμνη συγκόλλησης από το μέταλλο προσθήκης. Υποθέτουν ότι η θερμική ροή εξαιτίας του βολταϊκού τόξου και η κατανομή της πίεσης που ασκεί αυτό είναι σταθερά και ανεξάρτητα από το σχήμα της ελεύθερης επιφάνειας της λίμνης συγκόλλησης. Αριθμητικά, ενώ δεν επιβαρύνονται σημαντικά σε υπολογιστικό χρόνο, σε σχέση με τα μοντέλα πρώτης και δεύτερης γενιάς, απαιτούν δεδομένα όχι στη λογική της κατανομής πυκνότητας θερμότητας μέσα στο υλικό, αλλά δεδομένα που έχουν να κάνουν με τη φυσική της πηγής θερμότητας και των φαινομένων που προκύπτουν από αυτή (ροή θερμότητας ή θερμοκρασίας από το τόξο στη λίμνη συγκόλλησης, ρυθμός μετάδοσης μάζας προς αυτή, πιέσεις, επιφανειακές τάσεις κ.λπ.). Η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης στα μοντέλα αυτά δεν είναι δεδομένο εισόδου αλλά, αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Στα πλαίσια των ανωτέρω, άλλες ενδιαφέρουσες μελέτες που ανήκουν στη γενιά αυτή έχουν ως εξής:

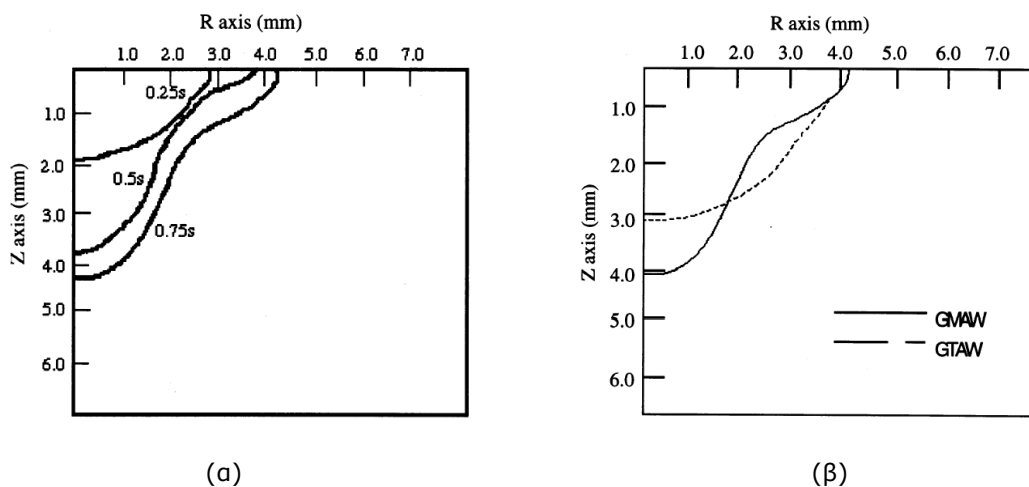
Οι P.E. Murray και A. Scotti^[23], πρότειναν ένα μοντέλο το οποίο προσδιορίζει το βάθος διείδυσης σε συγκολλήσεις GMAW. Το μοντέλο που ανέπτυξαν βασίζεται στην υπόθεση ότι η μεταφορά θερμότητας και μάζας στη λίμνη συγκόλλησης καθώς και το βάθος διείδυσης μπορούν να συσχετιστούν με μια αδιάστατη σχέση. Η συσχέτιση αυτή, οδηγεί σε μια αναλυτική έκφραση

για το βάθος της διείσδυσης η οποία συμπεριλαμβάνει εμπειρικές σταθερές που έχουν να κάνουν με αυτήν ακριβώς τη δραστικότητα της μεταφοράς θερμότητας και μάζας στη λίμνη συγκόλλησης.

Από την άλλη, οι I.S. Kim και A Basu^[24] επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ενός μη-μόνιμου διοδιαστατου μαθηματικού μοντέλου το οποίο συμπεριλαμβάνει όλα τα σημαντικά φυσικά φαινόμενα που «ελέγχουν» τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και συναγωγής στη λίμνη συγκόλλησης. Η μοντελοποίηση που πραγματοποίησαν περιλαμβάνει θεωρήσεις και παραδοχές για τη ροή του υλικού, τις φυσικές του ιδιότητες, τις συνοριακές συνθήκες (Εικ. 12.9), την κατανομή της πηγής θερμότητας, τις επιφανειακές εφελκυστικές τάσεις (Marangoni effect) και την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που παράγονται από την τεχνική συγκόλλησης (GMAW).

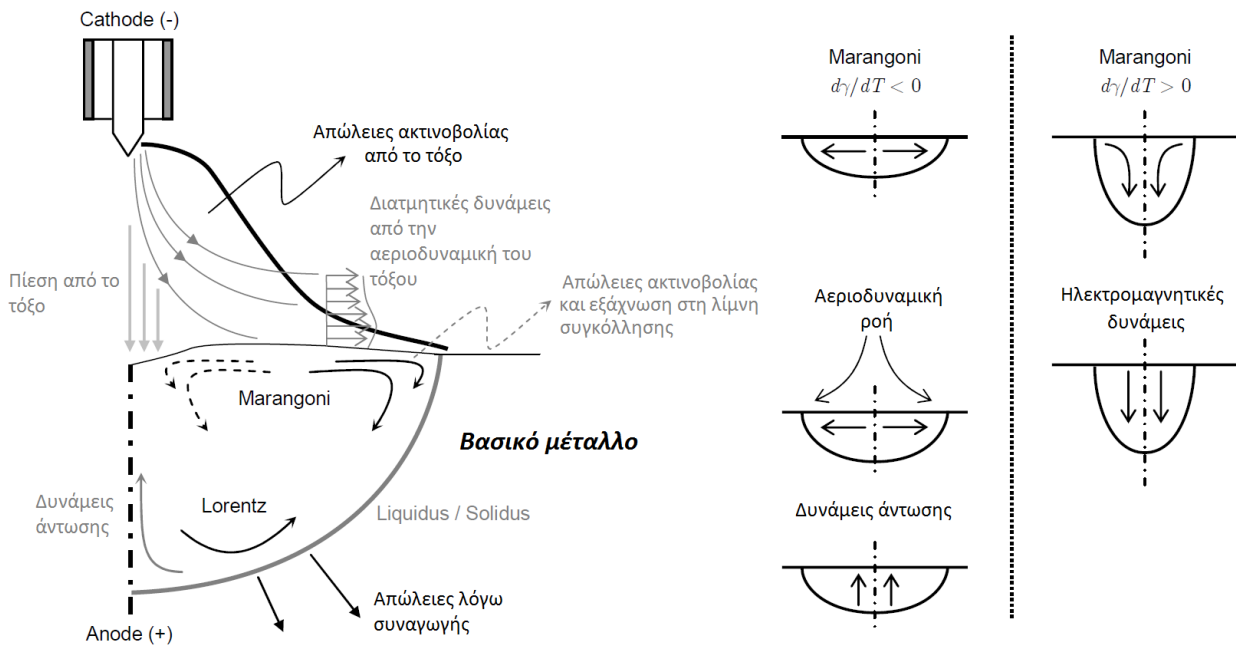


Εικόνα 12.9 Συνοριακές συνθήκες για τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου και του πεδίου ταχύτητας κατά τους I.S. Kim και A Basu^[24]



Εικόνα 12.10 Αποτελέσματα μοντέλου των I.S. Kim και A Basu^[24]. α) Πορεία διεπιφάνεια υγρού - στερεού κατά την εφαρμογή της τεχνικής GMAW σε διαφορετικούς χρόνους, β) σύγκριση των τεχνικών GMAW και GTAW

Παρόμοιες μελέτες αλλά με την ανάπτυξη διαφορετικών αναλυτικών μοντέλων πραγματοποίησαν τόσο οι K.C Tsao και C.S. Wu^[26] όσο και οι G.M. Oreper, T.W Eagar και J. Szekely^[27] ενώ, άλλοι ερευνητές ανέπτυξαν αναλυτικά μοντέλα με σκοπό επίσης τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε ότι αφορά όμως το αέριο προστασίας και το μέταλλο προσθήκης σε συγκολλήσεις GMAW^[29].



Εικόνα 12.11 Τα φυσικά φαινόμενα και οι δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση του ρευστού μετάλλου εντός της λίμνης συγκόλλησης

12.2.5 Τέταρτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας^[104]

Τα μοντέλα τέταρτης γενιάς πηγής θερμότητας διαφοροποιούνται, σε σχέση με τις προηγούμενες με την εισαγωγή σε αυτά των εξισώσεων της ρευστομηχανικής. Οι γενικές εξισώσεις Navier-Stokes που περιγράφουν μακροσκοπικά τη μηχανική των ρευστών, μπορούν να εφαρμοστούν για τη λίμνη συγκόλλησης, συμπεριλαμβάνοντας δυνάμεις Marangoni και Lorenz, και να περιγράψουν ικανοποιητικά τη φυσική του συστήματος πηγή θερμότητας - λίμνη συγκόλλησης. Ωστόσο, καθώς τα φαινόμενα που σχετίζονται με την κίνηση του ρευστού τήγματος εντός της λίμνης συγκόλλησης είναι συχνά χαοτικά (ειδικά όταν η ισχύς του ρεύματος συγκόλλησης ξεπερνά τιμές της τάξης των 100 - 150 A όπως συμβαίνει συνήθως στις συγκολλήσεις τόξου κραμάτων αλουμινίου), συνήθως απαιτείται η συμβολή πειραματικών δεδομένων προκειμένου να βαθμονομηθούν κατάλληλα ορισμένα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο. Το γεγονός αυτό αυτόματα περιορίζει τη δυνατότητα διεύρυνσης της εφαρμογής των μοντέλων αυτών για προσομοίωση συγκολλήσεων άλλων εκτός από αυτές με τις οποίες «ανταλλάσσουν» δεδομένα. Προφανώς, εκτός από σημαντικό υπολογιστικό κόστος, τα μοντέλα αυτά επιβαρύνονται και από

το κόστος εκτέλεσης των πειραμάτων που απαιτούνται για να επιλυθούν οι μαθηματικές δυσκολίες.

12.2.6 Πέμπτη Γενιά μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας^[104]

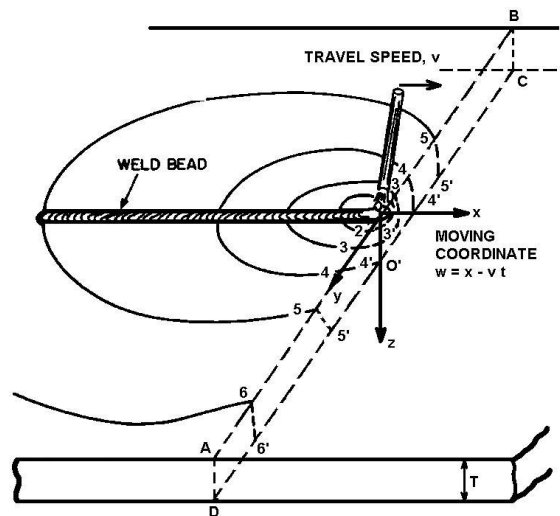
Σε συνέχεια των μοντέλων τέταρτης γενιάς, αυτά της πέμπτης προσπαθούν να συμπεριλάβουν και την προσομοίωση του βολταϊκού τόξου (μιλώντας για τις συμβατικές συγκολλήσεις τόξου). Συνεπώς, στις εξισώσεις των μοντέλων της τέταρτης γενιάς προστίθενται και οι εξισώσεις μαγνητο-υδροδυναμικής. Τα μοντέλα αυτά είναι ακόμα πολύ γενικά και απαιτείται σημαντική εξέλιξη τους προκειμένου να μπορούν να αξιολογηθούν. Τόσο τα μοντέλα αυτής της γενιάς όσο και τα μοντέλα της τέταρτης γενιάς έχουν προς το παρόν μόνο ερευνητική αξία και η εξέλιξή τους αλλά και η ευρεία εφαρμογή τους εξαρτάται από την βαρύτητα της αξίας της απόλυτης πρόβλεψης των φαινομένων που συμβαίνουν μέσα στη λίμνη συγκόλλησης.

12.3 Μηχανικά φαινόμενα - Μοντελοποίηση παραμενουσών τάσεων, στρεβλώσεων, παραμορφώσεων

Η προσομοίωση των μεταβατικών θερμικών και παραμενουσών τάσεων αλλά και των στρεβλώσεων παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης με χρήση αναλυτικών εξισώσεων, ξεκίνησε κατά τη δεκαετία του 1930 οπότε και οι Boulton, Lance-Martin μελέτησαν τις μεταβατικές θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος της ακμής ελάσματος, λόγω συγκόλλησης^[3]. Σύμφωνα με τον K. Masubuchi^[3], η πρώτη σημαντική προσπάθεια μοντελοποίησης της κατανομής των τάσεων αυτών, έγινε το 1961 από τον Tall στη διδακτορική του διατριβή. Ο Tall ανέπτυξε ένα απλό πρόγραμμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον υπολογισμό των θερμικών τάσεων σε συγκόλληση 'bead on plate' κατά μήκος του διαμήκους άξονα μιας ράβδου. Η κατανομή της θερμοκρασίας θεωρήθηκε διδιάστατη ωστόσο, κατά τον υπολογισμό των τάσεων, οι διαμήκεις τάσεις σ_x θεωρήθηκαν συνάρτηση μόνο της απόστασης x ενώ οι τάσεις σ_y και τ_{xy} θεωρήθηκαν μηδενικές.

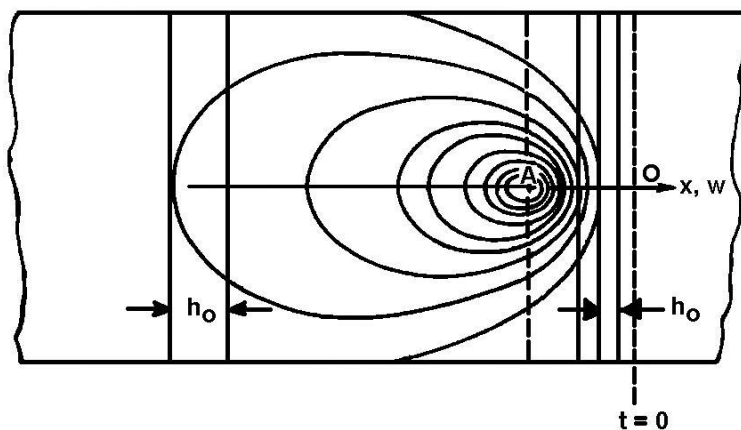
Όπως αναφέρει ο Masubuchi^[3] το 1968, ο ίδιος μαζί με άλλους ερευνητές βασιζόμενοι στην αναλυτική λύση του Tall, πρότειναν ένα νέο εξελιγμένο τρόπο μονοδιάστατου αναλυτικού υπολογισμού των θερμικών τάσεων, λόγω συγκόλλησης 'bead on plate', ο οποίος βασιζόταν σε υπολογισμούς σε κώδικα FORTRAN. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως στο μοντέλο που αναπτύχθηκε συμπεριλαμβανόταν και η επίδραση της θερμοκρασίας στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Κατ' αυτόν, αρχικά υπολογίστηκε η κατανομή των θερμοκρασιών γύρω από το κινούμενο τόξο συγκόλλησης μέσω της εξίσωσης που προκύπτει για την υπόθεση διδιάστατης θερμοκρασιακής κατανομής από γραμμική πηγή πυκνότητας ενέργειας $q=Q/T$ (Εξ. 12.41).

$$\theta - \theta_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} e^{(v/2k)w} K_0 \left(\frac{v}{2k} r \right) \quad (12.41)$$



Εικόνα 12.12 Σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής κατανομής σε πλάκα όταν στρώση συγκόλλησης αποτίθεται στην επιφάνειά της^[3]

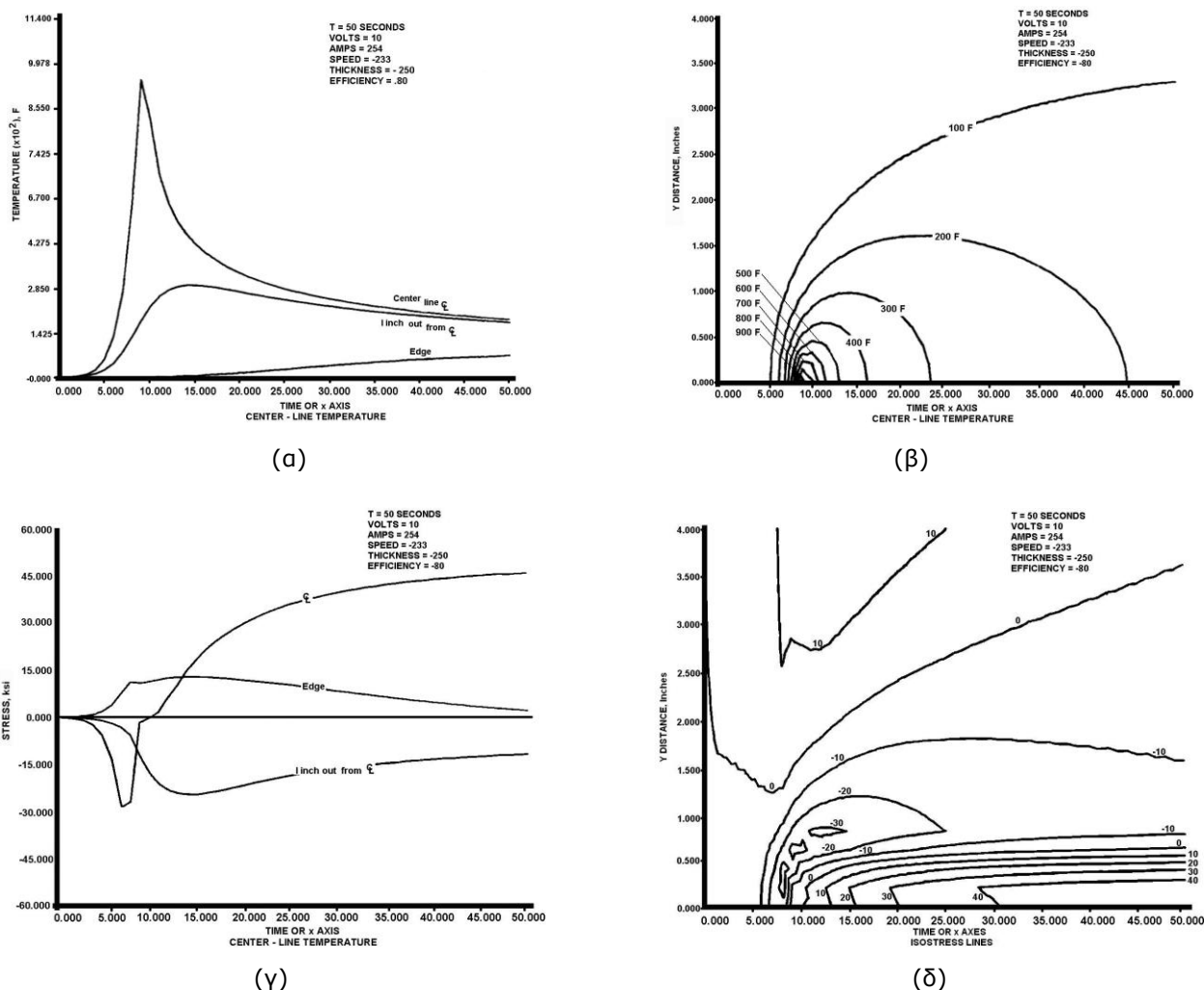
Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των τάσεων, έγινε η υπόθεση ότι η μεταβολή τους κατά τη διεύθυνση συγκόλλησης (Άξονας x) είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που συμβαίνει κατά τη διεύθυνση - y. Το συνολικό πεδίο διακριτοποιήθηκε σε εγκάρσιες ζώνες πάχους h_0 (Εικ. 12.12).



Εικόνα 12.13 Διακριτοποίηση τασικού πεδίου σε εγκάρσιες ζώνες για τον υπολογισμό των θερμικών και παραμενουσών τάσεων^[3]

Τα χρονικά διαστήματα που αντιστοιχούν σε κάθε ζώνη θεωρήθηκαν αρκετά μικρά ώστε η θερμοκρασία και οι θερμικές τάσεις για κάθε προσαύξηση να μπορούν να θεωρηθούν σταθερά. Οι υπολογισμοί ξεκινούν σε κάποια ζώνη που βρίσκεται αρκετά μπροστά από το τόξο συγκόλλησης όπου οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι μικρές και οι τάσεις πλήρως ελαστικές. Αρχικά, υπολογίστηκαν οι τάσεις στο σημείο αυτό με βάση τη θεωρία ελαστικότητας και στη συνέχεια, σε

κάθε άλλη ζώνη, οι τάσεις υπολογίστηκαν προσθέτοντας τις τάσεις λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητα από το εάν είχε πραγματοποιηθεί ή όχι πλαστική παραμόρφωση. Θεωρήθηκε, ότι οι τάσεις σε δεδομένο σημείο δεν υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού για τη δεδομένη θερμοκρασία. Έτσι, με τον τρόπο αυτό, προσδιορίστηκε η κατανομή των τάσεων στο συνολικό πεδίο. Στην Εικόνα 12.13 φαίνονται αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε για την περίπτωση κράματος αλουμινίου 2014-T6 πάχους 6,4mm και συνθήκες: πλάτος ελάσματος 200mm, ρεύμα συγκόλλησης 254A, τάση συγκόλλησης 10V, ταχύτητα τόξου 14ipm, δραστικότητα τόξου 80%. Άλλα αποτελέσματα του μοντέλου σε συγκολλήσεις κράματος αλουμινίου 5053-H32 φαίνονται στην Εικόνα 9.2 (Ενότητα II). Από τη δεκαετία του 1970 και μετά, η αναλυτική μοντελοποίηση θερμικών και παραμενουσών τάσεων, στρεβλώσεων και παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης αποτέλεσε δημοφιλές πεδίο μελέτης τόσο από ερευνητές του M.I.T.[4],[6],[7], όσο και από άλλες ερευνητικές ομάδες ανά τον κόσμο.



Εικόνα 12.14 Αποτελέσματα αναλυτικής μοντελοποίησης από ερευνητές του M.I.T.

α) Μεταβολή θερμοκρασίας κατά μήκος του διαμήκου άξονα, β) Ισόθερμες καμπύλες γύρω από το τόξο συγκόλλησης, γ) μεταβολή τάσεων κατά μήκος τριών διαμηκών γραμμών, δ) Ισόθερμες καμπύλες γύρω από το τόξο συγκόλλησης

Σύγχρονοι ερευνητές, βασιζόμενοι στις παραδοχές και τους τύπους που ανέπτυξε ο Masubuchi εξακολουθούν να προτείνουν μέσα από απλοποιητικές μεθοδολογίες αναλυτικούς τρόπους υπολογισμού των στρεβλώσεων-παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης, καθώς αυτές δίνουν μια εύκολη και πάνω απ' όλα ταχύτατη εκτίμηση των μετατοπίσεων που αναμένονται από τη διαδικασία.

Σε μια τέτοια μεθοδολογία για παράδειγμα, οι R. Mandar και C.V.N. Sundar^[8], προτείνουν μια απλοποιημένη προσέγγιση για την εκτίμηση της εγκάρσιας συστολής σε μια μετωπική συγκόλληση δύο ίδιου πάχους ελασμάτων. Η βασική υπόθεση τους ήταν ότι η συγκολλημένη πλάκα αποτελείται από μια θερμο-ελαστο - πλαστική ζώνη και μια τελείως ελαστική ζώνη. Η θερμο-ελαστο-πλαστική ζώνη, εντοπίζεται κοντά στη συγκόλληση ενώ η ελαστική ζώνη εντοπίζεται σε πιο απομακρυσμένες περιοχές και θεωρείται ότι παραμένει ελαστική κατά τις φάσεις της θέρμανσης και της ψύξης. Έτσι, τα ελάσματα που υπόκεινται σε συγκόλληση μπορούν να μοντελοποιηθούν ως συνδυασμός μιας θερμο-ελαστο-πλαστικής ράβδου και ενός ελατηρίου.

Βασικές παραδοχές των R. Mandar και C.V.N. Sundar ήταν ότι, οι πλάκες που πρόκειται να συγκολληθούν έχουν ικανοποιητικό μήκος ώστε να θεωρηθεί ημι - μόνιμη κατάσταση συναγωγής θερμότητας και ότι η τάση διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλονται γραμμικά με τη θερμοκρασία. Δηλαδή,

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \quad (12.42)$$

$$E = E_0 \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \quad (12.43)$$

Επιπλέον, θεώρησαν ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι γραμμικά εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία και ότι δε συμβαίνει σκλήρυνση της ράβδου.

Οι ερευνητές έλεγξαν το μοντέλο πραγματοποιώντας σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις της συστολής σε μετωπικές συγκολλήσεις μαλακού χάλυβα με την τεχνική SMAW. Η σύγκριση έδωσε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο, όπως άλλωστε συμβαίνει και με όλα τα αναλυτικά μοντέλα, οι εφαρμοζόμενες παραδοχές οδήγησαν σε περιορισμούς ως προς την τελική συστολή. Λόγω του ότι η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την παραδοχή της ημι - μόνιμης κατάστασης, η συστολή στην αρχή και το τέλος της συγκόλλησης δεν μπορούν να εκτιμηθούν. Βέβαια, στην περίπτωση των ναυπηγικών κατασκευών των οποίων οι διαστάσεις είναι ιδιαίτερα μεγάλες, η έκταση των μεταβατικών ζωνών στην αρχή και το τέλος της συγκόλλησης είναι πολύ μικρές σε σχέση με το μήκος του πλαισίου και επομένως το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία.

Σημαντική τέλος θεωρείται και η μελέτη των L.J. Yang^[9] και Z.M. Xiao^[9], οι οποίοι πραγματοποίησαν έρευνα, με σκοπό την ανεύρεση αναλυτικού μοντέλου για την εξέταση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων που αναπτύσσονται εγκάρσια στον άξονα της συγκόλλησης ελασμάτων που συγκολλήθηκαν υπό μηχανικό περιορισμό.

Η αξιοπιστία του μοντέλου που ανέπτυξαν συγκρίθηκε με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν έπειτα από συγκολλήσεις σε ελάσματα από κράμα αλουμινίου, AA5083 - H116 και χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης AISI1016, συγκολλημένα με την τεχνική GMAW και υπό μηχανικό περιορισμό ώστε να εμποδιστεί η υπερβολική στρέβλωση - παραμόρφωση κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι, κατά τη συγκόλληση με πλήρη διείσδυση, δε συμβαίνει διαρροή εάν ο λόγος της μέγιστης θερμικής τάσης, προς την τάση διαρροής είναι μικρότερος από 0,938. Το μοντέλο έδειξε πως πλήρης διαρροή εγκάρσια στον άξονα της συγκόλλησης θα υπάρξει, εάν ο παραπάνω λόγος υπερβεί την τιμή του 1,246. Προέκυψε ακόμα ότι για συγκόλληση χωρίς πλήρη διείσδυση, ο λόγος μπορεί επιπλέον να αυξηθεί πριν επιτευχθεί πλήρης διαρροή ενώ επίσης βρέθηκε ότι οι επιφανειακές παραμένουσες τάσεις αυξάνονται, καθώς το βάθος της ζώνης διαρροής αυξάνει. Οι ερευνητές επισημαίνουν ωστόσο, ότι οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις, δε συμβαίνουν πάντα στην επιφάνεια. Αναφέρουν πως καθώς το βάθος της ζώνης διαρροής αυξάνεται, η θέση των μέγιστων τάσεων μετατοπίζεται προς τη βάση του ελάσματος. Τέλος, διατυπώνουν το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες θερμικές τάσεις που προκαλούν τη διαρροή αυξάνονται, καθώς το βάθος της διείσδυσης της συγκόλλησης μειώνεται.

12.4 Αριθμητική μοντελοποίηση συγκόλλησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

12.4.1 Θεωρητική προσέγγιση θερμικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα θερμικά προβλήματα που μπορούν να λυθούν με χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

Η πρώτη κατηγορία αφορά θερμικά προβλήματα σε μόνιμη κατάσταση και περιλαμβάνουν σταθερές θερμο-φυσικές ιδιότητες. Η δεύτερη κατηγορία αφορά προβλήματα σε μεταβατική κατάσταση με σταθερές θερμο-φυσικές ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να εξαρτώνται από το χρόνο αλλά όχι από τη θερμοκρασία. Ο σκοπός σε αυτήν την περίπτωση είναι να υπολογιστούν οι μεταβολές των θερμοκρασιών με την πάροδο του χρόνου, ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση. Τέλος, η τρίτη κατηγορία καλύπτει όλα τα μόνιμα και μη μόνιμα προβλήματα συμπεριλαμβανομένων και των μη γραμμικοτήτων ή του εξαρτώμενου από το χρόνο και τη θερμοκρασία, συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Όταν εφαρμόζεται στην εξίσωση θερμότητας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τη λύση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων της μορφής:

$$C\dot{T} + KT = Q \quad (12.44)$$

Όπου, T είναι το μητρώο κομβικής θερμοκρασίας, \dot{T} το μητρώο χρονικής παραγώγου της θερμοκρασίας, C το μητρώο της ειδικής θερμότητας $\left(\frac{J}{K}\right)$, K το μητρώο της αγωγιμότητας $\left(\frac{W}{K}\right)$ και Q το μητρώο κομβικής ισχύος, ισοδύναμης με την εσωτερική πηγή θερμότητας και τις συνοριακές συνθήκες. Υπό στατικές συνθήκες η Εξίσωση 12.44 υποβαθμίζεται στην:

$$KT = Q \quad (12.45)$$

Συνολικά, η Εξίσωση 12.44 μπορεί να γραφεί:

$$R = Q - C\dot{T} - KT = 0 \quad (12.46)$$

Όπου, το R αναπαριστά ένα μητρώο που εμπεριέχει όλες τις κομβικές παραμένουσες δυνάμεις (θερμοκρασίες). Για μη γραμμικά προβλήματα, η Εξίσωση 12.46 πρέπει να λυθεί σε κάθε χρονική στιγμή μέσω επαναληπτικής μεθόδου.

Αν το R ληφθεί ως το υπόλοιπο που προκύπτει από την i επανάληψη, π.χ. λαμβανόμενη με θερμοκρασιακό πεδίο T_i , τότε μια βελτιωμένη λύση μπορεί να ληφθεί γράφοντας:

$$R_{i+1} = R_i + \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_i \delta T_i = 0 \quad (12.47)$$

Όπου, $\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_i$ αναπαριστά το εφαπτομενικό μητρώο που προκύπτει από την i επανάληψη.

Συνεπώς η :

$$\delta T_i = -\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_i^{-1} R_i \quad (12.48)$$

Λαμβάνεται, είτε με επανάληψη, είτε απευθείας με παραγοντοποίηση Choleski και δίνει τη νέα προσέγγιση:

$$T_{i+1} = T_i + \delta T_i \quad (12.49)$$

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η νόρμα του υπολοίπου να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\|R_{i+1}\| \leq \epsilon_m \quad (12.50)$$

Όπου, ϵ_m είναι μια μικρή παράμετρος που καθορίζεται από το χρήστη.

Το μητρώο $\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_i^{-1}$ χρησιμοποιείται μόνο για την εξασφάλιση του εφαπτομενικού μητρώου

δυσκαμψίας για ένα βελτιωμένο διάνυσμα θερμοκρασίας. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο να επαναϊπολογιστεί σε κάθε επανάληψη.

12.4.2 Θεωρητική προσέγγιση μηχανικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

12.4.2.1 Εξισώσεις ισορροπίας

Μια στατική γραμμική ανάλυση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόκρισης μιας κατασκευής που υπόκειται σε οποιοδήποτε φορτίο όταν η συμπεριφορά της κατασκευής δεν επηρεάζεται από:

- Τον παράγοντα χρόνο και τις δυναμικές επιδράσεις (αδράνεια και απόσβεση)
- Μη γραμμικότητες οποιασδήποτε προέλευσης (γεωμετρική, υλικού, σύνδεσης, κλπ.)

Η εξίσωση που καλύπτει αυτού του τύπου τη συμπεριφορά είναι η:

$$K_s U = F \quad (12.51)$$

Όπου, K_s είναι το μητρώο δυσκαμψίας, U είναι το μητρώο μετατόπισης της κατασκευής και F το μητρώο του εξωτερικού φορτίου. Το διάνυσμα F μπορεί να περιλαμβάνει θερμικά φορτία ή αρχικές παραμορφώσεις.

Αντίστοιχα, η θεμελιώδης εξίσωση που καλύπτει τη δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής είναι η:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F(t) \quad (12.52)$$

Όταν η συμπεριφορά της κατασκευής είναι γραμμική, τα μητρώα K , M και C είναι ανεξάρτητα από τη μετατόπιση.

Σε πολλά πακέτα λογισμικού μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, συναντώνται δύο μέθοδοι επίλυσης αυτής της εξίσωσης:

- Μια μέθοδος που αναφέρεται ως μέθοδος υπέρθεσης
- Μια μέθοδος απευθείας λύσης, που αναφέρεται ως σταδιακή μέθοδος ολοκλήρωσης με το χρόνο

Η ανάλυση του μηχανικού συστήματος είναι παρόμοια με την ανάλυση του θερμικού προβλήματος. Για μη γραμμικά δυναμικά προβλήματα, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες λύσεις του ακόλουθου τύπου:

$$R = F - KU - C\dot{U} - M\ddot{U} = 0 \quad (12.53)$$

Όπου, R είναι το μητρώο του υπόλοιπου κομβικού φορτίου, K είναι το μητρώο δυσκαμψίας, C το μητρώο απόσβεσης και M το μητρώο μάζας.

12.4.2.2 Δομικές εξισώσεις

Σε λογισμικά πακέτα μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων και κριτηρίων πλαστικότητας:

- Κριτήρια Von Mises, Drycker, Stassi Tsai – Hill ή άλλα ορισμένα από το χρήστη
- Τελείως πλαστικά μοντέλα και μοντέλα με ισοτροπικά στοιχεία
- Κινηματικά ή συνδυασμένης ενδοτράχυνσης
- Άλλα μοντέλα πλαστικότητας κ.λπ.

Η εμπειρία δείχνει^[59] ότι υπάρχει μια κυρτή περιοχή στο διάστημα των τάσεων, που αναφέρεται ως ελαστική περιοχή, έτσι ώστε κάθε φορτίο μέσα σε αυτήν την περιοχή να προκαλεί μόνο ελαστικές παραμορφώσεις. Αυτή η περιοχή ορίζεται από μία συνάρτηση βαθμωτής (αριθμητικής) τιμής Y , που αναφέρεται ως συνάρτηση διαρροής ή κριτήριο πλαστικότητας:

$$Y(\sigma_{ij}) \leq 0 \quad (12.54)$$

Αν μία κατάσταση ελαστικών τάσεων φτάσει στα όρια αυτής της περιοχής, προκαλούνται πλαστικές παραμορφώσεις ώστε η τασική κατάσταση να ικανοποιεί την:

$$Y(\sigma_{ij}) = 0 \quad (12.55)$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει την επιφάνεια διαρροής στο τασικό διάστημα. Η ολική παραμόρφωση διαχωρίζεται σε:

- Θερμική παραμόρφωση
- Ελαστική παραμόρφωση
- Πλαστική παραμόρφωση

Οι παραπάνω παραμορφώσεις σε διακριτή μορφή γίνονται:

$$\Delta \epsilon_{ij} = \Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij}^t + \Delta \epsilon_{ij}^p \quad (12.56)$$

Η ύπαρξη της πλαστικής πιθανότητας (αρχή του Hill για μέγιστο πλαστικό αποτέλεσμα^[5]) οδηγεί στη διατύπωση μιας υπόθεσης κανονικότητας, έτσι ώστε να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = \Delta \lambda \frac{\partial Y}{\partial \sigma_{ij}} \quad (12.57)$$

Για πλαστικότητα που συνδέεται με το κριτήριο $Y = 0$. Ο γενικός νόμος ελαστο - πλαστικότητας, ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς χρόνους δίνει:

$$\epsilon_{ij}^e = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^t - \epsilon_{ij}^p$$

$$\text{Αν } F\left(D\left(\Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij} - \Delta \epsilon_{ij}^t\right)\right) \leq 0, \text{ τότε} \quad (12.58)$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^e = \Delta \epsilon_{ij} - \Delta \epsilon_{ij}^t$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = 0 \quad (12.59)$$

$$\text{Αν } F\left(D\left(\Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij} - \Delta \epsilon_{ij}^t\right)\right) > 0, \text{ τότε} \quad (12.60)$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = \Delta \lambda \frac{\partial Y}{\partial \sigma_{ij}}$$

$$\Delta \epsilon_{ij}^e = \Delta \epsilon_{ij} - \Delta \epsilon_{ij}^t - \epsilon_{ij}^p \quad (12.61)$$

Όπου, D είναι μέτρο ελαστικότητας. Ο βαθμωτός $\Delta \lambda$ είναι ένας παράγοντας συνοχής που αντιπροσωπεύει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης. Ο $\Delta \lambda$ μπορεί να ληφθεί με τη λύση της εξίσωσης:

$$F \left(D \left(-\Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij} - \Delta \epsilon_{ij}^t - \Delta \lambda \frac{\partial Y}{\partial \sigma_{ij}} \right) \right) = 0 \quad (12.62)$$

Καθώς η επιφάνεια διαρροής και οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι ανεξάρτητες από την υδροστατική πίεση p :

$$p = -\frac{\sigma_{kk}}{3} \quad (12.63)$$

η πλαστικότητα είναι εξαρτημένη μόνο από την απόκλιση s_{ij} της τάσης, που δίνεται από την Εξίσωση 12.64:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3} \quad (12.64)$$

όπου, ο όρος δ_{ij} (του Kronecker) ορίζεται ως $\delta_{ij} = 1$ για $i = j$, και $\delta_{ij} = 0$ για $i \neq j$. Επομένως είναι σύνηθες να αναφέρονται μόνο οι σταθερές της απόκλισης της τάσης, που ορίζονται ως εξής:

$$J_1 = s_{kk} = 0, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{ik} s_{ki} \quad (12.65)$$

Η επιφάνεια διαρροής του Von Mises εξαρτάται μόνο από το J_2 .

Η επιφάνεια διαρροής του Von Mises παρουσιάζεται, στο διάστημα των κυρίων τάσεων, μέσω ενός κύκλου με ακτίνα $\sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_y$. Το κριτήριο Von Mises είναι ιδιαίτερος κατάλληλο για την ανάλυση της πλαστικότητας των μετάλλων. Η επιφάνεια διαρροής του Von Mises ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_e = \sigma_y \quad \text{για} \quad \sigma_e^2 = \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \quad (12.66)$$

Η τάση Von Mises ή ισοδύναμη τάση γίνεται:

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (12.67)$$

Μια σημαντική παρατήρηση για την πλαστικότητα των μετάλλων είναι η αρχή πλαστικής ασυμπίεστότητας, σύμφωνα με την οποία οι πλαστικές παραμορφώσεις δε δημιουργούν μεταβολές στον όγκο:

$$\epsilon_{kk}^p = 0 \quad (12.68)$$

Στην πράξη, η ελαστική περιοχή μεταβάλλεται με την παρουσία των πλαστικών παραμορφώσεων. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Το κριτήριο πλαστικότητας τότε εξαρτάται από άλλες μεταβλητές, κυρίως τις πλαστικές παραμορφώσεις. Διακρίνονται δύο τύποι σκλήρυνσης ενδοτράχυνσης.

Η ιστροπική σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, που αντιστοιχεί σε έκταση της ελαστικής περιοχής (Εικ. 12.14α). Με εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises, η έκφραση καλύπτεται από μια εσωτερική βαθμωτή μεταβλητή ϵ_{eq}^p , που αντιστοιχεί στις αθροιστικές ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις:

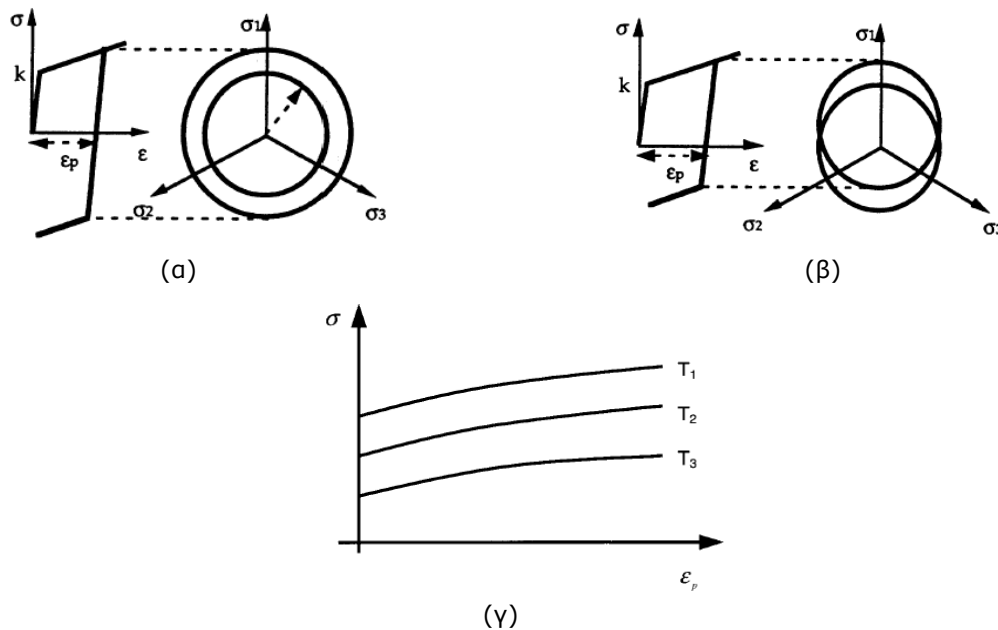
$$\epsilon_{eq}^p = \int_0^t \dot{\epsilon}_{eq}^p \quad (12.69)$$

$$\dot{\epsilon}_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (12.70)$$

Το μοντέλο της ιστροπικής ενδοτράχυνσης ορίζεται έτσι από τη σχέση:

$$Y(\sigma_{ij}, \epsilon_{eq}^p) = \sigma_e - \sigma_0(T, \epsilon_{eq}^p) \quad (12.71)$$

όπου, $\sigma_0(T, \epsilon_{eq}^p = 0) = \sigma_y(T)$ η αρχική τάση διαρροής του υλικού στην πραγματική θερμοκρασία.



Εικόνα 12.15 α) Ισοτροπική ενδοτράχυνση, β) Κινηματική ενδοτράχυνση, γ) Καμπύλες ενδοτράχυνσης εξαρτώμενες από τις πλαστικές παραμορφώσεις και τη θερμοκρασία

Λογισμικά μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν στο χρήστη να αποδώσει την ενδοτράχυνση, είτε σημείο-σημείο, είτε κάνοντας χρήση του νόμου των Ramberg - Osgood:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \beta \frac{\sigma_y}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (12.72)$$

όπου, β , είναι μια σταθερά πειραματικά προσδιορισμένη^[59],

n , είναι εκθέτης σκλήρυνσης και

E , το μέτρο ελαστικότητας.

Το άλλο μοντέλο ενδοτράχυνσης είναι η κινηματική ενδοτράχυνση, που αντιστοιχεί σε μία μετατροπή της ελαστικής περιοχής στο διάστημα των τάσεων (Εικ. 12.14β). Τα μοντέλα κινηματικής ενδοτράχυνσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποδώσουν το φαινόμενο Bauschinger (ανισοτροπική συμπεριφορά κάτω από εφελκυστικά - θλιπτικά φορτία) και συνιστώνται όταν υπάρχουν κυκλικές φορτίσεις.

Ο βαθμός ενδοτράχυνσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία τάση διαρροής, ενώ, η κλίση της καμπύλης (Εικ. 12.14γ) εξαρτάται από τις πλαστικές παραμορφώσεις (μηδενικές για πλήρη πλαστικότητα). Κατά την προσομοίωση της συγκόλλησης είναι σήνηθες να χρησιμοποιείται το κριτήριο Von Mises σε συνδυασμό με το μοντέλο Prager, και το κριτήριο Von Mises με ισοτροπική ενδοτράχυνση εξαρτώμενη από τις πλαστικές παραμορφώσεις και τη θερμοκρασία.

Σε ότι αφορά το μοντέλο Prager, αυτό ορίζει:

$$Y(\sigma_{ij}, \xi_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij} - \xi_{ij})(\sigma_{ij} - \xi_{ij})} - \sigma_y \quad (12.73)$$

Όπου, $\xi_{ij} = \frac{2}{3} c(T) \epsilon_{ij}^p$ είναι μια παράμετρος κινηματικής ενδοτράχυνσης. Το βαθμωτό c αντιπροσωπεύει την κλίση της ενδοτράχυνσης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4, ενώ το μοντέλο ισοτροπικής ενδοτράχυνσης δίνεται από την Εξίσωση 5.28.

Κεφάλαιο 13°

Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης μέσω λογισμικών που πραγματοποιούν ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

13.1 Γενικά

Η προσομοίωση της συγκόλλησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε από αρκετούς ερευνητές^{[11],[14],[17],[20],[30]-[40],[46],[56],[58],[63]-[66],[68]-83]}, για να προβλέψουν θερμοκρασιακά πεδία, παραμένουσες τάσεις και στρεβλώσεις - παραμορφώσεις σε διάφορους τύπους συγκόλλησης με διάφορες τεχνικές και διαφορετικά υλικά. Η πρόβλεψη είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω των σύνθετων μεταβολών της θερμοκρασίας, της θερμικής συστολής και διαστολής και μεταβολής των ιδιοτήτων του υλικού με το χρόνο και το χώρο. Επιπλέον, στη μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης συμπεριλαμβάνεται και η εκτίμηση των ειδικών επιδράσεων του κινούμενου τόξου συγκόλλησης, της απόθεσης του υλικού και των μεταλλουργικών μετασχηματισμών. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν τον εμπορικά διαθέσιμο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, εμπλουτισμένο με υπορουτίνες χρηστών, για να μοντελοποιήσουν τη διαδικασία της συγκόλλησης με μεγάλη επιτυχία^{[31],[64],[65],[73],[79],[80]}. Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ADINAT χρησιμοποιήθηκε από τους Karlsson και Josefson^[66], ενώ άλλοι ερευνητές^{[74]-[76],[96]} χρησιμοποίησαν το SYSWELD για την υλοποίηση προσομοιώσεων συγκόλλησης.

13.2 Θερμική, μηχανική και μεταλλουργική ανάλυση

Για την απλοποίηση της προσομοίωσης της συγκόλλησης, πολλά από τα διαθέσιμα εμπορικά πακέτα λογισμικού, για λόγους μεγαλύτερης υπολογιστικής αποτελεσματικότητας, εκτελούν τη θερμική και τη μηχανική ανάλυση μεμονωμένα. Φυσικά, θεωρείται ότι μεταβολές στη μηχανική κατάσταση δεν προκαλούν μεταβολές στη θερμική. Δηλαδή οι μεταβολές στις τάσεις ή τις παραμορφώσεις δεν προκαλούν αλλαγές στη θερμοκρασία. Ωστόσο, αλλαγές στη θερμοκρασία προκαλούν μεταβολές στη μηχανική κατάσταση. Κατά τη μοντελοποίηση, πρώτα ολοκληρώνεται ο υπολογισμός της θερμοκρασιακής ιστορίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και της επακόλουθης απόψυξης και μετά το προκύπτον θερμοκρασιακό πεδίο εφαρμόζεται στο μηχανικό μοντέλο για την εκτέλεση της ανάλυσης των παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων. Οι περισσότεροι ερευνητές αναφέρουν τη χρήση αυτής της μονοσήμαντης προσέγγισης^{[11],[31],[64],[66],[68],[69],[74]-[81]}. Οι μονοσήμαντες θερμικές και μηχανικές αναλύσεις είναι έγκυρες όταν οι στρεβλώσεις των συγκολλημένων τμημάτων είναι πολύ μικρές, διασφαλίζοντας ότι οι παραμορφώσεις δεν μεταβάλουν τη θέση του ηλεκτροδίου συγκόλλησης και επομένως και τη

θέση όπου εφαρμόζεται στο μοντέλο η πηγή θερμότητας^[31]. Οι Oddy^{[69],[78]} με άλλους ερευνητές, αναφέρουν ότι η θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τη θερμότητα που εφαρμόζεται από το τόξο συγκόλλησης. Επομένως, η θερμική ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί ξεχωριστά από τη μηχανική.

Ένα σημαντικό φαινόμενο κατά τις συγκολλήσεις, το οποίο κερδίζει ολοένα και περισσότερο την προσοχή των ερευνητών που εκτελούν προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία, είναι οι μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί και οι μετασχηματισμοί φάσεων^{[31],[66],[69],[72],[74]-[76],[78],[81],[82]} που συμβαίνουν στο υλικό κατά τη διαδικασία. Ο στόχος της μοντελοποίησης των μεταλλουργικών μετασχηματισμών, γενικά, είναι ο καθορισμός του ποσοστού των φάσεων που μορφοποιούνται τόσο στη ΘΕΖ όσο και στο μέταλλο συγκόλλησης. Η επίδραση της μεταλλουργικής ιστορίας του υλικού είναι εμφανής στους παρακάτω παράγοντες^[74]:

1) Οι μηχανικές ιδιότητες της ΘΕΖ απορρέουν από τις μηχανικές ιδιότητες των ξεχωριστών φάσεων.

2) Στη μορφοποίηση της τελικής κατανομής των παραμενουσών τάσεων επιδρούν φαινόμενα συστολής και διαστολής των διαφορετικών φάσεων που δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα των διαφορετικών, εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία, ιδιοτήτων αυτών κατά τη μορφοποίηση ή/και το μετασχηματισμό τους. Οι θερμικές παραμορφώσεις υπολογίζονται από τους, εξαρτώμενους από τη θερμοκρασία και τις φάσεις, συντελεστές θερμικής διαστολής.

3) Κατά τη διάρκεια των μεταλλουργικών μετασχηματισμών το επίπεδο των πλαστικών παραμορφώσεων μειώνεται λόγω της μετακίνησης των διαταραχών. Κάθε φάση του υλικού έχει διαφορετικό βαθμό σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση.

4) Η επίδραση στην τελική μορφοποίηση των εσωτερικών τάσεων της πλαστικότητας λόγω μετασχηματισμού των φάσεων (transformation plasticity).

Σε ότι αφορά στον τελευταίο παράγοντα που αναφέρθηκε, σημειώνεται ότι κατά τον μετασχηματισμό φάσεων συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση η οποία είναι μη αναστρέψιμη. Ο βασικός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος γι' αυτό, είναι η μεταβολή του όγκου που λαμβάνει χώρα κατά το μετασχηματισμό των φάσεων. Όταν ο όγκος ενός υλικού μεταβάλλεται, προάγονται τάσεις μέσα στο μετασχηματισμένο όγκο και στο περιβάλλον μη μετασχηματισμένο υλικό. Οι τάσεις είναι δυνατό να έχουν τέτοιο μέγεθος ώστε να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση στις ασθενέστερες φάσεις^[69]. Οι τάσεις αυτές ονομάστηκαν μικροσκοπικές τάσεις^{[83],[84]} διότι το τασικό πεδίο μεταβάλλεται σε ένα διάστημα μικρότερο από το μέγεθος των κόκκων. Αν δεν υπάρχουν μακροσκοπικές ή εξωτερικές τάσεις, οι πλαστικές παραμορφώσεις προσανατολίζονται τυχαία και παρατηρείται μόνο μεταβολή του όγκου. Η αλληλεπίδραση των μακροσκοπικών τάσεων με τις

μικροσκοπικές προσανατολίζει τις πλαστικές παραμορφώσεις έτσι ώστε η παραμόρφωση να συμβαίνει πέρα από τον όγκο του υλικού επιφέροντας μόνιμη εσωτερική πλαστική παραμόρφωση λόγω μετασχηματισμού^[69]. Αυτό το φαινόμενο καλείται μηχανισμός των Greenwood – Johnson^[85].

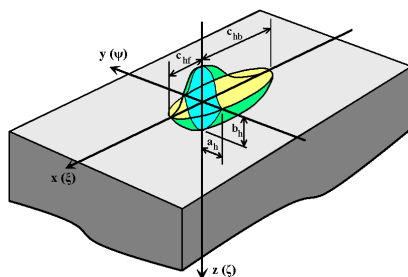
Οι Oddy και συνεργάτες^[69], αναφέρουν ότι οι μη αναστρέψιμες πλαστικές παραμορφώσεις, που συμβαίνουν κατά το μετασχηματισμό φάσεων, μπορεί να επηρεάσουν το μέγεθος και το πρόσημο των εκτιμώμενων παραμενουσών τάσεων στη ζώνη διάχυσης και στη ΘΕΖ. Οι Dubois κ.α. ερευνητές^[76], υπολόγισαν τις παραμένουσες τάσεις σε συγκόλληση χάλυβα με και χωρίς την επίδραση της πλαστικότητας λόγω μετασχηματισμού και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την επίδραση (έως 400MPa) της πλαστικότητας λόγω μετασχηματισμού, στις παραμένουσες τάσεις. Είναι επομένως σημαντικό να περιλαμβάνεται αυτό το φαινόμενο σε υπολογισμούς των παραμενουσών τάσεων. Οι L. Karlsson κ.α.^[81] και οι R.I. Karlsson και B.L. Josefson^[66], υπολόγισαν τις μεταβολές του όγκου, λόγω του μετασχηματισμού φάσεων, αλλά δεν έλαβαν υπόψη την επίδραση της πλαστικότητας λόγω μετασχηματισμού, λόγω περιορισμένων πειραματικών δεδομένων. Οι McDill κ.α.^[72], εξέτασαν το ρόλο του μετασχηματισμού φάσεων στην ανάπτυξη των παραμενουσών τάσεων και συμπέραναν ότι το αποτέλεσμα είναι σημαντικό, ιδιαίτερα στην περιοχή της ΘΕΖ. Οι προσομοιώσεις συγκολλήσεων, που αφορούν σε υλικά που υπόκεινται σε μετασχηματισμούς φάσεων, πρέπει να περιλαμβάνουν και την επίδραση της πλαστικότητας λόγω μετασχηματισμού^[69].

Ένα άλλο αποτέλεσμα του μετασχηματισμού φάσεων είναι η απελευθέρωση ή απορρόφηση ενέργειας κατά τη στερεοποίηση ή την τήξη, γνωστή ως ενέργεια λανθάνουσας θερμότητας. Η λανθάνουσα θερμότητα που συνδέεται με το μετασχηματισμό φάσης στερεού – στερεού είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη του μετασχηματισμού φάσης στερεού – υγρού^[31]. Οι Dubois κ.α.^[76], στη μελέτη τους για συγκόλληση χάλυβα συμπεριέλαβαν και τις λανθάνουσες θερμότητες για όλους τους μετασχηματισμούς: διάχυσης, στερεοποίησης, ωστενιτικό, φερριτικό, μπαινιτικό και μαρτενιτικό. Επίσης, έλαβαν υπόψη και την εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας και χωρητικότητας από τους μετασχηματισμούς. Οι Junek κ.α.^[74], τροποποίησαν την εξίσωση της θερμικής αγωγιμότητας με τον εμπορικά διαθέσιμο κώδικα SYSWELD συμπεριλαμβάνοντας τόσο τη λανθάνουσα θερμότητα που συνδέεται με το μετασχηματισμό όσο και τη λανθάνουσα θερμότητα κατά τη μεταβολή της κατάστασης. Οι Vincent κ.α.^[75], χρησιμοποίησαν τους εμπορικά διαθέσιμους κώδικες SYSWELD και CODE_ASTER για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων σε χάλυβα που υπόκειται σε μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς. Στο SYSWELD συνδυάζονται οι μεταλλουργικοί και θερμικοί υπολογισμοί ώστε για κάθε θερμοκρασία να υπολογίζονται οι αναλογίες κάθε φάσης. Τα θερμικά χαρακτηριστικά καθορίζονται χρησιμοποιώντας γραμμικό

κανόνα μιγμάτων για την ποσότητα της κάθε φάσης. Η ενθαλπία της κάθε φάσης περιλαμβάνει τη λανθάνουσα θερμότητα που συνδέεται με το μετασχηματισμό και την ενέργεια της αδράνειας. Στο CODE_ASTER οι μεταλλουργικοί και θερμικοί υπολογισμοί αποσυνδέονται και οι αναλογίες κάθε φάσης υπολογίζονται μετά τη θερμική ανάλυση. Η ενθαλπία και η συναγωγή θεωρούνται μεμονωμένες ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του μεταλλουργικού μετασχηματισμού στη θέρμανση και την ψύξη της ΘΕΖ. Οι λανθάνουσες θερμότητες που συνδέονται με το μετασχηματισμό συμπεριλαμβάνονται μέσω της χρήσης διαφορετικών καμπυλών ενθαλπίας για τη θέρμανση και την ψύξη. Επιπλέον, κάθε κώδικας χρησιμοποίησε δομικές εξισώσεις για να υπολογιστεί η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση λόγω μετασχηματισμού φάσεων^[75].

13.3 Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης

Για τη μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας, αρκετοί ερευνητές^{[11],[70],[80]}, υλοποίησαν την τριών διαστάσεων διπλή έλλειψη που αρχικά πρότεινε ο Goldak^[20] και στην συνέχεια εξέλιξαν άλλοι ερευνητές^{[15],[16]} (Εικ. 13.1). Η διπλή ελλειψοειδής γεωμετρία χρησιμοποιείται ώστε το σχήμα και το μέγεθος της πηγής θερμότητας να μπορεί να μεταβάλλεται εύκολα, αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κι έτσι να είναι δυνατή η μοντελοποίηση τόσο των διαδικασιών συγκόλλησης τόξου με ρηχή διείδυση, όσο και αυτών με βαθύτερη διείδυση, όπως είναι οι συγκολλήσεις με δέσμη λέιζερ ή δέσμες ηλεκτρονίων. Η κατανομή της ισχύος ή της ροής θερμότητας είναι γενικής μορφής Gauss κατά μήκος των διαμηκών αξόνων. Το μπροστινό μισό της πηγής είναι το ένα τεταρτημόριο μιας ελλειψοειδούς πηγής ενώ το πίσω μισό είναι το τεταρτημόριο μιας άλλης ελλειψοειδούς πηγής. Τέσσερα χαρακτηριστικά μήκη πρέπει να καθοριστούν, τα οποία από φυσικής άποψης αντιστοιχούν στις ακτινικές διαστάσεις της ζώνης τήξης. Αν η κάθετη τομή της ζώνης τήξης είναι γνωστή από τα πειράματα, τα δεδομένα της τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστούν οι διαστάσεις της πηγής θερμότητας. Αν δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα, οι Goldak κ.α.^{[15],[16],[20]}, προτείνουν σαν λογική εκτίμηση τη λήψη της διάστασης μπροστά από την πηγή ίση με το μισό του πλάτους συγκόλλησης και την απόσταση πίσω από την πηγή ίση με το διπλάσιο του πλάτους συγκόλλησης.



Εικόνα 13.1 Μοντέλο διπλής ελλειψοειδούς πηγής θερμότητας του Goldak [19]

Οι Chao και Qi^[68], καθώς και οι Dong κ.α.^[79], συμφωνούν με τη χρήση της κατανομής Gauss για τη μοντελοποίηση της συγκόλλησης GMAW αλλά δεν συμπεριέλαβαν περισσότερες λεπτομέρειες για τη γεωμετρία της πηγής. Οι Hong κ.α.^[73] αναφέρουν ότι η ισοδύναμη εισερχόμενη θερμότητα, για την προσομοίωση των θερμικών επιδράσεων του τόξου, μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός των συνιστωσών της ροής θερμότητας, του σώματος και της επιφάνειας. Η επιφανειακή ροή θερμότητας είναι κατανομής Gauss ενώ η ροή θερμότητας του σώματος, εισάγεται ως παράγωγος της θερμότητας ως προς τη μονάδα όγκου και θεωρείται σταθερά. Για τη συγκόλληση TIG, οι Preston κ.α.^[64], μοντελοποίησαν το τόξο ως πηγή θερμότητας κινούμενου σώματος και κατέληξαν ότι δεν απαιτείται πολύπλοκο μοντέλο πηγής θερμότητας, στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας τους. Οι Brown και Song^[31] επίσης μοντελοποίησαν τη μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης σαν επιφανειακή ροή θερμότητας με κατανομή Gauss. Οι Karlsson και Josefson^[66], προσομοίωσαν τη θερμότητα σαν κομβική ροή θερμότητας που αντιστοιχεί σε έναν όγκο εσωτερικής θερμότητας ή ισχύος. Ο όγκος είχε κάθετη τομή και μήκος αντίστοιχο της θεωρούμενης ζώνης διάχυσης που δημιουργείται από τη συγκόλληση MIG. Επιπλέον, το 60% της θερμότητας εφαρμόστηκε στα εξωτερικά στοιχεία της συγκόλλησης ενώ το 40% στα εσωτερικά στοιχεία. Στην ισχύ δόθηκε μια βαθμωτή μεταβολή έτσι ώστε η ισχύς να αυξάνει γραμμικά κατά την αξονική διεύθυνση και ακτινικά προς τα μέσα, εξασφαλίζοντας ότι και τα πιο εξωτερικά σημεία της ζώνης διάχυσης φτάνουν στο σημείο τήξης.

13.4 Απόθεση του συγκολλημένου μετάλλου

Η απόθεση υλικού είναι ένα άλλο σημαντικό κομμάτι που αφορά στη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία της διαδικασίας της συγκόλλησης. Τυπικά, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της συγκόλλησης περιλαμβάνει τις δύο πλάκες και όλες τις στρώσεις της συγκόλλησης σε ένα πλέγμα. Η συγκόλληση της κάθε στρώσης μοντελοποιείται σε ξεχωριστά βήματα ή υπο - αναλύσεις. Για την προσομοίωση της πρώτης στρώσης, μιας πολλαπλών στρώσεων συγκόλλησης, οι επόμενες στρώσεις απομακρύνονται χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά διαθέσιμα από τον κώδικα που εκάστοτε χρησιμοποιείται. Οι Hong κ.α.^[73], εφάρμοσαν την τεχνική «αναγέννησης» στοιχείων για να συμπεριλάβουν τις επιδράσεις απόθεσης των πολλαπλών στρώσεων. Με αυτήν την τεχνική τα στοιχεία ομαδοποιούνται, αναπαριστώντας μια στρώση, μετά απομακρύνονται και επανενεργοποιούνται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή μοντελοποιώντας τη δεδομένη συχνότητα των στρώσεων της συγκόλλησης. Καθώς ενεργοποιείται μια ομάδα στοιχείων, όλοι οι κόμβοι που συνδέονται με αυτά τα στοιχεία καθορίζονται να έχουν την ίδια αρχική θερμοκρασία. Τυπικά για τη διαδικασία συγκόλλησης GMAW το υπό συγκόλληση μέταλλο θεωρείται ότι εναποτίθεται στη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου προσθήκης. Οι Michaleris κ.α.^[70], εφάρμοσαν

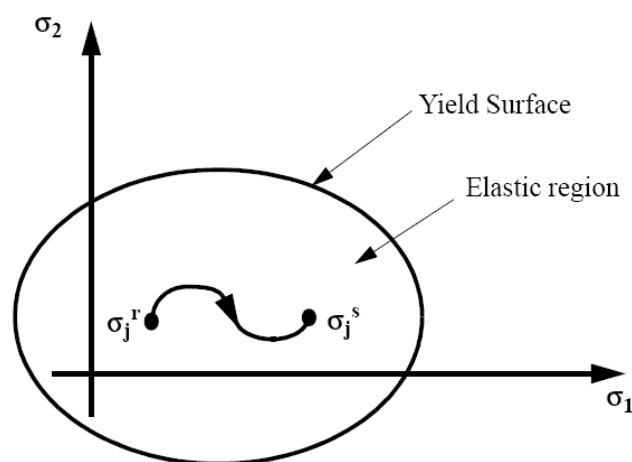
μια παρόμοια μέθοδο αλλά επιπλέον καθόρισαν ότι είναι απαραίτητο να επανενεργοποιούνται τα στοιχεία συγκόλλησης πριν την ανάλυση του αντίστοιχου βήματος. Για την αποφυγή της δημιουργίας ψευδούς πλαστικής παραμόρφωσης προσδιορίστηκαν χαμηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας και ορίου διαρροής για τα επανενεργοποιημένα στοιχεία. Καθώς η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται, ως δεδομένα χρησιμοποιούνται στοιχεία από το υλικό προσθήκης. Επίσης, αν οι μέγιστες θερμοκρασίες υπερβούν το σημείο τήξης του υλικού, όλες οι παραμορφώσεις (συμπεριλαμβανομένων και των πλαστικών παραμορφώσεων) εξαλείφονται ώστε να μοντελοποιηθεί η απόψυξη. Η βαφή σε αυτή την περίπτωση αντιστοιχεί στη θερμική κατεργασία του μετάλλου που έχει ήδη υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, προκαλώντας ανακρυστάλλωση και μείωση της σκληρότητας.

Οι Brown και Song^[31] επίσης, υλοποίησαν την «αναγέννηση» στοιχείων επανενεργοποιώντας στοιχεία τα οποία είχαν απενεργοποιηθεί στην αρχή της μηχανικής ανάλυσης. Η διαδικασία ενεργοποίησης στη μηχανική ανάλυση ή ανάλυση τάσεων/παραμορφώσεων παραμορφώνει το απενεργοποιημένο στοιχείο από την αρχική του θέση κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατό με την παραμένουσα κατασκευή και βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας δυνάμεων. Αυτή η διαδικασία παράγει ένα πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων στο ενεργοποιημένο στοιχείο, αλλά η υψηλή θερμοκρασία του στοιχείου μειώνει την επίδραση των τάσεων στην κατασκευή^[31]. Οι Karlsson και Josefson^[66], υλοποίησαν τη διαδικασία «αναγέννησης» στοιχείου στον εμπορικά διαθέσιμο κώδικα ADINAT έτσι ώστε να διατηρούνται τα στοιχεία συγκόλλησης μπροστά από το τόξο ανενεργά, μέχρι το μπροστινό τμήμα της πηγής θερμότητας να εισέλθει στην περιοχή του στοιχείου κατά τη θερμική ανάλυση. Στη μηχανική ανάλυση τα στοιχεία διατηρούνται ανενεργά μέχρι το μπροστινό τμήμα της πηγής θερμότητας να περάσει από τα ανενεργά στοιχεία για απόσταση όσο ένα μήκος στοιχείου. Οι Feng κ.α.^[80], χρησιμοποίησαν μια ειδική υπορουτίνα ιδιοτήτων υλικού στον κώδικα ABAQUS όπου τα στοιχεία που αντιπροσωπεύουν το μέταλλο συγκόλλησης προσδιορίζουν την ακαμψία του αέρα κατά τη θερμική ανάλυση. Τα στοιχεία απόθεσης της συγκόλλησης υπάρχουν κατά τη θερμική ανάλυση, αλλά η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική χωρητικότητα αυτών των στοιχείων λαμβάνουν μικρές τιμές αναπαριστώντας τον αέρα, ενώ όταν το στοιχείο εισέρχεται στο κινούμενο λουτρό συγκόλλησης, λαμβάνουν τις τιμές των ιδιοτήτων του μετάλλου. Για τη μηχανική ανάλυση, μια παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε όπου τα υπό συγκόλληση στοιχεία πρώτα προσδιορίζουν τεχνητές και πολύ χαμηλές ιδιότητες. Καθώς τα στοιχεία στερεοποιούνται από το λουτρό συγκόλλησης, επαναπροσδιορίζονται οι πραγματικές ιδιότητες του υλικού.

13.5 Μοντελοποίηση του υλικού

Στις μοντελοποιήσεις συγκολλήσεων έχουν υλοποιηθεί διάφοροι νόμοι των υλικών. Οι διαθέσιμοι νόμοι των υλικών τυπικά περιλαμβάνουν ένα ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο ή μοντέλο πλαστικότητας το οποίο λαμβάνει υπόψη του τη σκλήρυνση λόγω παραμορφώσεων, είτε κινηματική είτε ιστροπική^[61]. Αναφέρεται^[61], ότι ο Callister προσδιόρισε τη σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης ως την αύξηση της σκληρότητας ή του ορίου διαρροής ενός όλκιμου μετάλλου καθώς παραμορφώνεται πλαστικά. Πριν γίνει συζήτηση για την κινηματική ή ιστροπική σκλήρυνση είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η επιφάνεια διαρροής. Για ένα οποιοδήποτε στοιχείο υλικού που υπόκειται σε μια δεδομένη τασική κατάσταση (ακολουθούμενη μια τασική ιστορία) υπάρχει μια περιοχή τάσεων τέτοια ώστε η συμπεριφορά να είναι ελαστική και ανεξάρτητη της διαδρομής αν το σημείο εφαρμογής της τάσης βρίσκεται μέσα σε αυτήν την περιοχή. Η ελαστική περιοχή οριοθετείται από μια επιφάνεια διαρροής στην περιοχή των τάσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.2 με πιο συνηθισμένη την επιφάνεια διαρροής του Von Mises.

Τα σημεία όπου αυτή η επιφάνεια αλληλεπιδρά με τον άξονα σ_1 , για παράδειγμα, δίνουν την τάση διαρροής για αυτήν την περίπτωση όταν σ_1 είναι η μοναδική, μη μηδενική συνιστώσα της τάσης. Η ιστροπική σκλήρυνση περιγράφει τη συμπεριφορά των διαδοχικών επιφανειών διαρροής που συνδέονται με την εφαρμογή μονοτονικής εφελκυστικής φόρτισης, όπου η επιφάνεια διαρροής διατηρεί το ίδιο σχήμα με την αρχική επιφάνεια διαρροής αλλά μερικώς αυξάνει το μέγεθός της. Η κινηματική σκλήρυνση περιγράφει τη συμπεριφορά διαδοχικών επιφανειών διαρροής που συνδέονται με την εφαρμογή μονοτονικής διατμητικής φόρτισης, κατά την οποία διατηρούνται σταθερά το σχήμα και το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής, αλλά μετατοπίζεται ως προς τον άξονα διάτμησης χωρίς περιστροφή.



Εικόνα 13.2 Επιφάνεια διαρροής Von Mises

Οι Karlson και Josefson^[66], υλοποίησαν ένα μοντέλο θερμο - ελαστοπλαστικού υλικού με το κριτήριο Von Mises συνδυάζοντας το με νόμους ροής. Δεν ελήφθησαν υπόψη κινηματικές μη γραμμικότητες, ή πολύ μικρές παραμορφώσεις, ενώ θεωρήθηκαν μετατοπίσεις. Σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ελαστικά - τέλεια πλαστικά, π.χ. η ανάλυση δεν θεωρεί σαφώς τη σκλήρυνση. Οι συγγραφείς αναγνώρισαν ότι από φυσικής απόψεως, δεδομένου του θερμικού φορτίου και των μεγάλων παραμορφώσεων που ανέπτυξαν, ο κανόνας της κινηματικής σκλήρυνσης θα μπορούσε να είναι πιο κατάλληλος. Υποστηρίζοντας το ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο, οι Karlson και Josefson, διαφώνησαν με την παραδοχή ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις που συγκεντρώνονται πριν τον τελικό μετασχηματισμό φάσεων στερεής κατάστασης, ανακουφίζονται σε μεγάλη έκταση κατά το μετασχηματισμό. Επιπλέον, στο μοντέλο του υλικού συμπεριλαμβάνεται η αξιωσημείωτη μεταβολή του όγκου που συμβαίνει κατά το μετασχηματισμό φάσεων. Επίσης, όλες οι μηχανικές ιδιότητες θεωρήθηκαν ανεξάρτητες της θερμοκρασίας.

Η κινηματική σκλήρυνση εξυπηρετεί σωστά τη μοντελοποίηση συγκολλήσεων πολλαπλών στρώσεων λόγω της αντιστροφής της πλαστικότητας στην περιοχή όπου οι πολλαπλές στρώσεις συγκόλλησης εισάγουν επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους^[79]. Οι Dong κ.α. χρησιμοποίησαν τον κανόνα κινηματικής σκλήρυνσης του Von Mises συνδυασμένο με κανόνες ροής του υλικού. Οι Chao και Qi^[68], υλοποίησαν ένα μοντέλο πλαστικότητας ανεξάρτητο του ρυθμού κινηματικής σκλήρυνσης για τη μοντελοποίηση της αναστρέψιμης πλαστικότητας που συνδυάζεται με την αποφόρτιση λόγω της δεύτερης ή επόμενης στρώσης. Επιπλέον, χρησιμοποίησαν το κριτήριο διαρροής Von Mises συνδυασμένο με κανόνες ροής για τον προσδιορισμό της έναρξης της διαρροής και των διακριτών πλαστικών παραμορφώσεων. Οι Feng κ.α.^[80], θεώρησαν τη μηχανική δομική συμπεριφορά ελαστο - πλαστική, μέσω του κριτηρίου διαρροής Von Mises συνδυασμένο με κανόνες ροής.

Η ενδοτράχυνση, στην περίπτωση ύπαρξης μιας δομικής διαταραχής στο υλικό, μπορεί να επηρεαστεί από την κίνηση, σε ατομικό επίπεδο, κατά τη διάρκεια μεταλλουργικού μετασχηματισμού ή μετασχηματισμού φάσεων. Η καινούργια φάση έχει μερική μνήμη ή καθόλου μνήμη της προηγούμενης σκλήρυνσης. Για την περιγραφή της ανάκτησης της σκληρότητας λόγω μεταλλουργικών αλλαγών, παράμετροι που έχουν σχέση με την ισοτροπική σκλήρυνση καθορίζονται για κάθε φάση. Η σκλήρυνση λόγω πλαστικών παραμορφώσεων και η ανάκτηση της σκληρότητας λόγω μεταλλουργικών μετασχηματισμών περιλαμβάνονται σε εξελιγμένους νόμους^[75]. Οι Michaleris κ.α.^[70], αξιοποίησαν την πλαστικότητα ισοτροπικής σκλήρυνσης αλλά αναφέρουν ότι αυτή η παραδοχή, εξετάζοντας μοντέλο δύο διαστάσεων, μπορεί να είναι ανεπαρκής και ότι το μοντέλο μπορεί να αποβεί εξαιρετικά δύσκαμπτο κατά τη δεύτερη ή επόμενη

στρώση συγκόλλησης. Οι Hong κ.α.^[73], χρησιμοποίησαν την ιστροπική ενδοτράχυνση για την ανάλυση συγκόλλησης πολλαπλών στρώσεων χάλυβα. Οι Preston κ.α.^[64] για το μηχανικό μοντέλο χρησιμοποίησαν την επιφάνεια διαρροής του Von Mises με ιστροπική σκλήρυνση. Οι Brown και Song^[31] επίσης, χρησιμοποίησαν μοντέλο θερμο - ελαστο - πλαστικού υλικού με ιστροπική ενδοτράχυνση και εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία ιδιότητες υλικού.

13.6 Συνοριακές συνθήκες απώλειας θερμότητας, ακτινοβολίας και συναγωγής

Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας μέσω των εξωτερικών ορίων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, συνήθως χρησιμοποιούνται επιφανειακά ή επιδερμικά στοιχεία^{[66],[69]}. Μέσω της χρήσης αυτών των στοιχείων μπορούν να μοντελοποιηθούν η θερμότητα λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Οι Michaleris κ.α.^[70], χρησιμοποίησαν συνοριακές συνθήκες ακτινοβολίας και συναγωγής σε όλες τις ελεύθερες επιφάνειες στη θερμική ανάλυση, μέσω ενός συντελεστή ελεύθερης συναγωγής, ανεξάρτητου από τη θερμοκρασία, μοντελοποιώντας έτσι και τις δύο μορφές μεταφοράς θερμότητας. Οι Hong κ.α.^[73], χρησιμοποίησαν μια παρόμοια προσέγγιση ορίζοντας για όλες τις επιφάνειες έναν μόνο συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας. Οι Brown και Song^[31], ενσωμάτωσαν τη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής μέσω της χρήσης ενός συντελεστή ο οποίος θεωρήθηκε ότι εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από τον προσανατολισμό των ορίων. Η ακτινοβολία μοντελοποιήθηκε με την καθιερωμένη σχέση του Boltzman και θεωρήθηκε ότι άγεται από τις ελεύθερες επιφάνειες προς τον αέρα μόνο. Η επίδραση της ακτινοβολίας, τυπικά, είναι μικρότερη από την επίδραση της συναγωγής, εκτός από την περίπτωση όπου η θερμοκρασία πλησιάζει αυτήν της τήξης. Οι Preston κ.α.^[64], χρησιμοποίησαν μια διαφορετική προσέγγιση, θεωρώντας ότι η απώλεια θερμότητας στην ατμόσφαιρα είναι αμελητέες, σε σχέση με τη συναγωγή στην επικαλύπτρα όταν αυτή χρησιμοποιείται, όπως αναφέρουν άλλοι ερευνητές. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι αμελητέες διότι αυτές παίρνουν σημαντικές τιμές σε υψηλές θερμοκρασίες κοντά στο τόξο συγκόλλησης και μπορούν να ενσωματωθούν στον παράγοντα δραστηκότητας του τόξου.

13.7 Ενεργειακές και δομικές εξισώσεις στην προσομοίωση συγκολλήσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

13.7.1 Ροή θερμότητας στη συγκόλληση

Η μεταλλουργία της συγκόλλησης περιλαμβάνει την εφαρμογή των μεταλλουργικών κανόνων για την αποτίμηση των χημικών και φυσικών αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά τη συγκόλληση. Στη συγκόλληση οι αντιδράσεις υποχρεώνονται να συμβούν μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα σε έναν μικρό όγκο υλικού όπου οι θερμικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από^[21]:

- υψηλές θερμοκρασίες
- υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές
- απότομες τοπικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας

13.7.2 Διατήρηση της ενέργειας

Για την εκτέλεση μια ποσοτικής ανάλυσης των μεταλλουργικών αντιδράσεων στη συγκόλληση, απαιτείται λεπτομερής θερμική ιστορία της συγκόλλησης. Ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας, ή ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής, είναι η φυσική αρχή που χρησιμοποιείται για την μαθηματική περιγραφή της θερμικής ιστορίας της συγκόλλησης. Έστω ένα κλειστό, συνεχόμενο σύστημα σωματιδίων που ανταλλάσσει ύλη με το περιβάλλον, δηλαδή δεν υφίσταται μεταφορά μάζας δια μέσου της επιφάνειας των ορίων του συστήματος και η επιφάνεια ορίων του συστήματος κινείται με τη μεταφορά ύλης. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Lagrange, το σημείο αναφοράς του συστήματος καθορίζεται για τη χρονική στιγμή $t = 0$. Ο όγκος ορίζεται ως V_0 και περικλείεται σε επιφάνεια S_0 . Ένα σωματίδιο του συστήματος αναφοράς, εντοπίζεται στο ορθογώνιο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων με συντεταγμένες X_L , όπου χρησιμοποιείται το σύνηθες σύστημα δεικτών, έτσι ώστε το I να έχει εύρος από ένα έως τρία. Σε μία χρονική στιγμή $t > 0$ το σύστημα καταλαμβάνει όγκο V με συνοριακή επιφάνεια S και θέση του σωματιδίου x_i στο ίδιο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ολικής ενέργειας στο σύστημα, ισοδύναμης με το άθροισμα της εισερχόμενης ισχύος και του ρυθμού της εσωτερικής ενέργειας. Η ολική ενέργεια του συστήματος θεωρείται ότι είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας με την εσωτερική ενέργεια. Η εισερχόμενη ισχύς είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι εξωτερικές επιφανειακές δυνάμεις, ανά μονάδα επιφάνειας και οι εσωτερικές δυνάμεις, ανά μονάδα όγκου, επηρεάζουν τη μάζα του συστήματος. Ο ρυθμός της εισερχόμενης θερμότητας αποτελείται από τη συναγωγή μέσω της επιφάνειας S και τη δύναμη, ανά μονάδα μάζας, μια κατανεμημένης εσωτερικής πηγής θερμότητας. Όπως έδειξε ο Malvern^[88], η ενέργεια σε κάθε σημείο του συνεχούς και ομογενούς μέσου μειώνεται στην:

$$\rho \frac{du}{dt} = \sigma_{ij} D_{ij} + \rho r - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (13.1)$$

Όπου, ρ είναι η πυκνότητα του σωματιδίου τη χρονική στιγμή t , ρu είναι η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα όγκου, σ_{ij} είναι οι συνιστώσες της τάσης Cauchy, D_{ij} είναι οι συνιστώσες του τανυστή του ρυθμού εφελκυστικής παραμόρφωσης, ρr είναι η εσωτερική παροχή θερμότητας ανά μονάδα όγκου και q_{ij} είναι οι συνιστώσες του διανύσματος της ροής θερμότητας.

Η Εξίσωση 13.1 για το σημείο αναφοράς γράφεται ως εξής:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = S_{IJ} \frac{\partial E_{IJ}}{\partial t} + \rho_0 r - \frac{\partial q_j}{\partial X_j}, \quad (13.2)$$

όπου, ρ_0 είναι η πυκνότητα μάζας του σωματιδίου στο σημείο αναφοράς, S_{IJ} είναι οι συνιστώσες του δευτέρου τανυστή τάσεων Piola - Kirchhoff, E_{IJ} είναι οι συνιστώσες της παραμόρφωσης Lagrange, $\rho_0 r$ είναι η κατανεμημένη εσωτερική παροχή θερμότητας ανά μονάδα όγκου στο σημείο αναφοράς, και οι συνιστώσες του διανύσματος ροής θερμότητας για το σημείο αναφοράς, που ορίζονται από τη σχέση:

$$q_j = (\rho_0 / \rho) \frac{\partial X_j}{\partial x_k} q_k \quad (13.3)$$

Για απειροελάχιστους ρυθμούς μετατόπισης, ή απειροελάχιστες παραμορφώσεις και περιστροφές, οι απειροελάχιστες παραμορφώσεις ϵ_{IJ} είναι ισοδύναμες με τις παραμορφώσεις Lagrange, π.χ. $\epsilon_{IJ} \approx E_{IJ}$. Επίσης $\sigma_{ij} \approx S_{IJ}$, $\rho_0 \approx \rho$, $q_j \approx q_j$, και δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ της κατάστασης αναφοράς και της κατάστασης παραμόρφωσης. Επομένως για τους απειροελάχιστους ρυθμούς μετατόπισης, η Εξίσωση 13.2 ανάγεται στην:

$$\rho \frac{du}{dt} = \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} + Q - \frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (13.4)$$

όπου, $Q = \rho_0 r$.

Η Εξίσωση 13.4 αναπαριστά την εξίσωση ενέργειας αμοιβαίας σύζευξης. Ο όρος $\sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t}$ ονομάζεται δύναμη τάσης (ανά μονάδα όγκου) και αναπαριστά το μέρος της εξωτερικής εισερχόμενης ισχύος που δε συμβάλλει στην κινητική ενέργεια του συστήματος. Η δύναμη τάσης συνδυάζει τη μηχανική κατάσταση με τη θερμική, π.χ. τάσεις και παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη θέρμανση. Επίσης με την αμοιβαία σύζευξη, η θερμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου μπορεί να αποδοθεί σαν συνάρτηση των παραμορφώσεων και της θερμοκρασίας T , π.χ. $u = u(\epsilon_{IJ}, T)^{[89]}$. Επισημαίνεται, ότι η θερμοκρασία είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Μια συγκεκριμένη εσωτερική ενέργεια, που θεωρείται μόνο συνάρτηση των μεταβλητών

παραμόρφωσης της μηχανικής κατάστασης και των μεταβλητών της θερμοκρασίας της θερμικής κατάστασης, θα μπορούσε να είναι μία από τις δομικές εξισώσεις ενός ιδανικού θερμοελαστικού στερεού. Αυτή η συγκεκριμένη μορφή της δομικής εξίσωσης είναι αρκετά απλή για να αποδώσει για παράδειγμα τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας μιας ράβδου η οποία υπόκειται σε εφελκυσμό ανελαστικά έως το διπλάσιο του αρχικού της μήκους, επαναφέρεται στο αρχικό της μήκος και μετά ψύχεται στην αρχική της θερμοκρασία.

Στη μονόδρομη σύζευξη, ο όρος της δύναμης τάσης θεωρείται αμελητέος σε σχέση με τους όρους της εισερχόμενης θερμότητας του δεξιού μέρους της Εξίσωσης 13.4 και επιπλέον θεωρείται ότι η εσωτερική ενέργεια είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας. Η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\rho u = \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (13.5)$$

όπου, C_p είναι η ειδική θερμότητα του υλικού, και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Επομένως, η εξίσωση ενέργειας για μονόδρομη σύζευξη δίνεται από την:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q - \frac{\partial q_j}{\partial X_j} \quad (13.6)$$

Η Εξίσωση 13.6 είναι μια εξίσωση πεδίου για την ενεργειακή ισορροπία που περιέχει μόνο εξαρτημένες μεταβλητές που συνδέονται με τη θερμική κατάσταση. Όταν μια θερμική δομική εξίσωση συσχέτισης των συνιστωσών της ροής θερμότητας με τη θερμοκρασία εφαρμοστεί, η Εξίσωση 13.6 μπορεί να λυθεί ανεξάρτητα από τις μεταβλητές των τάσεων και παραμορφώσεων που συνδέονται με τη μηχανική κατάσταση. Ωστόσο, οι θερμικές παραμορφώσεις περιλαμβάνονται στη δημιουργία των δομικών κανόνων για τη μηχανική κατάσταση. Δηλαδή η θερμική κατάσταση επηρεάζει τη μηχανική αλλά όχι το αντίθετο.

Το ηλεκτρικό τόξο της GMAW παρέχει μεγάλη ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε μια πολύ μικρή περιοχή του δοκιμίου, τάξης μεγέθους 5×10^6 με 5×10^8 W/m²[62]. Σαν συνέπεια αυτής της έντονης τοπικής ροής θερμότητας, η περιοχή γύρω από το λουτρό συγκόλλησης υπόκειται σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι ο όρος της δύναμης τάσης είναι μικρός σε σχέση με τους όρους της εισερχόμενης θερμότητας της εξίσωσης ενέργειας και επομένως, η θεώρηση της διαδικασίας της συγκόλλησης σαν μονόδρομη σύζευξη είναι λογική.

13.7.3 Ο νόμος Fourier για τη συναγωγή θερμότητας – Αρχικές και συνοριακές συνθήκες

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας που μεταφέρεται εγκάρσια των ορίων μεταξύ των συστημάτων αναφοράς λόγω της διαφοράς στη θερμοκρασία τους. Η ποσότητα της θερμότητας που θα αναχθεί είναι ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειας, της διαφοράς θερμοκρασίας και της

χρονικής διάρκειας για την οποία διατηρείται η θερμοκρασιακή διαφορά. Ωστόσο, η ποσότητα της θερμότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ των δύο συστημάτων^[90]. Ο κλασικός νόμος της θερμότητας ο οποίος συσχετίζει τις συνιστώσες της ροής θερμότητας με τη θερμοκρασιακή κατανομή είναι ο νόμος Fourier. Η μαθηματική έκφραση του νόμου Fourier για ένα ανισοτροπικό υλικό δίνεται από την:

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} \quad (13.7)$$

Όπου, k_{ij} είναι ο τανυστής της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, ο οποίος είναι συμμετρικός σε συνεχές και ομογενές μέσο^[89]. Για ένα ορθοτροπικό υλικό ο τανυστής της θερμικής αγωγιμότητας είναι διαγώνιος, έτσι ώστε μόνο ο ρυθμός της θερμοκρασίας κατά τον άξονα X_i να επηρεάζει τη ροή θερμότητας σε αυτήν τη διεύθυνση. Για ιστροπικό υλικό υπάρχει μία μόνο ανεξάρτητη θερμοκή αγωγιμότητα, k , και η Εξίσωση 13.7 απλοποιείται στην:

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial X_i} \quad (13.8)$$

Με αντικατάσταση του νόμου Fourier (Εξ. 13.7), για τις συνιστώσες της ροής θερμότητας, στην εξίσωση ενέργειας (Εξ. 13.6), λαμβάνεται η εξίσωση για τη συναγωγή θερμότητας:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial X_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} \right) \quad (13.9)$$

στην οποία $Q = Q(X_i, t)$ είναι μια καθορισμένη συνάρτηση θερμότητας ανά μονάδα όγκου.

Η λύση της εξίσωσης συναγωγής θερμότητας (Εξ. 13.9), περιλαμβάνει έναν αριθμό αυθαίρετων σταθερών που καθορίζονται από συγκεκριμένες αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Αυτές οι συνθήκες είναι απαραίτητες για τη μετατροπή των φυσικών συνθηκών σε μαθηματικές εκφράσεις^[90].

Οι αρχικές συνθήκες απαιτούνται μόνο όταν αντιμετωπίζεται πρόβλημα μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας, στο οποίο το θερμοκρασιακό πεδίο στο υλικό μεταβάλλεται με το χρόνο. Η συνηθισμένη αρχική συνθήκη σε ένα υλικό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$T(X_i, 0) = T_0(X_i) \quad (13.10)$$

Όπου, το θερμοκρασιακό πεδίο T_0 είναι μια καθορισμένη συνάρτηση μόνο χωρικών συντεταγμένων^[90].

Καθορισμένες συνοριακές συνθήκες απαιτούνται στην ανάλυση όλων των μεταβατικών ή μόνιμης κατάστασης προβλημάτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται πέντε τύποι συνοριακών συνθηκών^[91]:

1) Προκαθορισμένη επιφανειακή θερμοκρασία, $T_s(t)$. Συχνά είναι απαραίτητος ο προκαθορισμός μια αρχικής επιφανειακής θερμοκρασίας της κατασκευής. Η μαθηματική της διατύπωση είναι:

$$T(X_I, 0)|_{X_I(S_0)} = T_s(t) \quad (13.11)$$

Όπου, $X_I(S_0)$ είναι οι συντεταγμένες που υπολογίστηκαν στην εξωτερική επιφάνεια S_0 όπου οι θερμοκρασίες ήταν καθορισμένες στην τιμή $T_s(t)$.

2) Προκαθορισμένη επιφανειακή ροή θερμότητας, $q_s(t)$. Αρκετές κατασκευές, κυρίως στην περίπτωση της συγκόλλησης, έχουν τη συνοριακή επιφάνεια εκτεθειμένη σε μία πηγή θερμότητας ή σε λουτρό θερμότητας. Έστω N_I η μονάδα που συνδέεται με την εξωτερική επιφάνεια S_0 του οποίου οι συντεταγμένες είναι $X_I(S_0)$, τότε η μαθηματική έκφραση της ροής θερμότητας εγκάρσια της συνοριακής επιφάνειας δίνεται:

$$N_I \frac{\partial T}{\partial X_I} \Big|_{X_I(S_0)} = q_s [X_I(S_0), t] / K \quad (13.12)$$

Όπου, q_s είναι η δεδομένη επιφανειακή ροή θερμότητας, θετική στην επιφάνεια.

3) Αδιαβατική συνοριακή συνθήκη (καθόλου ροή θερμότητας). Όταν ο ρυθμός ροής θερμότητας εγκάρσια ενός συνόρου είναι μηδέν, ο νόμος Fourier οδηγεί στη σχέση:

$$N_I \frac{\partial T}{\partial X_I} \Big|_{X_I(S_0)} = 0 \quad (13.13)$$

4) Συνοριακές συνθήκες συναγωγής. Οι περισσότερες κατασκευές έχουν συνοριακές επιφάνειες οι οποίες είναι σε επαφή με ρευστά, είτε αέρια είτε υγρά. Η μαθηματική έκφραση αυτού του τύπου συνοριακής συνθήκης μπορεί να προκύψει ως εξής: Μια κατασκευή με άγνωστο θερμοκρασιακό πεδίο $T(X_I, t)$ έχει την επιφάνειά της S_0 σε επαφή με ένα ρευστό, για παράδειγμα αέρα περιβάλλοντος, με θερμοκρασία T_0 . Η ροή θερμότητας που φτάνει στο καθορισμένο σύνορο της S_0 από το στερεό μπορεί να εκφραστεί ως εξής^[91]:

$$q_s = -k N_I \frac{\partial T}{\partial X_I} \Big|_{X_I(S_0)} \quad (13.14)$$

Όπου, q_s εκφράζει τη ροή θερμότητας που φεύγει από την S_0 και εισέρχεται στο ρευστό με θερμοκρασία T_0 . Η ροή θερμότητας που φεύγει από το σώμα μέσω της S_0 είναι ίση με τη ροή θερμότητας q_f που μεταφέρεται στο συνοριακό στρώμα του ρευστού, υποθέτοντας ότι δεν αποθηκεύεται θερμότητα στη διεπιφάνεια. Η ροή θερμότητας q_f εκφράζεται από τον νόμο του Newton για την επιφανειακή μεταφορά θερμότητας, που είναι ο ακόλουθος:

$$q_f = h \{ T[X_I(S_0), t] - T_0 \}, \quad (13.15)$$

όπου, h είναι η ειδική συναγωγιμότητα, η οποία μπορεί να είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Επομένως, η συνοριακή συνθήκη συναγωγής είναι η:

$$-k N_I \left. \frac{\partial T}{\partial X_I} \right|_{X_I(S_0)} = h \{ T[X_I(S_0), t] - T_0 \} \quad (13.16)$$

5) Συναλλαγή θερμότητας ακτινοβολίας. Όταν ο ρυθμός της ροής θερμότητας εγκάρσια ενός συνόρου καθορίζεται στα πλαίσια της εκπεμπόμενης ενέργειας από μια επιφάνεια και της περιστασιακής θερμικής ενέργειας ακτινοβολίας που εκπέμπεται και ανακλάται από άλλα στερεά και/ή ρευστά, η συνοριακή συνθήκη δίνεται από την:

$$-k N_I \left. \frac{\partial T}{\partial X_I} \right|_{X_I(S_0)} = \sigma \varepsilon T_S^4 - \alpha q_i \quad (13.17)$$

όπου σ , είναι η σταθερά του Stefan - Boltzmann, ε είναι ο βαθμός μελανότητας του υλικού (ικανότητα εκπομπής ή δραστικότητα της επιφάνειας) και T_S η επιφανειακή θερμοκρασία, α είναι η επιφανειακή απορροφητικότητα και q_i είναι η περιστασιακή θερμική ενέργεια ακτινοβολίας. Ο πρώτος όρος στο δεξί τμήμα της εξίσωσης είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια από την επιφάνεια και ο δεύτερος όρος είναι η απορροφώμενη περιστασιακή θερμική ενέργεια ακτινοβολίας.

Αν το σώμα στη θερμοκρασία T περικλείεται από κάποιο χώρο του οποίου τα τοιχώματα έχουν ομοιόμορφη θερμοκρασία T_e , και θεωρείται ότι τα τοιχώματα εκπέμπουν και απορροφούν ενέργεια, με $\varepsilon = \alpha = 1$, τότε η ενέργεια ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το σώμα ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφάνειας δίνεται από την $\varepsilon \sigma T^4$, ενώ η αντίστοιχη απορροφώμενη ενέργεια ακτινοβολίας από τα τοιχώματα δίνεται από την $\alpha \sigma T_e^4$. Επομένως ο ρυθμός της ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας από την επιφάνεια του σώματος εκφράζεται ως εξής:

$$q = \varepsilon \sigma T^4 - \alpha \sigma T_e^4 \quad (13.18)$$

Από τον νόμο του Kirchhoff $\varepsilon = \alpha$, οπότε ο ρυθμός της ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας από την επιφάνεια του σώματος προς το περιβάλλον δίνεται από τη γνωστή σχέση^[9]:

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_e^4) \quad (13.19)$$

13.7.4 Κινούμενες πηγές θερμότητας και ψευδο – μόνιμη κατάσταση

Η δημιουργία θερμότητας στις συγκολλήσεις βασίζεται στην αρχή των στιγμιαίων πηγών θερμότητας. Για το μοντέλο θερμικής πηγής του Goldak που καθορίζεται χωρικά από μια διπλή έλλειψη (Εικ 13.1), όπως ελέχθη, το μπροστά μισό της είναι το τεταρτημόριο μίας ελλειψοειδούς πηγής και το πίσω μισό της είναι το τεταρτημόριο μίας δεύτερης ελλειψοειδούς πηγής. Η

κατανομή της πυκνότητας ενέργειας θεωρείται Gauss κατά τη διαδρομή συγκόλλησης ή τον άξονα z του κομματιού. Για την ευκολία και απλοποίηση των σχέσεων είναι δυνατό να εισαχθεί συντεταγμένη ξ , ορισμένη στην πηγή θερμότητας και κινούμενη μαζί με αυτήν. Το κινούμενο πλαίσιο αναφοράς πάνω στην πηγή θερμότητας συνδέεται με την καθορισμένη συντεταγμένη του κομματιού, με τη σχέση:

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (13.20)$$

όπου v είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, τ είναι ο χρόνος υστέρησης απαραίτητος για τον καθορισμό της θέσης της πηγής θερμότητας τη χρονική στιγμή $t = 0$. Στο μοντέλο διπλής έλλειψης, τα μέρη της θερμότητας που εναποτίθενται εμπρός και πίσω από την πηγή θερμότητας ορίζονται αντίστοιχα ως f_f και f_r και καθορίζονται έτσι ώστε να ισχύει $f_f + f_r = 2$. Έστω q η πυκνότητα ισχύος σε W/m^3 και a , b και c οι ημι - άξονες της έλλειψης παράλληλοι στους x , y και ξ . Τότε η κατανομή της πυκνότητας ισχύος μέσα στο μπροστινό τεταρτημόριο προσδιορίζεται από την:

$$q(x, y, z, t) = \left(\frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1 \pi \sqrt{\pi}} \right) e^{-3(x^2/a^2)} e^{-3(y/b^2)} e^{-3(\xi^2/c_1^2)} \quad (13.21)$$

και η κατανομή της πυκνότητας ισχύος μέσα στο πίσω τεταρτημόριο προσδιορίζεται από την:

$$q(x, y, z, t) = \left(\frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_2 \pi \sqrt{\pi}} \right) e^{-3(x^2/a^2)} e^{-3(y/b^2)} e^{-3(\xi^2/c_2^2)} \quad (13.22)$$

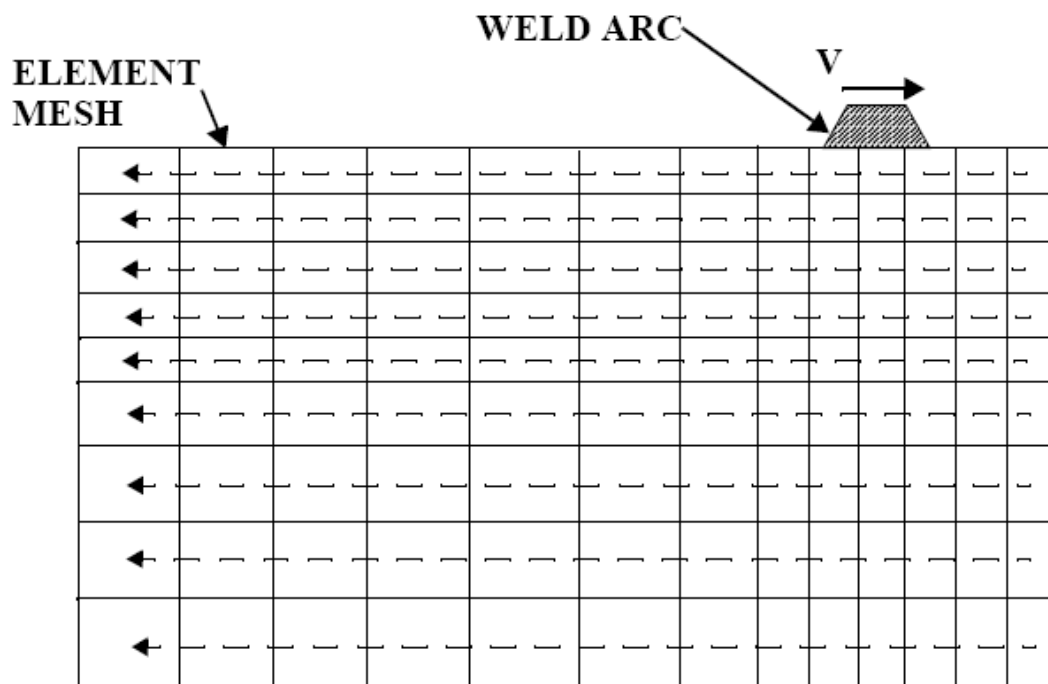
Στις εξισώσεις 13.21 και 13.22, το Q είναι η διαθέσιμη θερμότητα της πηγής. Για ηλεκτρικό τόξο η διαθέσιμη θερμότητα δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \eta VI \quad (13.23)$$

όπου η είναι η δραστηριότητα της πηγής θερμότητας, $0 \leq \eta \leq 1$, V είναι η ηλεκτρική τάση του τόξου και I η ένταση του ρεύματος του τόξου. Οι παράμετροι a , b , c_1 και c_2 είναι ανεξάρτητες και μπορούν να πάρουν διαφορετικές τιμές για το μπροστινό και πίσω τεταρτημόριο της πηγής ώστε να μοντελοποιηθεί σωστά το τόξο συγκόλλησης.

Στα διάφορα πακέτα λογισμικού προσομοίωσης της συγκόλλησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, η πηγή θερμότητας είναι δυνατόν να οριστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την τυπική μεταβατική μορφή όπου η πηγή θερμότητας προχωράει σταθερά με το χρόνο κατά μήκος του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση της έναρξης και της παύσης της πηγής θερμότητας μπορούν να ληφθούν υπόψη. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τον υπολογισμό ενός κινούμενου πλαισίου αναφοράς ή ψευδο - μόνιμη κατάσταση. Η μεταλλουργική και μηχανική μόνιμη κατάσταση που προκαλούνται από την κίνηση του κινούμενου τόξου της

πηγής θερμότητας καθορίζονται λύνοντας τις ελεγχόμενες εξισώσεις στο κινούμενο πλαίσιο αναφοράς (x, y, ξ) , αντί του σταθερού πλαισίου αναφοράς (x, y, z) . Εφόσον αυτή η μέθοδος επιλύει την μόνιμη ή ημι - μόνιμη κατάσταση, είναι λιγότερο χρονοβόρα από τον μεταβατικό υπολογισμό. Η διαδικασία βασίζεται στον καθορισμό των τροχιών των στοιχείων και επομένως σημείων ολοκλήρωσης. Αυτές οι τροχιές είναι παράλληλες στο ρυθμό της φόρτισης ή στην πηγή θερμότητας, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός της θερμικής, μεταλλουργικής και μηχανικής ιστορίας που υφίσταται κάθε σημείο της κατασκευής. Μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.3.



Εικόνα 13.3 Σχηματική αναπαράσταση «κινούμενου πλαισίου αναφοράς»

13.7.5 Ανάλυση θερμο - ελαστικών τάσεων

Οι θερμικές επιδράσεις λαμβάνονται υπόψη στη μηχανική προσομοίωση, συμπεριλαμβάνοντας τις θερμικές παραμορφώσεις και τις εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία ιδιότητες του υλικού. Επιπλέον, θεωρείται ότι η θερμική κατάσταση επηρεάζει και το κριτήριο της πλαστικής διαρροής. Οι δομικοί κανόνες που σχετίζουν τις παραμένουσες τάσεις, τις παραμορφώσεις και τη θερμοκρασία είναι μη γραμμικοί με βάση τη θεωρία της πλαστικής παραμόρφωσης των στερεών^[86].

13.7.5.1 Θεμελιώδεις παραδοχές

Οι παρακάτω παραδοχές εφαρμόζονται στις διατυπώσεις που θα ακολουθήσουν^[90]:

- 1) Το υλικό συμπεριφέρεται ως συνεχές μέσο ή συνεχές και ομογενές.

- 2) Το υλικό είναι ιστροπικό, με τις ιδιότητες ανεξάρτητες της διεύθυνσης.
- 3) Το υλικό δεν έχει «μνήμη» έτσι ώστε οι επιδράσεις στο υλικό προηγούμενων καταστάσεων δεν επηρεάζουν την τρέχουσα κατάσταση.

13.7.5.2 Θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης των στερεών

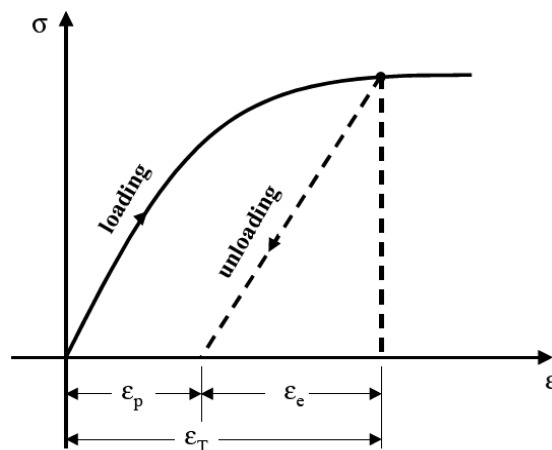
Παρακάτω περιγράφονται οι θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς ενός υλικού^[90]:

A) Ελαστική παραμόρφωση

- 1) Πολύ μικρή αλλοίωση με την παραμόρφωση, έως 0.1%.
- 2) Συνήθως γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης.
- 3) Εντελώς αναστρέψιμη παραμόρφωση ή αλλοίωση μετά την αποφόρτιση.

B) Πλαστική παραμόρφωση

- 1) Μεγαλύτερη παραμόρφωση.
- 2) Μη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης.
- 3) Μορφοποίηση μόνιμης παραμόρφωσης μετά την απομάκρυνση του φορτίου.
- 4) Κατά την πλαστική παραμόρφωση στο στερεό δεν παρατηρείται μεταβολή στον όγκο του.
- 5) Η ολική παραμόρφωση ϵ_T , είναι το άθροισμα της ελαστικής συνιστώσας ϵ_e και της πλαστικής συνιστώσας ϵ_p όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.4.

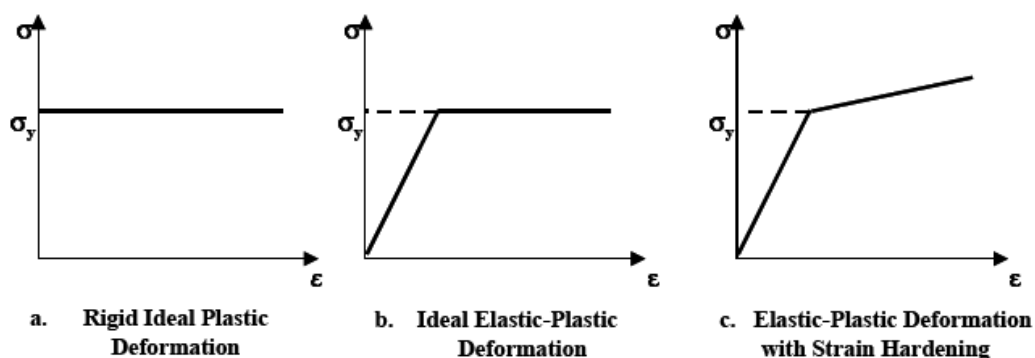


Εικόνα 13.4 Μονοαξονική ελαστο - πλαστική φόρτιση και ελαστική αποφόρτιση υλικού

13.7.5.3 Ιδανικές καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων

Στην Εικόνα 13.5 παρουσιάζονται τρεις ιδανικές καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων για μεταλλική ράβδο πρισματικής διατομής η οποία υπόκειται σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στις

Εικόνες 13.5a ως 13.c παρουσιάζονται αντίστοιχα οι: άκαμπτη - τέλεια πλαστική συμπεριφορά, ελαστική - τέλεια πλαστική συμπεριφορά και η ελαστική - πλαστική συμπεριφορά με σκλήρυνση λόγω παραμόρφωσης. Ως σ_y ορίζεται το όριο διαρροής του υλικού. Η άκαμπτη - τέλεια πλαστική συμπεριφορά ελαχιστοποιεί τις ελαστικές παραμορφώσεις και τη σκλήρυνση. Η ελαστική - τέλεια πλαστική καμπύλη περιλαμβάνει ελαστικές παραμορφώσεις και υποθέτει γραμμική σκλήρυνση. Όταν αποφεύγονται οι μεγάλες παραμορφώσεις, για παράδειγμα, μέσω ενός περιβάλλοντος ελαστικού υλικού τότε η πλαστική παραμόρφωση περιορίζεται. Για τον περιορισμό της πλαστικής παραμόρφωσης, η ελαχιστοποίηση της σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης, ή της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, θεωρείται λογική παραδοχή. Μεγάλες παραμορφώσεις λόγω ψυχρής κατεργασίας σκλήρυνσης προκύπτουν στις διαδικασίες μορφοποίησης των μετάλλων, όπως είναι η έλαση, η διέλαση και η συρματοποίηση. Η ψυχρή κατεργασία περιλαμβάνει σκλήρυνση και οι πλαστικές παραμορφώσεις σε αυτές τις κατεργασίες είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις ελαστικές, και επομένως είναι σωστό να θεωρούνται αμελητέες.



Εικόνα 13.5 Ιδανικές καμπύλες για δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού

Με μια δοκιμή εφελκυσμού, η οποία αντιστοιχεί σε μονοαξονική τασική κατάσταση, μετριέται η τάση διαρροής ενός μετάλλου. Ο τρόπος με τον οποίο ελέγχεται η διαρροή σε μια πολυαξονική τασική κατάσταση, προσδιορίζεται πειραματικά, δεδομένου ότι δεν υπάρχει θεωρητικός τρόπος για τον συσχετισμό της διαρροής σε τρισδιάστατη τασική κατάσταση με τη διαρροή σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η κατάσταση διαρροής, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να καθοριστεί μόνο από το κριτήριο διαρροής^[90].

13.7.5.4 Κριτήριο διαρροής Von Mises

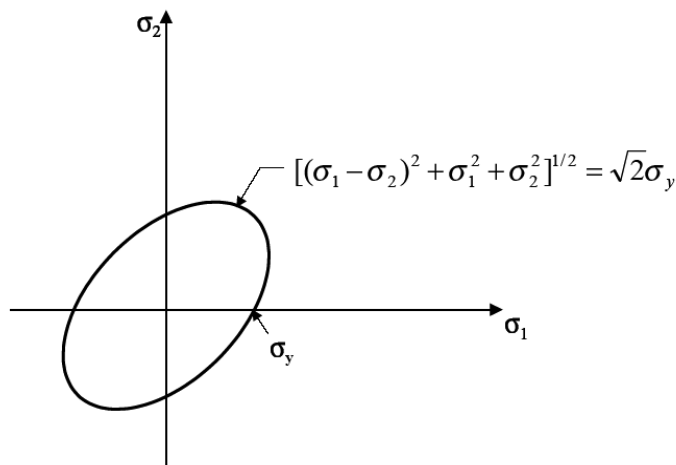
Το κριτήριο διαρροής von Mises αρχικά εξήχθη από τη θεωρία της ενέργειας στρέβλωσης. Έστω σ η πραγματική τάση Mises που εκφράζεται από τη σχέση:

$$\bar{\sigma} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right]^{1/2} \quad (13.24)$$

Όπου, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \dots, \sigma_{xz}$ είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες της τάσης σε ένα σημείο του υλικού. Το κριτήριο Mises αναφέρει ότι η διαρροή ξεκινάει, σε μία τρισδιάστατη τασική κατάσταση, όταν η πραγματική τάση γίνει ίση με την τάση διαρροής του υλικού, όπως έχει προσδιοριστεί από τη δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού. Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου είναι:

$$\sigma = \sigma_y \quad \text{στην έναρξη της διαρροής} \quad (13.25)$$

Για τη μονοαξονική τασική κατάσταση όπου $\sigma_{xx} \neq 0$ και όλες οι άλλες συνιστώσες της τάσης είναι ίσες με το μηδέν, το κριτήριο Mises προσδιορίζει την έναρξη της διαρροής όταν $\sigma_{xx} = \pm \sigma_y$. Για την κατάσταση της καθαρής διάτμησης $\sigma_{xy} \neq 0$ και όλες τις άλλες συνιστώσες της τάσης είναι ίσες με το μηδέν, το κριτήριο Mises προσδιορίζει την έναρξη της διαρροής όταν $\sigma_{xy} = \pm \sigma_y / (\sqrt{3})$. Επομένως, το κριτήριο Mises υποδηλώνει ότι η τάση διαρροής σε εφελκυσμό είναι $\sqrt{3}$ φορές την τάση διαρροής σε διάτμηση. Αυτή η σχέση μεταξύ της τάσης διαρροής σε εφελκυσμό και καθαρή διάτμηση προσεγγίζει με ακρίβεια αρκετές δοκιμές πολυκρυσταλλικών μετάλλων^[88]. Το κριτήριο Mises μπορεί να απεικονιστεί στο σύστημα των κυρίων τάσεων, όπου οι κύριες τάσεις ορίζονται ως $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Τότε σχεδιάζεται ως κυλινδρική επιφάνεια κυκλικής διατομής ακτίνας $\sqrt{2/3}\sigma_y$, με τον άξονα του κυλίνδρου ισοδύναμα κεκλιμένο σε σχέση με το θετικό άξονα της κύριας τάσης. Για $\sigma_3 = 0$, το κριτήριο Mises σχεδιάζεται σαν έλλειψη στο επίπεδο $\sigma_1 - \sigma_2$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.6.



Εικόνα 13.6 Επιφάνεια διαρροής von Mises δύο διαστάσεων

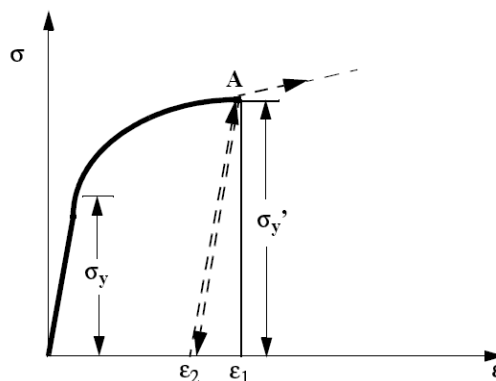
13.7.5.5 Σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης

Η σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης ορίζεται ως η αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής ενός μετάλλου καθώς παραμορφώνεται πλαστικά^[61]. Η αρχική πλαστική διαρροή συμβαίνει όταν ένα υλικό υπόκειται σε φόρτιση πέρα από το όριο ελαστικότητας. Θεωρητικά, το υλικό αρχίζει να «ρέει» χωρίς πρόσθετο φορτίο όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 13.5b. Ωστόσο, στην πραγματικότητα τα περισσότερα υλικά διατηρούν κάποια από την αρχική ακαμψία τους μετά τη διαρροή. Επιπρόσθετο φορτίο απαιτείται για περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση του υλικού όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.5c. Μετά από ορισμένη πλαστική παραμόρφωση του υλικού καθίσταται «σκληρότερο» καθώς απαιτείται υψηλότερο εφαρμοζόμενο φορτίο για να προκαλέσει στο ίδιο υλικό πλαστική παραμόρφωση μετά την ολοκλήρωση του προηγούμενου κύκλου φόρτισης^[90].

Στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιούνται δύο τύποι σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, η ιστροπική και η κινηματική.

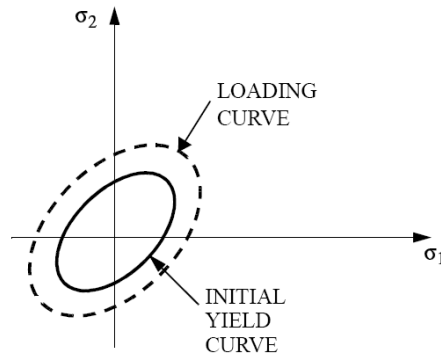
1) Ισοτροπική σκλήρυνση

Η Εικόνα 13.7 απεικονίζει την αρχή της ιστροπικής σκλήρυνσης ενός υλικού. Αρχικά το υλικό φορτίζεται πάνω από την αρχική τάση διαρροής σ_y σε μια στιγμιαία παραμόρφωση ϵ_1 και μετά αποφορτίζεται μέχρι το σημείο A. Μετά την αποφόρτιση εισάγεται στο υλικό μια μόνιμη παραμόρφωση ϵ_2 . Εάν το στερεό φορτιστεί ξανά, το υλικό διαρρέει σε υψηλότερη τάση διαρροής σ_y' , η οποία συμπίπτει με την τάση σ_A στο τελευταίο σημείο φόρτισης.



Εικόνα 13.7 Φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση στερεού ιστροπικής σκλήρυνσης

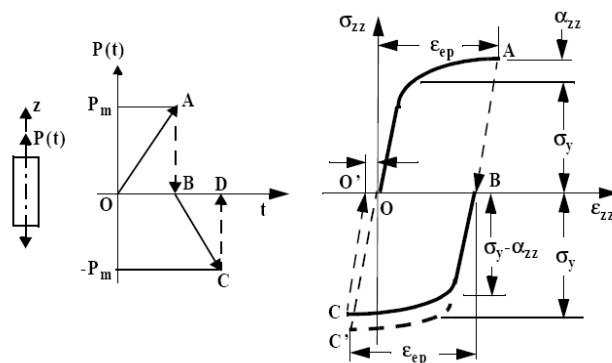
Η διαξονική τασική κατάσταση της συμπεριφοράς ισοαξονικής σκλήρυνσης μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με την ομοιόμορφη έκταση της αρχικής επιφάνειας διαρροής (Εικ. 13.6) ή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.8. Η επιφάνεια διαρροής διατηρεί τη μορφή της και δεν μετατοπίζεται, ενώ η αύξηση του μεγέθους της ελέγχεται από μια απλή παράμετρο που εξαρτάται από την πλαστική παραμόρφωση.



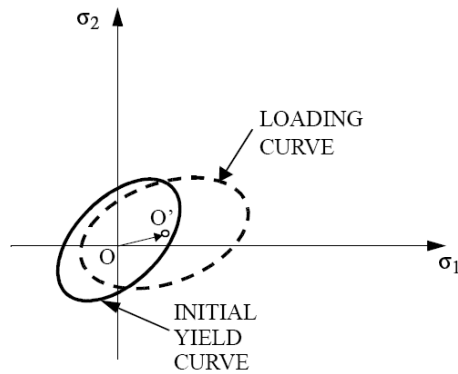
Εικόνα 13.8 Επιφάνειες διαξονικής φόρτισης για στερεά ιστροπικής σκλήρυνσης

2) Κινηματική σκλήρυνση

Ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει κινηματική σκλήρυνση έχει το χαρακτηριστικό ότι όταν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση μέσω εφελκυσμού, ακολουθούμενη από φόρτιση στην αντίστροφη διεύθυνση, η θλιπτική τάση διαρροής στην αντίστροφη φόρτιση μειώνεται στην ίδια ποσότητα όση η ποσότητα αύξησης της εφελκυστικής τάσης διαρροής στην αρχική φόρτιση. Η μείωση της θλιπτικής τάσης διαρροής που ακολουθεί μια αρχική φόρτιση σε εφελκυσμό ονομάζεται φαινόμενο Bauschinger. Το μοντέλο ιστροπικής σκλήρυνσης θα προβλέψει μια τάση διαρροής σε θλίψη $\sigma_{zz} = -(\sigma_y + \alpha_{zz})$ (Εικ 13.8). Επομένως, το μοντέλο ιστροπικής σκλήρυνσης δεν μπορεί να προβλέψει το φαινόμενο Bauschinger, ενώ το κινηματικό μοντέλο μπορεί. Τα αποτελέσματα της κινηματικής σκλήρυνσης στην υστέρηση της παραμόρφωσης, παρατηρούνται μετά από ένα πλήρη κύκλο φόρτισης εφελκυσμού - θλίψης (Εικ. 13.9). Για την πολυαξονική φόρτιση, το μέγεθος και η μορφή της επιφάνειας διαρροής δεν μεταβάλλεται, αλλά μερικώς μετατοπίζεται στο σύστημα των τάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.10. Η μετατόπιση συμβαίνει στη διεύθυνση του διανύσματος προσαύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 13.9 Μονοαξονική φόρτιση ράβδου υπό πλαστική παραμόρφωση λόγω κινηματικής σκλήρυνσης



Εικόνα 13.10 Μετατόπιση της επιφάνειας διαρροής με τον κανόνα της κινηματικής σκλήρυνσης υπό διαξονική φόρτιση

13.8 Επιλογή δισδιάστατης ή τρισδιάστατης προσομοίωσης

Η προσομοίωση της συγκόλλησης, βασίζεται στην ακριβή πρόβλεψη του θερμικού κύκλου της. Ερευνητές^{[68],[69],[72]}, έχουν διατυπώσει την άποψη ότι η πρόβλεψη του θερμοκρασιακού πεδίου, λόγω συγκόλλησης, απαιτεί μη γραμμική, μεταβατική τρισδιάστατη ανάλυση. Εκφράζουν δηλαδή την άποψη ότι η τρισδιάστατη μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης είναι ουσιώδης και παρέχει ακριβή αποτελέσματα για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων και στρεβλώσεων που δεν μπορούν να επιτευχθούν με προσομοιώσεις δύο διαστάσεων. Στηρίζουν δε την άποψη αυτή επισημαίνοντας ότι ορισμένες προβλέψεις παραμενουσών τάσεων, για υλικά που υπόκεινται σε μετασχηματισμούς φάσεων, παρουσιάζουν σημαντικά μεγάλες διαφορές με τις πειραματικές μετρήσεις όταν χρησιμοποιούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Οι συμβάσεις στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης είναι ότι η διατμητικές παραμορφώσεις και οι παραμορφώσεις εκτός του επιπέδου, μηδενίζονται. Θεωρώντας διαμήκεις τάσεις, η συνθήκη δισδιάστατης επίπεδης παραμόρφωσης αντιστοιχεί σε περιορισμούς άκαμπτων άκρων ενώ η πραγματική συνθήκη τριών διαστάσεων είναι πιο κοντά στη συνθήκη ελαστικότητας. Οι διαμήκεις τάσεις σε αυτή την περίπτωση αποδίδονται σε επίπεδες τάσεις ή τάσεις στη διεύθυνση της απόθεσης της συγκόλλησης. Οι Michaleris κ.α.^[70], αναφέρουν ότι το δισδιάστατο μοντέλο συγκόλλησης πλήρους διεύθυνσης μπορεί να αποβεί ασταθές λόγω της μείωσης της δυσκαμψίας σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μοντέλα τριών διαστάσεων μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τη στρέβλωση λόγω συγκόλλησης όταν χρησιμοποιείται κινούμενη πηγή θερμότητας για να προσομοιώσει την εισερχόμενη θερμότητα της συγκόλλησης. Στην περίπτωση του αλουμινίου, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα (πάνω από τρεις φορές αυτής του χάλυβα) προκαλεί κίνηση του υλικού κάθετα στο τόξο συγκόλλησης, και επομένως απαιτείται ανάλυση τριών διαστάσεων για την ακριβή μοντελοποίηση της κατάστασης των παραμενουσών τάσεων. Καθώς το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης κινείται κατά μήκος της διαδρομής της συγκόλλησης, δύο ανεξάρτητα, προηγουμένως, τμήματα

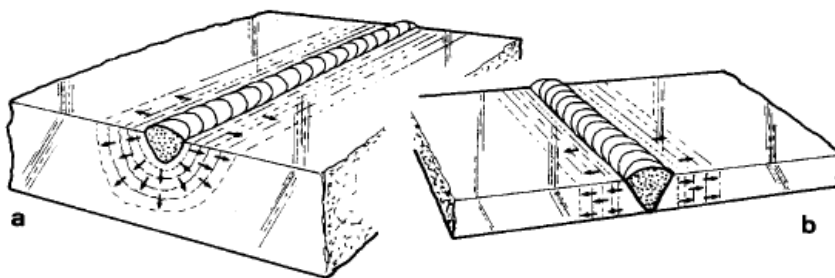
ενώνονται μέσω του αποτιθέμενου υλικού συγκόλλησης, μεταβάλλοντας έτσι την απόκριση της δομής στην επόμενη απόθεση του υλικού συγκόλλησης. Η ολική επίδραση του φαινομένου αυτού μπορεί να αποδοθεί μόνο με τη χρήση μοντέλων τριών διαστάσεων^[31]. Οι Feng κ.α.^[80], ανέφεραν ότι η έντονη χωρική εξάρτηση των παραμενουσών τάσεων κοντά στη συγκόλληση υποδηλώνει ότι τα κάθετη τομή μοντέλα δυο διαστάσεων δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για την ανάλυση συγκολλήσεων.

Οι Dong κ.α.^[79], χρησιμοποίησαν και μοντέλα με στοιχεία κελύφη/πλάκες και μοντέλα κάθετη τομή δυο διαστάσεων, για τη μελέτη των παραμενουσών τάσεων συγκόλλησης σε τρεις διαστάσεις, αλλά διαπίστωσαν ότι οι εγκάρσιες παραμενουσές τάσεις στις συγκολλήσεις είναι δυνατόν να παρουσιάσουν σημαντικές μεταβολές κατά μήκος της διεύθυνσης συγκόλλησης και αυτές οι μεταβολές πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να ερμηνευτούν σωστά τα αποτελέσματα του διδιάστατου μοντέλου. Οι εγκάρσιες τάσεις αντιστοιχούν σε εκείνες τις τάσεις που αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση της απόθεσης της συγκόλλησης. Οι Dubois κ.α.^[76] υλοποίησαν 2-D μοντέλα, αναγνωρίζοντας ότι η τριών διαστάσεων επίδραση του κινούμενου ηλεκτροδίου είχε απαλειφθεί. Από την άλλη, οι Hong κ.α.^[73], αμφισβήτησαν την αναγκαιότητα για μοντέλα συγκολλήσεων 3-D, προτείνοντας ότι οι αναλύσεις 2-D μπορούν να εκτελεστούν με τις κατάλληλες απλοποιητικές παραδοχές ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Για να συμπεριλάβουν και την επίδραση του κινούμενου, σε τρεις διαστάσεις τόξου στο 2-D μοντέλο μέσης τομής, ανέπτυξαν μια συνάρτηση «ράμπας» για να περιγράψουν την εισερχόμενη θερμότητα. Η συνάρτηση αυτή εκτιμά την επίδραση της μεταφοράς θερμότητας έξω από το επίπεδο καθώς πλησιάζει το τόξο, κινείται εγκάρσια και απομακρύνεται από την καθορισμένη διδιάστατη κάθετη τομή.

Άλλες απλοποιημένες τεχνικές (lump pass modeling) χρησιμοποιούνται για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου και για την απλοποίηση της ανάλυσης σε συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων, ομαδοποιώντας αρκετές συγκολλήσεις ή στρώσεις σε μία μόνο στρώση. Οι ισοδύναμες συνιστώσες της θερμότητας που συνδέονται με αυτές τις τεχνικές πρέπει να καθορίζονται με ιδιαίτερη προσοχή για την επίτευξη λογικών προβλέψεων παραμενουσών τάσεων^[73].

Ωστόσο, γενικά πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή διδιάστατης ή τριδιάστατης μοντελοποίησης εξαρτάται τόσο από τη φύση του υλικού όσο και από το πάχος των υπό συγκόλληση ελασμάτων. Μια απλοποιημένη διαδικασία επιλογής διδιάστατης ή τριδιάστατης μοντελοποίησης προκύπτει από τις εκφράσεις του Rosenthal^[47] σχετικά με τη ροή θερμότητας σε λεπτή και μεγάλου πάχους πλάκα.

Στην Εικόνα 13.11 παρουσιάζεται μια γενικευμένη σχηματική παράσταση της ροής θερμότητας για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Φυσικά, μόνο το πάχος του ελάσματος δεν είναι ικανό να «συμπεριλάβει» τις διαστάσεις της ροής. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρόδιο (SMAW) που περνάει από μία πλάκα χάλυβα πάχους 50mm χρησιμοποιώντας ρεύμα 900A και τάση 27V με ταχύτητα 0.2m/min περικλείει ουσιαστικά δισδιάστατη ροή θερμότητας, ενώ ένα ηλεκτρόδιο (MAG) με ρεύμα 150A και 20V που περνάει από μια πλάκα χάλυβα πάχους 20mm με ταχύτητα 0.4m/min θα συμπεριφερθεί όπως αν η πλάκα ήταν απείρου πάχους^[60]. Συνεπώς, η επιλογή της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί για το θερμοκρασιακό πεδίο εξαρτάται και από τις συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης.



Εικόνα 13.11 Σχηματική παράσταση της ροής θερμότητας. α) τρισδιάστατη, β) δισδιάστατη

Ο Rosenthal^[47], εξήγαγε το ρυθμό απόψυξης για τη δισδιάστατη πλάκα από την Εξίσωση 12.22 πραγματοποιώντας ανάλυση κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης, π.χ. για $y = 0$ και $x = -ut$. Έτσι έλαβε την παρακάτω έκφραση:

$$\frac{dT}{dt} = -2\pi k \rho c g^2 \left(\frac{v}{Q} \right)^2 (T - T_0)^3 (2D) \quad (13.26)$$

Όπου, k η αγωγιμότητα του μετάλλου,

ρ η πυκνότητα,

c η ειδική θερμοχωρητικότητα,

g το πάχος της πλάκας,

u η ταχύτητα της φλόγας,

Q η θερμική ισχύς σε W και

T, T_0 η θερμοκρασία για δεδομένη στιγμή και η αρχική θερμοκρασία, αντίστοιχα.

Ο ρυθμός απόψυξης για πλάκα μεγάλου πάχους μπορεί να εξαχθεί από την Εξίσωση 12.12. Αν τα δεδομένα σε ότι αφορά στην επιφάνεια και στην περιοχή της συγκόλλησης είναι περιορισμένες,

η απόσταση R είναι απλά η απόσταση ut που καλύπτεται από το τόξο σε μια δεδομένη χρονική διάρκεια t . Ο ρυθμός απόψυξης δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = -2\pi k \frac{v}{Q} (T - T_0)^2 \quad (3D) \quad (13.27)$$

Το δεξιό μέρος της εξίσωσης 13.27 είναι σταθερό για δεδομένη θερμοκρασία, υλικό, εισερχόμενη θερμότητα και ταχύτητα και επομένως και το αριστερό μέρος πρέπει επίσης να είναι σταθερό. Με διαστασιακή ανάλυση οι ρυθμοί απόψυξης κανονικοποιούνται από το ρυθμό απόψυξης για πλάκα μεγάλου πάχους (Εξ. 2.31). Για το λόγο αυτό, για τρισδιάστατη πλάκα ισχύει:

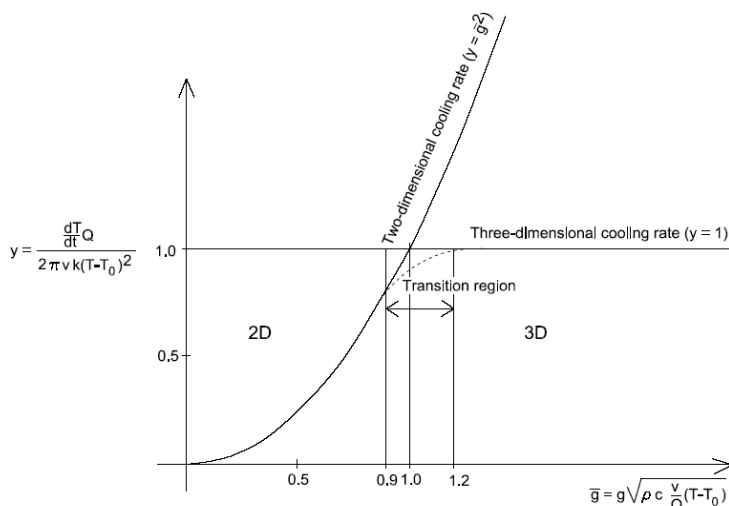
$$\frac{\frac{dT}{dt}}{-2\pi k \frac{v}{Q} (T - T_0)^2} = 1 \quad (3D) \quad (13.28)$$

ενώ για διοδιάστατη πλάκα:

$$\frac{\frac{dT}{dt}}{-2\pi k \frac{v}{Q} (T - T_0)^2} = \frac{2\pi k \rho c g^2 \left(\frac{v}{Q}\right)^2 (T - T_0)^3}{2\pi k \rho c \frac{v}{Q} (T - T_0)^3} = \rho c \frac{v}{Q} g^2 (T - T_0) = \bar{g}^2 \quad (13.29)$$

Το αδιάστατο πάχος \bar{g} για την περίπτωση δύο διαστάσεων ορίζεται ως εξής:

$$\bar{g} = g \sqrt{\rho c \frac{v}{Q} (T - T_0)} \quad (13.30)$$



Εικόνα 13.12 Αδιάστατοι ρυθμοί απόψυξης σαν συνάρτηση του αδιάστατου πάχους της πλάκας \bar{g}

Η διακεκομμένη καμπύλη αναπαριστά τη συμπεριφορά στη μεταβατική ζώνη, π.χ. για την ενδιάμεση ζώνη ανάμεσα στην περιοχή αξιόπιστων λύσεων για την περίπτωση της λεπτής πλάκας

και την αντίστοιχη λύση για την περίπτωση της πλάκας μεγάλου πάχους. Από την Εξίσωση 13.30 το μεταβατικό πάχος $g_{\text{transition}}$ ορίζεται ως εξής:

$$g_{\text{transition}} = \frac{g}{\bar{g}} = \frac{1}{\sqrt{\rho c \frac{v}{Q} (T - T_0)}} \quad (13.31)$$

Από την Εξίσωση 13.31 προκύπτει ότι:

$$g_{\text{transition}} > g_{\text{actual}} \Rightarrow 2D \quad (13.32)$$

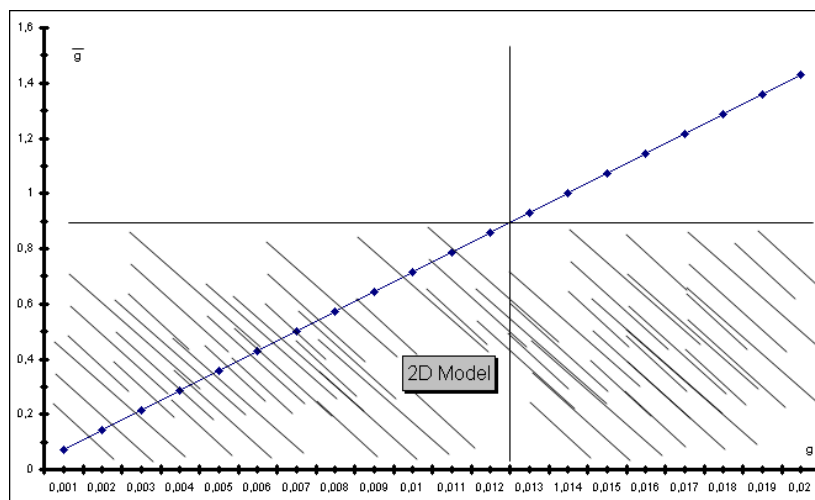
$$g_{\text{transition}} < g_{\text{actual}} \Rightarrow 3D \quad (13.33)$$

Χρησιμοποιώντας και την Εικόνα 13.12 προκύπτει ότι:

$$\bar{g} \leq 0.9 \Rightarrow 2D \quad (13.34)$$

$$\bar{g} \geq 1.2 \Rightarrow 3D \quad (13.35)$$

Από την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου 5083, προκύπτει ότι (Εικ. 13.13) η μοντελοποίηση μπορεί να είναι δισδιάστατη ακόμα και για πάχος υλικού $\sim 12\text{mm}$.



Εικόνα 13.13 Καμπύλη επιλογής δισδιάστατης ή τρισδιάστατης ανάλυσης για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου 5083

13.9 Ανέγερση του μοντέλου προσομοίωσης μέσω λογισμικού που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS®)

Πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση της συγκόλλησης των ελασμάτων πάχους 4mm μεγάλων διαστάσεων (700 x 300mm²) από το κράμα AA 5083-H116 μέσω του προγράμματος ABAQUS® [108]. Κατά τη διαδικασία της ανέγερσης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την πειραματική μελέτη (π.χ. διαστάσεις του μετάλλου συγκόλλησης) και από τη βιβλιογραφία (π.χ. στοιχεία για τις ιδιότητες του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες).

Καθώς ένας από τους βασικούς σκοπούς της μοντελοποίησης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα από την πειραματική μελέτη, η επιλογή προσομοίωσης της συγκόλλησης των ελασμάτων πάχους 6mm απορρίφθηκε καθώς τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στις μετρητικές διατάξεις (Εικ. 11.13) και κυρίως, οι ιδιαίτερα μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, που προέκυψαν πειραματικά (Εικ. 11.13 και Εικ. 11.14) λειτουργούν αποτρεπτικά στην υιοθέτηση στοιχείων από την πειραματική διαδικασία αυτών των συγκολλήσεων ως δεδομένα εισόδου κατά την ανέγερση του μοντέλου με τον κίνδυνο να οδηγήσουν σε αντίστοιχα εσφαλμένα αποτελέσματα προσομοίωσης.

Αντίστοιχα, μεταξύ των συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm και αυτών πάχους 5mm θεωρήθηκε ως δυσμενέστερη η επιλογή για προσομοίωση των συγκολλήσεων ελασμάτων πάχους 4mm καθώς λόγω ακριβώς του μικρού πάχους είναι θεωρητικά πιο ευπαθή σε παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης και συνεπώς εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς τη μελέτη τους.

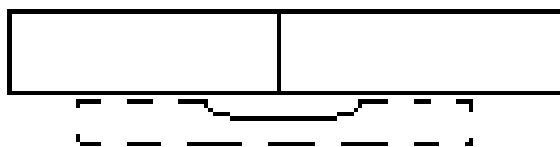
Πραγματοποιήθηκε συζευγμένη θερμο-μηχανική μοντελοποίηση (coupled temp. - displacement analysis) κατά την οποία καθώς εκ των προτέρων αναμένονται σημαντικές γεωμετρικές μη-γραμμικότητες (παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης), επιλέχθηκε η μη-γραμμική ανάλυση με την επιλογή NLGEOM ενεργή (ABAQUS® [108]) δηλαδή με ενεργή την επιλογή για επίλυση του προβλήματος μέσω της μεθόδου Newton-Raphson (Solution technique: Full Newton) και χωρίς παρέμβαση στις προεπιλογές του λογισμικού που αφορούν στη μέθοδο.

Σε ότι αφορά στις επιλογές προσαύξησης που χρησιμοποιήθηκαν μέσα σε κάθε χρονικό βήμα, το αρχικό μέγεθος προσαύξησης ορίστηκε σε 0,01 το ελάχιστο σε 2×10^{-5} , ενώ το μέγιστο σε 0,2. Ο μέγιστος αριθμός προσαυξήσεων ορίστηκε σε 100 ενώ, η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας μέσα σε κάθε προσαύξηση ορίστηκε στους 50°C.

13.9.1 Στοιχεία από την πειραματική διαδικασία

Τα βασικά στοιχεία τα οποία ελήφθησαν υπόψη από την πειραματική μελέτη, είναι η προετοιμασία των ακμών συγκόλλησης, οι συνθήκες συγκόλλησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

του μετάλλου συγκόλλησης, το εύρος της ΘΕΖ, και ως ένα βαθμό οι περιορισμοί που υπήρχαν στη μετατόπιση των ελασμάτων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 και 6 της Ενότητας 2 (Εικ. 5.8, Πιν. 6.7, Πιν. 6.8) και παρατίθενται ξανά στην Εικόνα (Εικ. 13.14) και στους Πίνακες (Πιν. 13.1, Πιν. 13.2) που ακολουθούν.

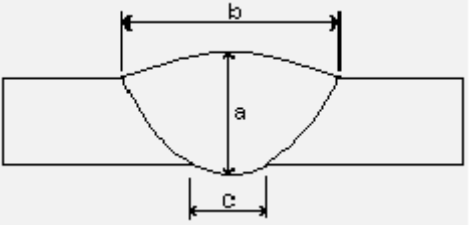


Εικόνα 13.14 Γεωμετρία των ακμών συγκόλλησης για πάχος ελάσματος 4mm

Πίνακας 13.1 Οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης για καθένα από τα διατιθέμενα πάχη

Κράμα - Πάχος	Τάση (V)	Ένταση (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Παροχή αερίου προστασίας (lit/min)	Στρώσεις
AA5083-H116 (4mm)	24	160	65	20	1

Πίνακας 13.2 Μέσοι όροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης

	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης (mm)			Πάχος (mm)
	a	b	c	
	6,5	8,5	4,5	4

13.9.2 Πλέγμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS®

Καθώς η προσομοίωση περιλαμβάνει τη συγκόλληση δύο πανομοιότυπων πλακών, μοντελοποιήθηκε μόνο η μία, προς εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, χρησιμοποιώντας ουσιαστικά τον άξονα συγκόλλησης ως άξονα συμμετρίας για το μοντέλο.

Σε ότι αφορά στην επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος σημειώνεται ότι λόγω των υψηλών ρυθμών θερμοκρασιακής μεταβολής που συμβαίνουν κατά τις συγκολλήσεις αλουμινίου, είναι απαραίτητο να υπάρχει πολύ μικρό μέγεθος στοιχείων και αντιστοίχων χρονικών βημάτων. Είναι

δηλαδή απαραίτητο να επιλεγεί ένα χρονικό βήμα τέτοιο ώστε να μπορεί να συμπεριλάβει τις μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές για δεδομένο κλίμα. Μια προσέγγιση στη σχέση της πυκνότητας του πλέγματος με το χρονικό βήμα εξέλιξης της συγκόλλησης προκύπτει από τις γενικές εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας (Εξισώσεις 12.1, 12.2) θεωρώντας ιστροπικό υλικό με θερμικές ιδιότητες ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία, μεταφορά θερμότητας κατά μια διεύθυνση (π.χ. κατά τον άξονα 'X') και μηδενική εσωτερική πηγή θερμότητας, οπότε και λαμβάνεται η απλοποιημένη εξίσωση:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13.36)$$

Για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας η Εξίσωση παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σχέσης των χωρικών και χρονικών προσαυξήσεων ως:

$$\Delta t = (\Delta x)^2 / \kappa \text{ όπου } \kappa = k / (\rho C_p) \text{ η θερμική διαχυτότητα.}$$

Έτσι, για το κράμα αλουμινίου AA5083 με $k = 117 \text{ W/m-K}$, $\rho = 2660 \text{ kg/m}^3$, και $C_p = 900 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}$ για θερμοκρασία μεγαλύτερη από 400°C , υποθέτοντας μέγεθος στοιχείων 3mm το χρονικό βήμα θα είναι $\Delta t = 0.19 \text{ sec}$.

Συνεπώς για μέγεθος στοιχείων 3mm ένα χρονικό βήμα της τάξης των 0,2sec είναι ικανό να συμπεριλάβει τις μεταβατικές θερμικές μεταβολές στο μοντέλο συγκόλλησης.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 6475 γραμμικά εξαεδρικά στοιχεία με πυκνότητα πλέγματος τέτοια ώστε να προκύψουν 13376 κόμβοι (Εικ. 13.15). Αναλυτικότερα:

- Σε ότι αφορά στα γραμμικά εξαεδρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου C3D8HT δηλαδή στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε συνδιασμένες θερμο-μηχανικές αναλύσεις, είναι πλήρους ολοκλήρωσης (C8D8) με οκτώ κόμβους και δύο σημεία ολοκλήρωσης σε κάθε διάσταση (8 συνολικά σημεία ολοκλήρωσης στις τρεις διαστάσεις - $2 \times 2 \times 2$).

- Στην περιοχή που ορίστηκε ως μέταλλο συγκόλλησης, οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,

- στην περιοχή της ΘΕΖ και ως πλάτος 20mm από τον άξονα συγκόλλησης, οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,

- στην περιοχή από πλάτος 20mm ως και πλάτος 40mm από τον άξονα συγκόλλησης, οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, ενώ,

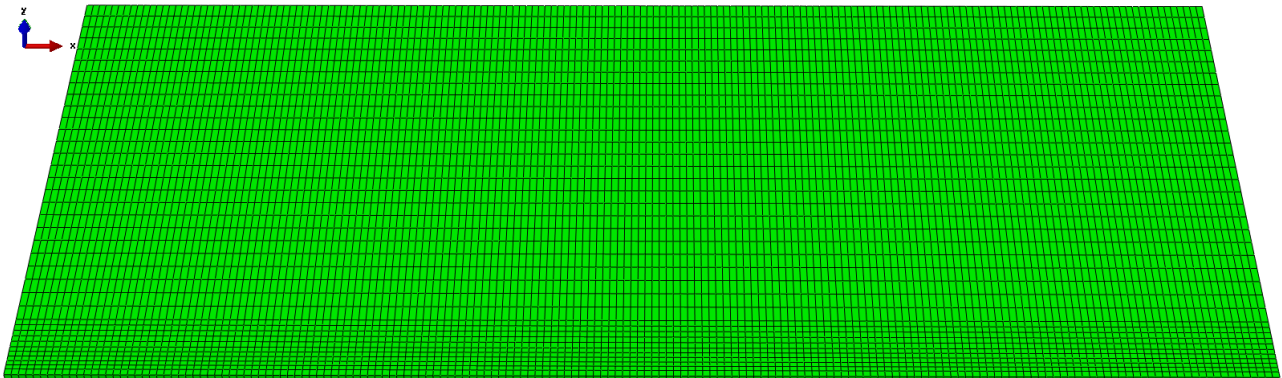
- στην περιοχή από πλάτος 40mm ως και πλάτος 300mm από τον άξονα συγκόλλησης, οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.

Σημειώνεται ότι πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις:

A) με διαστάσεις στοιχείων $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ στην περιοχή που ορίστηκε ως μέταλλο συγκόλλησης, και $2\text{mm} \times 3\text{mm}$ στην περιοχή της ΘΕΖ και ως πλάτος 20mm από τον άξονα συγκόλλησης, (με το διπλάσιο δηλαδή αριθμό στοιχείων στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης και ως τη ΘΕΖ)

B) με διαστάσεις στοιχείων $8\text{mm} \times 4\text{mm}$ στην περιοχή που ορίστηκε ως μέταλλο συγκόλλησης, και $8\text{mm} \times 6\text{mm}$ ή $8\text{mm} \times 10\text{mm}$ στην περιοχή της ΘΕΖ και ως πλάτος 20mm από τον άξονα συγκόλλησης (με διπλάσιο δηλαδή μέγεθος στοιχείων στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης και ως τη ΘΕΖ).

Για τη μεν περίπτωση (A) τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πανομοιότυπα με το μοντέλο αναφοράς και τις πειραματικές καμπύλες με μόνη διαφορά το χρόνο υπολογισμού που ήταν αυξημένος κατά περίπου 20% για το πιο πυκνό πλέγμα ενώ για την περίπτωση (B), εμφανίστηκε διασπορά αποτελεσμάτων σε σύγκριση πάντα με τις πειραματικές καμπύλες και το μοντέλο αναφοράς.



Εικόνα 13.15 Διαστάσεις του ενός από τα δύο υπό προσομοίωση συγκόλλησης ελάσματα

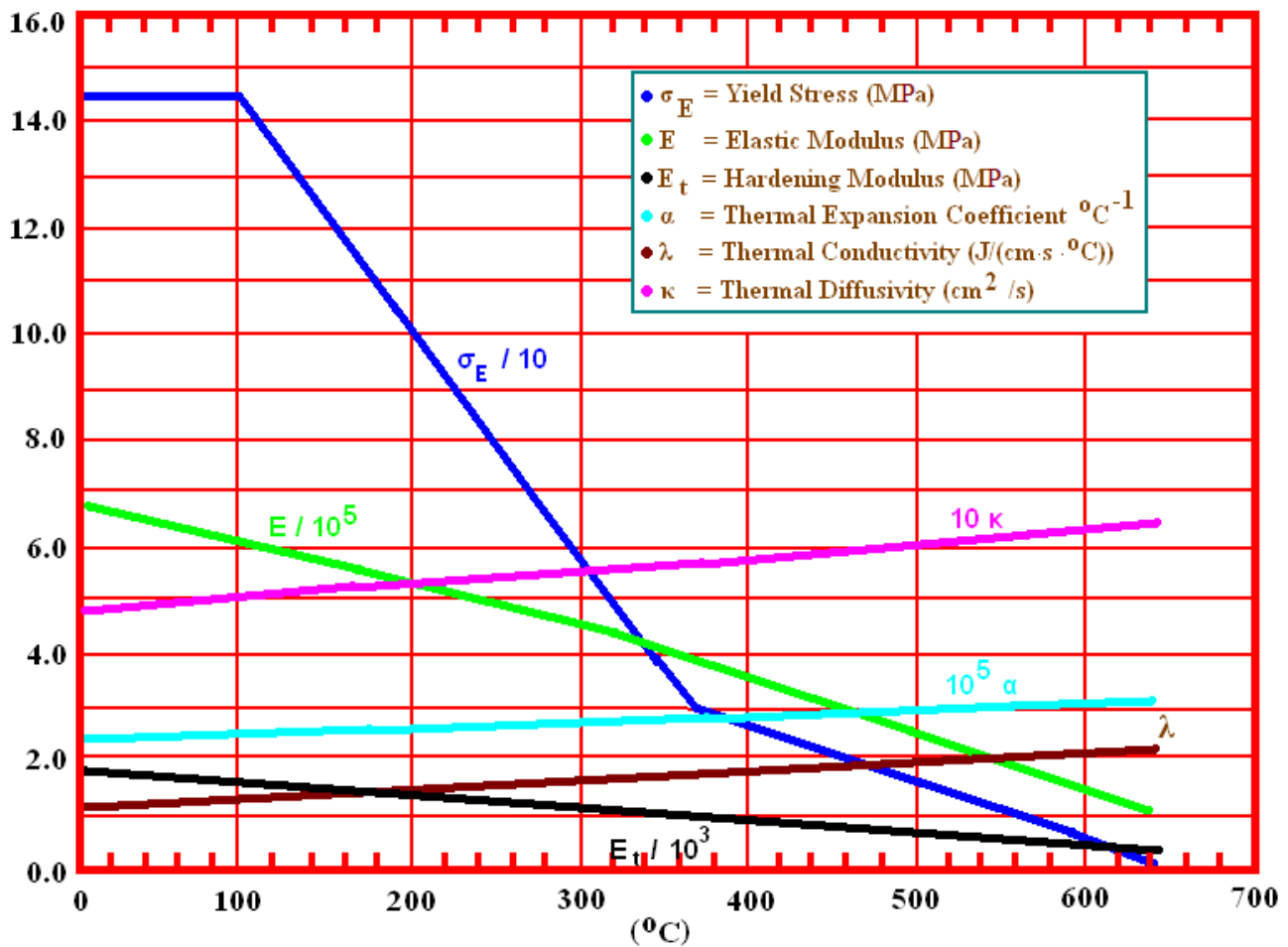
13.9.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο ABAQUS®

Στον Πίνακα 13.3 που ακολουθεί, εμφανίζονται οι βασικές ιδιότητες σε συνθήκες περιβάλλοντος, φυσικές και μηχανικές, του κράματος αλουμινίου 5083-H116 που ελήφθησαν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση.

Πίνακας 13.3 Βασικές ιδιότητες σε συνθήκες περιβάλλοντος, φυσικές και μηχανικές, του κράματος αλουμινίου 5083-H116

Πυκνότητα (kg/m ³)	Αντοχή (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Συντελεστής θερμικής διαστολής (γραμμικός) 20°C (μm/m-°C)	Συντελεστής θερμικής διαστολής (γραμμικός) 250°C (μm/m-°C)	Ειδική θερμότητα J/kg°C	Θερμική αγωγιμότητα W/m°C	Σημείο τήξης (°C)
2660	317	228	70.3	0.33	23.8	26	900	117	591 - 638

Καθώς στη βιβλιογραφία δεν συναντώνται πλήρη στοιχεία σχετικά με τις καμπύλες μεταβολής των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου αα 5083-H116 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για όλο το εύρος των θερμοκρασιών, οι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία καμπύλες ιδιοτήτων του υλικού που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν αποτέλεσμα μελέτης στοιχείων από τη βιβλιογραφία^[105] και από αντίστοιχες διαθέσιμες καμπύλες, που παρουσιάζουν στις μελέτες τους άλλοι ερευνητές, κυρίως του κράματος 5083-O^[97] (Εικ. 13.16), αλλά και άλλων κραμάτων αλουμινίου^{[3],[4],[96]}.



Εικόνα 13.16 Ιδιότητες του κράματος 5083-O σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία^[97]

Έτσι, σε ότι αφορά στις φυσικές ιδιότητες του υπό μοντελοποίηση κράματος AA5083-H116 στο μοντέλο εισήχθησαν, ως γραμμικές εξισώσεις, αυτές του AA5083-O ενώ σε ότι αφορά στις μηχανικές ιδιότητες, μέτρο ελαστικότητας και συντελεστής θερμικής διαστολής, ελήφθησαν όπως για το κράμα AA5083-O και εισήχθησαν στο μοντέλο κι αυτές σαν γραμμικές εξισώσεις ενώ για τις εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία τιμές του ορίου διαρροής χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές και εισήχθησαν στο μοντέλο ως γραμμικές εξισώσεις όπως περιγράφονται στη συνέχεια της παραγράφου.

Συνολικά, από όλες τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υπό μελέτη κράματος αλουμινίου, αντικείμενο διερεύνησης ήταν:

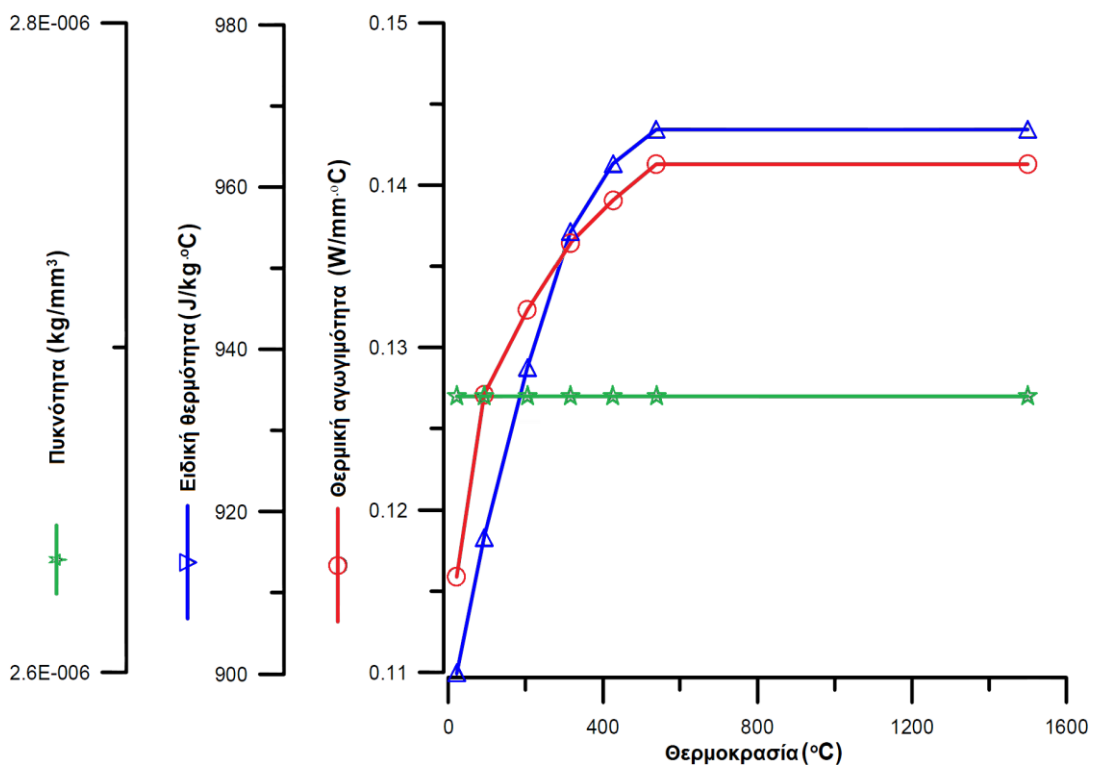
Από τις φυσικές ιδιότητες,

- Η ποκνότητα, ρ
- Η θερμική αγωγιμότητα, k
- Η ειδική θερμότητα, c

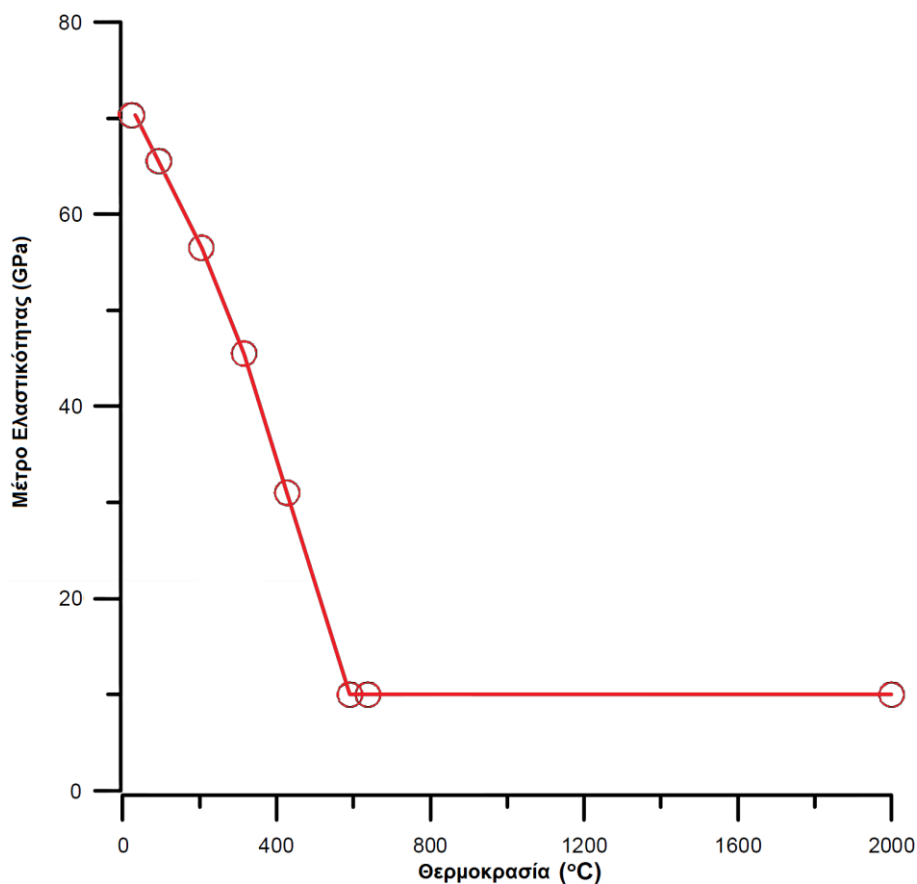
Από τις μηχανικές ιδιότητες

- Το μέτρο ελαστικότητας, E
- Το όριο διαρροής, σ_s
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, α

Οι ανωτέρω ήταν και αυτές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία. Οι υπόλοιπες όπως για παράδειγμα ο λόγος Poisson, ελήφθησαν σταθερές και στην τιμή που λαμβάνουν σε συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. $\nu = 0.33$).



Εικόνα 13.17 Οι βασικές τιμές θερμικών ιδιοτήτων του υπό μελέτη κράματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όπως εισήχθησαν ως δεδομένα στο ABACUS®

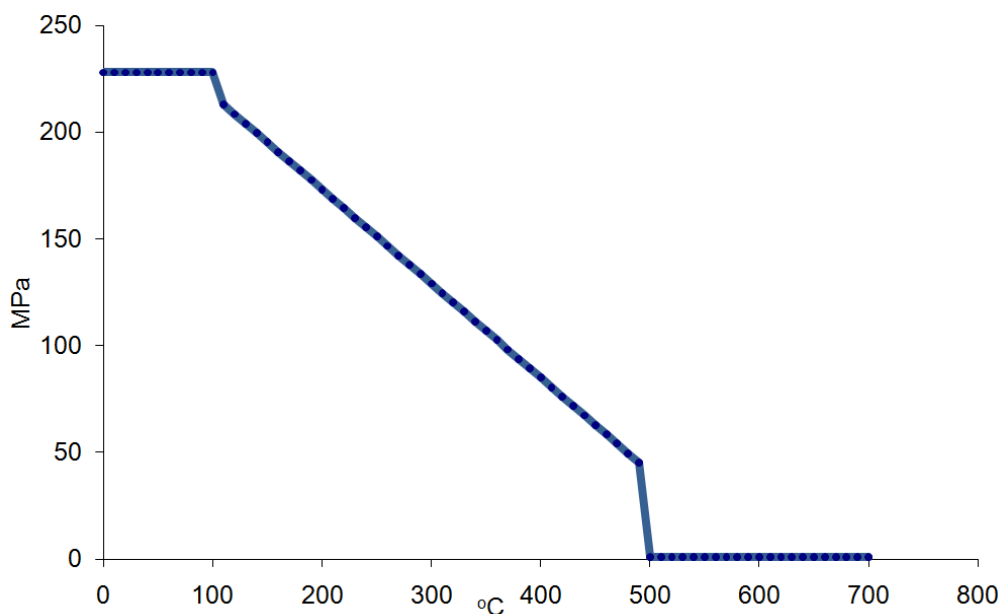


Εικόνα 13.18 Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας του υπό μελέτη κράματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όπως εισήχθησαν ως δεδομένα στο ABACUS®

Ιδιαίτερα σε ότι αφορά στο όριο διαρροής, αξιοποιήθηκε και εφαρμόστηκε η εμπειρική καμπύλη που έχει προταθεί από τους X. K. Zhu και Y. J. Chao^[96]. Θεωρείται δηλαδή ότι η τάση διαρροής έχει τιμή ίση με αυτή για θερμοκρασία δωματίου όταν $0 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$, ενώ, ισούται με το 5% της τιμής αυτής όταν $T \geq T_1 = 2/3$ του σημείου τήξης του υλικού. Για θερμοκρασίες T όπου $100^\circ\text{C} < T < T_1$ το όριο διαρροής ορίζεται ως μια γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Η T_1 , αποτελεί το θερμοκρασιακό όριο που χρησιμοποιείται στις αριθμητικές προσομοιώσεις των συγκολλήσεων για τον υπολογισμό των σχεδόν μηδενικών τάσεων διαρροής κοντά στο σημείο τήξης. Το ποσοστό του 5% έχει επιλεγεί αυθαίρετα για την αποφυγή αριθμητικών δυσκολιών ωστόσο, έπειτα από αρκετές αριθμητικές δοκιμές, αποδείχθηκε ότι δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Έτσι, για το κράμα αλουμινίου 5083-H116 που μελετάται στην παρούσα διατριβή με σημείο τήξης 638°C και όριο διαρροής 228MPa , προκύπτουν:

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_{s0} = 228\text{MPa}, 0 \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ 11,4\text{MPa} + \frac{400 - T}{300} \times 216,6\text{MPa}, 100 < T < 100^\circ\text{C} \\ 5\%\sigma_{s0} \approx 11,4\text{MPa}, T \geq 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (13.36)$$



Εικόνα 13.19 Η εμπειρική καμπύλη του ορίου διαρροής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, των Χ. Κ.Ζhu και Υ. J. Chao^[96], προσαρμοσμένη για το AA5083-H116

13.9.4 Οριακές και συνοριακές συνθήκες

Σε ότι αφορά στις οριακές και συνοριακές συνθήκες που υιοθετήθηκαν, ισχύουν τα εξής:

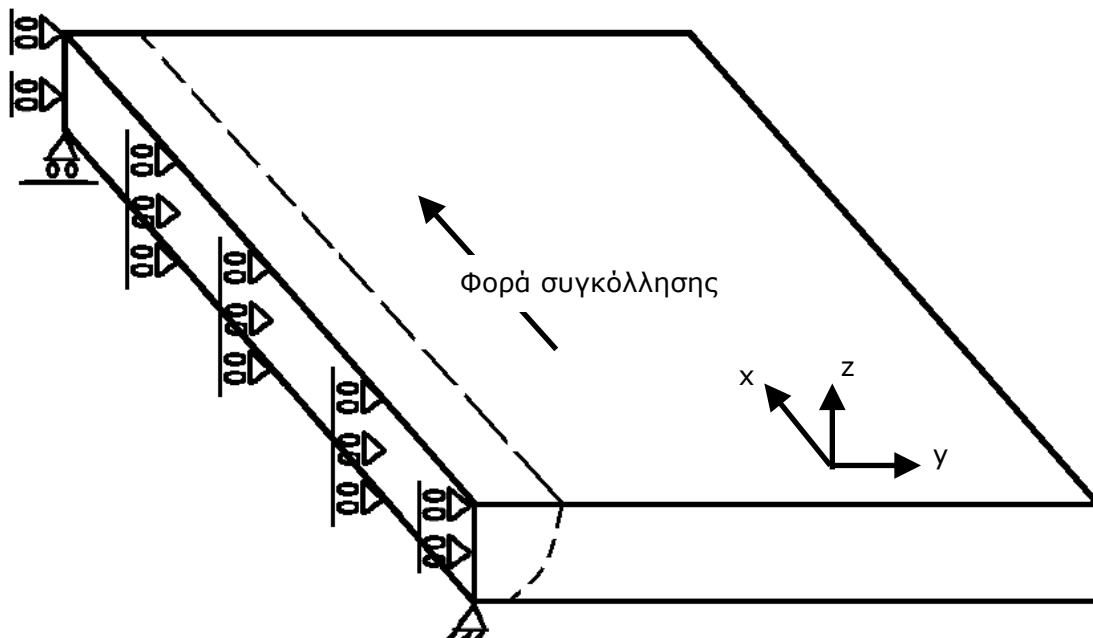
- Η αρχική θερμοκρασία θεωρείται ίση με 25°C
- Καθώς μεταξύ των υπό συγκόλληση πλακών δεν υπάρχει διάκενο και η προετοιμασία των ακμών συγκόλλησης είναι τέτοια ώστε οι δύο πλάκες να είναι σε απόλυτη επαφή σε όλο το μήκος συγκόλλησης (Εικ. 5.8α), θεωρείται ότι υπάρχει συνέχεια υλικού και αγωγή θερμότητας κατά τον άξονα συγκόλλησης καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Έτσι, δεν εφαρμόζεται διαδικασία ενεργοποίησης - απενεργοποίησης στοιχείων παρά ουσιαστικά ένα επιφανειακό θερμικό φορτίο που εξασφαλίζει σε όλο το εύρος του μετάλλου συγκόλλησης θερμοκρασίες μεγαλύτερες του σημείου τήξης του υλικού.
 - Στο επίπεδο συμμετρίας xz (Εικ. 13.20) ορίστηκε αδιαβατική οριακή συνθήκη
 - Απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας αμελούνται καθώς θεωρείται ότι το έτσι κι αλλιώς μεγάλο μέγεθος της θερμικής αγωγιμότητας παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στα θερμικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη συγκόλληση. Ο συνδυασμός της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου με την επιλογή ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων είναι αυτός που

καθορίζει τις μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κατά τη συγκόλληση τέτοιες, ώστε η συνεισφορά σε αυτές των απωλειών συναγωγής και ακτινοβολίας να θεωρούνται αμελητέες.

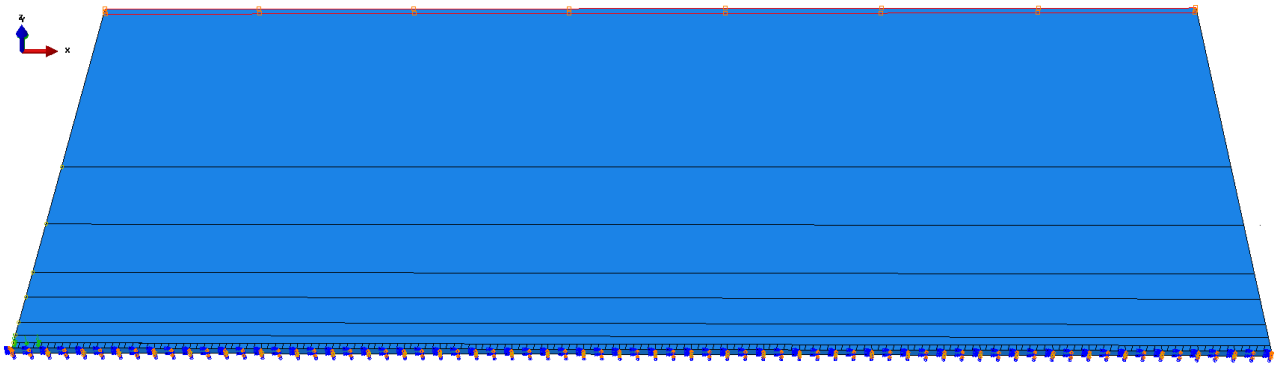
- Προς ενίσχυση των ανωτέρω, και με σκοπό να εξασφαλιστούν οι σημαντικές θερμοκρασιακές μεταβολές, ανά περιοχή, λόγω συγκόλλησης και εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας και των μεγάλων διαστάσεων των πλακών, ένα θερμοκρασιακό σύνορο 25°C εφαρμόζεται στην παράλληλη με τον άξονα συγκόλλησης ακμή της πλάκας στο πλήρες πλάτος του ελάσματος, σε απόσταση 300mm από τον άξονα συγκόλλησης.

- Κατά την έναρξη της συγκόλλησης το έλασμα θεωρείται ελεύθερο τάσεων

- Σε ότι αφορά στους μηχανικούς περιορισμούς μετατόπισης σημειώνεται ότι καθώς μοντελοποιείται η μισή πλάκα, ήταν αδύνατο να προσομοιωθούν οι ακριβείς περιορισμοί που εφαρμόστηκαν κατά το πείραμα (Παράγραφος 11.2) καθώς αυτοί δεν ήταν συμμετρικοί ως προς τον άξονα συγκόλλησης. Έτσι, αυτοί είναι τέτοιοι ώστε αφενός να εξασφαλίζεται ότι ο άξονας συγκόλλησης είναι και άξονας συμμετρίας του συστήματος (μοντελοποίηση μόνο της μια πλάκας) αφετέρου, να επιτρέπεται η παραμόρφωση λόγω συγκόλλησης με τρόπο ρεαλιστικό (Εικ. 13.20). Στο επίπεδο xz που ορίζεται ο άξονας συγκόλλησης περιορίζεται η μετατόπιση κατά y ενώ, προκειμένου να αναπτυχθούν ελεύθερα οι γωνιακές και καμπτικές παραμορφώσεις η ακμή που ορίζει την έναρξη της συγκόλλησης περιορίστηκε κατά x και y και η ακμή που ορίζει το πέρας της συγκόλλησης περιορίστηκε κατά y (Εικ. 13.20).



Εικόνα 13.20 Σκαριφηματική απεικόνιση των μηχανικών συνοριακών συνθηκών που υιοθετήθηκαν κατά την ανέγερση του μοντέλου



Εικόνα 13.21 Οι θερμικές και μηχανικές συνοριακές συνθήκες του μοντέλου

13.9.5 Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης

Προκειμένου για τη μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης ή αλλιώς της εισερχόμενης θερμότητας, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης (Πιν. 6.8 ή 13.2) αλλά και δεδομένων από τη βιβλιογραφία (Παράγραφος 12.2). Ουσιαστικά, υιοθετείται ένα συνδυαστικό μοντέλο πρώτης και δεύτερης γενιάς μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας ως εξής:

α) Καθώς $b = 8,5\text{mm}$ και παρόλο που $c = 4,5\text{ mm}$ (Πιν. 6.8 ή 13.2) ορίζεται ένα πλάτος μετάλλου συγκόλλησης ίσο με 8mm (σχετικά υπερδιαστασιοποιημένο σε σύγκριση με το πειραματικό μέσο πλάτος της τάξης των $6,5\text{mm}$). Το πλάτος αυτό ορίζεται και ως το πλάτος της κατανομής της εισερχόμενης θερμότητας από το τόξο συγκόλλησης.

β) Αναφερόμενοι στην διπλή ελλειψοειδή (Εικ. 12.8 ή 13.22) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής, βιβλιογραφικά^[104] προτείνεται σαν λογική εκτίμηση για τη λήψη της διάστασης C_f μπροστά από την πηγή τιμή ίση με το μισό του πλάτους συγκόλλησης και για την απόσταση C_r πίσω από την πηγή τιμή ίση με το διπλάσιο του πλάτους συγκόλλησης. Δηλαδή, $C_f = 4$ και $C_r = 16$. Έτσι, ορίζοντας το πλάτος της πηγής στα 8mm προκύπτει συνολικό μήκος πηγής 20 mm

γ) Ορίζεται παραλληλόγραμμη επιφανειακή κατανομή θερμότητας με διαστάσεις $8\text{mm} \times 20\text{mm}$ (Εικ. 13.23)

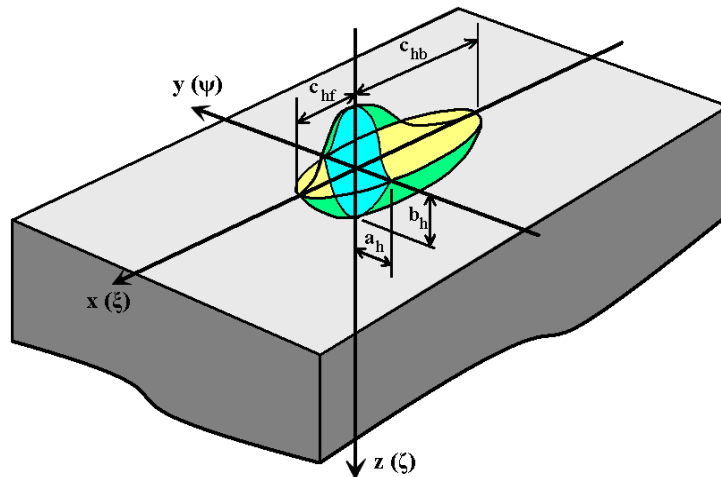
δ) Η ισχύς της επιφανειακής αυτής κατανομής ορίζεται τέτοια ώστε να επιτυγχάνονται θερμοκρασίες ανώτερες του σημείου τήξης ($\sim 638^\circ\text{C}$) σε όλο το πάχος του μετάλλου στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης.

Γίνεται προφανές πως με την υιοθέτηση της επιφανειακής παραλληλόγραμμης κατανομής και την απαίτηση για επίτευξη θερμοκρασιών της τάξης του σημείου τήξης σε όλο το πάχος, στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, ουσιαστικά μόνο μέσω αγωγής θερμότητας, η ισχύς της

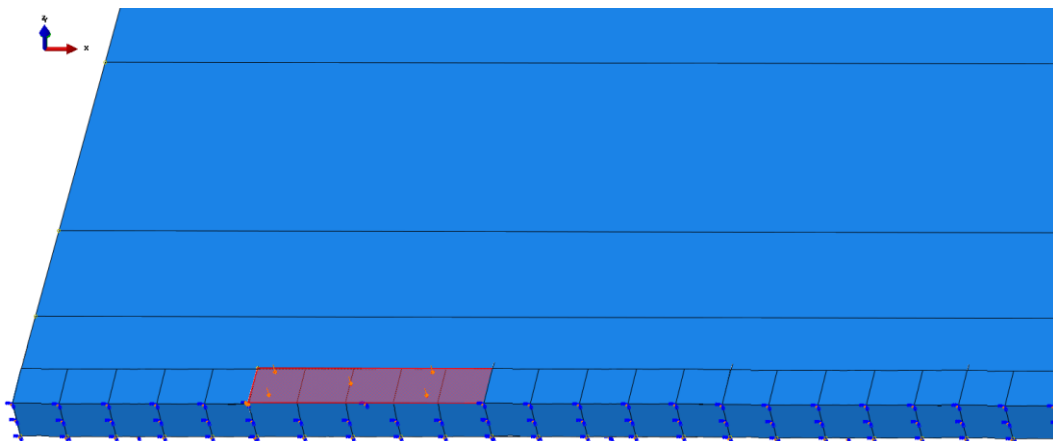
εφαρμοζόμενης κατανομής είναι πολλαπλάσιο από αυτή που περιγράφεται πειραματικά από τις συνθήκες συγκόλλησης (Πιν. 6.7 ή Πιν. 13.1).

Πράγματι, από τον Πίνακα 6.7 (ή Πιν. 13.1) προκύπτει ενέργεια $0,36\text{KJ/mm}$ ή λαμβάνοντας υπόψη και συντελεστή απωλειών $n = 64,3$, συνήθη τιμή για συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου, προκύπτει ενέργεια τόξου ίση με $0,23\text{ KJ/mm}$.

Για το μοντέλο και προκειμένου να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις που τέθηκαν, η εισερχόμενη ενέργεια που ορίζεται είναι της τάξης των $0,48\text{ KJ/mm}$, σαφώς μεγαλύτερη από την πειραματική γεγονός ωστόσο αναμενόμενο αν συνυπολογιστεί η επιλογή της επιφανειακής θερμικής κατανομής, σε συνδυασμό με τη μεγάλη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και η παράβλεψη της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας στο κέντρο της δέσμης του πλάσματος του τόξου σε συνδυασμό με τη μικρή θερμική αγωγιμότητα του Αργού (ως αέριο προστασίας).



Εικόνα 13.22 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπλής ελλειψοειδούς



Εικόνα 13.23 Η κατανομή της πηγής θερμότητας στο μοντέλο

13.9.6 Εκτέλεση της προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε, πέρα από τους ορισμούς και τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν κατά την ανέγερση του μοντέλου, ιδιαίτερα σημαντικές για τα εξαγόμενα αποτελέσματα θεωρούνται οι ιδιότητες του υλικού που εισήχθησαν ως μεταβαλλόμενες με τη θερμοκρασία.

Έτσι, πέρα από την προφανή εκτέλεση του μοντέλου με τις τιμές της πυκνότητας ρ , της ειδικής θερμότητας c , της θερμικής αγωγιμότητας k , του μέτρου ελαστικότητας E , του ορίου διαρροής σ_s και του συντελεστή θερμικής διαστολής α , ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, πραγματοποιήθηκε και η εκτέλεση μιας σειράς άλλων μοντέλων με κατά περίπτωση μία ή και περισσότερες τιμές ιδιοτήτων υλικού σταθερές, όπως ορίζονται σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Τελικός σκοπός είναι αφενός η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από το πλήρες μοντέλο (με τις προαναφερόμενες παραδοχές) αφετέρου, η μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων του υλικού στα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Ως δεδομένα σύγκρισης ορίζονται οι θερμικοί κύκλοι της συγκόλλησης, οι προκύπτουσες στρεβλώσεις - παραμορφώσεις, με έμφαση στη γωνιακή παραμόρφωση και οι παραμένουσες τάσεις.

Στις γραμμές που ακολουθούν, φαίνεται η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για τα διαφορετικά μοντέλα που εκτελέστηκαν. Έτσι, π.χ. $\rho(t)$ σημαίνει εισαγωγή ιδιότητας εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ενώ, ρ_0 εισαγωγή σταθερής τιμής ιδιότητας που ισχύει σε συνθήκες περιβάλλοντος. Από T0 - T4 αναφέρονται τα προγράμματα που εκτελέστηκαν μελετώντας μόνο τις ιδιότητες που ενδέχεται να επηρεάσουν μόνο τους προσομοιωμένους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης (θερμικό μέρος μοντελοποίησης) ενώ από M0[T0] - M3[T3] αναφέρονται τα προγράμματα που εκτελέστηκαν μελετώντας τις προσομοιωμένες παραμένουσες τάσεις και στρεβλώσεις/παραμορφώσεις για τα διαφορετικά T0 - T4 (θερμικό μέρος μοντελοποίησης). Προφανώς τα μοντέλα T0 - T4 και M0[T0] - M3[T3] ταυτίζονται απλά διαφοροποιείται η κωδική τους ονομασία ανάλογα αν μελετάται μόνο το θερμικό ή μόνο το μηχανικό μέρος της μοντελοποίησης.

- 1) T0 : $\rho = \rho(t)$, $c = c(t)$, $k = k(t)$
- 2) T1 : $\rho = \rho_0$, $c = c(t)$, $k = k(t)$
- 3) T2 : $\rho = \rho_0$, $c = c_0$, $k = k(t)$
- 4) T3 : $\rho = \rho_0$, $c = c_0$, $k = k_0$

- 1) M0[T0] : E = E(t) , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 2) M1[T1] : E = E(t) , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 3) M2[T2] : E = E(t) , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 4) M3[T3] : E = E(t) , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$

=====

- 5) M4[T1] : E = E_o , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 6) M5[T1] : E = E(t) , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 7) M6[T1] : E = E(t) , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_{s_o}$
- 8) M7[T1] : E = E_o , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$

- 9) M8[T2] : E = E_o , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 10) M9[T2] : E = E(t) , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 11) M10[T2] : E = E_o , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$

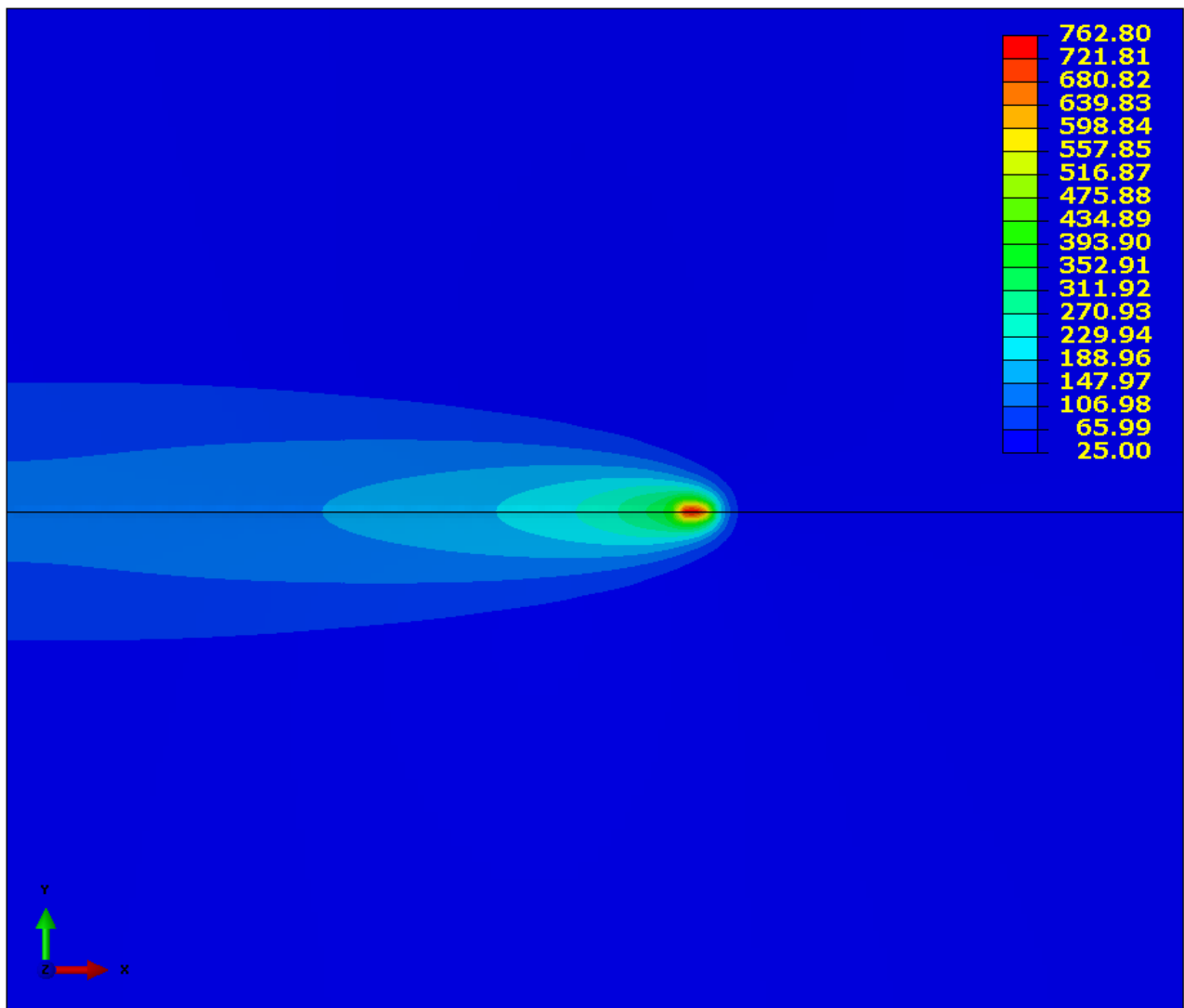
- 12) M11[T3] : E = E_o , $\alpha = \alpha(t)$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 13) M12[T3] : E = E(t) , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$
- 14) M13[T3] : E = E_o , $\alpha = \alpha_o$, $\sigma_s = \sigma_s(t)$

Κεφάλαιο 14°

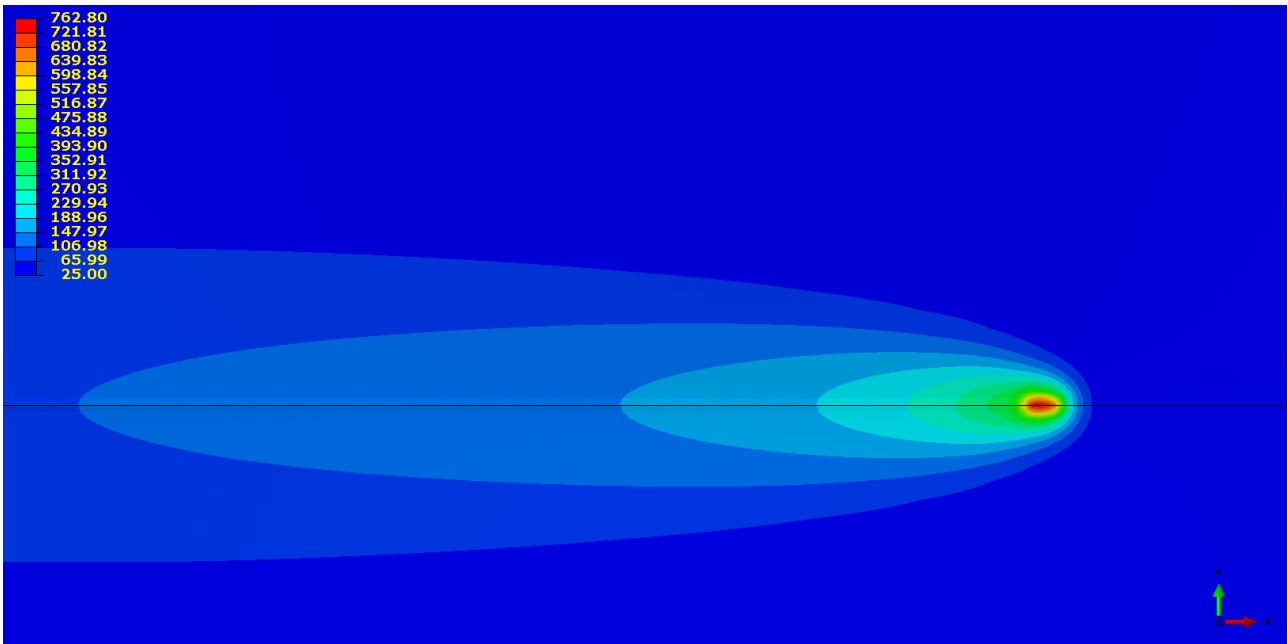
Αποτελέσματα και συζήτηση μοντελοποίησης

14.1 Αρχικές παρατηρήσεις

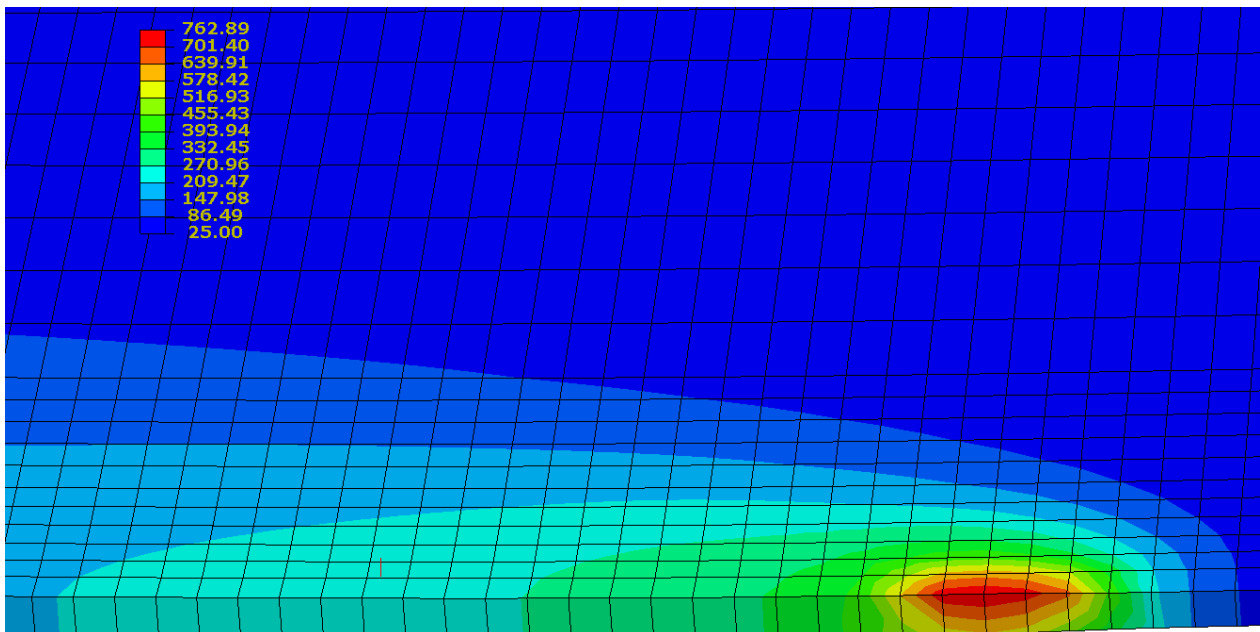
Παρατίθενται Εικόνες από τα αποτελέσματα του μοντέλου M0[T0] (όλες οι ιδιότητες του υλικού εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία).



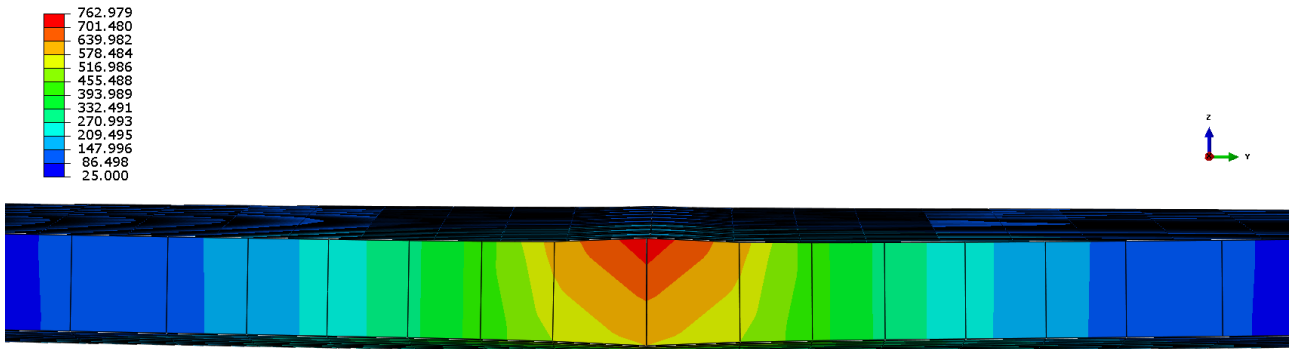
Εικόνα 14.1 Η κατανομή των θερμοκρασιών όταν το τόξο βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής του



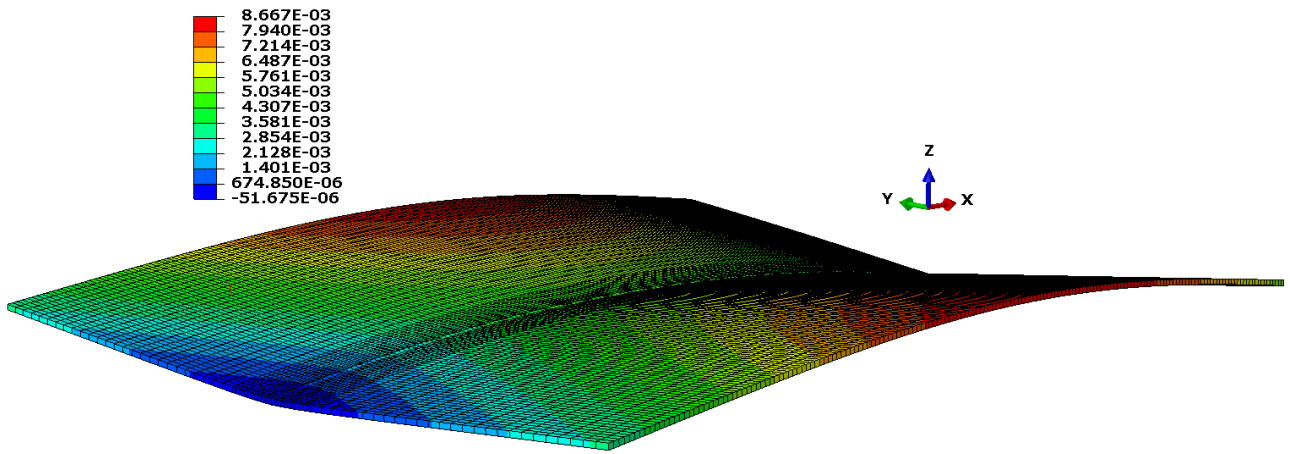
Εικόνα 14.2 Μια πιο κοντινή παρατήρηση της κατανομής των θερμοκρασιών όταν το τόξο βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής του



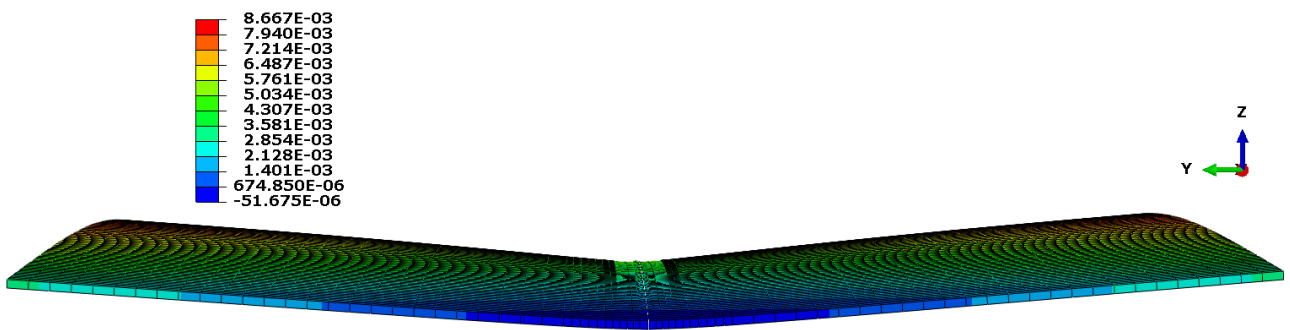
Εικόνα 14.3 Κατανομή θερμοκρασιών στις τρεις διαστάσεις, στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης, σε τυχαίο σημείο της διαδρομής του τόξου



Εικόνα 14.4 Κατανομή θερμοκρασιών στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης, στη μέση της διαδρομής του τόξου και σε εγκάρσια τομή yz

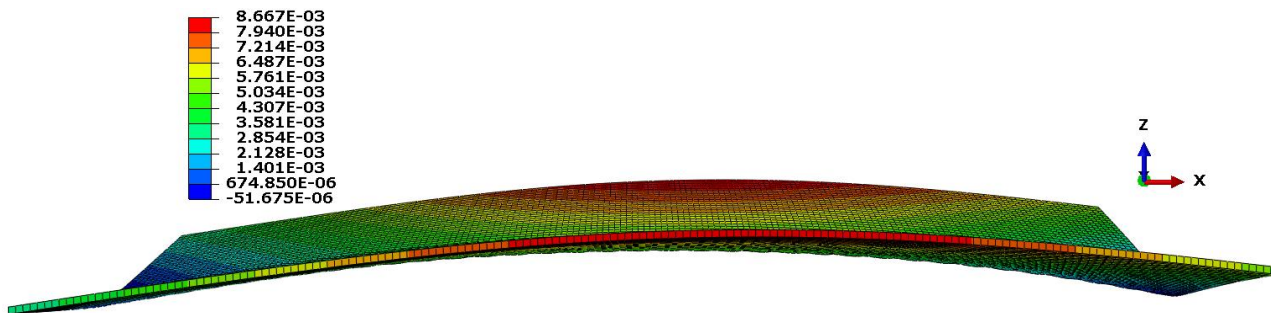


(α)

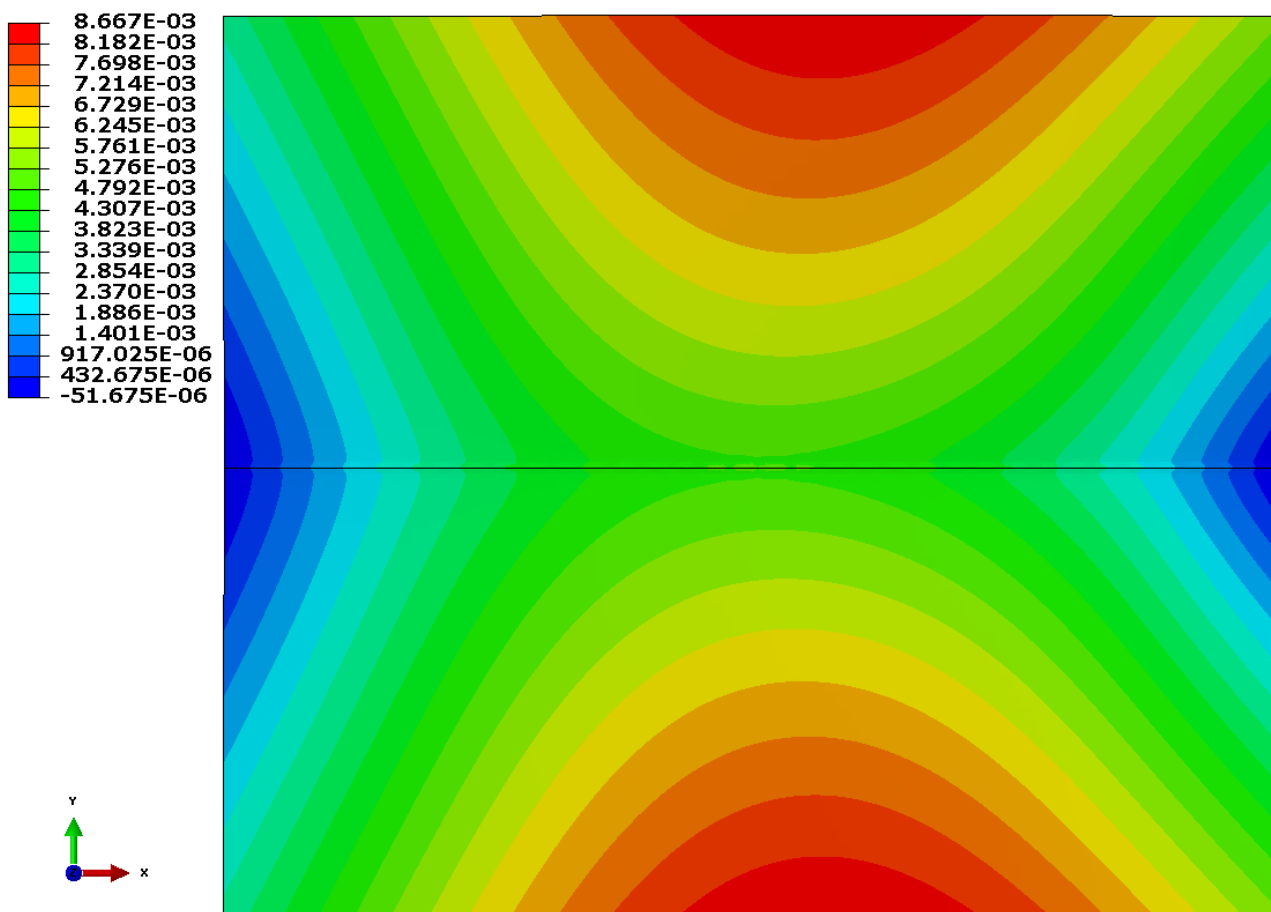


(β)

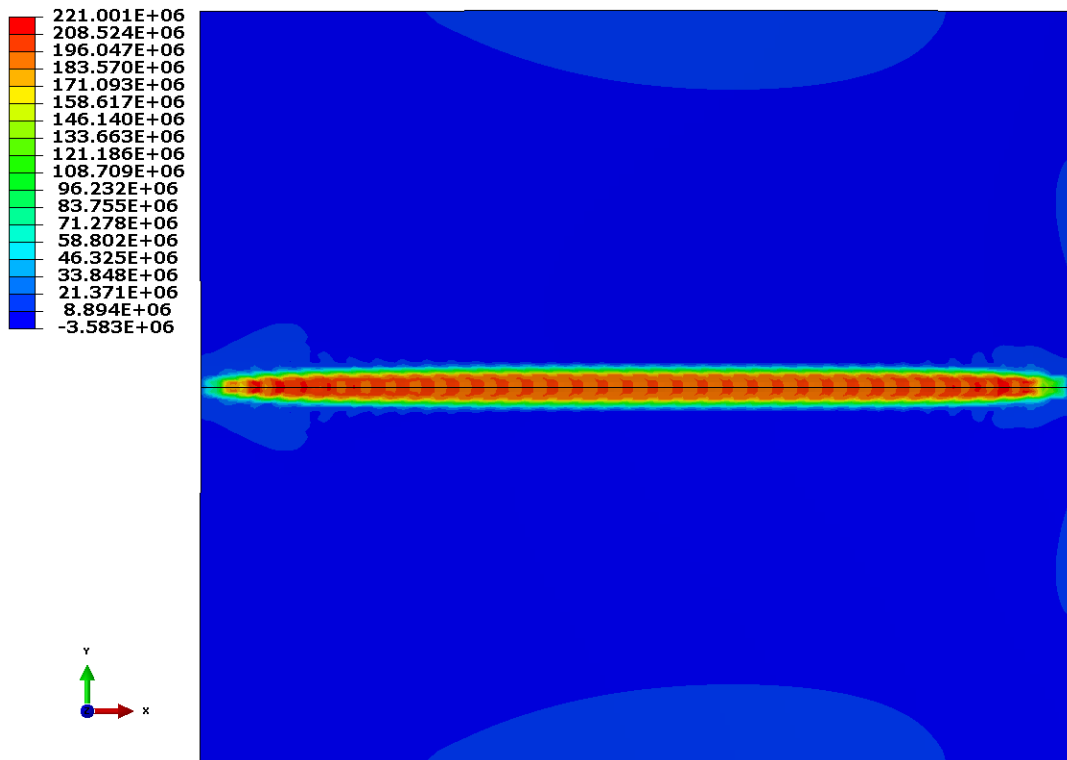
Εικόνα 14.5 Όψεις της τελικής κατάστασης (μετά την απόψυξη) των στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με καταγραφή των παραμορφώσεων κατά z



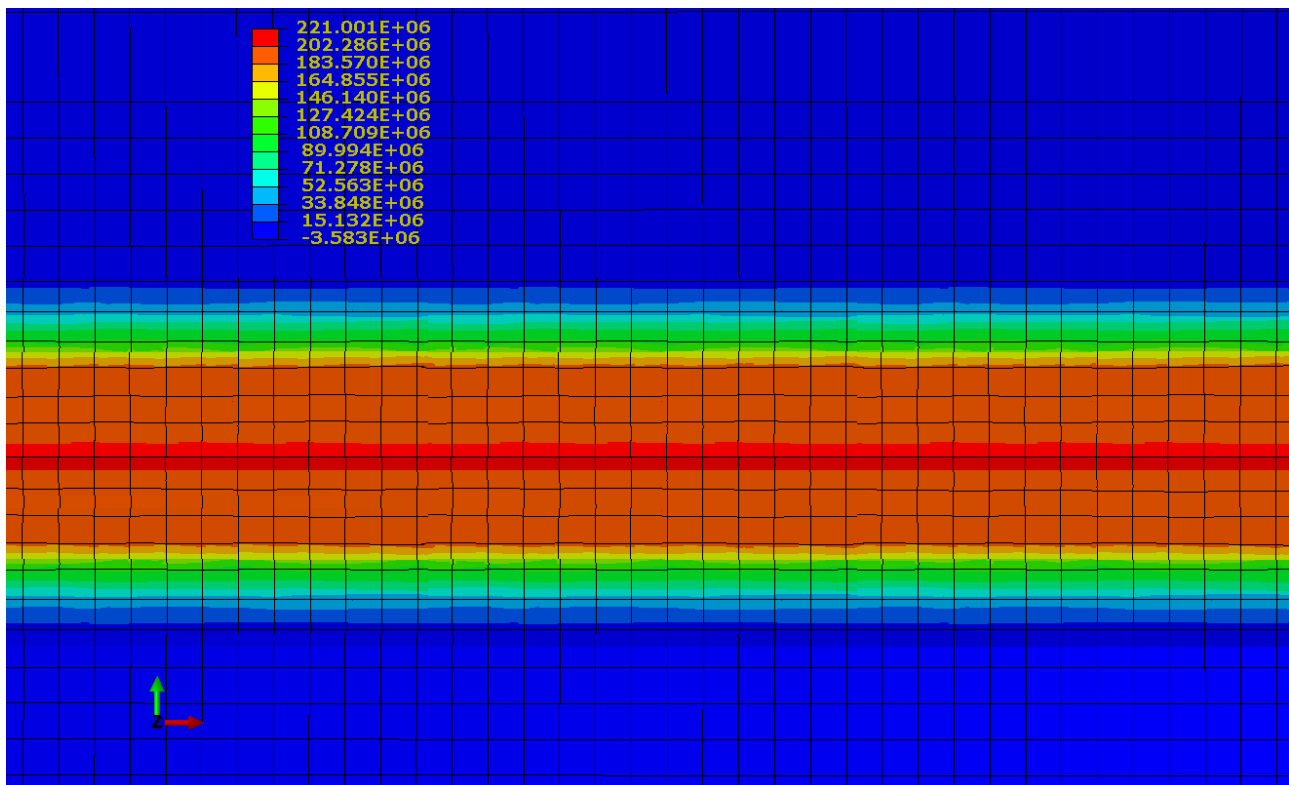
Εικόνα 14.6 Όψη της τελικής κατάστασης (μετά την απόψυξη) των στρεβλώσεων/παραμορφώσεων με καταγραφή των παραμορφώσεων κατά z



Εικόνα 14.7 κατανομή των τελικών παραμορφώσεων κατά z



Εικόνα 14.8 Κατανομή των τελικών μέγιστων κύριων τάσεων



Εικόνα 14.9 Κοντινή άποψη της κατανομής των τελικών μέγιστων κύριων τάσεων σε περιοχή της συγκόλλησης στο μέσο μήκος

Από την αρχική οπτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για το μοντέλο M0[T0], όπως απεικονίζονται στις Εικόνες 14.1 – 14.9, μπορούν να εξαχθούν τα εξής αρχικά συμπεράσματα:

A) Η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται στην επιφάνεια είναι της τάξης των 760°C (Εικ. 14.1, Εικ. 14.2) η οποία κρίνεται ρεαλιστική. Ταυτόχρονα, όπως προκύπτει από το φάσμα των θερμοκρασιών, σε πλάτος τάξης μεγέθους 4mm, εκατέρωθεν του άξονα συγκόλλησης, εμφανίζονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 580 °C κάτι που σημαίνει ότι προσομοιώνεται λίμνη συγκόλλησης παρόμοιου μεγέθους με αυτή που προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα.

B) Η θερμοκρασία στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης προς την επιφάνεια ρίζας (Εικ. 14.3) είναι εντός του εύρους θερμοκρασιών που ορίζει τήξη του υλικού (μεγαλύτερη από 578 °C). Συνεπώς προσομοιώνεται τήξη του υλικού σε όλο το πάχος.

Γ) Συνολικά σε ολόκληρη την περιοχή που ορίζει τη λίμνη συγκόλλησης προσομοιώνονται θερμοκρασίες ανώτερες του σημείου τήξης με τρόπο τέτοιο ώστε να ανταποκρίνονται στα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης (Εικ. 6.7γ, Πιν. 6.8, Πιν. 13.2, Εικ. 14.4) .

Δ) Η μορφή της κατανομής των μεταβατικών θερμοκρασιών τόσο, κυρίως, στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης όσο και έξω από αυτή πλησιάζει σε κατανομή διπλού ελλειψοειδούς.

Ε) Το μοντέλο απέδωσε τελική μορφή γωνιακής και καμπτικής παραμόρφωσης αντίστοιχη με αυτή που προέκυψε από την εκτέλεση του πειράματος (Εικ. 11.11 Εικ. 14.5, Εικ. 14.6).

ΣΤ) Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατά z είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή που υπολογίστηκε από το πείραμα (Εικ. 11.11 Εικ. 14.5, Εικ. 14.6).

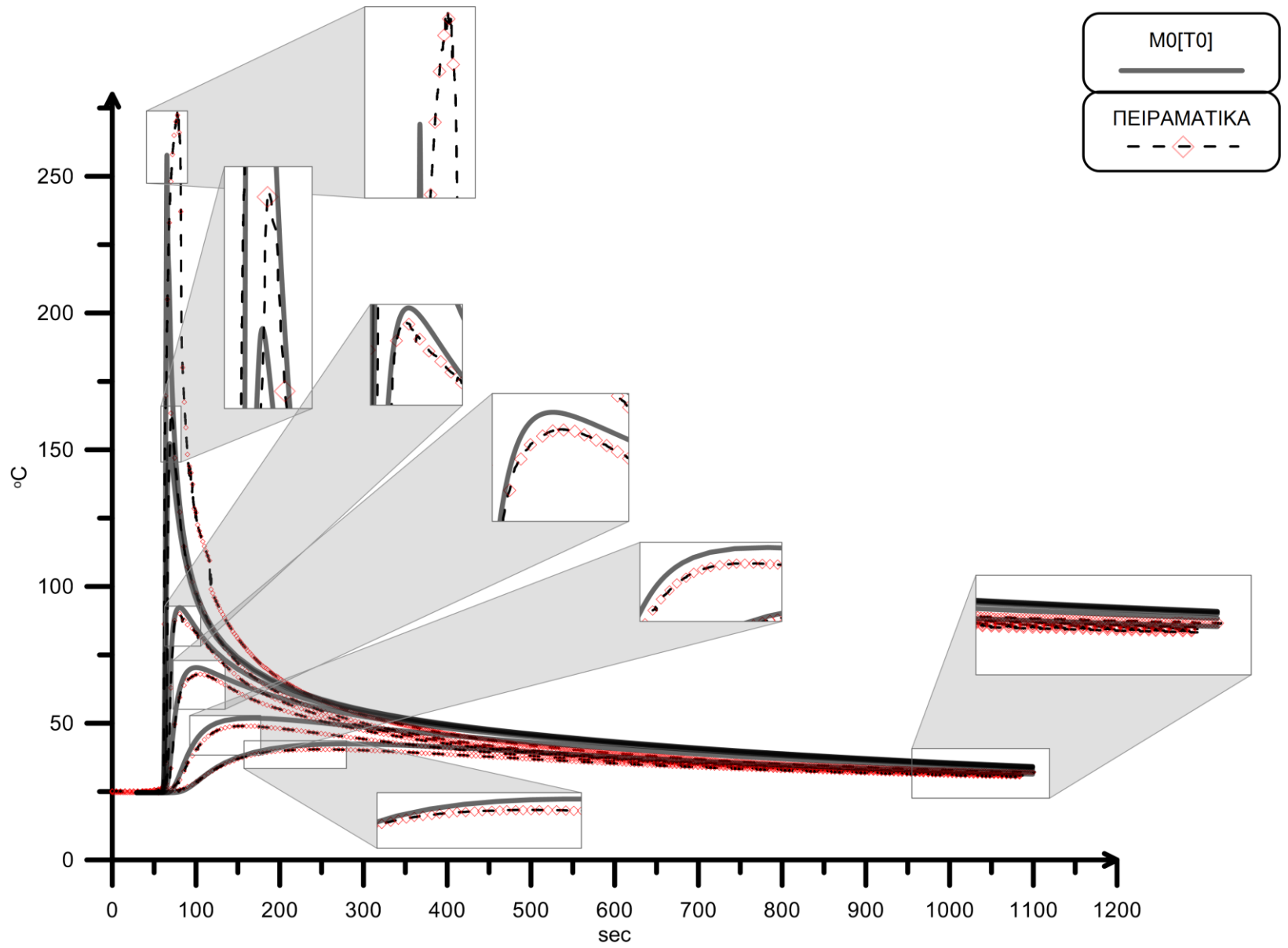
Ζ) Η κατανομή των μέγιστων κύριων τάσεων έχει την αναμενόμενη μορφή με τη μέγιστη τιμή της εντός του μετάλλου συγκόλλησης και της τάξης του ορίου διαρροής (>220MPa).

14.2 Σύγκριση μοντέλου με τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης

Στην Παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής μελέτης με τα αποτελέσματα του μοντέλου M0[T0] (όλες οι ιδιότητες εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία).

14.2.1 Σύγκριση θερμικών κύκλων

Η σύγκριση των πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από την προσομοίωση συνοψίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 14.10 που ακολουθεί.



Εικόνα 14.10 Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από την προσομοίωση (μοντέλο Μ0[Τ0])

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα της Εικόνας 14.10, οι μορφές των καμπυλών των θερμικών κύκλων από την προσομοίωση, στα σημεία μελέτης, είναι σχεδόν ταυτόσημες με αυτές που προέκυψαν πειραματικά από τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων τόσο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης όσο και κατά τη διαδικασία της απόψυξης.

Όπως φαίνεται, για τα σημεία που απέχουν 10mm και 20mm από τον άξονα συγκόλλησης υπάρχει μια μικρή υποεκτίμηση των τιμών προσομοίωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές ενώ, για τα σημεία που απέχουν 40mm, 60mm, 100mm και 150mm από τον άξονα συγκόλλησης οι τιμές προσομοίωσης είναι ελαφρώς υπερεκτιμημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές.

Επιπλέον, εμφανίζεται μια μικρή υπερεκτίμηση όλων των τελικών τιμών προσομοίωσης, στο τέλος της απόψυξης που ορίζεται στα 1100sec, προφανώς εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά τη μοντελοποίηση φαινόμενα συναγωγής και ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα όμως, η πραγματικά μικρή αυτή διαφορά ενισχύει την ορθότητα της παραδοχής για μικρή επίδραση των φαινομένων αυτών στη λήψη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίν. 14.1) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα τις σύγκρισης μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0].

Πίνακας 14.1 Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0] σε ότι αφορά στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης

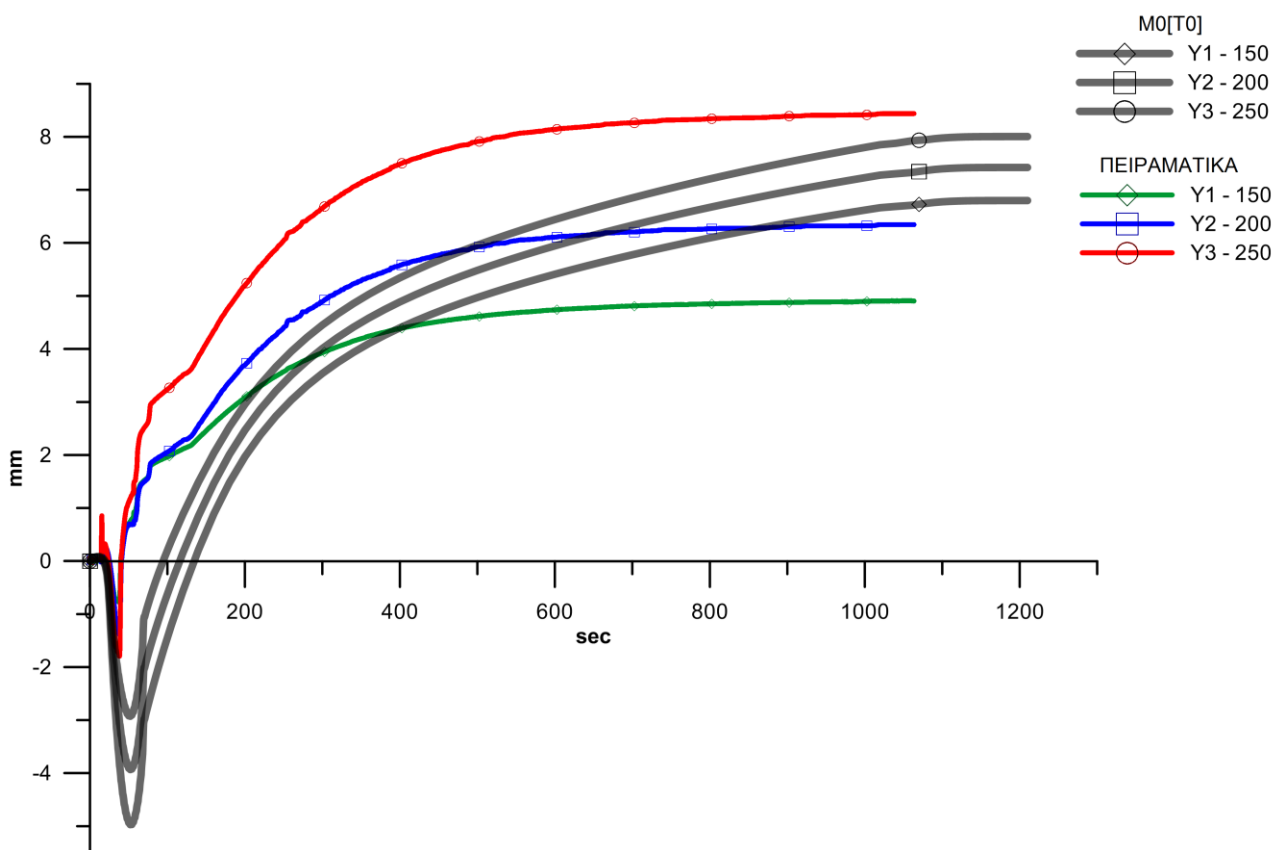
Τιμές	Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης						Αντικείμενο μελέτης
	10mm	20mm	40mm	60mm	100mm	150mm	
Μέγιστες τιμές	273,20	164,00	90.63	67.95	48.98	40.47	Πείραμα
	258,12	152,69	92,70	70,75	52,28	42,84	Μοντέλο
Διαφορά Μέγιστων τιμών (Πείραμα μείον Μοντέλο) [%]	15,08 [5,52]	11,31 [6,90]	-2,07 [-2,28]	-2,80 [-4,12]	-3,42 [-6,98]	-2,57 [-6,35]	
Τελικές τιμές	31,88	31,22	30,89	30,80	30,53	30,32	Πείραμα
	34,58	34,54	34,39	34,13	33,32	31,80	Μοντέλο
Διαφορά τελικών τιμών (Πείραμα μείον Μοντέλο) [%]	-2,70 [-8,46]	-3,32 [-10,63]	-3,49 [-11,31]	-3,32 [-10,79]	-2,79 [-9,14]	-1,48 [-4,90]	

Το σφάλμα (Πιν. 14.1), σε ότι αφορά στις μέγιστες τιμές, δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το 7% ενώ, σε ότι αφορά στις τελικές τιμές μπορεί να αγγίζει το 12% (40mm από τον άξονα συγκόλλησης τιμή θερμοστοιχείων 30,89°C, τιμή από μοντέλο 34,39 °C) ωστόσο οι τιμές είναι χαμηλές και σαφώς συγκρίσιμες με τις πειραματικές.

Συνολικά λοιπόν, μπορούμε να θεωρήσουμε με ασφάλεια πως σε ότι αφορά στο θερμικό κομμάτι της μοντελοποίησης το σφάλμα σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι μικρότερο του 10% ενώ η μορφή των καμπυλών (πειραματικών - προσομοίωσης) ταυτίζεται απόλυτα.

14.2.2 Σύγκριση στρεβλώσεων - παραμορφώσεων

Η σύγκριση των πειραματικών κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση (U3) συνοψίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 14.11 που ακολουθεί.



Εικόνα 14.11 Σύγκριση των πειραματικών κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση

Οι μορφές των καμπυλών που προκύπτουν από την προσομοίωση έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις πειραματικές καθώς και σ' αυτές αρχικά εμφανίζονται αρνητικές τιμές που στην συνέχεια, κατά την απόψυξη, γίνονται θετικές και τελικά ισορροπούν μετά από πάροδο 1100sec (Εικ. 14.11).

Πίνακας 14.2 Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου Μ0[Τ0] σε ότι αφορά στη συνολική κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Τιμές	Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης			Αντικείμενο μελέτης
	150mm	200mm	250mm	
Min	-4,971	-3,933	-2,927	Πείραμα
	-1,796	-1,394	-0,776	Μοντέλο
Διαφορά min (Πείραμα - μοντέλο) [%]	3,175 [-176,77]	2,539 [-182,07]	2,151 [-277,03]	
Max	4,911	6,343	8,250	Πείραμα
	6,798	7,422	8,005	Μοντέλο
Διαφορά max (Πείραμα - μοντέλο) [%]	-1,888 [-38,44]	-1,079 [-17,02]	0,245 [2,97]	

Η βασική διαφορά των καμπυλών που προέκυψαν από το μοντέλο είναι ότι εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερη αρνητική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες (Πιν. 14.2). Το σφάλμα σε ότι αφορά στις μέγιστες αρνητικές τιμές μεταξύ πειράματος και μοντέλου είναι εξαιρετικά μεγάλο με το μοντέλο να προβλέπει από περίπου 1,8 έως και σχεδόν 2,8 φορές μεγαλύτερη μέγιστη αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, από αυτή που μετρήθηκε πειραματικά (απόσταση αντίστοιχα από 150mm έως 250mm από τον άξονα συγκόλλησης).

Επιπλέον, αντίστοιχα μεγάλο είναι και το χρονικό διάστημα που το μοντέλο προβλέπει αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης σε σύγκριση με τις πειραματικές καμπύλες. Σύμφωνα με το πείραμα, η κατακόρυφη μετατόπιση αποκτά θετικό πρόσημο σχεδόν με το πέρας της συγκόλλησης (67sec) ενώ το μοντέλο προβλέπει αλλαγή πρόσημου σε σχεδόν διπλάσιο χρόνο (140sec).

Εξαιτίας των ανωτέρω, οι καμπύλες που προέκυψαν από το μοντέλο, αδυνατούν να ακολουθήσουν την ακριβή μορφή των αντίστοιχων πειραματικών και μόνο μετά την πάροδο περίπου 1000sec φαίνεται να επέρχεται εξομάλυνση (Εικ. 14.11).

Σε ότι αφορά στις τελικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, φαίνεται ότι το σφάλμα μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοίωσης μειώνεται όσο αυξάνει η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης (Πιν. 14.2). Έτσι, στο σημείο που βρίσκεται σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης συναντάται η μικρότερη απόκλιση μεταξύ πειράματος και μοντέλου 2,97%.

Τέλος, φαίνεται ότι η επίδραση της μη υιοθέτησης απωλειών συναγωγής και ακτινοβολίας έχει ως συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι να επέλθει πλήρη ισορροπία στις παραμορφώσεις (απαιτήθηκαν περίπου 150sec περισσότερα ανάλυσης μέχρι να επέλθει ισορροπία).

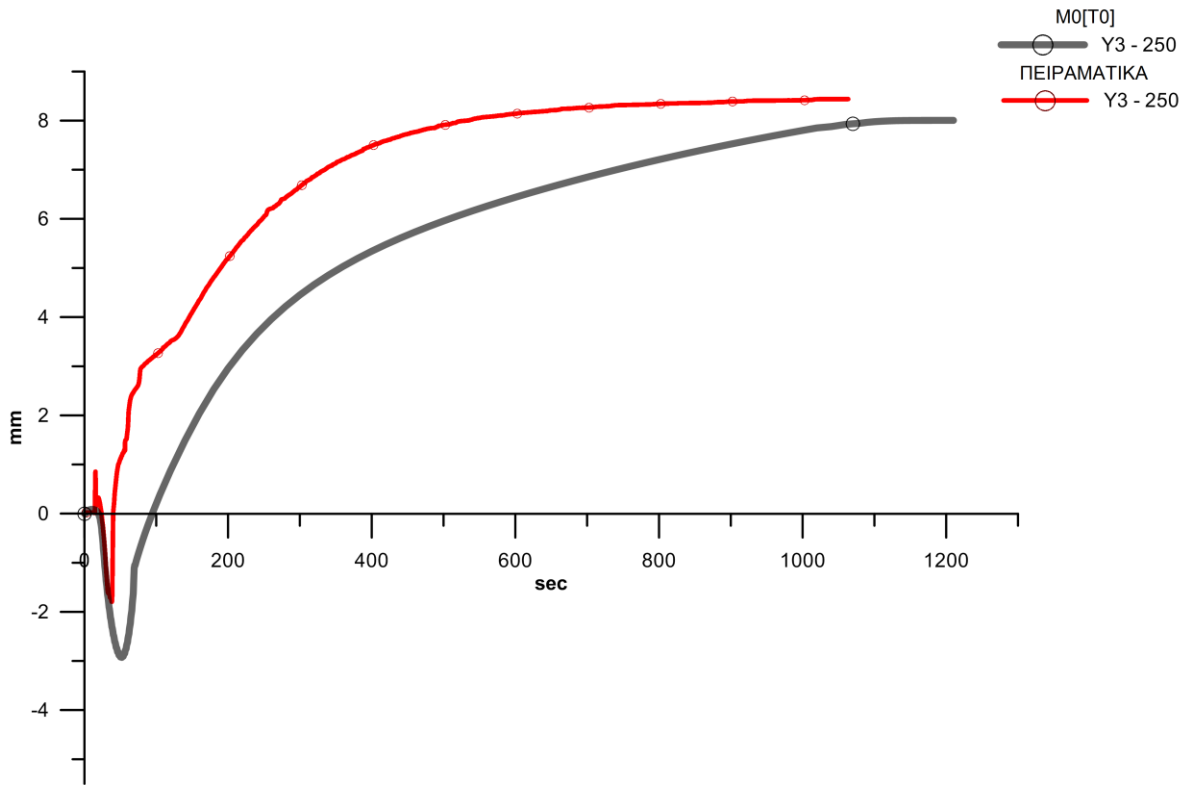
Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στις αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοίωσης κρίνεται ως ο κυρίαρχος παράγοντας της εμφάνισης τόσο σημαντικών σφαλμάτων. Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από τη διαφορά στους περιορισμούς μεταξύ πειράματος και μοντέλου. Κατά την εκτέλεση του πειράματος η μια πλάκα (η αντίθετη από αυτή όπου ήταν εγκατεστημένοι οι γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης) ήταν περιορισμένη συνεχώς ώστε να μην επιτρέπονται οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα z ενώ, στο μοντέλο εφαρμόστηκαν οι περιορισμοί της Παραγράφου 13.9.4.

Κατά τη μοντελοποίηση εφαρμόστηκαν ουσιαστικά μηχανικοί περιορισμοί που είναι ιδανικοί για να εφαρμοστούν σε πειραματική διαδικασία. Στην περίπτωση που μελετάται, θα ήταν δυνατό να είναι ορθός ο ισχυρισμός ότι το μοντέλο προβλέπει καλύτερα τις μεταβατικές και τις τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, από αυτές που στην πραγματικότητα μετρήθηκαν.

Επιπλέον, η διαφορά στο ρυθμό ανάπτυξης διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης, η οποία συμβάλει με θετικό πρόσημο στη συνολική κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση, μεταξύ πειράματος και μοντέλου είναι άγνωστη λόγω και πάλι της μορφής των περιορισμών που εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, η αδυναμία σύγκλισης των τελικών τιμών και για τις τρεις θέσεις μέτρησης (150mm, 200mm, 250mm) οφείλεται στην ύπαρξη μη-προβλέψιμων εγκάρσιων καμπτικών και στρεπτικών παραμορφώσεων στα ελάσματα του πειράματος η οποία δεν συναντάται στην προσομοίωση.

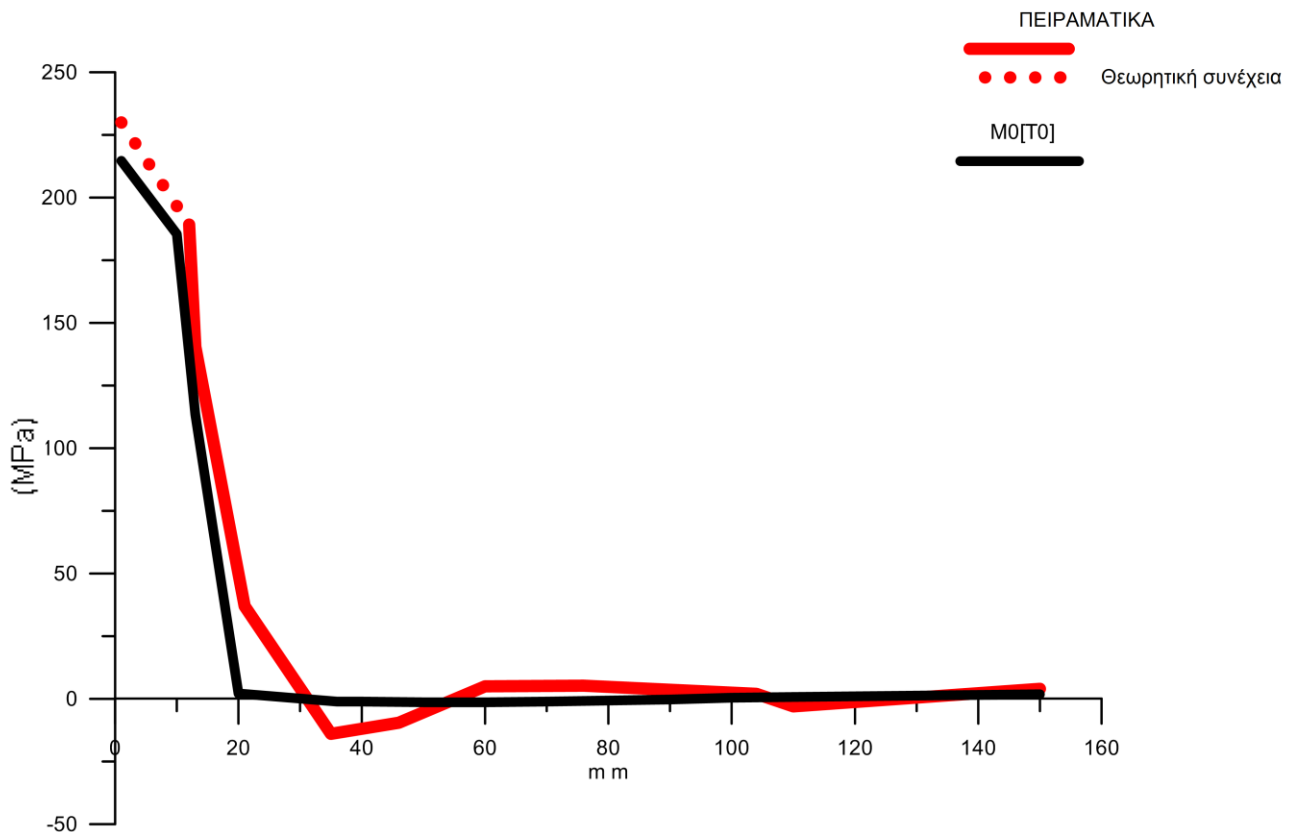
Στο διάγραμμα της Εικόνας 14.12 παρουσιάζονται η πειραματική καμπύλη και η καμπύλη προσομοίωσης για το σημείο που απέχει 250mm από τον άξονα το οποίο είναι και πιο αντιπροσωπευτικό για να αποδώσει τη συνολική κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης των υπό συγκόλληση ελασμάτων (απόσταση από ακμή ελάσματος 50mm).



Εικόνα 14.12 Σύγκριση των πειραματικών κατακόρυφων μετατοπίσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης

14.2.3 Σύγκριση παραμενουσών τάσεων

Η σύγκριση των πειραματικών παραμενουσών τάσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση συνοψίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 14.13 που ακολουθεί.



Εικόνα 14.13 Σύγκριση των πειραματικών μέγιστων κύριων παραμενουσών τάσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση

Όπως προκύπτει (Εικ. 14.13), το μοντέλο προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια τόσο την μορφή της κατανομής όσο και τις τιμές των παραμενουσών τάσεων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

Εντός του μετάλλου συγκόλλησης το μοντέλο δίνει τιμή 215 MPa που είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θεώρηση ότι εντός του μετάλλου συγκόλλησης αναπτύσσονται τάσεις της τάξης του ορίου διαρροής (228 MPa).

Εκτός του μετάλλου συγκόλλησης, δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Πιν. 11.8) και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης καθώς δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση των θέσεων μέτρησης (ιδιαίτερα κοντά στον άξονα συγκόλλησης όπου οι μεταβολές είναι μεγάλες). Ωστόσο, ο Πίνακας 14.3 μπορεί να δώσει μια ποιοτική συγκριτική εικόνα.

Είναι όμως εμφανές (Εικ. 14.13), ότι το μοντέλο, προβλέπει μια σαφώς πιο μικρή ζώνη εφελκυστικών τάσεων από αυτές που υπολογίστηκαν πειραματικά (20 mm με 35 mm αντίστοιχα). Επιπλέον, το μοντέλο, μετά από τη ζώνη των σημαντικών εφελκυστικών τάσεων κοντά στη

συγκόλληση, προβλέπει πολύ πιο μικρές (θετικές ή αρνητικές) παραμένουσες τάσεις από τις επίσης μικρές πειραματικά υπολογιζόμενες.

Πίνακας 14.3 Σύγκριση μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου M0[T0] σε ότι αφορά στις κατά τον άξονα συγκόλλησης σ_x , παραμένουσες τάσεις

Πειραματικά αποτελέσματα		Αποτελέσματα προσομοίωσης	
Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης	σ_x	Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης	σ_x
12	169,228	10	185,457
13	140,685	13	113,485
21	37,011	20	2,138
35	-13,950	36	-1,091
46	-9,534	40	-1,091
-	-	50	-1,358
60	5	60	-1,373
76	5,247	70	-1,096
-	-	80	-0,672
-	-	90	-0,256
104	2	100	0,455
110	-3	110	0,746
150	4	150	1,827

14.2.4 Σύνοψη

Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του πλήρους μοντέλου (M0[T0]) προκύπτει ότι:

- Οι μορφές των καμπυλών των θερμικών κύκλων από την προσομοίωση, στα σημεία μελέτης, είναι σχεδόν ταυτόσημες με αυτές που προέκυψαν πειραματικά από τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων τόσο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης όσο και κατά τη διαδικασία της απόψυξης (Εικ. 14.10).

- Για τα σημεία που απέχουν 10mm και 20mm από τον άξονα συγκόλλησης υπάρχει μια μικρή υποεκτίμηση των τιμών προσομοίωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές ενώ, για τα σημεία που απέχουν 40mm, 60mm, 100mm και 150mm από τον άξονα συγκόλλησης οι τιμές προσομοίωσης είναι ελαφρώς υπερεκτιμημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές.

- Εμφανίζεται μια μικρή υπερεκτίμηση όλων των τελικών τιμών προσομοίωσης, στο τέλος της απόψυξης που ορίζεται στα 1100sec, προφανώς εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά τη μοντελοποίηση φαινόμενα συναγωγής και ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα όμως, η

πραγματικά μικρή αυτή διαφορά ενισχύει την ορθότητα της παραδοχής για μικρή επίδραση των φαινομένων αυτών στη λήψη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

- Το σφάλμα σε ότι αφορά στις μέγιστες τιμές δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το 7% ενώ, σε ότι αφορά στις τελικές τιμές μπορεί να αγγίζει το 12% (40mm από τον άξονα συγκόλλησης τιμή θερμοστοιχείων 30,89°C, τιμή από μοντέλο 34,39 °C) ωστόσο οι τιμές είναι χαμηλές και σαφώς συγκρίσιμες με τις πειραματικές (Πιν. 14.1).

- Συνολικά, σε ότι αφορά στο θερμικό κομμάτι της μοντελοποίησης το σφάλμα σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι μικρότερο του 10%.

- Οι μορφές των καμπυλών της κατακόρυφης μετατόπισης (Εικ. 14.11) που προκύπτουν από την προσομοίωση έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις πειραματικές καθώς και σ' αυτές αρχικά εμφανίζονται αρνητικές τιμές που στην συνέχεια, κατά την απόψυξη, γίνονται θετικές και τελικά ισορροπούν μετά από πάροδο 1100sec.

- Η βασική διαφορά στις καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης μεταξύ πειράματος και μοντέλου είναι ότι αυτές του μοντέλου εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερη αρνητική τιμή σε σύγκριση με τις πειραματικές (Πιν. 14.2). Το σφάλμα σε ότι αφορά στις μέγιστες αρνητικές τιμές μεταξύ πειράματος και μοντέλου είναι εξαιρετικά μεγάλο με το μοντέλο να προβλέπει από περίπου 1,8 έως και σχεδόν 2,8 φορές μεγαλύτερη μέγιστη αρνητική παραμόρφωση από αυτή που μετρήθηκε πειραματικά (απόσταση αντίστοιχα από 150mm έως 250mm από τον άξονα συγκόλλησης).

- Αντίστοιχα μεγάλο είναι και το χρονικό διάστημα που το μοντέλο προβλέπει αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης σε σύγκριση με τις πειραματικές καμπύλες. Σύμφωνα με το πείραμα, η κατακόρυφη μετατόπιση αποκτά θετικό πρόσημο σχεδόν με το πέρας της συγκόλλησης (67sec) ενώ το μοντέλο προβλέπει αλλαγή πρόσημου σε σχεδόν διπλάσιο χρόνο (140sec).

- Οι καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης που προέκυψαν από το μοντέλο, αδυνατούν να ακολουθήσουν την ακριβή μορφή των αντίστοιχων πειραματικών και μόνο μετά την πάροδο περίπου 1000sec φαίνεται να επέρχεται εξομάλυνση (Εικ. 14.11).

- Σε ότι αφορά στις τελικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, φαίνεται ότι το σφάλμα μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοίωσης μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα συγκόλλησης (Πιν. 14.2). Έτσι, στο σημείο που βρίσκεται σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης συναντάται η μικρότερη απόκλιση μεταξύ πειράματος και μοντέλου 2,97%.

- Η επίδραση της μη υιοθέτησης απωλειών συναγωγής και ακτινοβολίας έχει ως συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι να επέλθει πλήρης ισορροπία στις παραμορφώσεις (απαιτήθηκαν περίπου 150sec περισσότερα ανάλυσης μέχρι να επέλθει ισορροπία).

- Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στις αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοίωσης κρίνεται ως ο κυρίαρχος παράγοντας της εμφάνισης τόσο σημαντικών σφαλμάτων. Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από τη διαφορά στους περιορισμούς μεταξύ πειράματος και μοντέλου. Κατά την εκτέλεση του πειράματος η μια πλάκα (η αντίθετη από αυτή που ήταν εγκατεστημένοι οι γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης) ήταν περιορισμένη συνεχώς ώστε να μην επιτρέπονται οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα z ενώ, στο μοντέλο εφαρμόστηκαν οι περιορισμοί της Παραγράφου 13.9.4.

- Κατά τη μοντελοποίηση εφαρμόστηκαν ουσιαστικά μηχανικοί περιορισμοί που είναι ιδανικοί για να εφαρμοστούν σε πειραματική διαδικασία. Στην περίπτωση που μελετάται, θα ήταν δυνατό να είναι ορθός ο ισχυρισμός ότι το μοντέλο προβλέπει καλύτερα τις μεταβατικές και τις τελικές κατακόρυφες παραμορφώσεις από αυτές που στην πραγματικότητα μετρήθηκαν.

- Η διαφορά στο ρυθμό ανάπτυξης διαμήκους καμπτικής παραμόρφωσης, η οποία συμβάλει με θετικό πρόσημο στη συνολική κατακόρυφη γωνιακή παραμόρφωση, μεταξύ πειράματος και μοντέλου είναι άγνωστη λόγω και πάλι της μορφής των περιορισμών που εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

- Η αδυναμία σύγκλισης των τελικών τιμών και για τις τρεις θέσεις μέτρησης (150mm, 200mm, 250mm) οφείλεται στην ύπαρξη μη-προβλέψιμων εγκάρσιων καμπτικών και στρεπτικών παραμορφώσεων στα ελάσματα του πειράματος η οποία δεν συναντάται στην προσομοίωση.

- Το μοντέλο προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια τόσο την μορφή της κατανομής όσο και τις τιμές των παραμενουσών τάσεων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα (Εικ. 14.13).

- Εντός του μετάλλου συγκόλλησης το μοντέλο δίνει τιμή 215MPa που είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θεώρηση ότι εντός του μετάλλου συγκόλλησης αναπτύσσονται τάσεις της τάξης του ορίου διαρροής (228MPa).

- Εκτός του μετάλλου συγκόλλησης, δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Πιν. 11.8) και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης καθώς δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση των θέσεων μέτρησης (ιδιαίτερα κοντά στον άξονα συγκόλλησης όπου οι μεταβολές είναι μεγάλες). Ωστόσο, ο Πίνακας 14.3 μπορεί να δώσει μια ποιοτική συγκριτική εικόνα.

- Είναι όμως εμφανές (Εικ. 14.13), ότι το μοντέλο, προβλέπει μια σαφώς πιο μικρή ζώνη εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων από αυτές που υπολογίστηκαν πειραματικά (20mm με 35mm αντίστοιχα). Επιπλέον, το μοντέλο, μετά από τη ζώνη των σημαντικών εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων κοντά στη συγκόλληση, προβλέπει πολύ πιο μικρές (θετικές ή αρνητικές) παραμενουσες τάσεις από τις επίσης μικρές πειραματικά υπολογιζόμενες.

14.3 Μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων υλικού, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Αρχικά (Παράγραφος 14.3.1) μελετάται η επίδραση εκείνων των ιδιοτήτων του υλικού οι οποίες θεωρείται ότι μπορούν να επιδράσουν στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης (πυκνότητα ρ , ειδική θερμότητα c , θερμική αγωγιμότητα k). Συγκρίνονται δηλαδή το μοντέλο T0 με τα T1, T2 και T3 (όπως ορίστηκε στην Παράγραφο 13.6.9, η κωδική τους ονομασία) κυρίως μέσω των θερμικών κύκλων που αποδίδουν αλλά και των κατακόρυφων παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων (ισοδύναμα μοντέλα M0[T0] και M1[T1], M2[T2], M3[T3]).

Στη συνέχεια, μελετώνται τρεις διαφορετικές ομάδες μοντέλων οι οποίες σε κάθε περίπτωση συγκρίνονται με το αρχικό πλήρες M0[T0]. Στην πρώτη ομάδα (Παράγραφος 14.3.2) υιοθετούνται οι τιμές του μοντέλου T1 ενώ μεταβάλλονται κατά περίπτωση οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E , του ορίου διαρροής σ_s και του συντελεστή θερμικής διαστολής α (σύγκριση μοντέλων M0[T0] και M4[T1], M5[T1], M6[T1], M7[T1]). Αντίστοιχα, στη δεύτερη ομάδα (Παράγραφος 14.3.3) υιοθετούνται οι τιμές του μοντέλου T2 ενώ μεταβάλλονται κατά περίπτωση οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E , του ορίου διαρροής σ_s και του συντελεστή θερμικής διαστολής α (σύγκριση μοντέλων M0[T0] και M8[T2], M9[T2], M10[T2]) ενώ, στην Τρίτη ομάδα (Παράγραφος 14.3.4) υιοθετούνται οι τιμές του μοντέλου T3 ενώ μεταβάλλονται κατά περίπτωση οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E , του ορίου διαρροής σ_s και του συντελεστή θερμικής διαστολής α (σύγκριση μοντέλων M0[T0] και M11[T3], M12[T3], M13[T3]).

14.3.1 Σύγκριση μοντέλων T0, T1, T2, T3 (M0[T0], M1[T1], M2[T2], M3[T3])

Υπενθυμίζεται (Παράγραφος 13.6.9) ότι,

$$T0 \quad : \quad \rho = \rho(t) \quad , \quad c = c(t) \quad , \quad k = k(t)$$

$$T1 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c(t) \quad , \quad k = k(t)$$

$$T2 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c_0 \quad , \quad k = k(t)$$

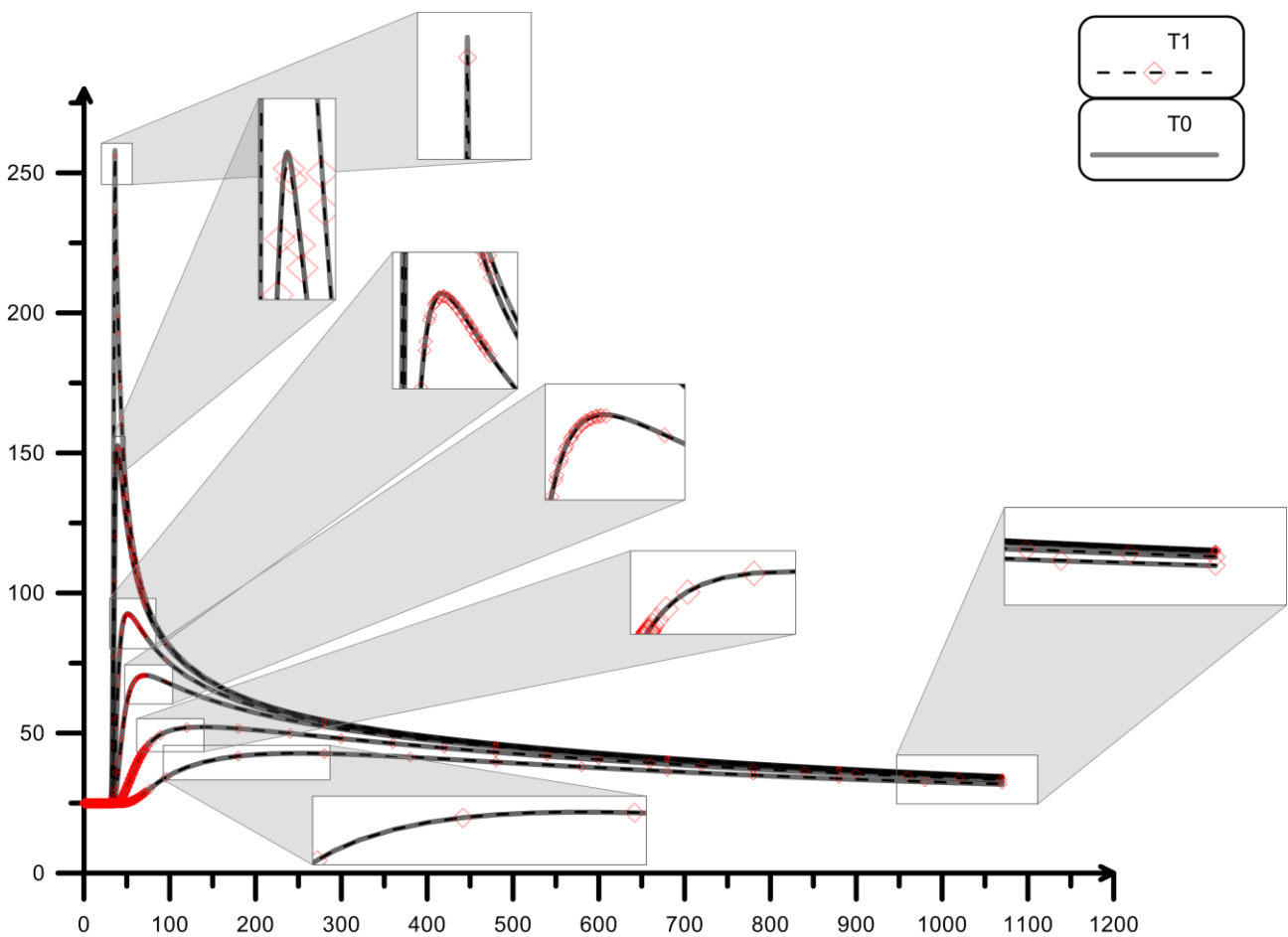
$$T3 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c_0 \quad , \quad k = k_0$$

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικ. 14.14 και Εικ. 14.15) κρατώντας την τιμή της πυκνότητας σταθερή και ίση με αυτή που ισχύει σε συνθήκες περιβάλλοντος (T1), προκύπτουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα με την περίπτωση που όλες οι ιδιότητες του υλικού εισάγονται στο μοντέλο ως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία (Εικ. 14.14).

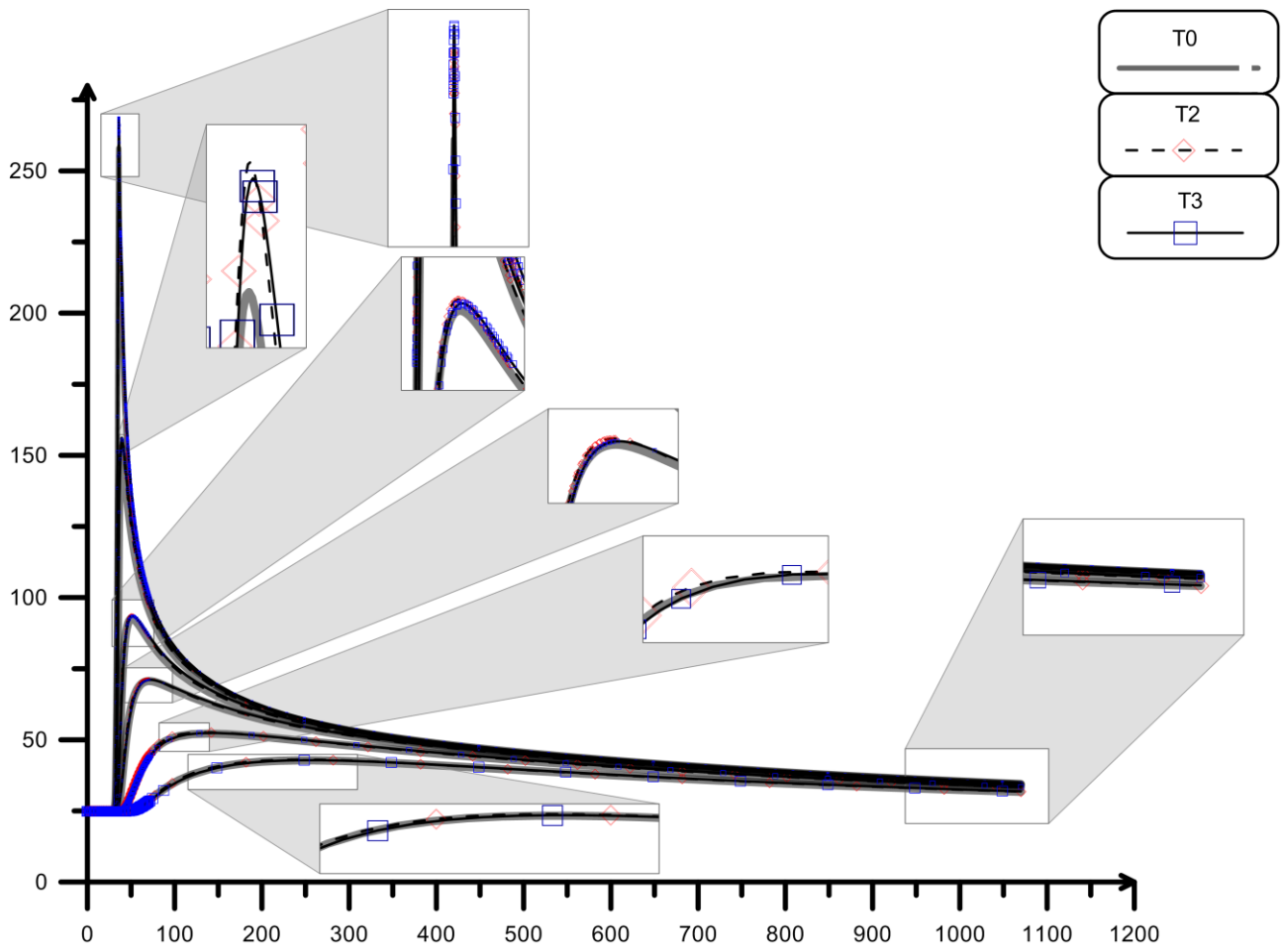
Λαμβάνοντας και την τιμή της ειδικής θερμότητας σταθερή και ίση με αυτή που ισχύει σε συνθήκες περιβάλλοντος (T2), προκύπτουν αποτελέσματα ελάχιστα υπερεκτιμημένα (Εικ. 14.14) ενώ, κρατώντας και την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας σταθερή και ίση με αυτή που ισχύει σε συνθήκες περιβάλλοντος (T3) προκύπτουν αποτελέσματα πάντα σε σύγκριση με την περίπτωση

που όλες οι ιδιότητες του υλικού εισάγονται στο μοντέλο ως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία, (Εικ. 14.14), ελάχιστα επιπλέον υπερεκτιμημένα (Εικ. 14.15).

Στον Πίνακα 14.4 φαίνονται οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιών για καθένα από τα μοντέλα T0 - T3 καθώς και το σφάλμα των T1 - T3 ως προς το T0. Σε κάθε περίπτωση το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται στις τιμές κοντά στο μέταλλο συγκόλλησης και είναι της τάξης του 4% για την περίπτωση όπου όλες οι ιδιότητες (ρ , c , k) λαμβάνονται σταθερές και ίσες με αυτές που ισχύουν σε συνθήκες περιβάλλοντος.



Εικόνα 14.14 Σύγκριση μοντέλων T0 και T1 (Παράγραφος 13.6.9)



Εικόνα 14.15 Σύγκριση μοντέλων T0 και T2 και T3 (Παράγραφος 13.6.9)

Πίνακας 14.4 Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιών για καθένα από τα μοντέλα T0 – T3 καθώς και το σφάλμα των T1 – T3 ως προς το T0. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το T0

T0		T1		T2		T3	
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	Max(θ) [°C]	Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	Max(θ) [°C]	Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	Max(θ) [°C]	Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	Max(θ) [°C]
10	258,12	10	256,14	10	266,26	10	268,66
20	152,69	20	151,76	20	156,21	20	155,84
40	92,70	40	92,31	40	94,01	40	93,60
60	70,75	60	70,54	60	71,44	60	71,19
100	52,28	100	52,19	100	52,59	100	52,46
150	42,84	150	42,80	150	43,02	150	42,93
Σφάλμα ως προς το T0 [%]							
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	T1		T2		T3		
10	0,77		-3,15		-4,08		
20	0,61		-2,30		-2,06		
40	0,42		-1,41		-0,98		
60	0,30		-0,98		-0,63		
100	0,17		-0,60		-0,36		
150	0,10		-0,43		-0,22		

Σε ότι αφορά στην επίδραση των ιδιοτήτων (ρ , c , k) στην κατακόρυφη μετατόπιση, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης και στις παραμένουσες τάσεις, υπενθυμίζεται (Παράγραφος 13.6.9) ότι,

$$M0[T0] : E = E(t) , \alpha = \alpha(t) , \sigma_s = \sigma_s(t),$$

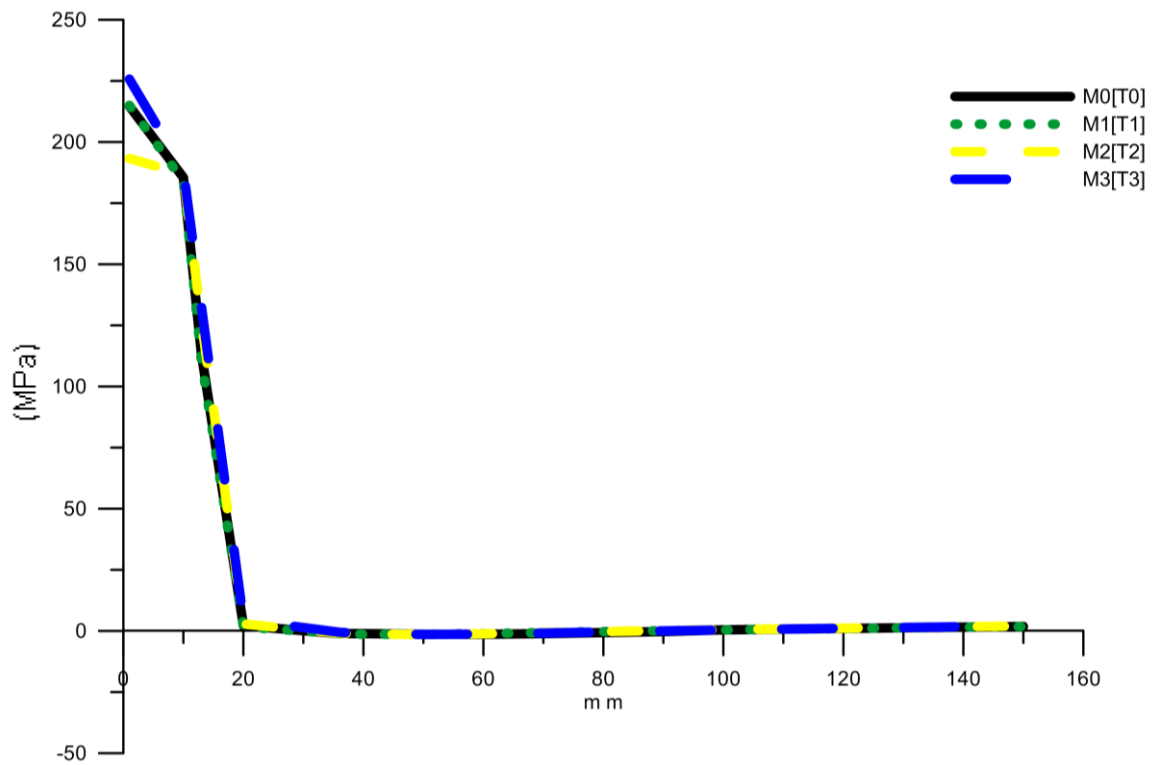
$$M1[T1] : E = E(t) , \alpha = \alpha(t) , \sigma_s = \sigma_s(t),$$

$$M2[T2] : E = E(t) , \alpha = \alpha(t) , \sigma_s = \sigma_s(t),$$

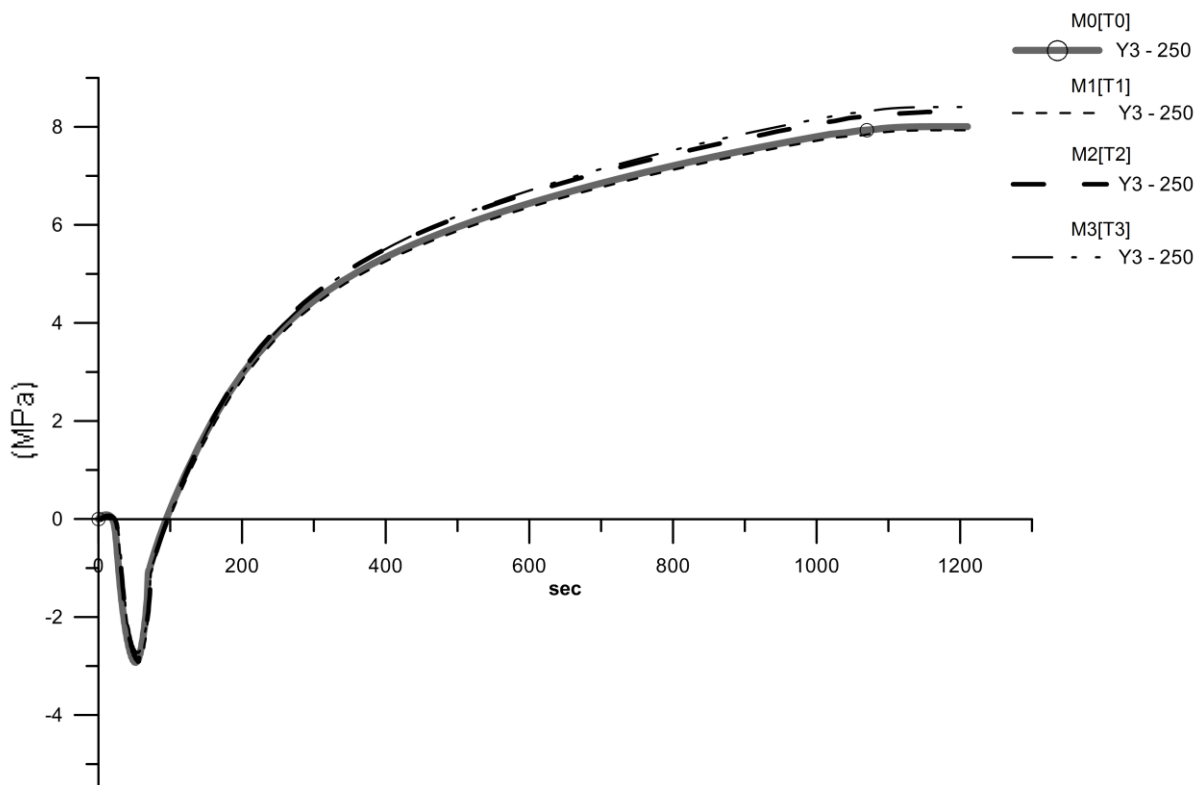
$$M3[T3] : E = E(t) , \alpha = \alpha(t) , \sigma_s = \sigma_s(t),$$

και ότι λαμβάνεται υπόψη μόνο η καμπύλη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου που απέχει 250mm από τον άξονα συγκόλλησης.

Στις Εικόνες 14.16 και 14.17 αλλά και στους Πίνακες 14.5 και 14.6 που ακολουθούν, παρουσιάζεται η σύγκριση των ανωτέρω μοντέλων ως προς τα αναφερθέντα μηχανικά φαινόμενα που συμβαίνουν λόγω συγκόλλησης.



Εικόνα 14.16 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις



Εικόνα 14.17 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Πίνακας 14.5 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] καθώς και το σφάλμα των M1[T1], M2[T2] και M3[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M0[T0]	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]
	σ_x			
1	214,66	215,00	193,26	225,72
10	185,46	183,84	186,94	188,51
13	113,49	110,52	126,65	132,81
20	2,14	1,64	2,83	4,57
36	-1,09	-1,12	-0,94	-0,54
40	-1,09	-1,36	-1,31	-1,08
50	-1,36	-1,36	-1,43	-1,42
60	-1,37	-1,08	-1,17	-1,27
70	-1,10	-0,66	-0,72	-0,87
80	-0,67	-0,25	-0,27	-0,41
90	-0,26	0,12	0,15	0,03
100	0,45	0,44	0,51	0,42
110	0,75	0,72	0,83	0,78
150	1,83	1,78	2,02	2,06
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]	
1	-0,15	9,97	-5,15	
10	0,87	-0,80	-1,65	
13	2,61	-11,60	-17,03	
20	23,21	-32,27	-113,97	
36	-2,55	14,27	50,61	
40	-24,85	-19,88	1,48	
50	0,08	-5,34	-4,53	
60	21,41	14,61	7,23	
70	39,64	33,88	20,60	
80	62,14	59,70	39,26	
90	145,11	157,00	112,49	
100	3,67	-12,39	6,57	
110	3,25	-11,70	-3,84	
150	2,80	-10,66	-13,01	

Πίνακας 14.6 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M1[T1], M2[T2] και M3[T3] καθώς και το σφάλμα των M1[T1], M2[T2] και M3[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 250mm				
Τιμές	M0[T0]	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]
Min	-2,927	-2,934	-2,871	-2,737
Max	8,005	7,933	8,304	8,405
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Τιμές	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]	
Min	-0,24	1,93	6,52	
Max	0,90	-3,74	-5,00	

Είναι φανερό (Εικ. 14.16 Εικ. 14.17, Πίν. 14.5 και Πίν. 14.6) ότι είτε η πυκνότητα εισαχθεί στο μοντέλο ως συνάρτηση της θερμοκρασίας είτε με την τιμή που έχει σε συνθήκες περιβάλλοντος, έχει ελάχιστη επίδραση στα αποτελέσματα τόσο των θερμικών όσο και των μηχανικών φαινομένων που αναπτύσσονται λόγω συγκόλλησης.

Λαμβάνοντας επιπλέον σταθερή τιμή και για την ειδική θερμότητα, (μοντέλο M2[T2]), σε ότι αφορά στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζεται σφάλμα από -9,97 έως +11,60% (με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), ανάλογα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.16 Πίν. 14.5). Σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M2[T2] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 3,74% (Εικ. 14.17, Πίν. 14.6) ενώ, το σφάλμα της αντιστοιχίας τελικής τιμής μετά την απόψυξη είναι 1,93%.

Τέλος, λαμβάνοντας και τις τρεις ιδιότητες (ρ , c , k) σταθερές και ίσες με τις τιμές που ισχύουν σε συνθήκες περιβάλλοντος λαμβάνονται υπερεκτιμημένες τιμές μέγιστων παραμενουσών τάσεων (σ_x) με σφάλμα από 5 - 17% σε απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης ενώ, επίσης μεγαλύτερο είναι το σφάλμα και σε ότι αφορά στις κατακόρυφες μετατοπίσεις όπου για τις μεν αρνητικές τιμές υπάρχει υποεκτίμηση της τάξης του 6,52% για τις δε θετικές τιμές υπάρχει

υπερεκτίμηση της τάξης του 5% (5% σφάλμα τελικής τιμής μετά την απόψυξη σε σχέση με το M0[T0]).

14.3.2 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1], M7[T1]

Υπενθυμίζεται (Παράγραφος 13.6.9) ότι,

$$T1 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c(t) \quad , \quad k = k(t)$$

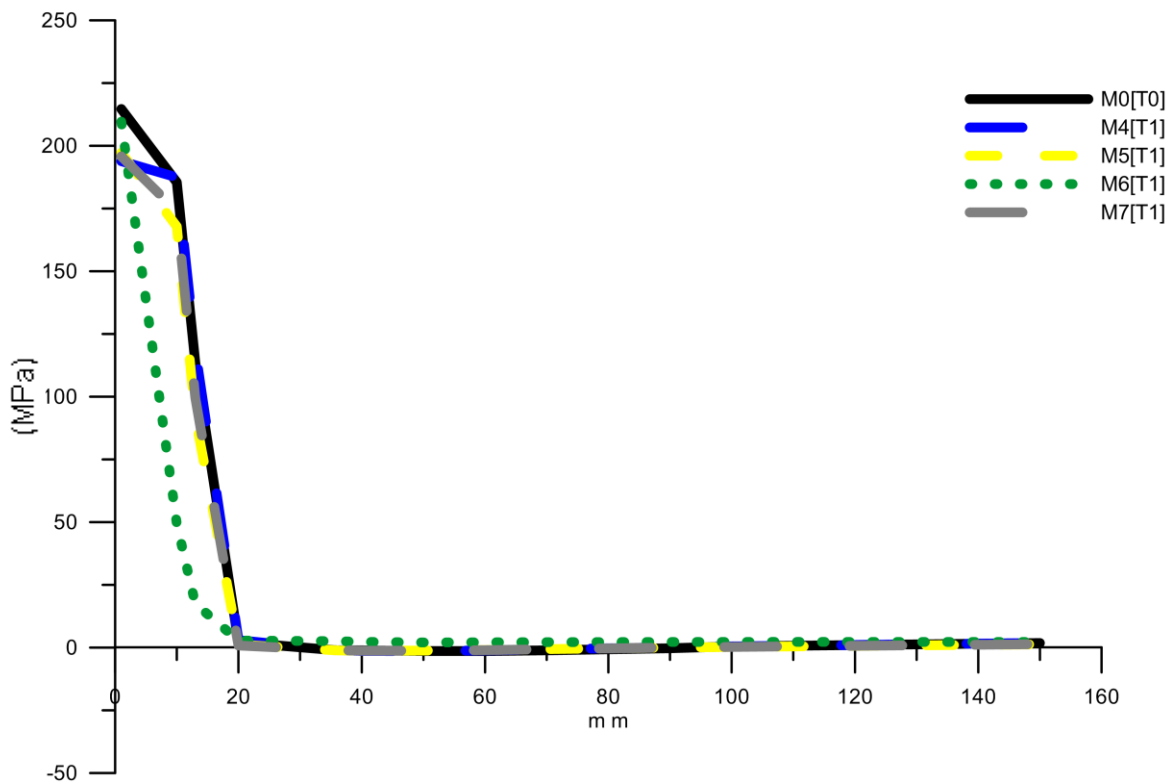
ενώ,

$$M4[T1] \quad : \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha(t) \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

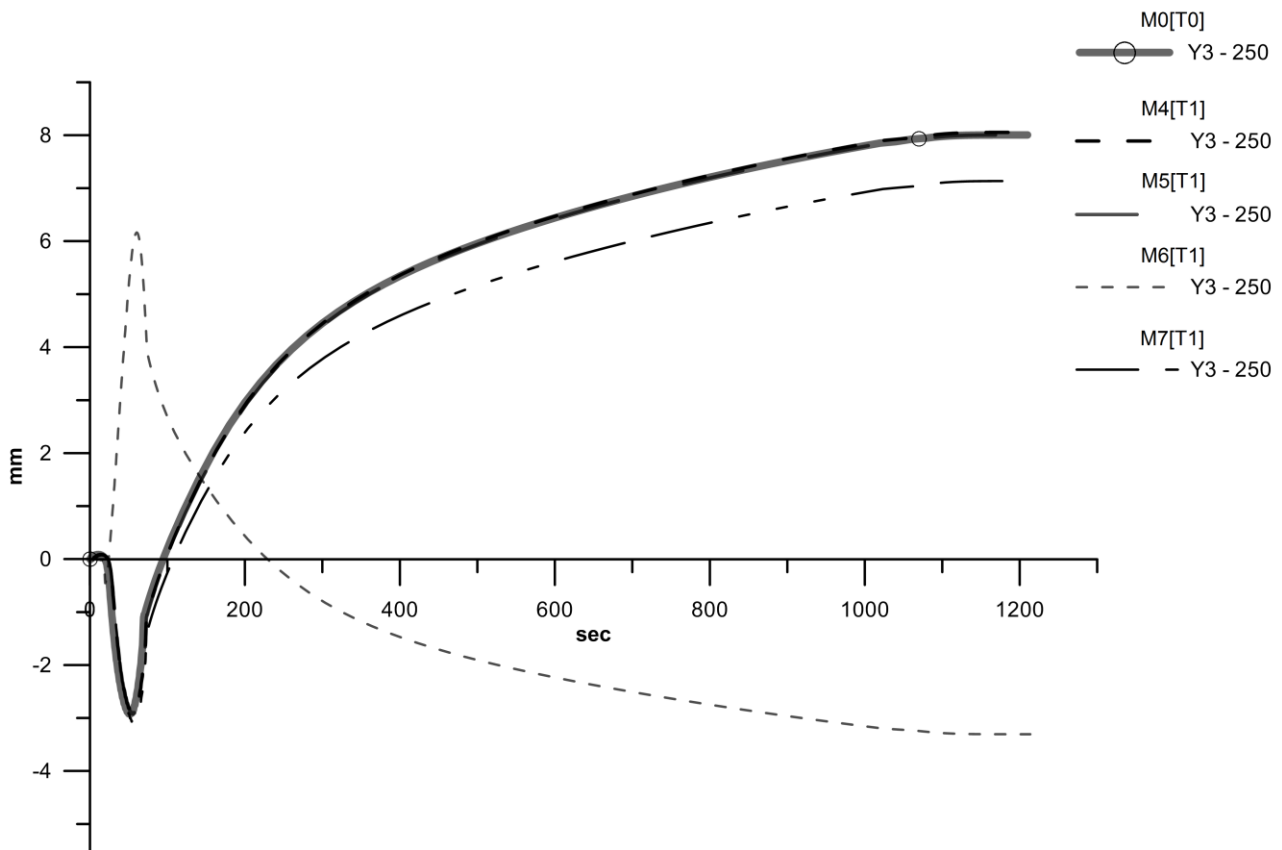
$$M5[T1] \quad : \quad E = E(t) \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

$$M6[T1] \quad : \quad E = E(t) \quad , \quad \alpha = \alpha(t) \quad , \quad \sigma_s = \sigma_{s0}$$

$$M7[T1] \quad : \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$



Εικόνα 14.18 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις



Εικόνα 14.19 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Ξεκινώντας από το M6[T1] ($\sigma_s = \sigma_{s0}$), η εξήγηση για την μεγάλη απόκλιση στις παραμένουσες τάσεις και στη μόνιμη παραμόρφωση σε σύγκριση με το M0[T0] (Εικ. 14.18 και Εικ. 14.19) συνοψίζεται στο ότι η σταθερή σ_{s0} υπερεκτιμά την ικανότητα διαρροής του υλικού, η οποία στην πραγματικότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας, με συνέπεια να κυριαρχούν ελαστικές παραμορφώσεις, στην περιοχή της συγκόλλησης και όχι πλαστικές. Έτσι, πέρα από την τιμή των 209,59MPa που προκύπτει εντός του μετάλλου συγκόλλησης, όλες οι υπόλοιπες τιμές στα σημεία ενδιαφέροντος είναι μικρότερες από 50MPa. Η κυριαρχία ελαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή συγκόλλησης έχει ως συνέπεια και τη μορφή της καμπύλης της κατακόρυφης μετατόπισης λόγω γωνιακής παραμόρφωσης (Εικ. 14.19), η οποία δίνει τελική τιμή αρνητική και ίση με -3,31mm.

Λόγω ακριβώς της προφανούς και μεγάλης απόκλισης του μοντέλου M6[T1] σε σύγκριση με το M0[T0] κρίθηκε ότι δεν υφίσταται λόγος περαιτέρω μελέτης της επίδρασης του ορίου διαρροής στα εξαγόμενα αποτελέσματα και γι αυτό στη συνέχεια για όλα τα μοντέλα θεωρείται $\sigma_s = \sigma_s(t)$

Για τα υπόλοιπα μοντέλα M4[T1], M5[T1], και M7[T1] ως προς το M0[T0] ισχύει:

Πίνακας 14.7 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] καθώς και το σφάλμα των M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0].

Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M0[T0]	M4[T1]	M5[T1]	M7[T1]
	σ_x			
1	214,66	193,87	197,21	195,79
10	185,46	187,42	167,83	173,95
13	113,49	118,51	92,04	99,62
20	2,14	2,97	1,17	0,83
36	-1,09	-1,02	-1,12	-1,04
40	-1,09	-1,34	-1,25	-1,24
50	-1,36	-1,40	-1,19	-1,24
60	-1,37	-1,14	-0,96	-1,02
70	-1,10	-0,70	-0,62	-0,66
80	-0,67	-0,27	-0,29	-0,32
90	-0,26	0,12	0,00	-0,01
100	0,45	0,46	0,25	0,26
110	0,75	0,76	0,47	0,50
150	1,83	1,86	1,30	1,37
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M4[T1]	M5[T1]	M7[T1]	
1	9,69	8,13	8,79	
10	-1,06	9,51	6,20	
13	-4,43	18,90	12,22	
20	-39,05	45,37	61,13	
36	6,77	-2,79	4,68	
40	-22,34	-14,86	-13,57	
50	-3,36	12,00	8,60	
60	17,10	30,24	25,93	
70	35,76	43,74	39,69	
80	59,31	56,47	52,92	
90	146,19	99,24	97,22	
100	-1,03	44,91	42,55	
110	-1,71	36,76	33,55	
150	-1,60	28,59	25,28	

Πίνακας 14.8 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] καθώς και το σφάλμα των M4[T1], M5[T1], M6[T1] και M7[T1] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 250mm				
Τιμές	M0[T0]	M4[T1]	M5[T1]	M7[T1]
Min	-2,927	-2,914	-2,927	-3,097
Max	8,005	8,054	8,005	7,135
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Τιμές	M4[T1]		M5[T1]	M7[T1]
Min	0,46		0,00	-5,78
Max	-0,61		0,00	10,87

Προκόπτει δηλαδή ότι (Πιν. 14.7 και Πιν 14.8), με $\rho=\rho_0$, $c=c(t)$ και $k=k(t)$ όταν $E=E_0$ και $\alpha=\alpha(t)$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, (μοντέλο M4[T1]) οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν σφάλμα από +9,69 έως -4,43% (με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), ανάλογα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.18 Πιν. 14.7). Για τις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M4[T1] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 0,61% (Εικ. 14.19, Πιν. 14.8) που ισοδυναμεί και με το σφάλμα της αντίστοιχης τελικής τιμής μετά την απόψυξη.

Στην περίπτωση του M5[T1] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c(t)$, $k=k(t)$ και $E=E(t)$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν, σε κάθε περίπτωση θετικό σφάλμα (όπου αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), από +8,13% έως +18,90% ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.18 Πιν. 14.7) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M5[T1] ως προς το M0[T0] είναι μηδενικό (Εικ. 14.19, Πιν. 14.8).

Τέλος, περίπτωση του M7[T1] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c(t)$, $k=k(t)$ και $E=E_0$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν, σε κάθε περίπτωση θετικό σφάλμα (όπου αρνητικό πρόσημο η

υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το $M0[T0]$), από +8,79% έως +12,22% ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.18 Πιν. 14.7) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του $M5[T1]$ ως προς το $M0[T0]$ παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 10,87% (Εικ. 14.19, Πιν. 14.8) που ισοδυναμεί και με το σφάλμα της αντίστοιχης τελικής τιμής μετά την απόψυξη.

14.3.3 Σύγκριση μοντέλων $M0[T0]$, $M8[T2]$, $M9[T2]$, $M10[T2]$

Υπενθυμίζεται (Παράγραφος 13.6.9) ότι,

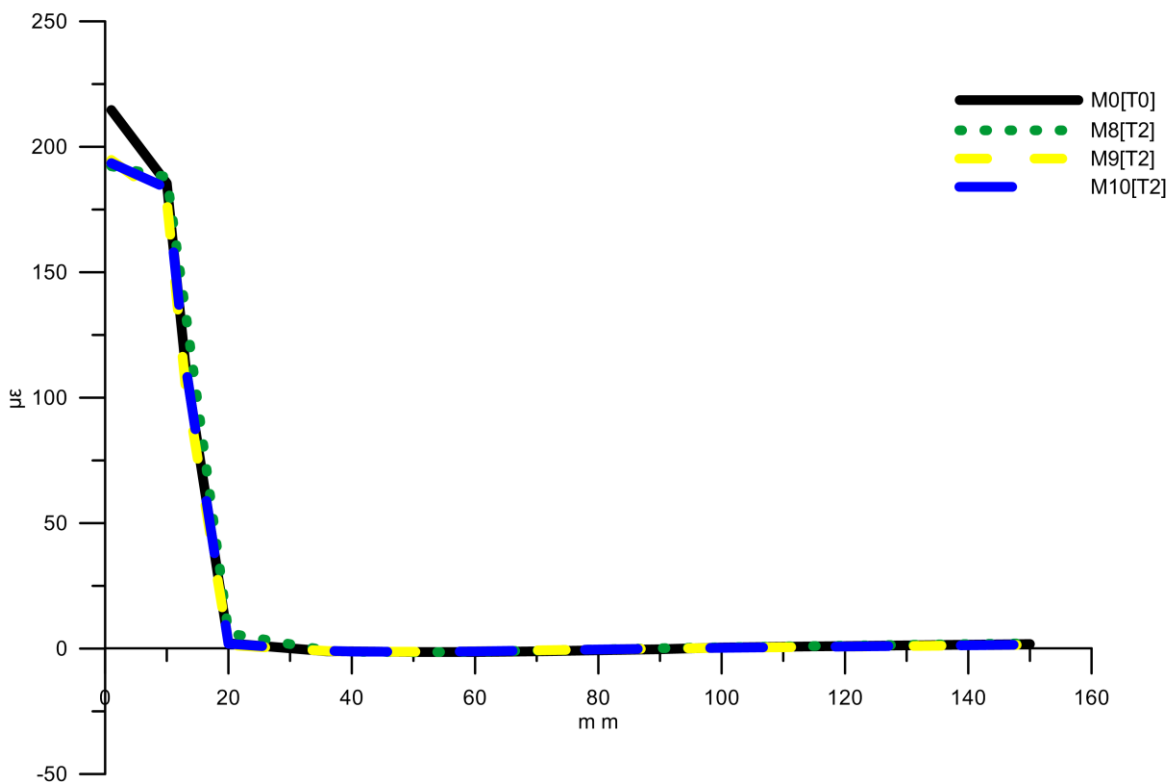
$$T2 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c_0 \quad , \quad k = k(t)$$

ενώ,

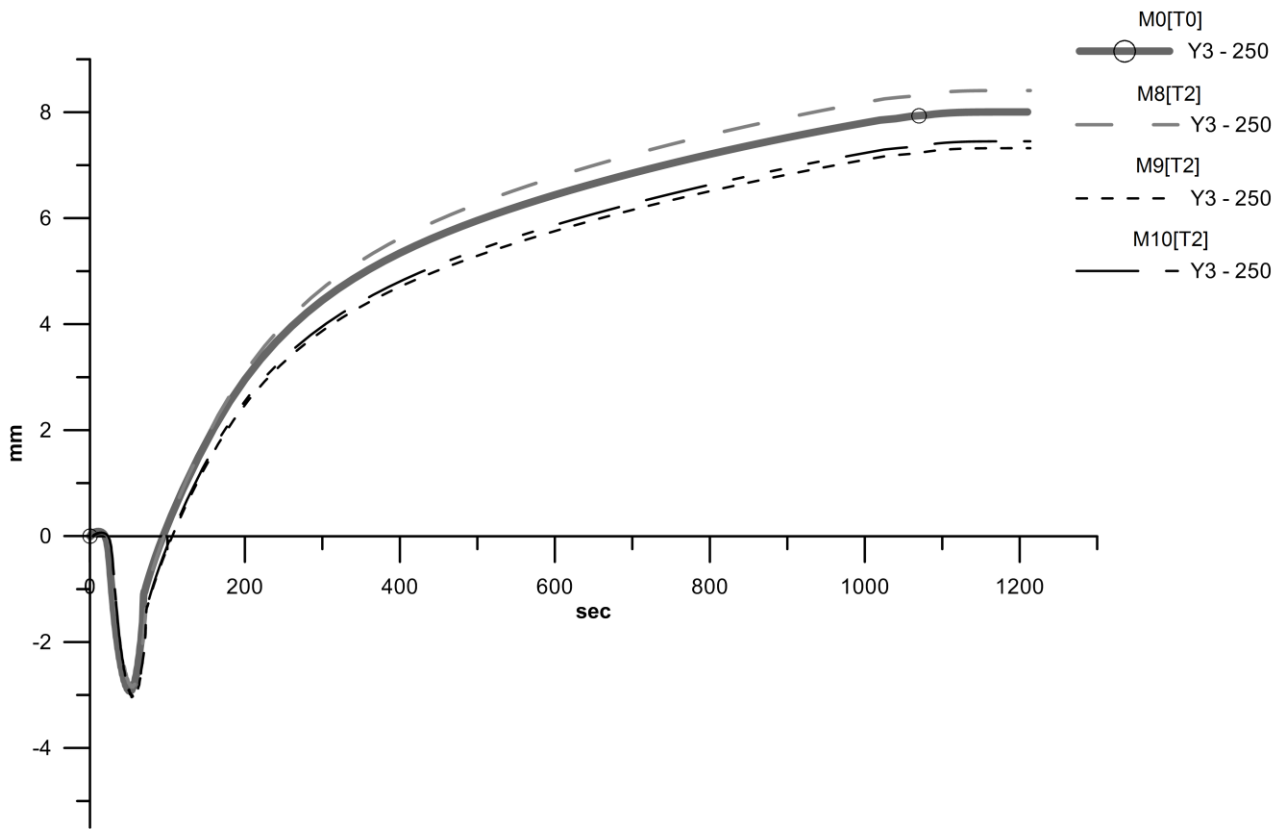
$$M8[T2] \quad : \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha(t) \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

$$M9[T2] \quad : \quad E = E(t) \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

$$M10[T2] : \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$



Εικόνα 14.20 Σύγκριση μοντέλων $M0[T0]$, $M8[T2]$, $M9[T2]$ και $M10[T2]$ (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις



Εικόνα 14.21 Σύγκριση μοντέλων $M0[T0]$, $M8[T2]$, $M9[T2]$ και $M10[T2]$ (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Πίνακας 14.9 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] καθώς και το σφάλμα των M8[T2], M9[T2] και M10[T2] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M0[T0]	M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]
	σ_x			
1	214,66	192,25	194,77	193,50
10	185,46	187,96	178,53	183,53
13	113,49	134,90	105,58	113,33
20	2,14	6,14	1,37	1,92
36	-1,09	-0,82	-0,95	-0,84
40	-1,09	-1,26	-1,21	-1,17
50	-1,36	-1,47	-1,26	-1,30
60	-1,37	-1,23	-1,05	-1,11
70	-1,10	-0,77	-0,69	-0,74
80	-0,67	-0,29	-0,33	-0,35
90	-0,26	0,15	0,00	0,00
100	0,45	0,54	0,29	0,30
110	0,75	0,88	0,54	0,57
150	1,83	2,11	1,49	1,57
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]	
1	10,44	9,27	9,86	
10	-1,35	3,74	1,04	
13	-18,87	6,97	0,13	
20	-187,19	35,97	10,31	
36	25,10	12,97	23,04	
40	-15,78	-10,52	-7,22	
50	-8,20	7,04	4,21	
60	10,47	23,26	19,16	
70	30,07	36,84	32,81	
80	57,17	50,95	47,67	
90	159,54	100,05	99,49	
100	-18,24	36,54	32,99	
110	-17,51	27,27	23,13	
150	-15,56	18,28	14,33	

Πίνακας 14.10 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M8[T2], M9[T2] και M10[T2] καθώς και το σφάλμα των M8[T2], M9[T2] και M10[T2] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 250mm				
Τιμές	M0[T0]	M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]
Min	-2,927	-2,850	-3,062	-3,038
Max	8,005	8,409	7,321	7,451
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Τιμές		M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]
Min		2,65	-4,61	-3,79
Max		-5,05	8,54	6,92

Από τα διαγράμματα των Εικόνων 14.20 και 14.21 αλλά και τους Πίνακες 14.9 και 14.10 προκύπτει ότι, με $\rho=\rho_0$, $c=c_0$ και $k=k(t)$ όταν $E=E_0$ και $\alpha=\alpha(t)$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, (μοντέλο M8[T2]) οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν σφάλμα από +10,44 έως -18,87% (με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), ανάλογα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.20, Πίν. 14.9). Για τις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M8[T2] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 5,05% (Εικ. 14.21, Πίν. 14.10) που ισοδυναμεί και με το σφάλμα της αντίστοιχης τελικής τιμής μετά την απόψυξη.

Στην περίπτωση του M9[T2] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c_0$, $k=k(t)$ και $E=E(t)$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν, σε κάθε περίπτωση θετικό σφάλμα (όπου αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), από +9,27% έως +6,97% ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.20, Πίν. 14.9) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M9[T2] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 8,54% (Εικ. 14.21, Πίν. 14.10) το οποίο είναι και το σφάλμα της τελικής κατακόρυφης μετατόπισης.

Τέλος, περίπτωση του M10[T2] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c_0$ και $k=k(t)$ και $E=E_0$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζονται, σε κάθε περίπτωση θετικό σφάλμα (όπου αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), από +9,86% έως +0,13% ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.20 Πίν. 14.9) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M5[T1] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 6,92% (Εικ. 14.21, Πιν. 14.10) το οποίο είναι και το σφάλμα της τελικής κατακόρυφης μετατόπισης.

14.3.4 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M11[T3], M12[T3], M13[T3]

Υπενθυμίζεται (Παράγραφος 13.6.9) ότι,

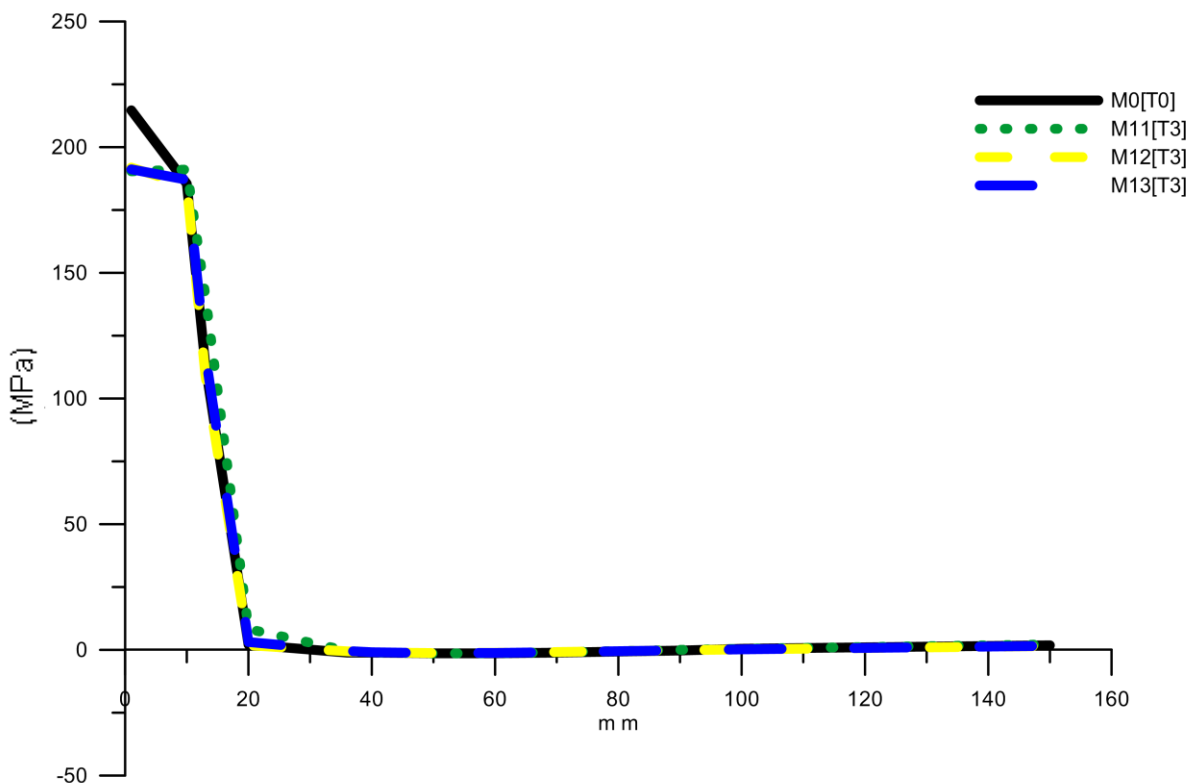
$$T3 \quad : \quad \rho = \rho_0 \quad , \quad c = c_0 \quad , \quad k = k_0$$

ενώ,

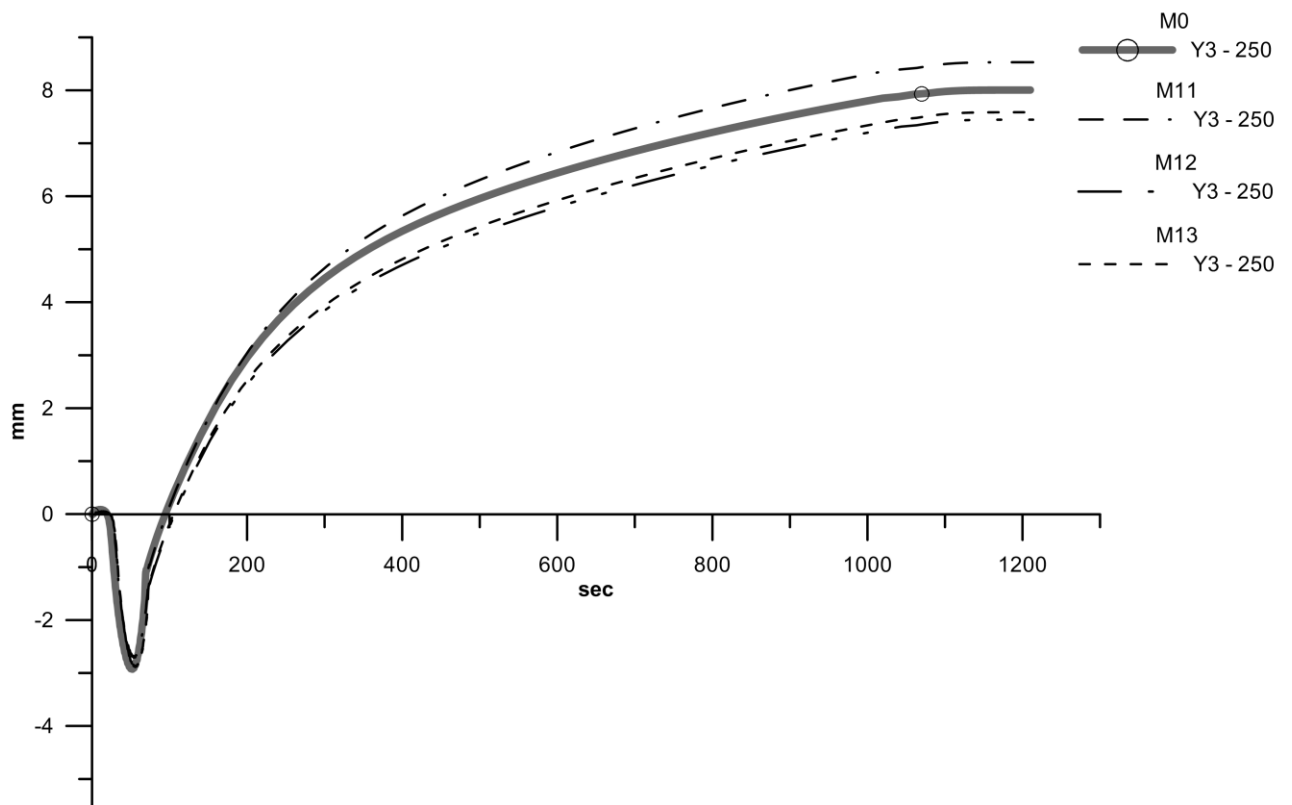
$$M11[T3]: \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha(t) \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

$$M12[T3]: \quad E = E(t) \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$

$$M13[T3]: \quad E = E_0 \quad , \quad \alpha = \alpha_0 \quad , \quad \sigma_s = \sigma_s(t)$$



Εικόνα 14.22 Σύγκριση μοντέλων M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] (Παράγραφος 13.6.9) ως προς τις παραμένουσες τάσεις



Εικόνα 14.23 Σύγκριση μοντέλων $M0[T0]$, $M11[T3]$, $M12[T3]$ και $M13[T3]$ (Παράγραφος 13.6.9) ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Πίνακας 14.11 Οι τιμές των σ_x παραμενουσών τάσεων για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] καθώς και το σφάλμα των M11[T3], M12[T3] και M13[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M0[T0]	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]
	σ_x			
1	214,66	190,40	191,88	191,18
10	185,46	191,10	184,82	187,03
13	113,49	141,14	109,45	117,78
20	2,14	8,29	1,84	3,13
36	-1,09	-0,39	-0,57	-0,44
40	-1,09	-1,00	-0,99	-0,93
50	-1,36	-1,44	-1,26	-1,28
60	-1,37	-1,32	-1,16	-1,21
70	-1,10	-0,92	-0,85	-0,90
80	-0,67	-0,43	-0,48	-0,51
90	-0,26	0,03	-0,13	-0,13
100	0,45	0,45	0,18	0,20
110	0,75	0,81	0,47	0,50
150	1,83	2,15	1,51	1,58
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]	
1	11,30	10,61	10,94	
10	-3,04	0,35	-0,85	
13	-24,37	3,55	-3,78	
20	-287,56	13,77	-46,42	
36	63,95	47,54	59,77	
40	8,17	8,90	14,69	
50	-6,03	7,09	5,57	
60	3,48	15,39	11,98	
70	16,33	22,18	17,98	
80	35,63	28,15	24,22	
90	112,27	49,12	47,16	
100	2,07	59,36	56,31	
110	-8,97	37,68	33,68	
150	-17,78	17,43	13,31	

Πίνακας 14.12 Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης για καθένα από τα μοντέλα M0[T0], M11[T3], M12[T3] και M13[T3] καθώς και το σφάλμα των M11[T3], M12[T3] και M13[T3] ως προς το M0[T0]. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 250mm				
Τιμές	M0[T0]	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]
Min	-2,927	-2,709	-2,913	-2,887
Max	8,005	8,529	7,445	7,585
Σφάλμα ως προς το M0[T0] [%]				
Τιμές	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]	
Min	7,46	0,48	1,37	
Max	-6,55	6,99	5,24	

Από τα διαγράμματα των Εικόνων 14.22 και 14.23 αλλά και τους Πίνακες 14.11 και 14.12 προκύπτει ότι, με $\rho=\rho_0$, $c=c_0$ και $k=k_0$ όταν $E=E_0$ και $\alpha=\alpha(t)$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, (μοντέλο M11[T3]) οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν σφάλμα από +11,30 έως -24,37% (με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), ανάλογα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.22, Πίν. 14.11). Για τις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M11[T3] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 7,46% (Εικ. 14.23, Πίν. 14.12) ενώ, το σφάλμα της αντίστοιχης τελικής τιμής μετά την απόψυξη είναι -6,55% (και πάλι, με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]).

Στην περίπτωση του M12[T3] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c_0$, $k=k_0$ και $E=E(t)$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν, σε κάθε περίπτωση θετικό σφάλμα (όπου αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), από +10,61% έως +3,55% ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.22, Πίν. 14.11) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M9[T2] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 7% (Εικ. 14.23, Πίν. 14.12) το οποίο είναι και το σφάλμα της τελικής κατακόρυφης μετατόπισης.

Τέλος, περίπτωση του M13[T3] όπου $\rho=\rho_0$, $c=c_0$ και $k=k_0$ και $E=E_0$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), κοντά στη συγκόλληση (μέχρι απόσταση 13mm από τον άξονα συγκόλλησης) εμφανίζουν σφάλμα από +10,94% έως -3,78% (όπου αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]), ανάλογα πάντα με το σημείο μέτρησης (Εικ. 14.22 Πιν. 14.11) ενώ, σε ότι αφορά στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, το σφάλμα του M5[T1] ως προς το M0[T0] παραμένει σε κάθε περίπτωση και κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 5,24% (Εικ. 14.23, Πιν. 14.12) το οποίο είναι και το σφάλμα της τελικής κατακόρυφης μετατόπισης.

14.3.5 Σύνοψη

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων του υλικού στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της συγκόλλησης, τα οποία συγκρίθηκαν με το αρχικό, πλήρες μοντέλο όπου όλες οι ιδιότητες εισάγονται ως εξαρτώμενες της θερμοκρασίας.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι:

A) Σε ότι αφορά στη μεμονωμένη επίδραση των ιδιοτήτων (ρ , c , k) στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης, φαίνεται ότι ακόμα και όταν και οι τρεις εισάγονται ως σταθερές και ίσες με την τιμή που έχουν σε συνθήκες περιβάλλοντος το μέγιστο σφάλμα που παρατηρείται είναι της τάξης του 4% (Εικ. 14.14, Εικ. 14.15, Πιν. 14.4)

B) Εισάγοντας την τιμή της πυκνότητας σταθερή και ίση με την τιμή που έχει σε συνθήκες περιβάλλοντος δεν υπάρχει καμία ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα που αφορούν στο θερμικό κύκλο, στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) και στην κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, πάντα σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο (Εικ. 14.14, Εικ. 14.16, Εικ. 14.17, Πιν. 14.4, Πιν. 14.5, Πιν. 14.6).

Γ) Το όριο διαρροής έχει κυρίαρχο ρόλο στα αποτελέσματα που αφορούν στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) και στην κατακόρυφη μετατόπιση. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εισάγεται ως $\sigma_s = \sigma_s(t)$ διαφορετικά τα αποτελέσματα εμφανίζουν σημαντική απόκλιση και κατά το μεταβατικό στάδιο της συγκόλλησης και ως προς τις τελικές τιμές (Εικ. 14.18, Εικ. 14.19, Πιν. 14.7, Πιν. 14.8). Η σταθερή σ_{s0} υπερεκτιμά την ικανότητα διαρροής του υλικού, η οποία στην πραγματικότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας, με συνέπεια να κυριαρχούν ελαστικές παραμορφώσεις, στην περιοχή της συγκόλλησης και όχι πλαστικές.

Δ) Για όλες τις υπόλοιπες ιδιότητες, η παραμετρική μελέτη έδειξε πως ανεξάρτητα με την επιλογή της μορφής που αυτές εισάγονται το σφάλμα σε ότι αφορά στις μέγιστες κύριες παραμένουσες τάσεις (κοντά στη συγκόλληση) και στην κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης είναι της τάξης του 20% και 10% αντίστοιχα (Εικ. 14.14 - Εικ. 14.23 και Πιν. 14.4 - Πιν. 14.12). Μάλιστα κατά τη σύγκριση των μοντέλων M0[T0] ($\rho=\rho(t)$, $c=c(t)$ και $k=k(t)$ και $E=E(t)$, $\alpha=\alpha(t)$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$) και M13[T13] ($\rho=\rho_0$, $c=c_0$ και $k=k_0$ και $E=E_0$, $\alpha=\alpha_0$, $\sigma_s=\sigma_s(t)$), όταν δηλαδή όλες οι ιδιότητες είναι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία και αντίστοιχα όταν όλες οι ιδιότητες λαμβάνονται σταθερές και σε συνθήκες περιβάλλοντος, εκτός του ορίου διαρροής, προέκυψαν αποτελέσματα με σφάλμα της τάξης του 10% για τις μέγιστες παραμένουσες τάσεις (κοντά στη συγκόλληση) και 5% για την τελική κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης (Εικ. 14.22, Εικ. 14.23, Πιν. 14.11, Πιν. 14.12).

Στους Πίνακες 14.13 - 14.15 που ακολουθούν, συνοψίζονται όλα τα σφάλματα των αναφερόμενων εκτελεσθέντων μοντέλων, M1[T1], M2[T2], M3[T3], M4[T1], M5[T1], M7[T1], M8[T2], M9[T2], M10[T2], M11[T3], M12[T3], M13[T3], σε σύγκριση με το αρχικό πλήρες M0[T0].

Πίνακας 14.13 Μέγιστα σφάλματα θερμικών κύκλων των T1 – T3 ως προς το T0.

Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το T0

Σφάλμα ως προς το T0 [%]			
Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	T1	T2	T2
10	0,77	-3,15	-4,08
20	0,61	-2,30	-2,06
40	0,42	-1,41	-0,98
60	0,30	-0,98	-0,63
100	0,17	-0,60	-0,36
150	0,10	-0,43	-0,22

Πίνακας 14.14 Σφάλματα των M1[T1], M2[T2], M3[T3], M4[T1], M5[T1], M7[T1], M8[T2], M9[T2], M10[T2], M11[T3], M12[T3], M13[T3]

ως προς το M0[T0] σε ότι αφορά στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από άξονα συγκ/σης [mm]	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]	M4[T1]	M5[T1]	M7[T1]	M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]
1	-0,15	9,97	-5,15	9,69	8,13	8,79	10,44	9,27	9,86	11,30	10,61	10,94
10	0,87	-0,80	-1,65	-1,06	9,51	6,20	-1,35	3,74	1,04	-3,04	0,35	-0,85
13	2,61	-11,60	-17,03	-4,43	18,90	12,22	-18,87	6,97	0,13	-24,37	3,55	-3,78
20	23,21	-32,27	-113,97	-39,05	45,37	61,13	-187,19	35,97	10,31	-287,56	13,77	-46,42
36	-2,55	14,27	50,61	6,77	-2,79	4,68	25,10	12,97	23,04	63,95	47,54	59,77
40	-24,85	-19,88	1,48	-22,34	-14,86	-13,57	-15,78	-10,52	-7,22	8,17	8,90	14,69
50	0,08	-5,34	-4,53	-3,36	12,00	8,60	-8,20	7,04	4,21	-6,03	7,09	5,57
60	21,41	14,61	7,23	17,10	30,24	25,93	10,47	23,26	19,16	3,48	15,39	11,98
70	39,64	33,88	20,60	35,76	43,74	39,69	30,07	36,84	32,81	16,33	22,18	17,98
80	62,14	59,70	39,26	59,31	56,47	52,92	57,17	50,95	47,67	35,63	28,15	24,22
90	145,11	157,00	112,49	146,19	99,24	97,22	159,54	100,05	99,49	112,27	49,12	47,16
100	3,67	-12,39	6,57	-1,03	44,91	42,55	-18,24	36,54	32,99	2,07	59,36	56,31
110	3,25	-11,70	-3,84	-1,71	36,76	33,55	-17,51	27,27	23,13	-8,97	37,68	33,68
150	2,80	-10,66	-13,01	-1,60	28,59	25,28	-15,56	18,28	14,33	-17,78	17,43	13,31

Πίνακας 14.15 Σφάλματα των M1[T1], M2[T2], M3[T3], M4[T1], M5[T1], M7[T1], M8[T2], M9[T2], M10[T2], M11[T3], M12[T3], M13[T3] ως προς το M0[T0] σε ότι αφορά στην κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης για τη θέση που βρίσκεται σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης. Με αρνητικό πρόσημο η υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς το M0[T0]

Απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 250mm												
Τιμές	M1[T1]	M2[T2]	M3[T3]	M4[T1]	M5[T1]	M7[T1]	M8[T2]	M9[T2]	M10[T2]	M11[T3]	M12[T3]	M13[T3]
Min	-0,24	1,93	6,52	0,46	0,00	-5,78	2,65	-4,61	-3,79	7,46	0,48	1,37
Max	0,90	-3,74	-5,00	-0,61	0,00	10,87	-5,05	8,54	6,92	-6,55	6,99	5,24

14.4 Μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στην παράγραφο αυτή, μελετάται η επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης στα εξαγόμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης (συγκόλληση ελασμάτων πάχους 4mm), σε ότι αφορά στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης, τις παραμένουσες τάσεις και τις κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω γωνιακής παραμόρφωσης εξαιτίας της συγκόλλησης. Σε κάθε περίπτωση τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με το αρχικό μοντέλο προσομοίωσης (Παρ. 13.9.6 – M0[T0]) όπου η συγκόλληση πραγματοποιείται με ένα πέρασμα. Σκοπός είναι να διερευνηθεί αν υπάρχει κάποια ακολουθία συγκόλλησης που μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα κυρίως σε ότι αφορά στις παραμένουσες τάσεις και στις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης.

☞ Μελετήθηκαν έξι διαφορετικές περιπτώσεις ακολουθίας συγκόλλησης (Εικ. 14.24) οι οποίες είναι βασισμένες στην ακολουθία της οπισθοδρόμησης (back-step welding – Παρ. 7.3.5) και οι οποίες εφαρμόστηκαν στο μοντέλο που περιγράφηκε σε ολόκληρη την Παράγραφο 13.9.

☞ Αναλυτικότερα, το μήκος συγκόλλησης των 700mm χωρίστηκε σε δύο (Εικ. 14.24α, Εικ. 14.24β) ή τέσσερα (Εικ. 14.24γ - 14.24στ) κατά περίπτωση ισομήκη τμήματα έτσι ώστε να εφαρμοστεί σε αυτά η ακολουθία της οπισθοδρόμησης σε διαφορετικές εκδοχές της.

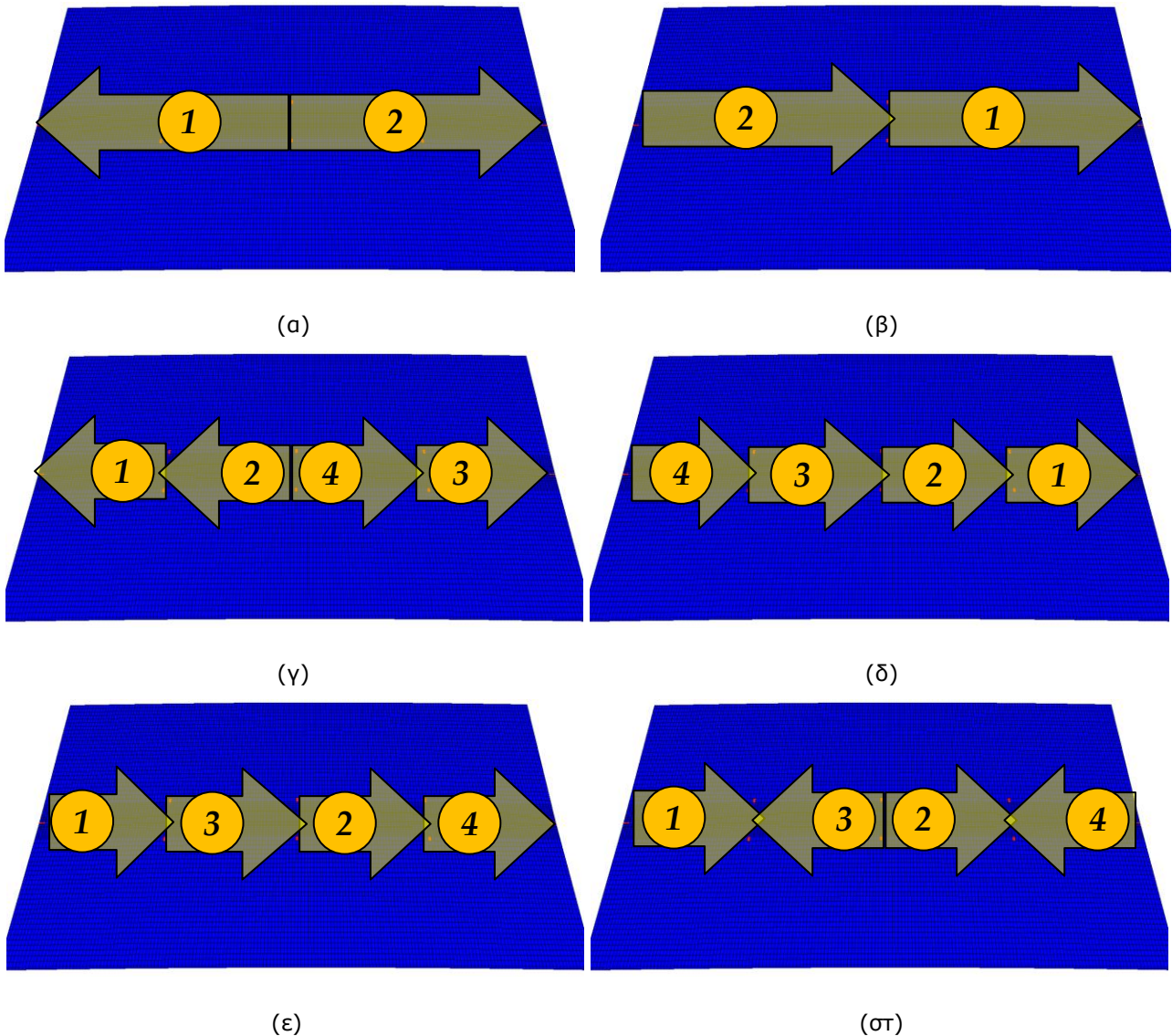
☞ Σημειώνεται ότι κατά τις προσομοιώσεις, στις περιπτώσεις όπου υπήρχε έναρξη ή πέρας της συγκόλλησης κάποιου τμήματος σε περιοχή όπου είχε προηγηθεί η συγκόλληση άλλου τμήματος, πραγματοποιούνταν επικάλυψη μήκους 4mm δηλαδή η συγκόλληση ξεκινούσε (ή αντίστοιχα τερματιζέ) 4mm πάνω σε προηγούμενη προσομοιωμένη στρώση.

☞ Τέλος, ο χρόνος μεταξύ του τέλους συγκόλλησης κάποιου τμήματος και αρχής συγκόλλησης κάποιου άλλου θεωρήθηκε μηδενικός καθώς έγινε η παραδοχή ότι στην περίπτωση ρομποτικής συγκόλλησης η κίνηση του βραχίονα συγκόλλησης γίνεται με τόσο μεγάλη ταχύτητα (ως και 1000mm/sec) ώστε πρακτικά ο συνολικός νεκρός χρόνος να είναι της τάξης κλάσματος του δευτερολέπτου.

☞ Περιγράφοντας τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης όπως αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 14.24, αναφέρονται τα εξής:

A) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε δύο τμήματα, αντίθετης φοράς (συμμετρία ως προς το μέσο του άξονα συγκόλλησης) - Εικ. 14.25α. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 350mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά επίσης από το μέσο του άξονα συγκόλλησης (με επικάλυψη 4mm στην έναρξη της προηγούμενης

στρώσης) και ολοκληρώνεται στο άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 354mm.



Εικόνα 14.24 Σχηματική παράσταση των έξι διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης που προσομοιώθηκαν. Με βέλη η φορά συγκόλλησης

B) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε δύο τμήματα, ίδιας φοράς - Εικ. 14.25β. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 350mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά από το άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων και ολοκληρώνεται στο μέσο του άξονα συγκόλλησης (με επικάλυψη 4mm της προηγούμενης στρώσης) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 354mm.

Γ) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας ανά δύο φορές (συμμετρία ως προς το μέσο του άξονα συγκόλλησης) - Εικ. 14.25γ. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά -175mm (με '+/-' οι ισαποστάσεις εκατέρωθεν του μέσου του άξονα συγκόλλησης) από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 175mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στην περιοχή έναρξης της στρώσης του πρώτου τμήματος (με επικάλυψη 4mm) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 179mm. Το τρίτο τμήμα ξεκινά +175mm (με '+/-' οι ισαποστάσεις εκατέρωθεν του μέσου του άξονα συγκόλλησης) από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 175mm. Το τέταρτο τμήμα ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στην περιοχή έναρξης της στρώσης του τρίτου τμήματος (με επικάλυψη 4mm) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 179mm.

Δ) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας φοράς - Εικ. 14.25δ. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά +175mm (με '+/-' οι ισαποστάσεις εκατέρωθεν του μέσου του άξονα συγκόλλησης) από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 175mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στην περιοχή έναρξης της στρώσης του πρώτου τμήματος (με επικάλυψη 4mm) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 179mm. Το τρίτο τμήμα ξεκινά -175mm (με '+/-' οι ισαποστάσεις εκατέρωθεν του μέσου του άξονα συγκόλλησης) από το μέσο του άξονα συγκόλλησης και ολοκληρώνεται στο μέσο του άξονα συγκόλλησης, στην περιοχή έναρξης του δεύτερου περάσματος πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 179mm (επικάλυψη 4mm). Το τέταρτο τμήμα ξεκινά από άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων και ολοκληρώνεται στην περιοχή έναρξης του τρίτου περάσματος πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 179mm (επικάλυψη 4mm).







Ε) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα με τεχνική παράβλεψης, ίδιας φοράς - Εικ. 14.25ε. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά από το ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων και ολοκληρώνεται πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 175mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης (παραλείπονται 175mm συγκόλλησης) και με την ίδια φορά συγκόλλησης όπως στο πρώτο τμήμα ολοκληρώνεται πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 175mm. Το τρίτο τμήμα ξεκινά από την περιοχή τέλους της πρώτης στρώσης καλύπτοντας το ασυγκόλλητο τμήμα μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης (ίδια φορά συγκόλλησης) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους

183mm (επικάλυψη 4mm τόσο στο τέλος της πρώτης στρώσης όσο και στην αρχή της δεύτερης). Το τέταρτο τμήμα ξεκινά από την περιοχή τέλους της δεύτερης στρώσης και φτάνει στο άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων (ίδια φορά συγκόλλησης) διανύοντας απόσταση 179mm (επικάλυψη 4mm)

ΣΤ) Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα με τεχνική παράβλεψης, αντίθετης φοράς - Εικ. 14.25στ. Κατά το πρώτο τμήμα, η συγκόλληση ξεκινά από το ένα άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων και ολοκληρώνεται πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 175mm. Το δεύτερο τμήμα ξεκινά από το μέσο του άξονα συγκόλλησης (παραλείπονται 175mm συγκόλλησης) και με την ίδια φορά συγκόλλησης όπως στο πρώτο τμήμα ολοκληρώνεται πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης συνολικού μήκους 175mm. Το τρίτο τμήμα ξεκινά από την περιοχή αρχής της δεύτερης στρώσης καλύπτοντας το ασυγκόλλητο τμήμα μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης (αντίθετη φορά συγκόλλησης) πραγματοποιώντας στρώση συγκόλλησης μήκους 183mm (επικάλυψη 4mm τόσο στο τέλος της πρώτης στρώσης όσο και στην αρχή της δεύτερης). Το τέταρτο τμήμα ξεκινά από άλλο άκρο των υπό συγκόλληση ελασμάτων και ολοκληρώνεται στην περιοχή τέλους της δεύτερης στρώσης (αντίθετη φορά) διανύοντας απόσταση 179mm (επικάλυψη 4mm).

➤ Προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη των εικόνων και των διαγραμμάτων που παρατίθενται, για κάθε ακολουθία συγκόλλησης αποδόθηκε συγκεκριμένη κωδική ονομασία και σύμβολο ως εξής (Πίν 14.16):

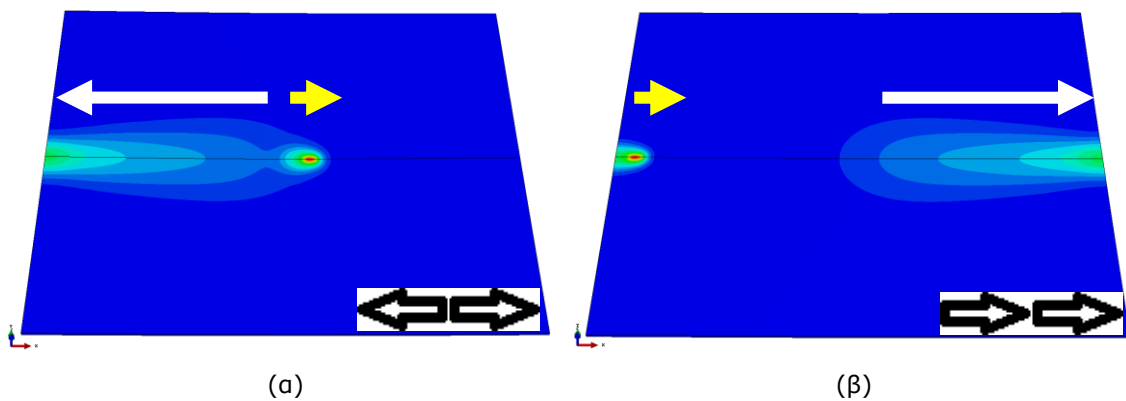
Πίνακας 14.16 Κωδική ονομασία και σύμβολα για καθεμιά από τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης που μελετήθηκαν

Κωδικός	Περιγραφή	Σύμβολο
Seq-1	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε δύο τμήματα, αντίθετης φοράς	
Seq-2	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε δύο τμήματα, ίδιας φοράς	
Seq-3	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας ανά δύο φορές	
Seq-4	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας φοράς	
Seq-5	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα με τεχνική παράβλεψης, ίδιας φοράς	
Seq-6	Ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα με τεχνική παράβλεψης, αντίθετης φοράς	

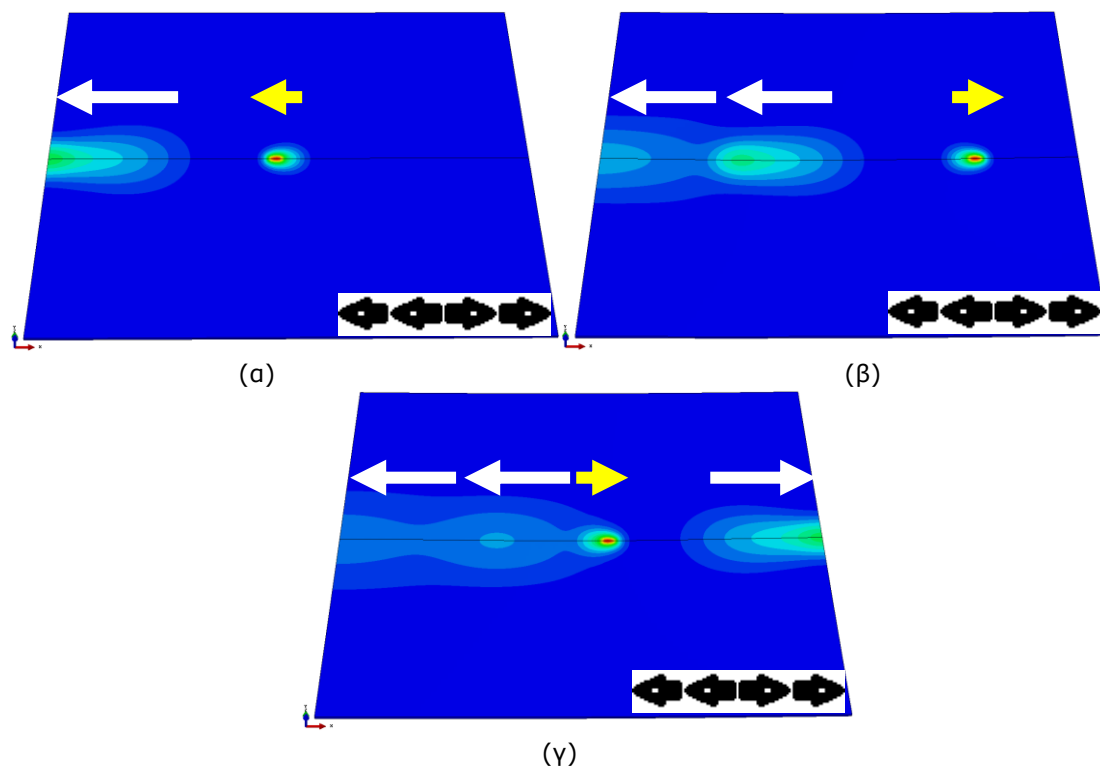
14.4.1 Αποτελέσματα και συζήτηση

14.4.1.1 Θερμικοί κύκλοι

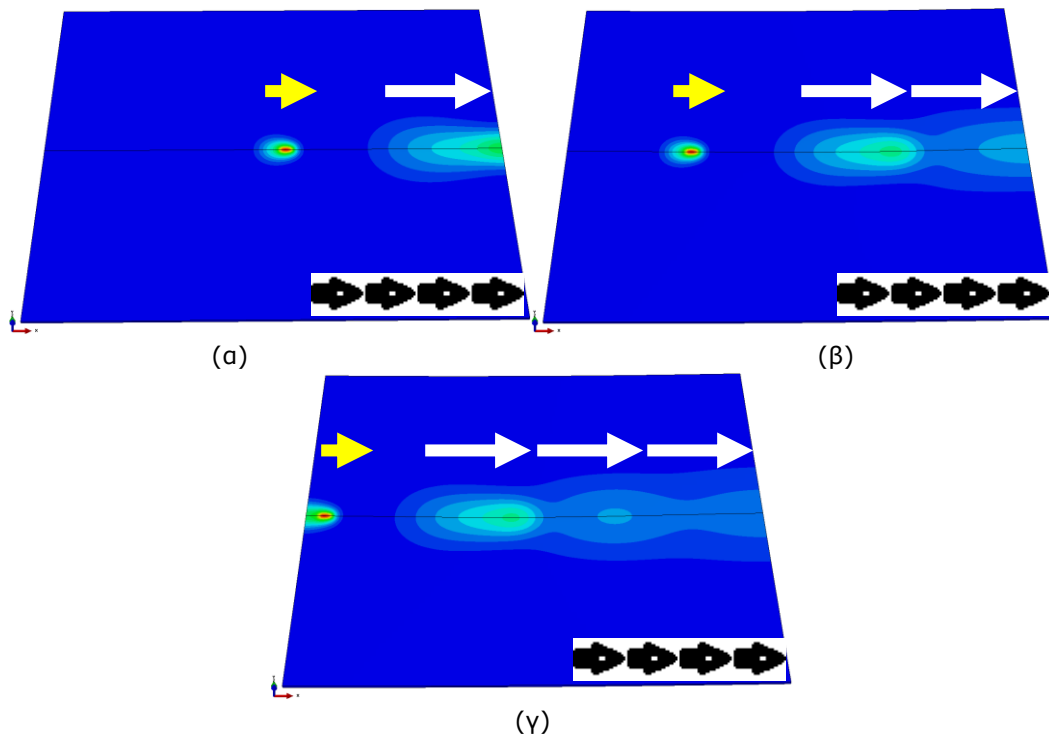
Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται η κατανομή των θερμοκρασιών σε συγκεκριμένες και καθοριστικές χρονικές στιγμές της προσομοίωσης για κάθε ακολουθία συγκόλλησης (Εικ. 14.25 - 14.29).



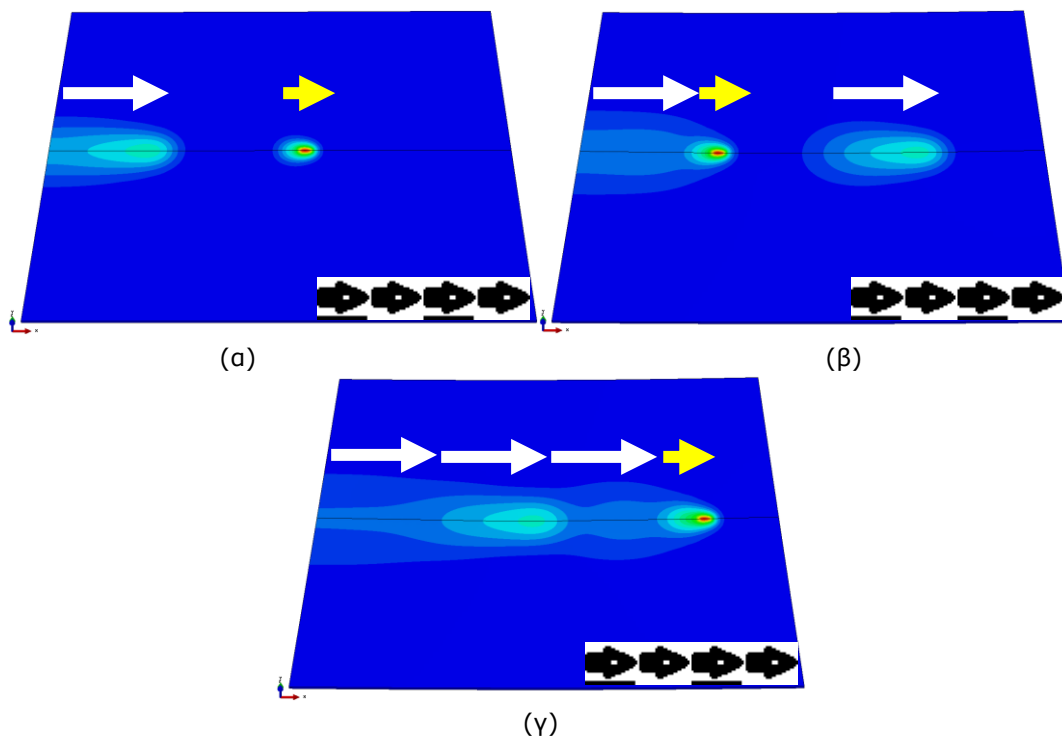
Εικόνα 14.25 Κατανομή θερμοκρασιών σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρωθεί για το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος για τις περιπτώσεις α) Seq-1 και β) Seq-2



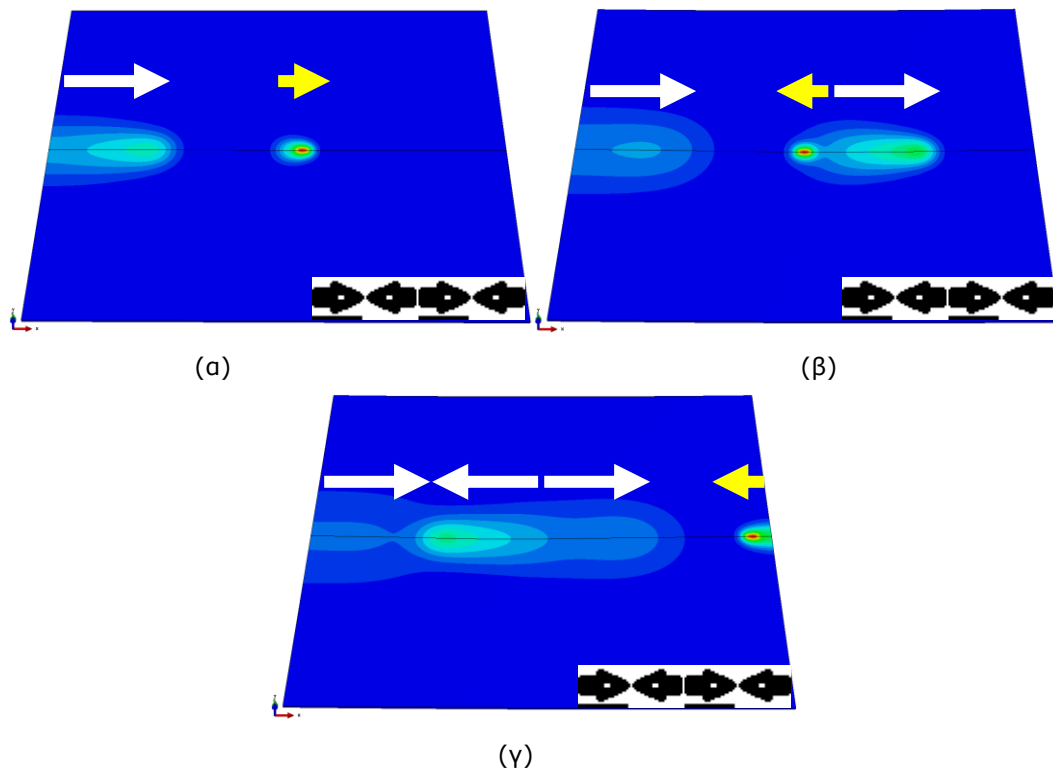
Εικόνα 14.26 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-3, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος



Εικόνα 14.27 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-4, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος



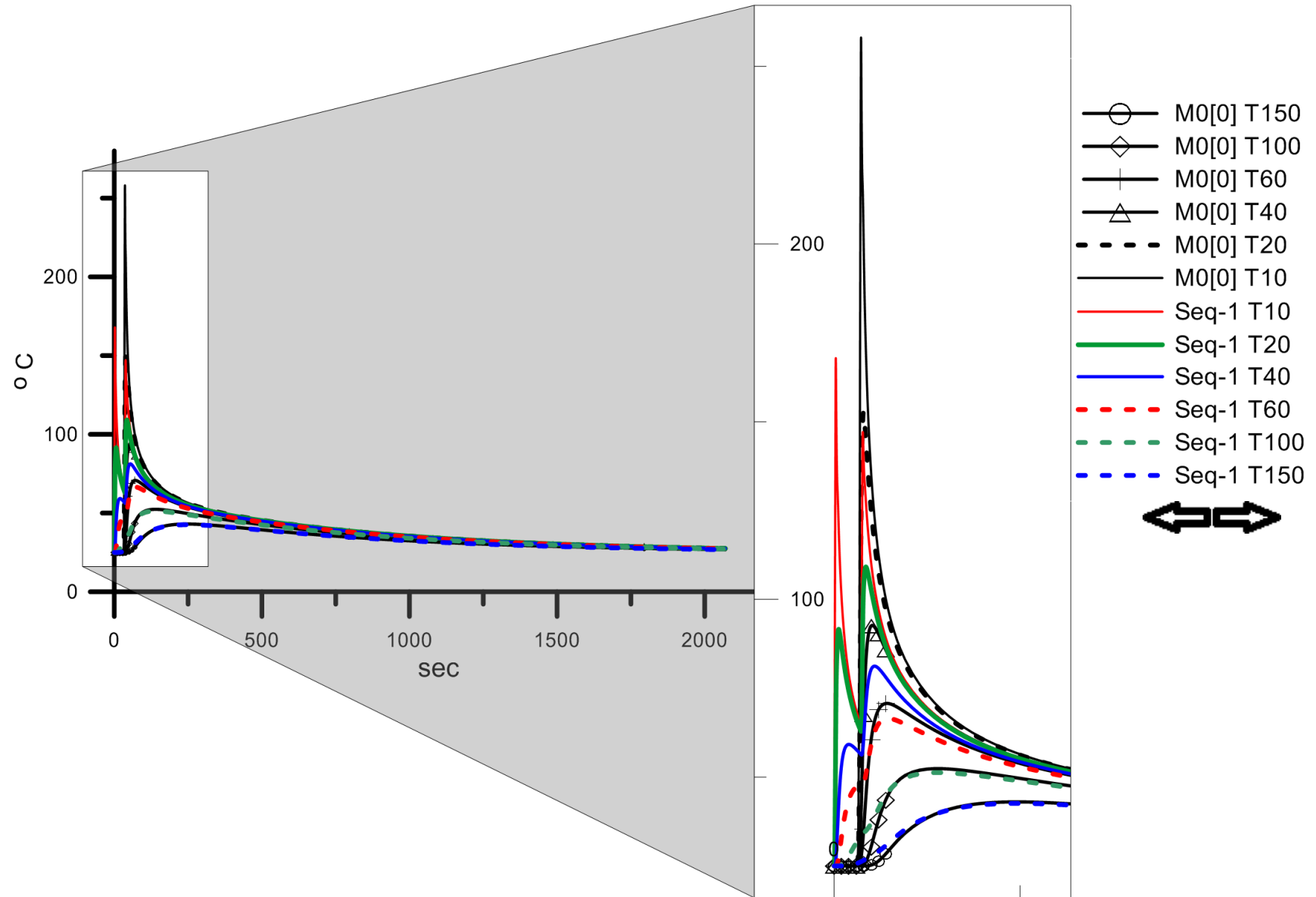
Εικόνα 14.28 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-5, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος



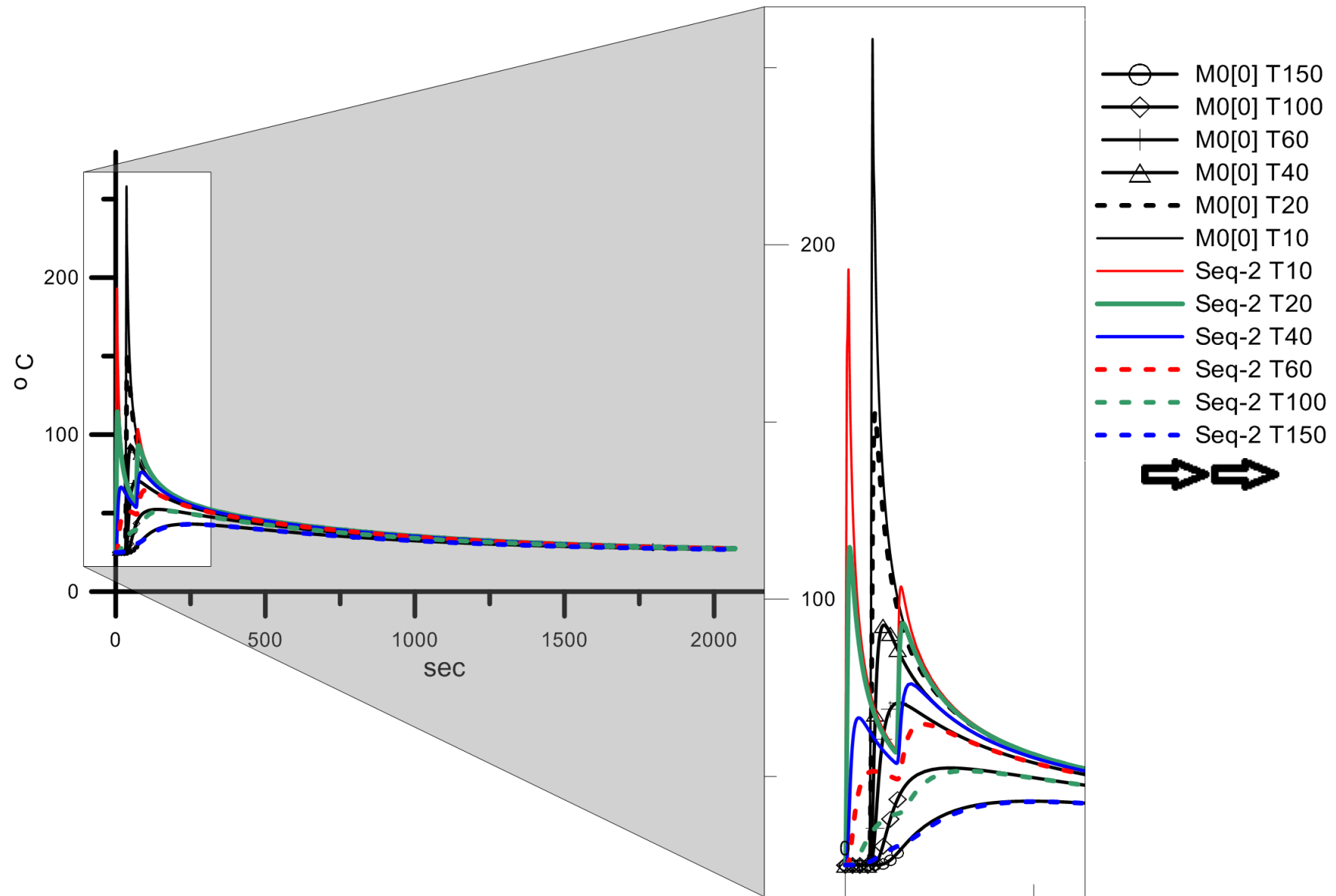
Εικόνα 14.29 Κατανομή θερμοκρασιών για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-6, σε χρονική στιγμή όπου η προσομοίωση συγκόλλησης έχει ολοκληρώσει α) το πρώτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του δεύτερου τμήματος, β) και το δεύτερο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τρίτου τμήματος, γ) και το τρίτο τμήμα και βρίσκεται σε εξέλιξη η συγκόλληση του τέταρτου τμήματος

Στις Εικόνες (Εικ. 14.30 - 14.35) που ακολουθούν, φαίνονται οι θερμικοί κύκλοι των συγκολλήσεων για τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης (Seq-1 - Seq-6) και οι σύγκρισή τους με το αρχικό, πλήρες μοντέλο προσομοίωσης M0[0].

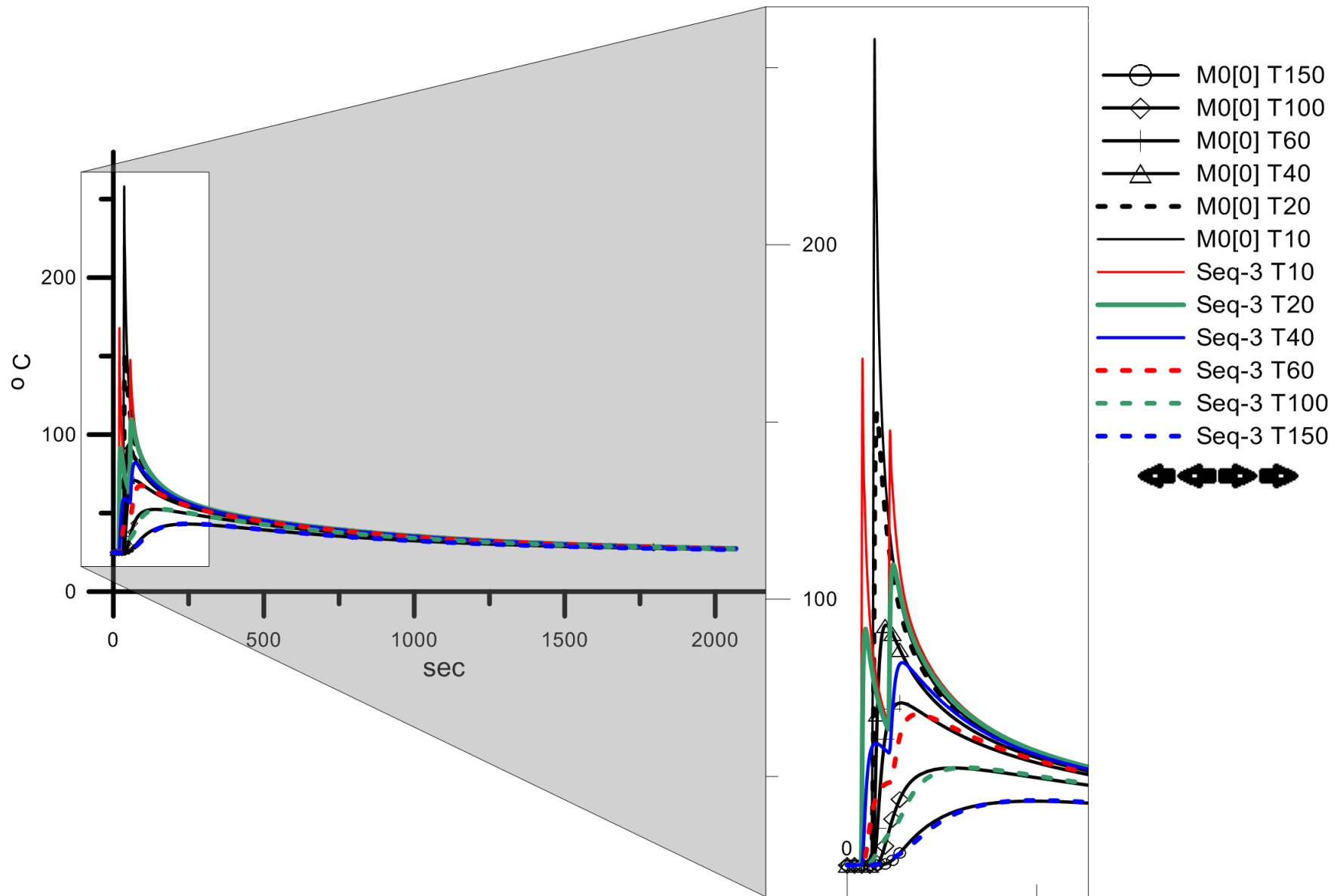
Σημείωση: Υπενθυμίζεται ότι οι κωδικοί 'Txx' δηλώνουν τη θέση μέτρησης θερμοκρασίας με 'xx' την απόσταση (σε mm) από τον άξονα συγκόλλησης (π.χ. T10: απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης 10mm).



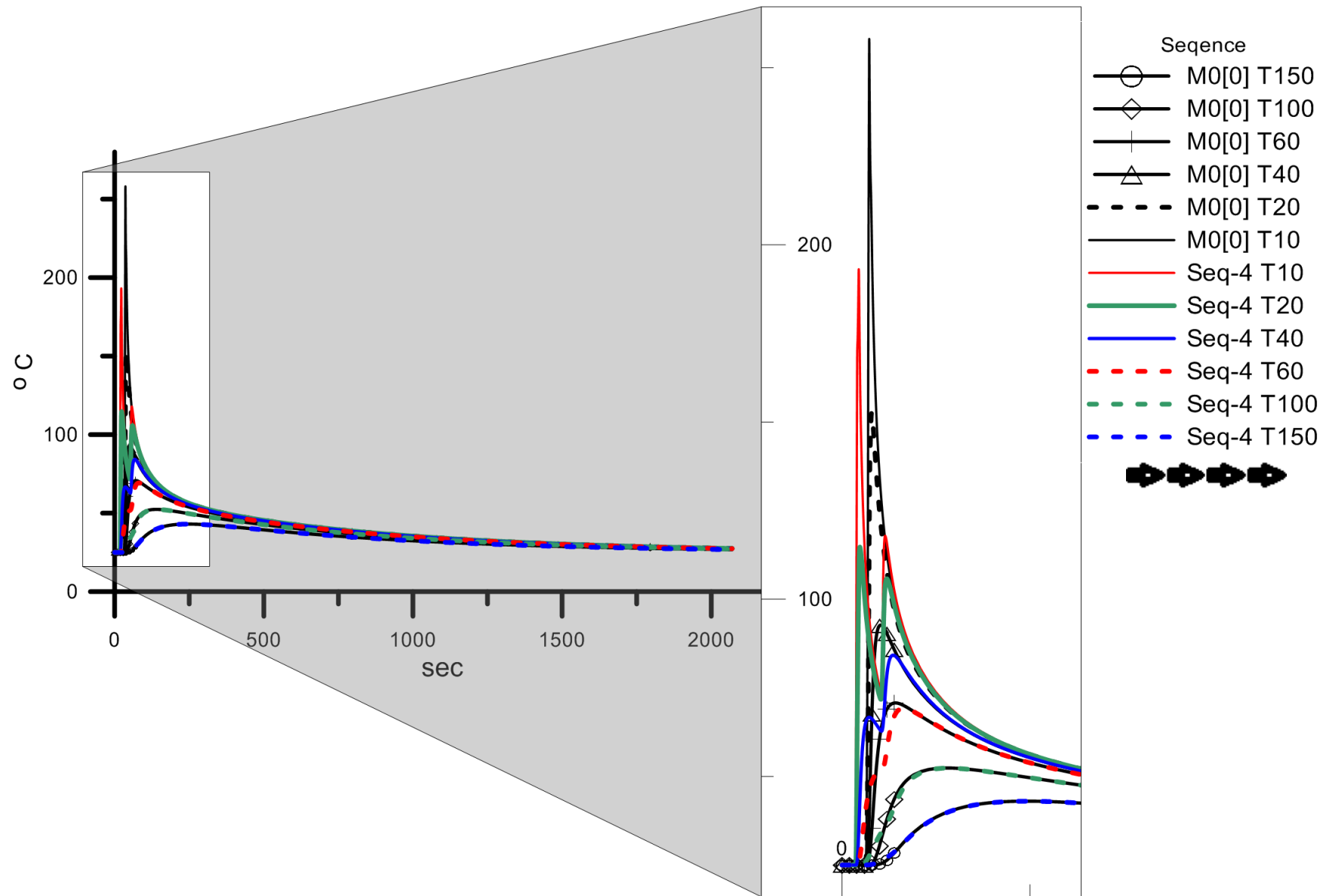
Εικόνα 14.30 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-1'. Σύγκριση με το M[0]



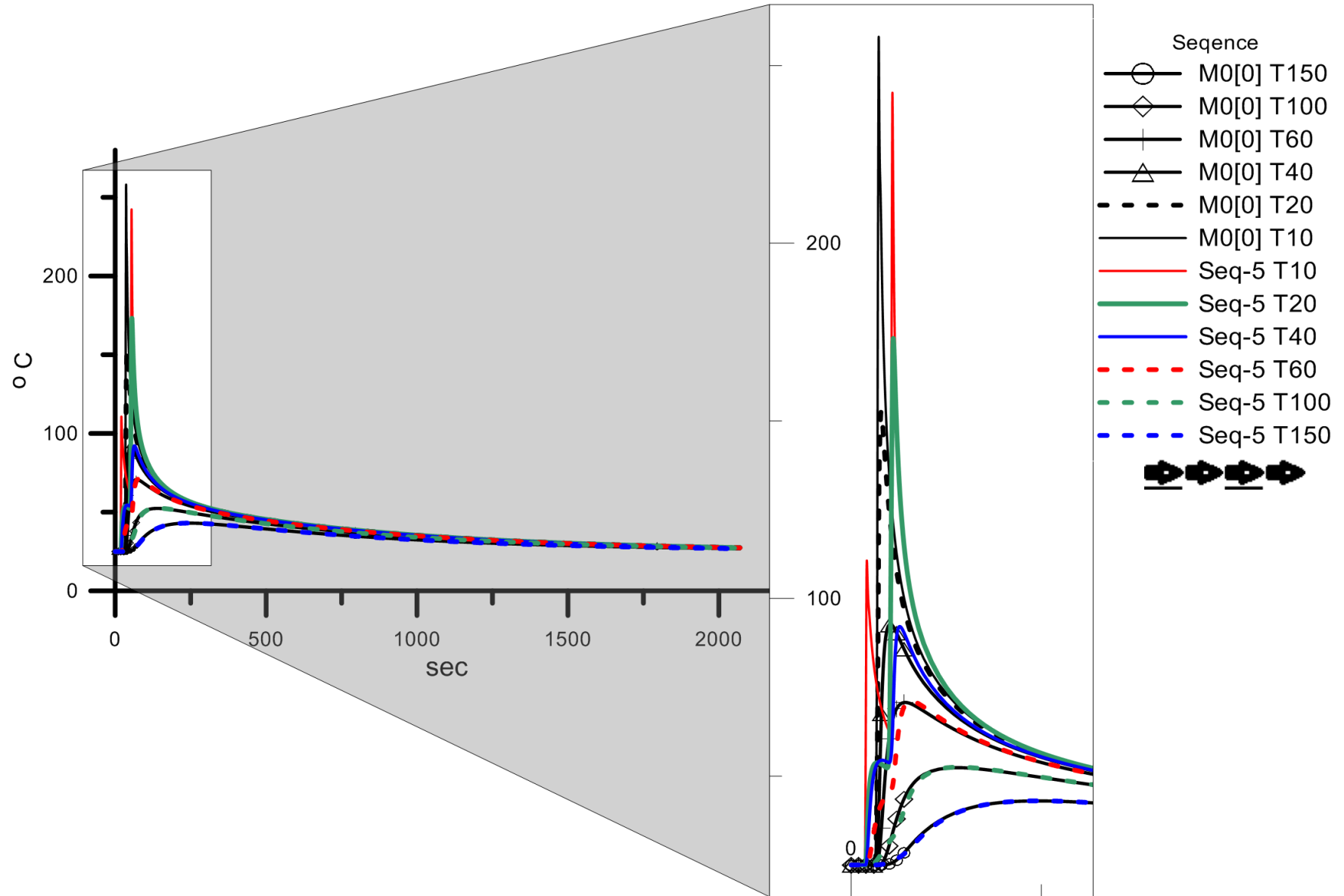
Εικόνα 14.31 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-2'. Σύγκριση με το M[0]



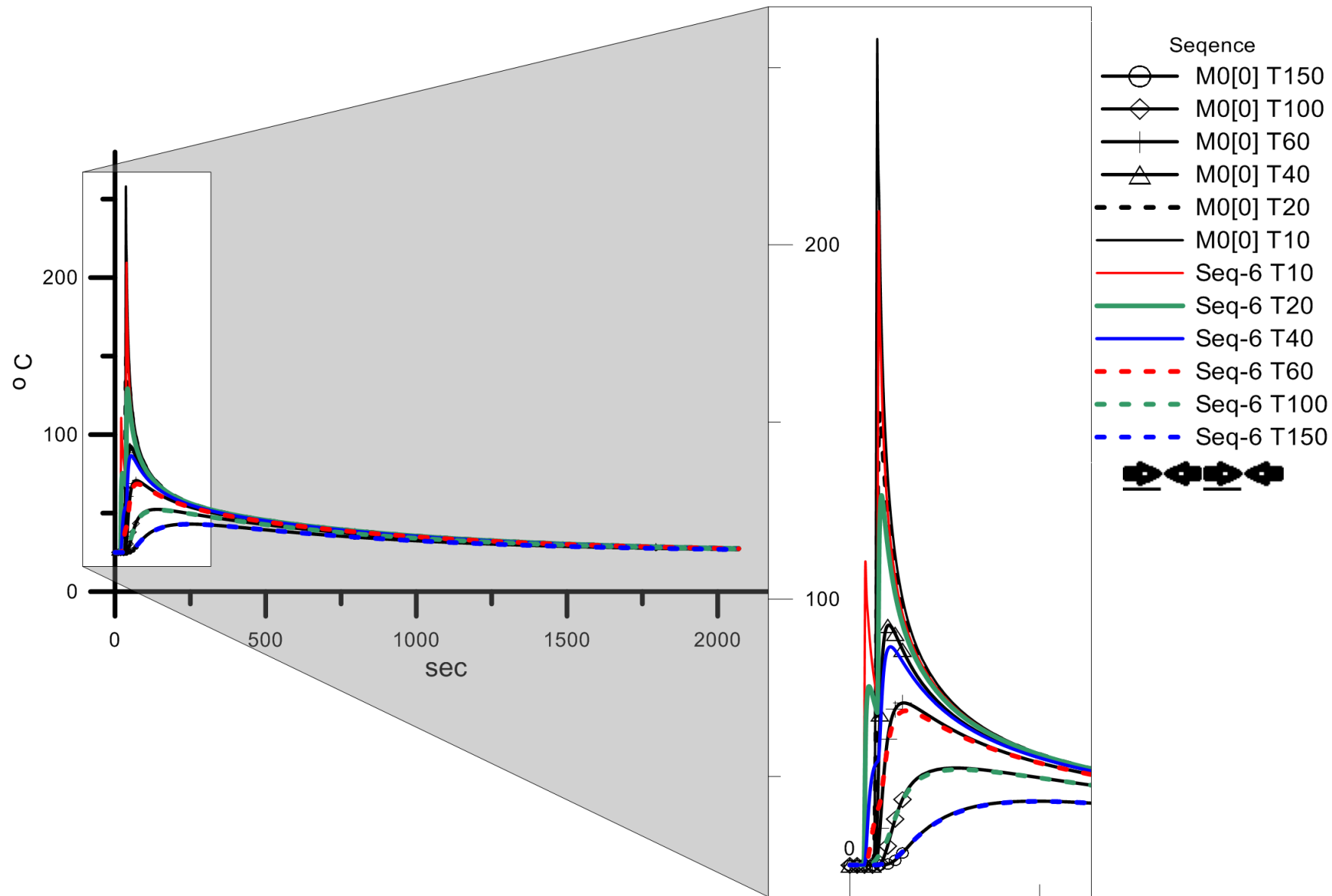
Εικόνα 14.32 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-3'. Σύγκριση με το M[0]



Εικόνα 14.33 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-4'. Σύγκριση με το M[0]



Εικόνα 14.34 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-5'. Σύγκριση με το M[0]



Εικόνα 14.35 Θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-6'. Σύγκριση με το M[0]

Από τις καμπύλες Θερμοκρασίας - Χρόνου των διαγραμμάτων που προηγήθηκαν, για κάθε ακολουθία συγκόλλησης που εφαρμόστηκε (Εικ. 14.30 - 14.35), προκύπτουν τα εξής:

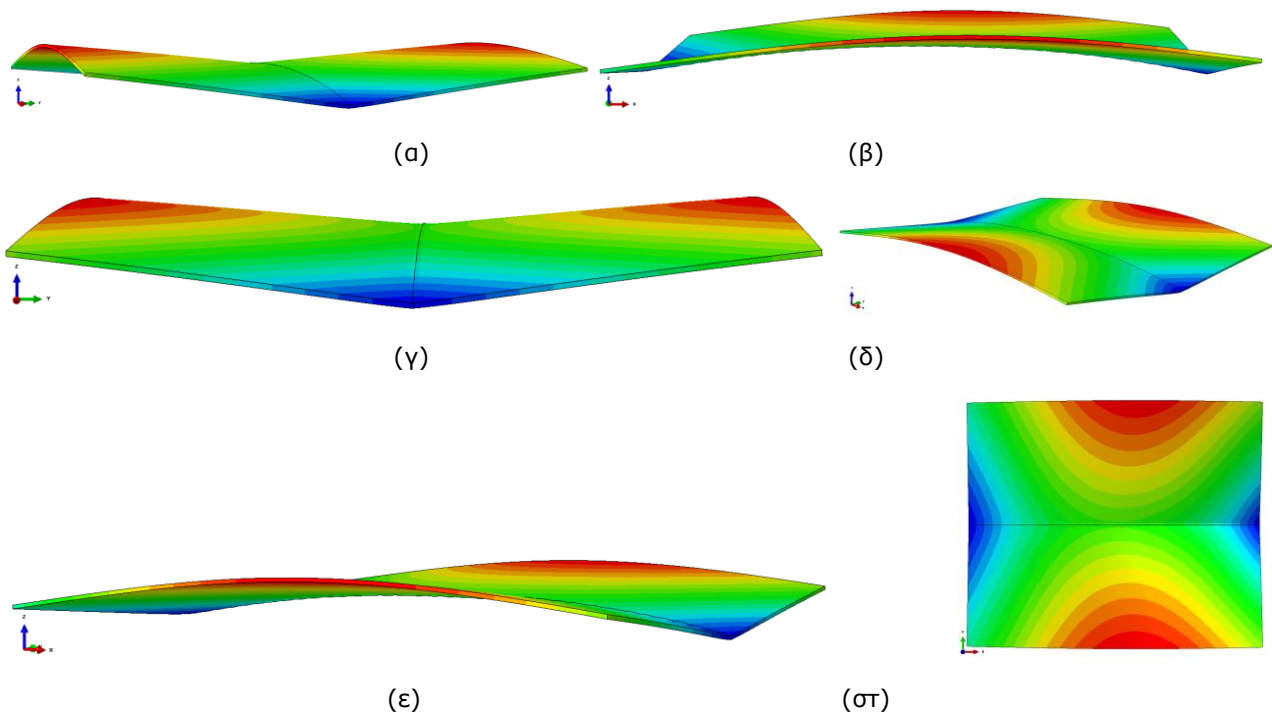
- Κοντά στον άξονα συγκόλλησης και σε απόσταση έως 60mm από αυτόν (θέσεις T10, T20, T40 και T60) οι καμπύλες εμφανίζουν δύο κορυφές που αντιστοιχούν κατά περίπτωση σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές όπου το τόξο συγκόλλησης περνά από την περιοχή του μέσου μήκους συγκόλλησης όπου και είναι εγκατεστημένα τα θερμοστοιχεία.

- Οι καμπύλες των θερμικών κύκλων σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 100mm από τον άξονα συγκόλλησης (θέσεις T100 και T150) δείχνουν να μην επηρεάζονται από την ακολουθία συγκόλλησης και σχεδόν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες της περίπτωσης M0[0] όπου η συγκόλληση εκτελείται με μια συνεχόμενη στρώση.

- Σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθίας συγκόλλησης, οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που καταγράφονται, στα σημεία μέτρησης, είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνει η προσομοίωση M0[0] γεγονός που υποδεικνύει μια καλύτερη γενική κατανομή των θερμοκρασιών στα υπό συγκόλληση ελάσματα, κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης.

14.4.1.2 Κατακόρυφη μετατόπιση λόγω γωνιακής παραμόρφωσης

Στα σχήματα που ακολουθούν (Εικ. 14.36), φαίνεται η συνολική παραμόρφωση των συγκολλημένων ελασμάτων μετά το τέλος της προσομοίωσης για καθένα από τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης.



Εικόνα 14.36 Συνολική παραμόρφωση λόγω συγκόλλησης. α) Seq-1, β) Seq-2, γ) Seq-3, δ) Seq-4, ε) Seq-5, στ) Seq-6

- Όπως φαίνεται (Εικ. 14.36), η συνολική τελική παραμόρφωση των συγκολλημένων ελασμάτων μετά το τέλος της προσομοίωσης έχει την ίδια μορφή με αυτή που παρατηρήθηκε ως αποτέλεσμα από την προσομοίωση του πλήρους μοντέλου M0[0] (Εικ. 14.5 - 14.7), αλλά και την πειραματική διαδικασία (Εικ. 11.10).

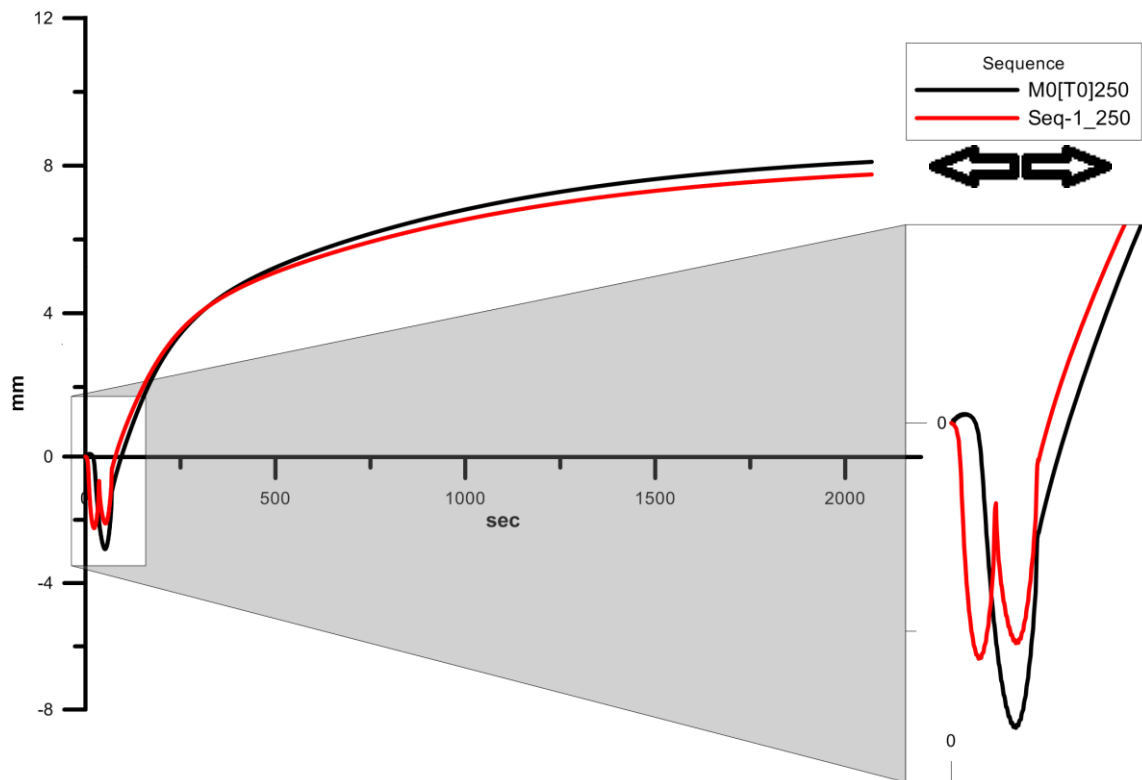
Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική καθώς η συγκόλληση του συνολικού μήκους ραφής κατά τμήματα, και με διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης δεν είναι δεδομένο ότι θα οδηγήσει σε ίδια μορφής παραμόρφωση με την περίπτωση όπου το συνολικό μήκος ραφής συγκολλείται συνεχόμενα, με μία στρώση και μία κατεύθυνση συγκόλλησης.

Η διαφοροποίηση της κατανομής θερμότητας και των μεταβατικών θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων από τμήμα συγκόλλησης σε τμήμα συγκόλλησης, σε σύγκριση με το αρχικό πλήρες μοντέλο προσομοίωσης M0[0] θα μπορούσε να δώσει και διαφορετικές μορφές παραμόρφωσης από τη γωνιακή και τη διαμήκη καμπτική που παρατηρείται (π.χ. θα μπορούσε να αποδώσει στρεπτικές παραμορφώσεις ή κυρίως, παραμορφώσεις λυγισμού που έτσι κι αλλιώς συναντώνται συχνά σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων).

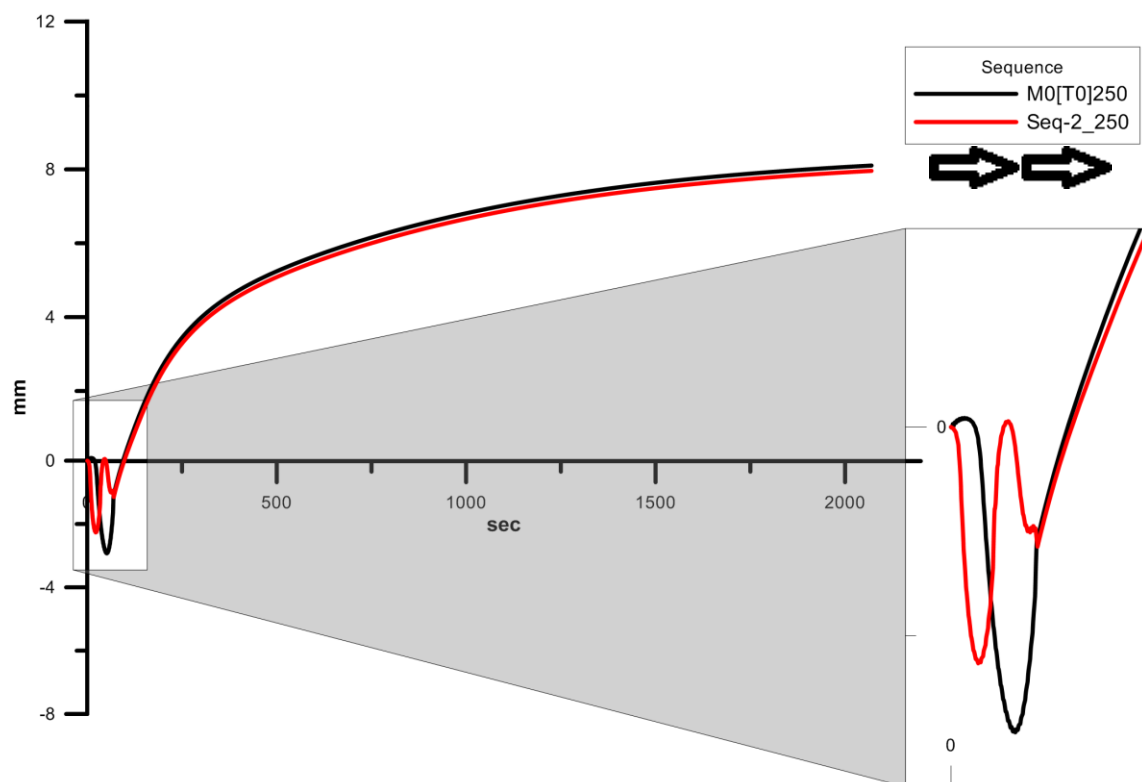
- Ωστόσο τελικά, οι τελικές παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης δείχνουν να μην επηρεάζονται από την επιλογή της συγκόλλησης με διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης κατά τμήματα.

Σε ότι αφορά στις καμπύλες Κατακόρυφης μετατόπισης - Χρόνου για τις έξι διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης που προσομοιώθηκαν, πάντα και σε σύγκριση με το μοντέλο M0[0], αυτές φαίνονται στις Εικόνες 14.37 - 14.42.

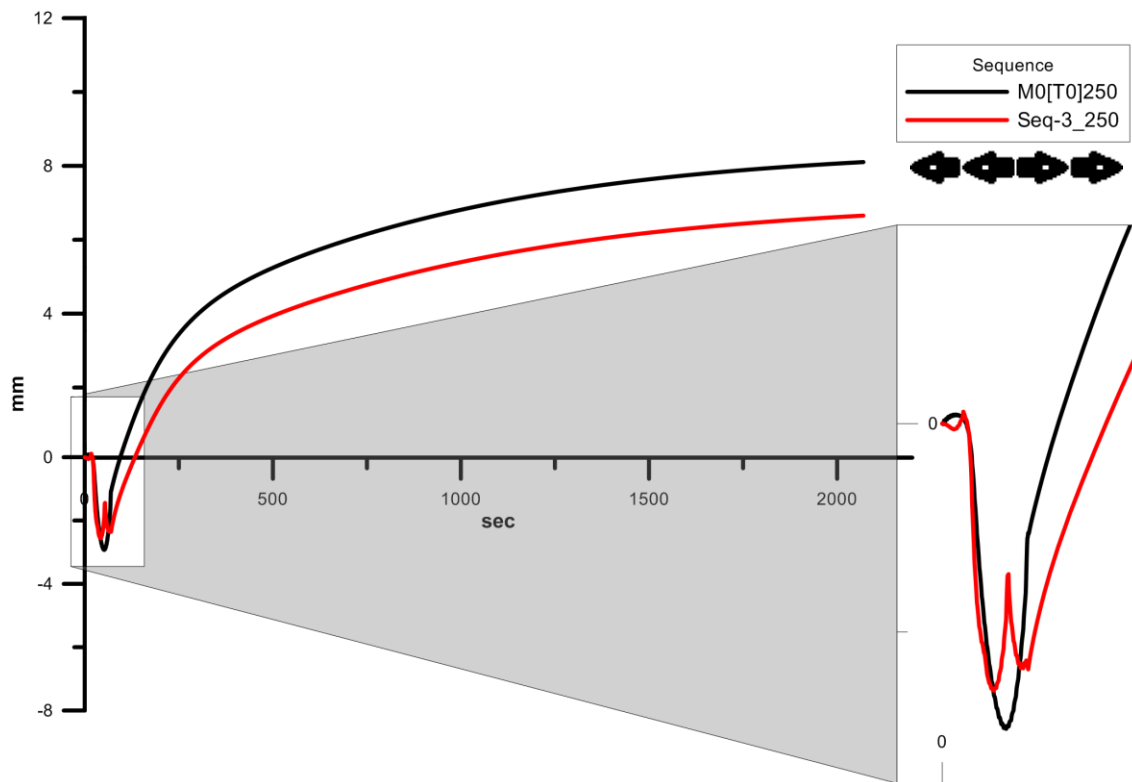
☞ Σημειώνεται πως στις Εικόνες αυτές (Εικ. 14.37 - 14.42) εμφανίζεται μόνο το σημείο μέτρησης που βρίσκεται στο μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης και σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης καθώς αφενός μεν το σημείο αυτό αποτέλεσε και σημείο μέτρησης κατά την πειραματική μελέτη (Εικ. 11.11 - 11.14, βλ. Υ3 - 250) και συγκρίθηκε με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου M0[0] (Εικ. 14.11 - 14.12), αφετέρου δε, δεδομένου ότι η μετρούμενη κατακόρυφη μετατόπιση συνδέεται με τη γωνιακή παραμόρφωση λόγω συγκόλλησης, η όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης δίνει καλύτερη εικόνα για το μέγεθος της παραμόρφωσης. Άλλωστε, όπως φάνηκε και στην Παράγραφο 11.2.1.1, η μορφή των καμπυλών για σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στον άξονα συγκόλλησης (σημεία Y1 - 150 και Y2 - 200, Εικ. 11.11 - 11.14) είναι ίδια χωρίς αξιοσημείωτες μεταβολές.



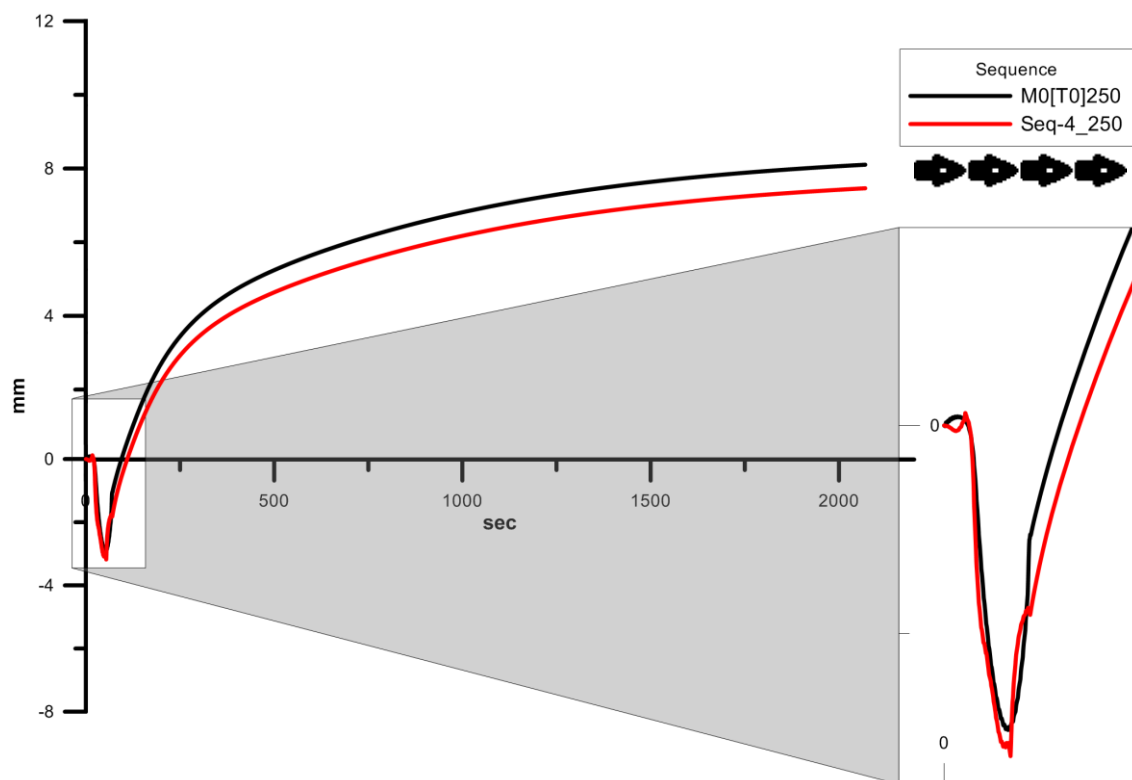
Εικόνα 14.37 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-1' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης



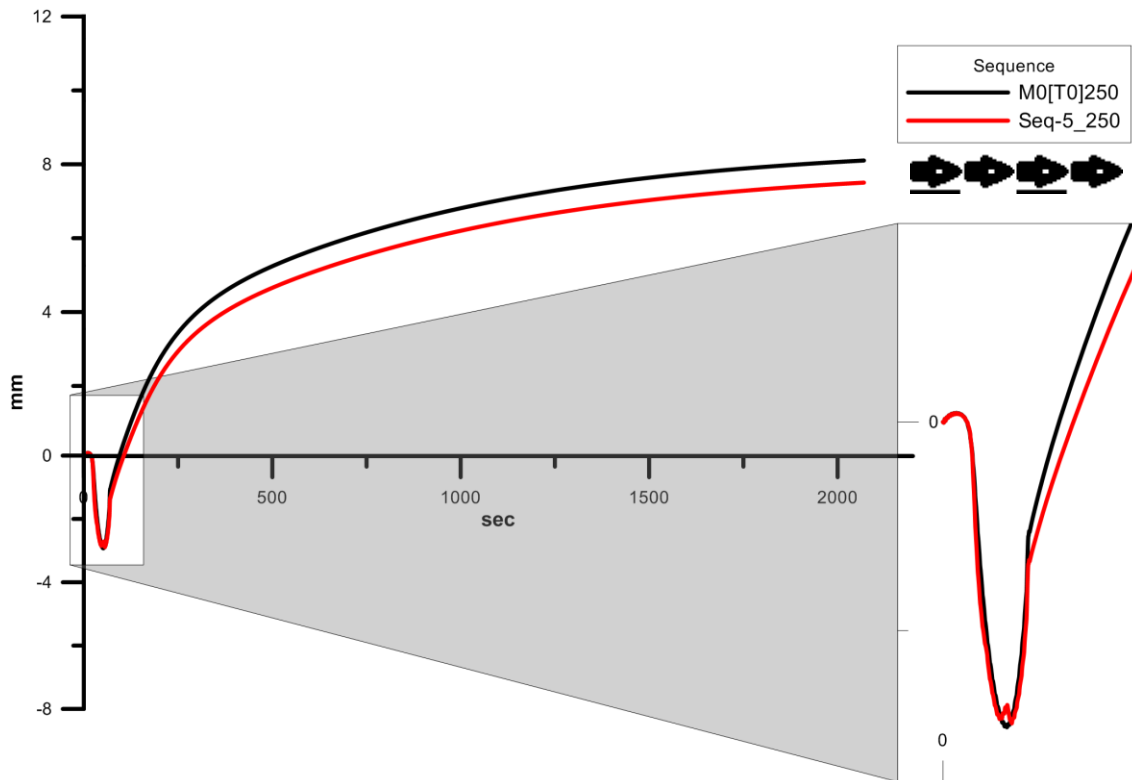
Εικόνα 14.38 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-2' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης



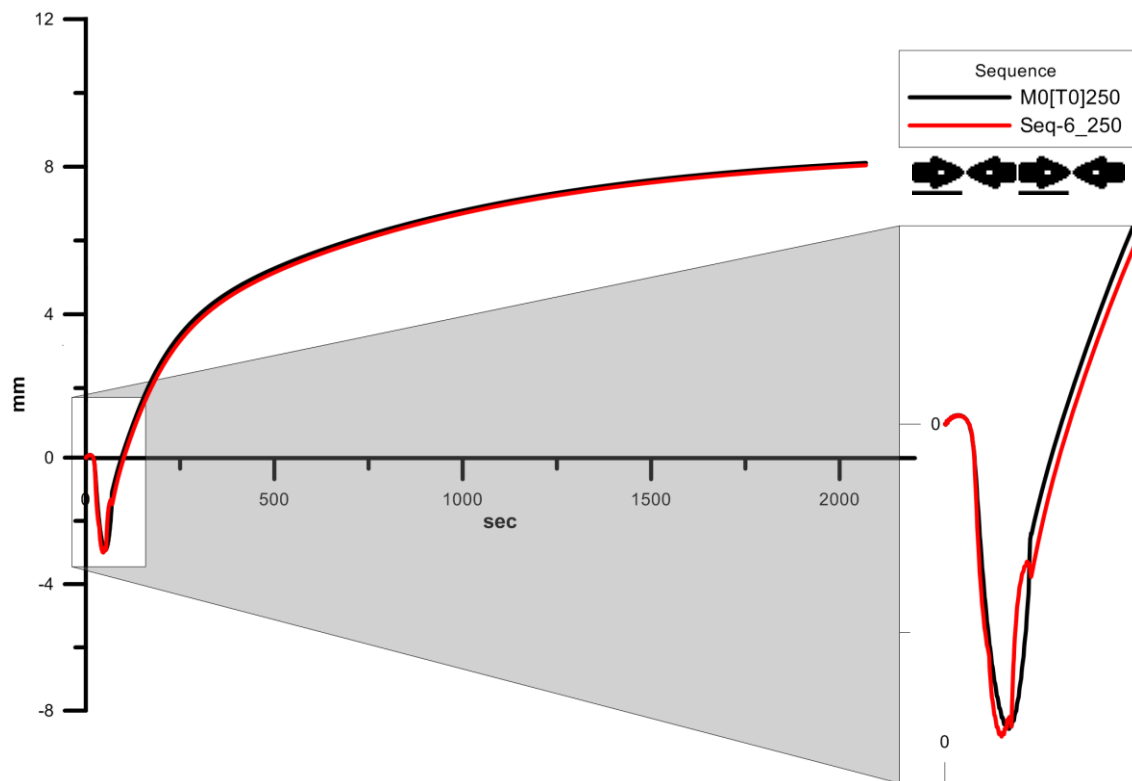
Εικόνα 14.39 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-3' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 14.40 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-4' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 14.41 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-5' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης



Εικόνα 14.42 Κατακόρυφη μετατόπιση ακολουθίας συγκόλλησης 'Seq-6' σε σύγκριση με το M[0] για απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης

Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 14.17) φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων προσομοίωσης Seq-1 – Seq-6 με το πλήρες μοντέλο προσομοίωσης M0[0].

Πίνακας 14.17 Συγκριτικός πίνακας ελάχιστων και μέγιστων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης λόγω γωνιακής παραμόρφωσης των Seq-1 – Seq-6 με το M0[0] σε απόσταση 250mm από τον άξονα συγκόλλησης

Μοντέλο		Τιμές (mm)	Διαφορά ως προς το M0[0] * (%)
M0[0]	max	8,00	-
	min	-2,93	-
Seq-1	max	7,66	4,28
	min	-2,26	22,66
Seq-2	max	7,86	1,80
	min	-2,26	22,60
Seq-3	max	6,55	18,14
	min	-2,56	12,46
Seq4	max	7,36	8,00
	min	-3,20	-3,18
Seq-5	max	7,41	7,50
	min	-2,89	1,26
Seq-6	max	7,94	0,79
	min	-3,01	-3,00

* αρνητικό πρόσημο επισημάνει μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο του M0[0] μέγεθος

Όπως προκύπτει για τα σημεία μελέτης, τόσο από τα διαγράμματα των Εικόνων 14.37 – 14.42 όσο και από τον Πίνακα 14.17:

- Οι καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης λόγω γωνιακής παραμόρφωσης για όλες τις περιπτώσεις ακολουθιών συγκόλλησης έχουν γενικά την ίδια μορφή με την περίπτωση όπου η συγκόλληση εκτελείται με ένα συνεχές πέρασμα εμφανίζοντας ένα τμήμα με αρνητικές τιμές κι ένα με θετικές τιμές.

- Με εξαίρεση την ακολουθία συγκόλλησης Seq-2 (Εικ. 14.38) οι υπόλοιπες ακολουθίες διατηρούν αρνητικό πρόσημο στην κατακόρυφη μετατόπιση σε όλη την εξέλιξη τους και μόνο κατά την απόψυξη η κατακόρυφη μετατόπιση αποκτά θετικές τιμές

- Η ακολουθία συγκόλλησης Seq-4 και Seq-6 εμφανίζουν μεγαλύτερη μέγιστη αρνητική τιμή μετατόπισης σε σχέση με το M0[0]

- Κατατάσσοντας τις έξι ακολουθίες συγκόλλησης σε σειρά, από αυτή που δίνει τη μικρότερη βελτίωση στην τελική τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης (σε σύγκριση πάντα με το M0[0]) σε αυτή που δίνει τη μεγαλύτερη βελτίωση στην τελική τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης, προκύπτει (Πιν. 14.17): Seq-6 → Seq-2 → Seq-1 → Seq-5 → Seq-4 → Seq-3.

- Η Seq-3 (ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας ανά δύο φοράς – συμμετρία ως προς το μέσο του μήκους συγκόλλησης) δίνει μικρότερη τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης της τάξης του 18% (Εικ. 14.39, Πιν. 14.17) το οποίο κρίνεται ως ένα σημαντικό ποσοστό μείωσης.

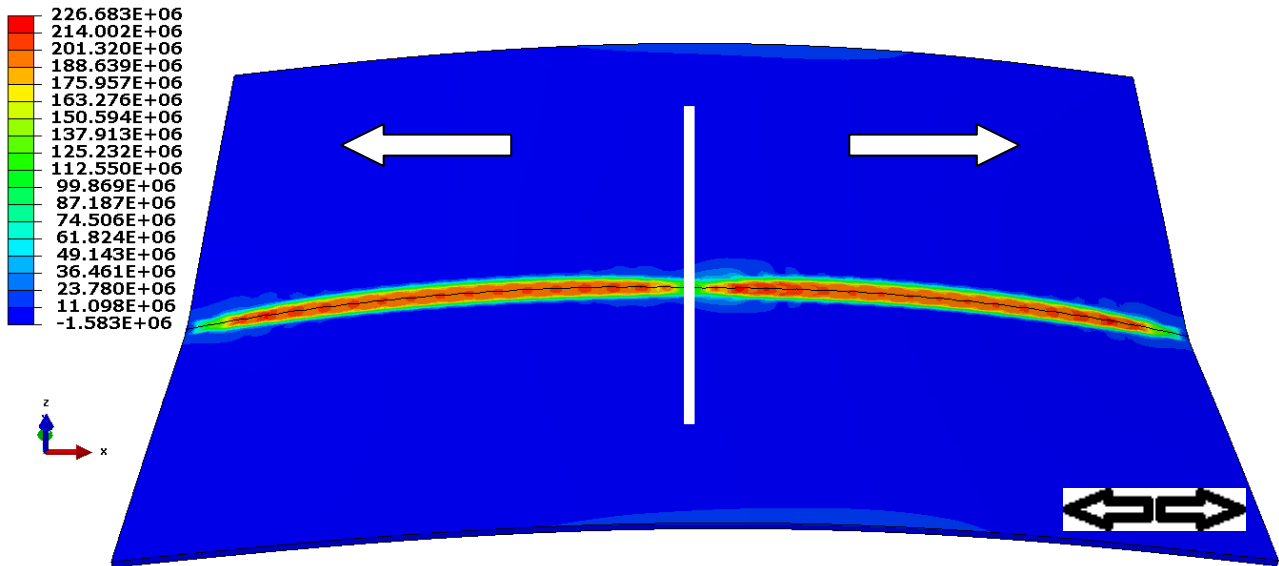
- Από τις Εικόνες 14.37 και 14.39 που αναπαριστούν τις ακολουθίες Seq-1 και Seq-3 αντίστοιχα, προκύπτει ότι ενώ αυτές έχουν παρόμοια μορφή, σε ότι αφορά και τις αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης, ωστόσο η Seq-3 δίνει μικρότερη τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης οδηγώντας στο συμπέρασμα πως επιλέγοντας ακολουθία συγκόλλησης κατά τμήματα με συμμετρία ως προς τον άξονα που περνά από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης, διαιρώντας το μήκος συγκόλλησης σε περισσότερα τμήματα, λαμβάνονται μικρότερες τελικές παραμορφώσεις.

- Το ανωτέρω συμπέρασμα ενισχύεται περαιτέρω, συγκρίνοντας και τις ακολουθίες Seq-2 και Seq-4 παρόλο που το τμήμα αυτών που δίνει αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης διαφέρει (Εικ. 14.38, Εικ. 14.40). Αν και σε σύγκριση με τη βέλτιστη Seq-3 η βελτίωση που προσφέρουν οι ακολουθίες Seq-2 και Seq-4 στην τελική τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης δεν είναι τόσο μεγάλη (Πιν. 14.17 - 1,8% και 8% αντίστοιχα) ωστόσο η ακολουθία Seq-4 είναι σαφώς προτιμότερη από την Seq-2 και δίνει το δεύτερο καλύτερο αποτέλεσμα.

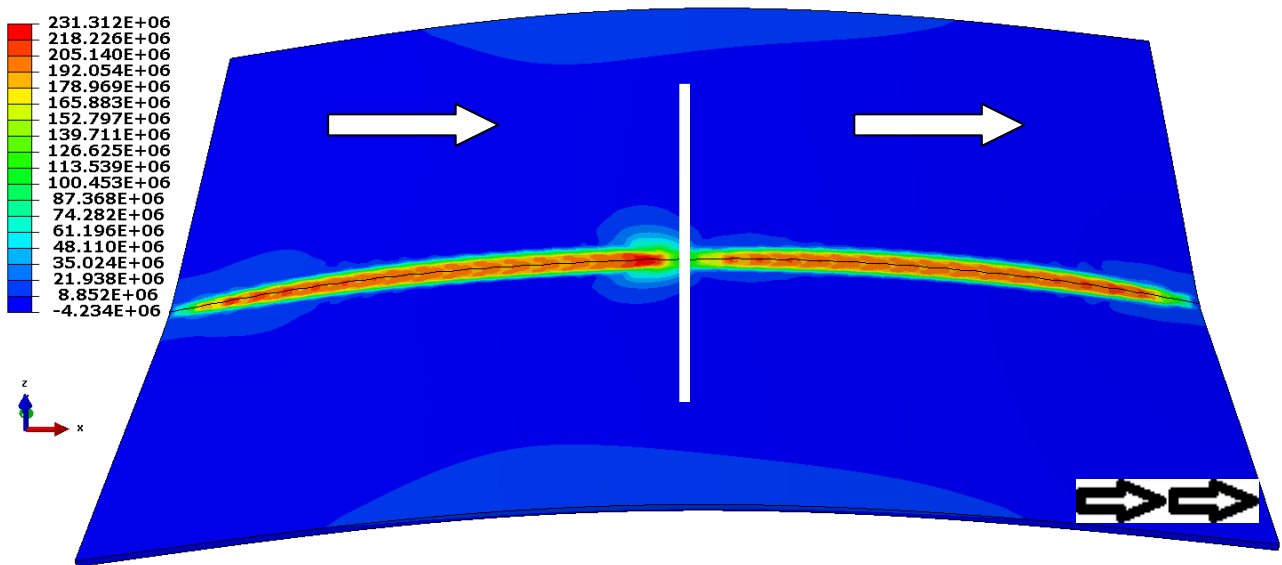
- Σε ότι αφορά στις ακολουθίες συγκόλλησης με την τεχνική της παράβλεψης (Seq-5 και Seq-6), στην περίπτωση που διατηρείται ίδια φορά συγκόλλησης (Εικ. 14.41) το αποτέλεσμα είναι σχετικά ικανοποιητικό και τρίτο κατά σειρά σημαντικότητας σε ποσοστό βελτίωσης σε σύγκριση με το M0[0] (Πιν. 14.17 - 7,50%) ενώ, στην περίπτωση που επιλέγεται αντίθετη φορά συγκόλλησης στα ενδιάμεσα τμήματα (Seq-6) τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνοντας αφενός μεγαλύτερες αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης (Εικ. 14.42) αλλά και μικρό ποσοστό βελτίωσης των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων σε σύγκριση με το M0[0] (Πιν. 14.17 - 7,50%).

14.4.1.3 Παραμένουσες τάσεις

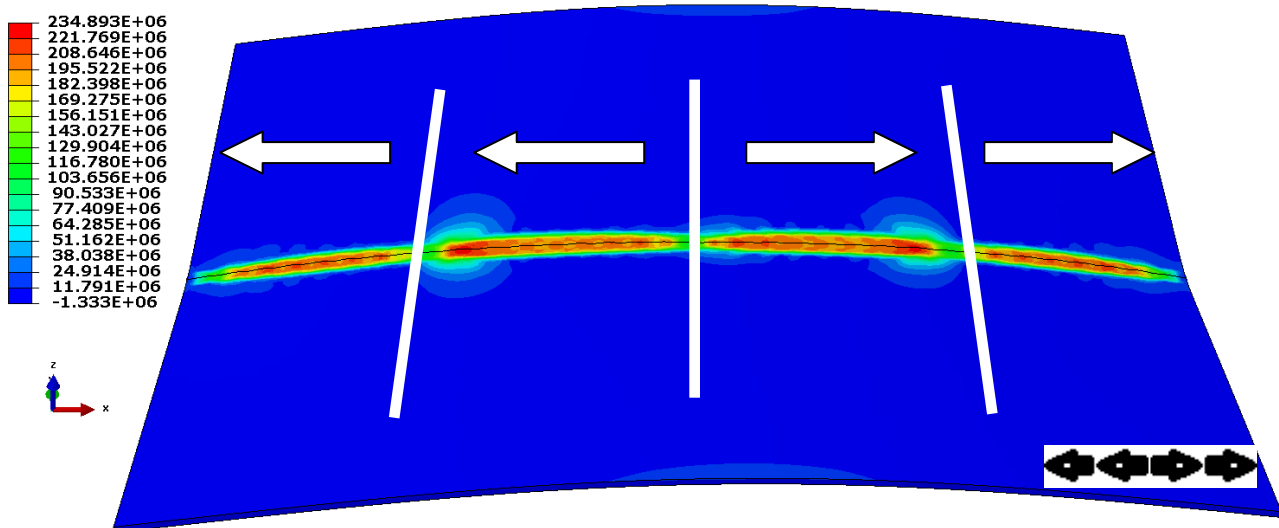
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μετά το τέλος της προσομοίωσης για καθεμιά από της ακολουθίες συγκόλλησης (Εικ. 14.43 - 14.48).



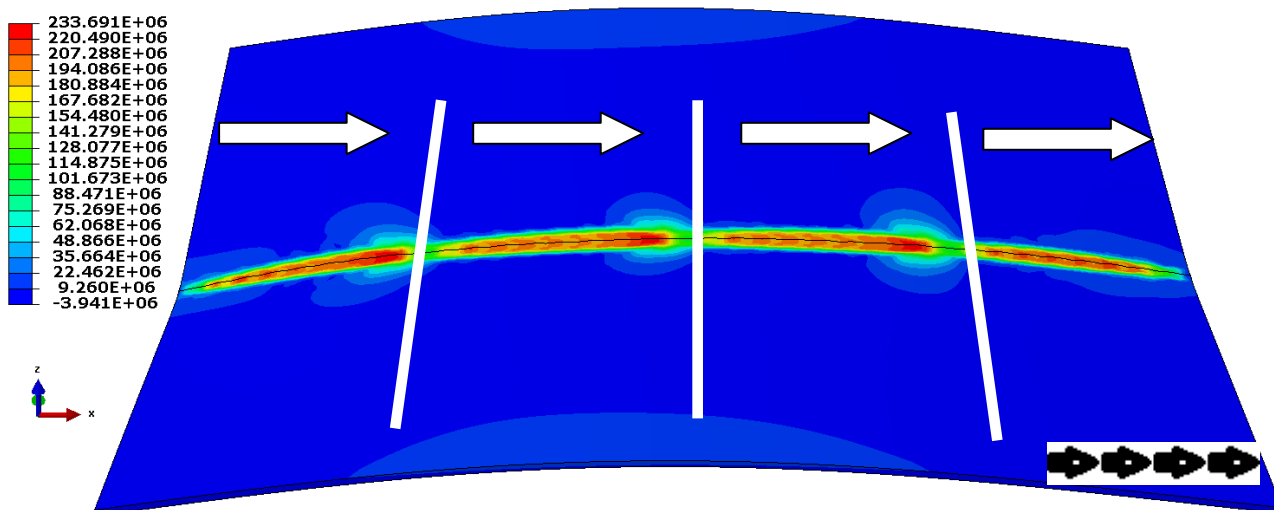
Εικόνα 14.43 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-1'



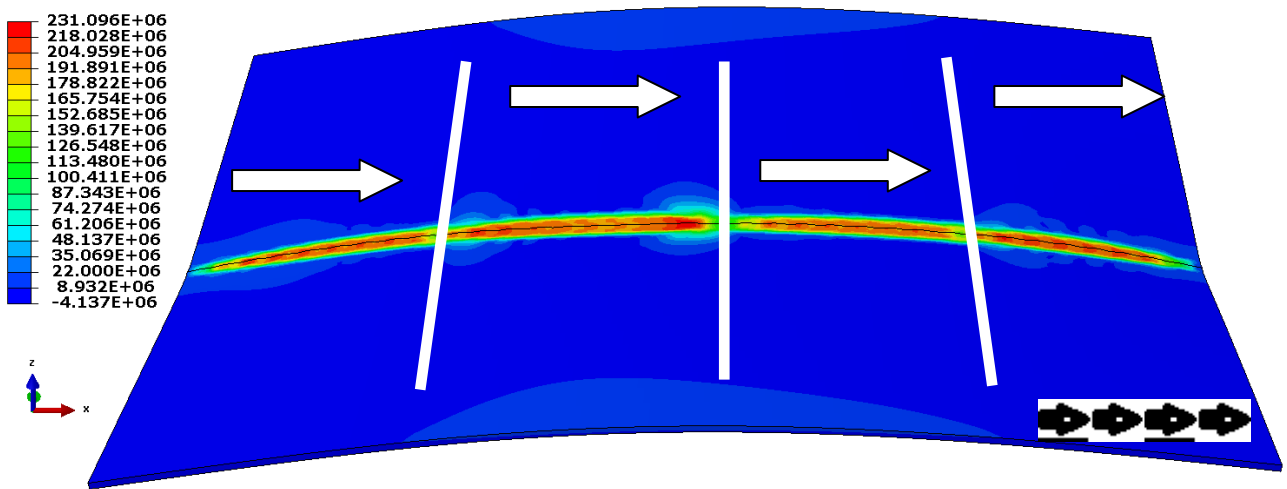
Εικόνα 14.44 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-2'



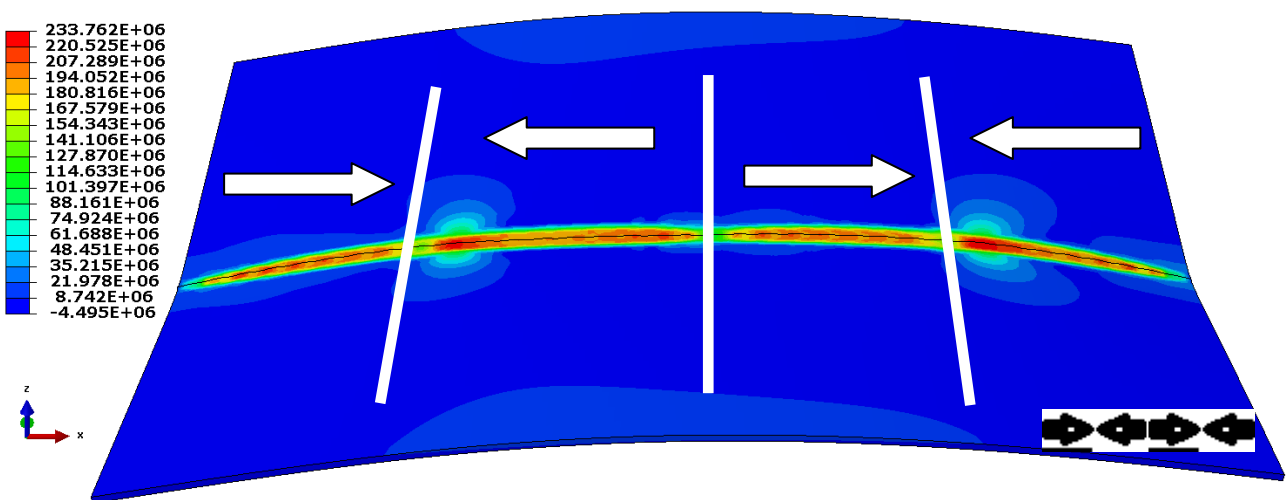
Εικόνα 14.45 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-3'



Εικόνα 14.46 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-4'



Εικόνα 14.47 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-5'



Εικόνα 14.48 Η κατανομή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για την ακολουθία συγκόλλησης 'Seq-6'

Από τις κατανομές των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , για τις διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης (Εικ. 14.43 - 14.48) προκύπτει ότι:

- Η ομοιόμορφη μορφή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , όπως αυτές προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης M0[0] (Εικ. 14.8, Εικ. 14.9) έχει αντικατασταθεί από κατανομές με επί μέρους ανομοιομορφίες οι οποίες σχετίζονται με τον αριθμό των τμημάτων και τη φορά συγκόλλησης σε κάθε τμήμα.

- Στις περιπτώσεις των ακολουθιών Seq-1 και Seq-2 όπου και το συνολικό μήκος συγκόλλησης έχει χωριστεί σε δύο τμήματα, εμφανίζεται ένα κύριο σημείο ενδιαφέροντος με υψηλές τιμές παραμενουσών τάσεων (Εικ. 14.43 - 14.44) ενώ στις περιπτώσεις των ακολουθιών Seq-3, Seq-4, Seq-5, και Seq-6 όπου το συνολικό μήκος συγκόλλησης έχει χωριστεί σε τέσσερα τμήματα, εμφανίζονται τρία κύρια σημεία ενδιαφέροντος με υψηλές τιμές παραμενουσών τάσεων (Εικ. 14.45 - 14.48).

- Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση, οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις, σ_x , εμφανίζονται σε περιοχή, λίγο πριν την ολοκλήρωση μιας στρώσης, που επικαλύπτει γειτονική της, ανεξάρτητα από το μήκος αυτής και με όποια φορά κι αν εκτελείται η συγκόλληση σε σχέση με γειτονικές της στρώσεις. Έτσι, ισχύουν τα εξής:

α) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-1 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται +/-40mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης

β) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-2 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται -40mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης προς την πλευρά της δεύτερης στρώσης

γ) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-3 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται +152mm και -160mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης προς την πλευρά της τέταρτης και της δεύτερης στρώσης αντίστοιχα

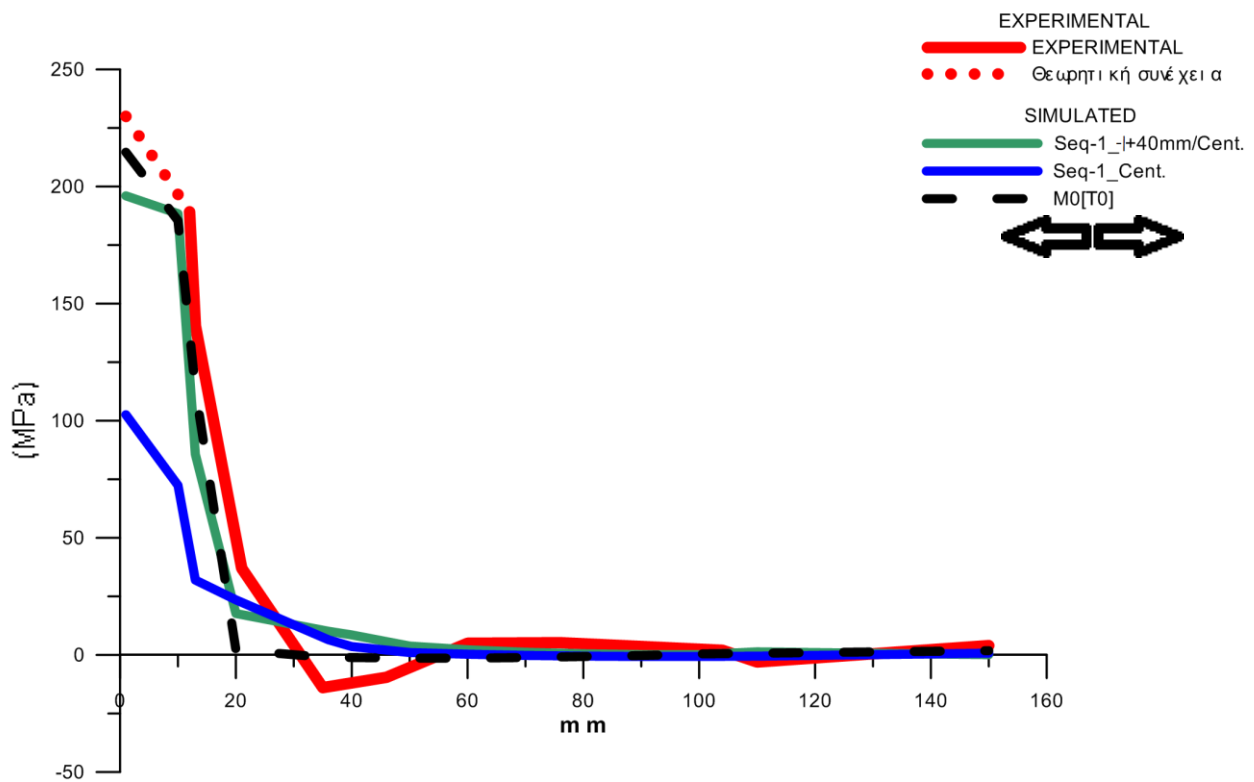
δ) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-4 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται +144mm, -36 και -212mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης προς την πλευρά της δεύτερης, της τρίτης και της τέταρτης στρώσης αντίστοιχα

ε) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-5 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται -16mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης προς την πλευρά της τρίτης στρώσης

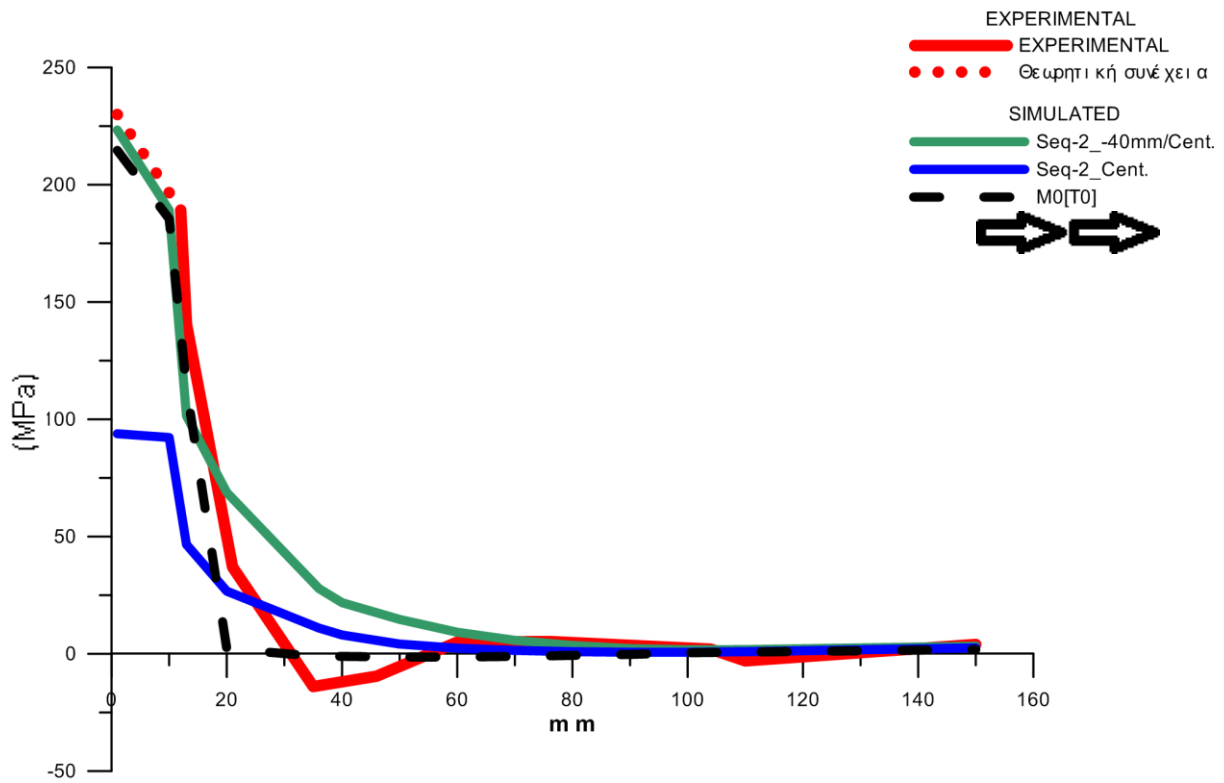
στ) για την ακολουθία συγκόλλησης Seq-6 οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x) εμφανίζονται +204mm και -160mm από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης προς την πλευρά της τέταρτης και της τρίτης στρώσης αντίστοιχα

➤ Σημειώνεται πως για το χαρακτηρισμό και την κωδική ονομασία των θέσεων ενδιαφέροντος θεωρήθηκε αρχή αξόνων το μέσον του συνολικού μήκους συγκόλλησης και θετικό πρόσημο προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης του μοντέλου M0[0] (προς τα δεξιά της σελίδας όπως απεικονίζονται όλα τα σχήματα).

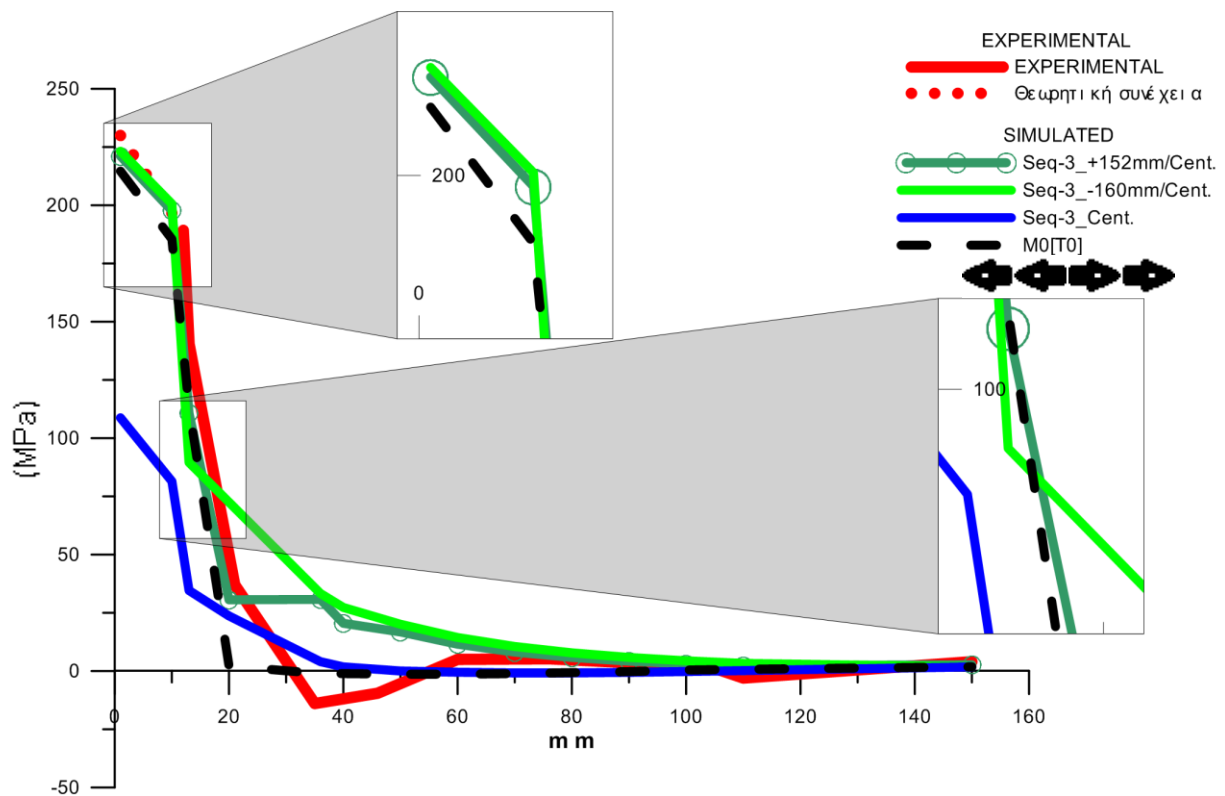
Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων, των τιμών της προσομοίωσης M0[0] και των τιμών που προέκυψαν για καθεμιά από τις ακολουθίες συγκόλλησης Seq-1 - Seq-6 σε ότι αφορά στις μέγιστες παραμένουσες τάσεις (σ_x), λαμβάνοντας υπόψη και τα επιπλέον σημεία ενδιαφέροντος όπως αυτά φαίνονται στις Εικόνες 14.43 - 14.48.



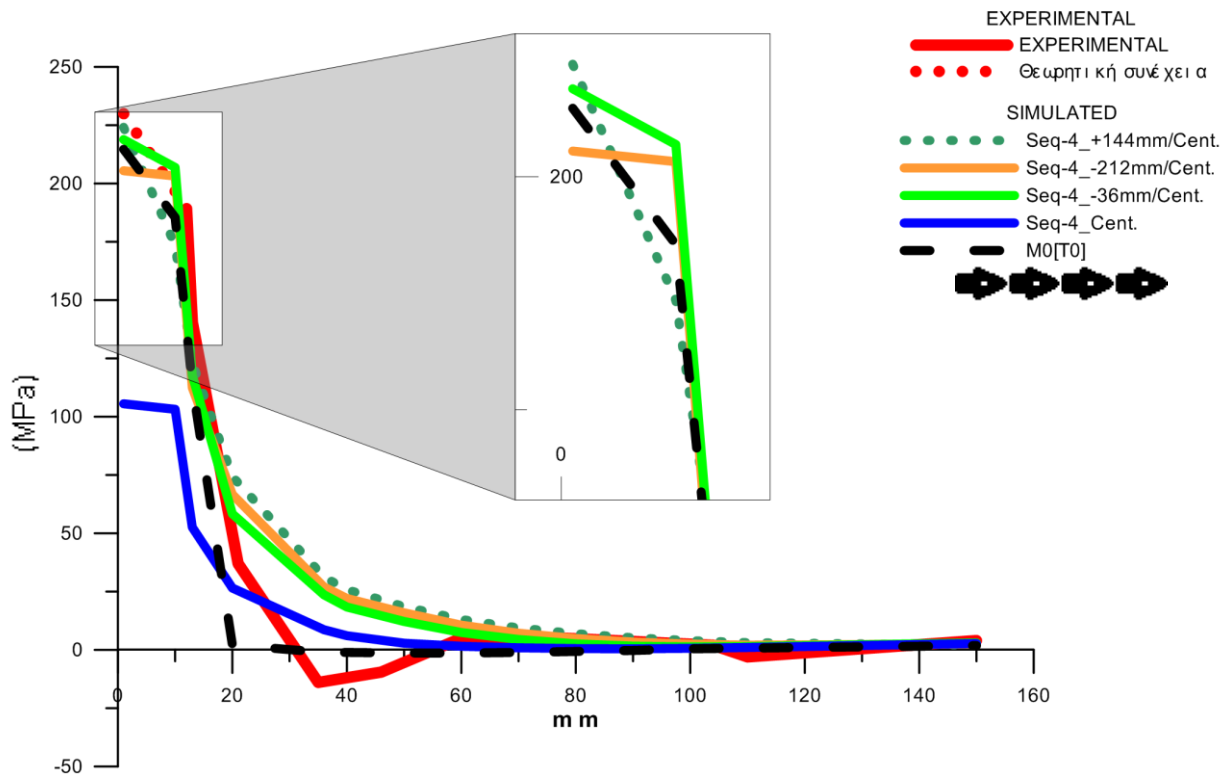
Εικόνα 14.49 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-1', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων



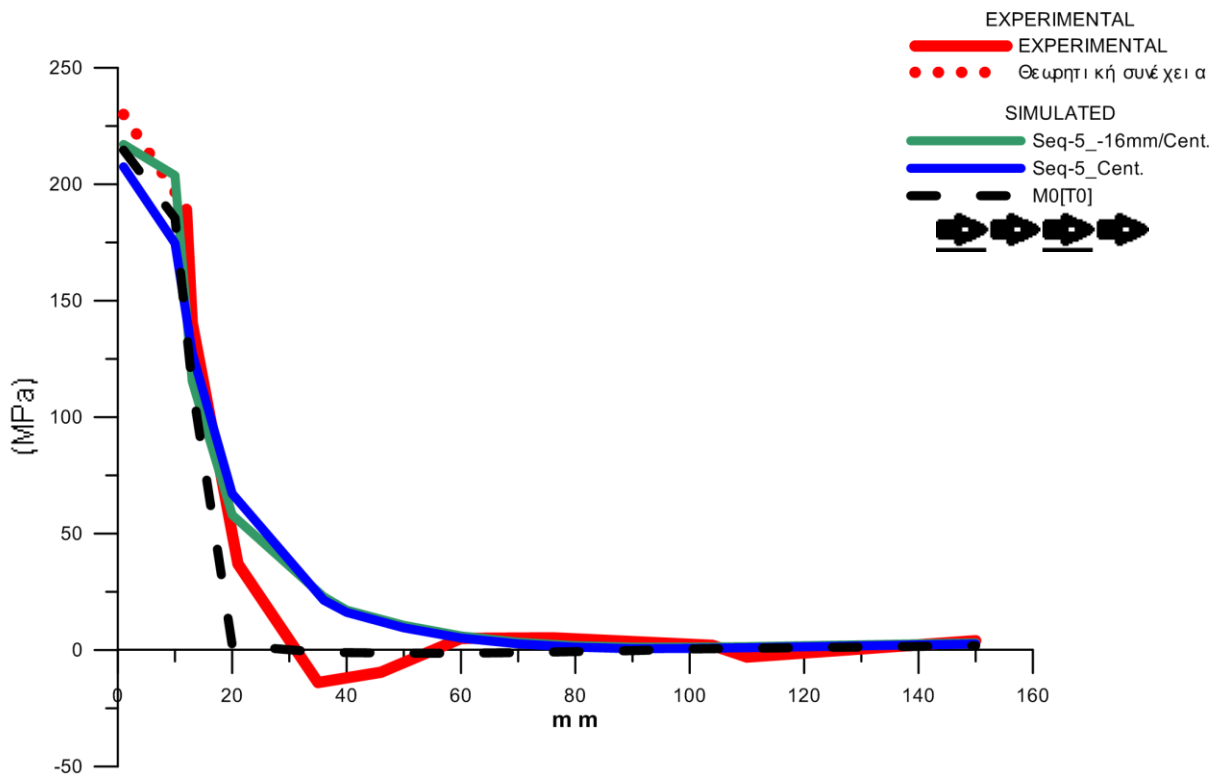
Εικόνα 14.50 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-2', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων



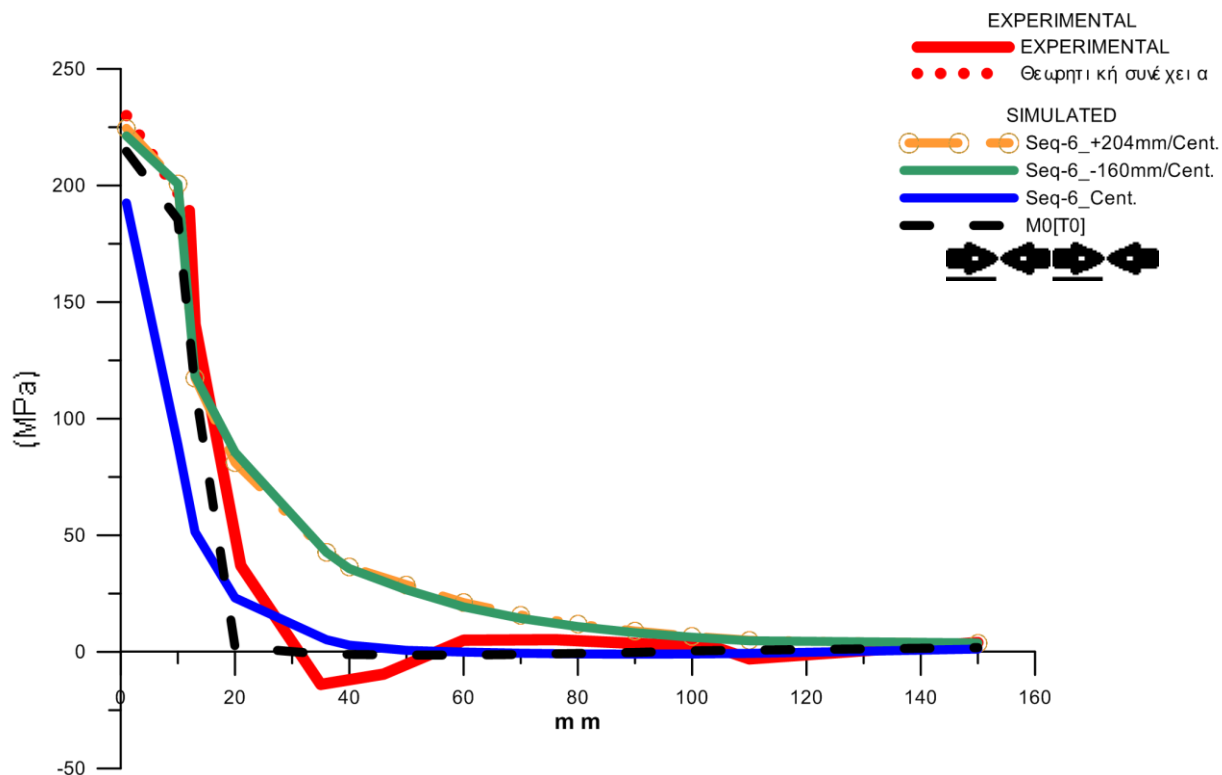
Εικόνα 14.51 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-3', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων



Εικόνα 14.52 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-4', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων



Εικόνα 14.53 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-5', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων



Εικόνα 14.54 Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , μεταξύ 'Seq-6', M0[0] και πειραματικών μετρήσεων

Από τα διαγράμματα σύγκρισης των μέγιστων παραμενουσών τάσεων (σ_x) μεταξύ των διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης και των τιμών στα σημεία μέτρησης για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης M0[0] και των πειραματικών μετρήσεων προκύπτει ότι:

- Ενώ στον άξονα που περνά κάθετα από το μέσο του συνολικού μήκους συγκόλλησης οι τιμές των μέγιστων κύριων τάσεων, στα επιλεγμένα σημεία μέτρησης, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης M0[0] και από τις πειραματικές μετρήσεις ωστόσο, έχουν προκύψει, εξαιτίας της εκάστοτε ακολουθίας συγκόλλησης, άλλες περιοχές στις οποίες οι μέγιστες κύριες τάσεις είναι της τάξης του ορίου διαρροής πολύ κοντά στον άξονα συγκόλλησης.

- Ουσιαστικά, σε καμία από τις περιπτώσεις Seq-1 – Seq-6 δεν παρατηρούνται χαμηλές τιμές μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x (σε σύγκριση πάντα με το M0[0]) ενώ αυτό που προκύπτει είναι για όλες τις ακολουθίες συγκόλλησης είναι ότι δίνουν κατά κανόνα μεγαλύτερο εύρος εφελκυστικών κύριων παραμενουσών τάσεων.

14.4.2 Σύνοψη

Από τη μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει γενικά ότι:

- Η ακολουθία συγκόλλησης φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στη μορφή του θερμικού κύκλου σε περιοχές κοντά στη συγκόλληση και σχεδόν καμία επίδραση σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση εφόσον φυσικά η συνολική ποσότητα εισερχόμενης θερμικής ισχύος παραμένει σταθερή.

- Σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθίας συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν, οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας που καταγράφηκαν, στα σημεία μέτρησης, ήταν μικρότερες από τις τιμές που έδωσε η προσομοίωση M0[0] γεγονός που υποδεικνύει μια καλύτερη γενική κατανομή των θερμοκρασιών στα υπό συγκόλληση ελάσματα, κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης.

- Η συνολική τελική παραμόρφωση των συγκολλημένων ελασμάτων μετά το τέλος της προσομοίωσης (Εικ. 14.36) έχει την ίδια μορφή με αυτή που παρατηρήθηκε ως αποτέλεσμα από την προσομοίωση του πλήρους μοντέλου M0[0] (Εικ. 14.5 - 14.7), αλλά και την πειραματική διαδικασία (Εικ. 11.10).

- Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική καθώς η επιλογή συγκόλλησης του συνολικού μήκους ραφής διακοπτόμενα, κατά τμήματα, με διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης δεν είναι δεδομένο ότι θα οδηγήσει σε ίδιας μορφής παραμόρφωση σε σχέση με την περίπτωση όπου το συνολικό μήκος ραφής συγκολλείται συνεχόμενα, με μία στρώση και μία κατεύθυνση συγκόλλησης.

Η διαφοροποίηση της κατανομής θερμότητας και των μεταβατικών θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων από τμήμα συγκόλλησης σε τμήμα συγκόλλησης, σε σύγκριση με το αρχικό πλήρες μοντέλο προσομοίωσης M0[0] θα μπορούσε να δώσει και διαφορετικές μορφές παραμόρφωσης από τη γωνιακή και τη διαμήκη καμπυλική που παρατηρείται (π.χ. θα μπορούσε να αποδώσει στρεπτικές παραμορφώσεις ή κυρίως, παραμορφώσεις λυγισμού που έτσι κι αλλιώς συναντώνται συχνά σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων). Ωστόσο τελικά, οι τελικές παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης δείχνουν να μην επηρεάζονται από την επιλογή της συγκόλλησης με διαφορετικές ακολουθίες συγκόλλησης κατά τμήματα.

- Οι καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης λόγω γωνιακής παραμόρφωσης για όλες τις περιπτώσεις ακολουθιών συγκόλλησης έχουν γενικά την ίδια μορφή με την περίπτωση όπου η συγκόλληση εκτελείται με ένα συνεχές πέρασμα εμφανίζοντας ένα τμήμα με αρνητικές τιμές κι ένα με θετικές τιμές.

- Κατατάσσοντας τις έξι ακολουθίες συγκόλλησης με τη σειρά, ξεκινώντας από αυτή που δίνει τη μικρότερη βελτίωση στην τελική τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης (σε σύγκριση πάντα με το M0[0]) και καταλήγοντας σε αυτή που δίνει τη μεγαλύτερη βελτίωση στην τελική τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης προκύπτει (Πιν. 14.17): Seq-6 → Seq-2 → Seq-1 → Seq-5 → Seq-4 → Seq-3.

- Η Seq-3 (ακολουθία συγκόλλησης οπισθοδρόμησης σε τέσσερα τμήματα, ίδιας ανά δύο φοράς - συμμετρία ως προς το μέσο του μήκους συγκόλλησης) δίνει μικρότερη τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης της τάξης του 18% (Εικ. 14.39, Πιν. 14.17) το οποίο κρίνεται ως ένα σημαντικό ποσοστό μείωσης.

- Η ομοιόμορφη μορφή των μέγιστων παραμενουσών τάσεων, σ_x , όπως αυτές προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης M0[0] (Εικ. 14.8, Εικ. 14.9) έχει αντικατασταθεί από κατανομές με επί μέρους ανομοιομορφίες οι οποίες σχετίζονται με τον αριθμό των τμημάτων και τη φορά συγκόλλησης σε κάθε τμήμα.

- Στις περισσότερες των περιπτώσεων, υψηλές τιμές μέγιστων παραμενουσών τάσεων εμφανίζονται λίγο πριν το τέλος μιας στρώσης, όταν αυτή ολοκληρώνεται επικαλυπτόμενη με κάποια προηγούμενη, ανεξάρτητα με τη σειρά εκτέλεσης, το μήκος της στρώσης ή τη φορά εκτέλεσης της συγκόλλησης.

- Στις περιπτώσεις των ακολουθιών Seq-1 και Seq-2 όπου και το συνολικό μήκος συγκόλλησης έχει χωριστεί σε δύο τμήματα, εμφανίζεται ένα κύριο σημείο ενδιαφέροντος με υψηλές τιμές κύριων παραμενουσών τάσεων (Εικ. 14.43 - 14.44) ενώ στις περιπτώσεις των ακολουθιών Seq-3, Seq-4, Seq-5, και Seq-6 όπου το συνολικό μήκος συγκόλλησης έχει χωριστεί σε τέσσερα τμήματα, εμφανίζονται τρία κύρια σημεία ενδιαφέροντος με υψηλές τιμές παραμενουσών τάσεων (Εικ. 14.45 - 14.48).

Συνολικά, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η επιλογή ακολουθίας συγκόλλησης είναι ασφαλής καθώς δεν οδηγεί σε διαφορετική από το αναμενόμενο μορφή παραμορφώσεων, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της γωνιακής παραμόρφωσης ωστόσο δεν αναμένεται να επιφέρει διαφοροποιήσεις σε ότι αφορά στην ανάπτυξη και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων.

Αντίθετα, σε ότι αφορά στην επιλογή του αριθμού των τμημάτων που θα διαιρεθεί το συνολικό μήκος συγκόλλησης, τη φορά συγκόλλησης και την αλληλουχία στρώσεων, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή διότι παρόλο που μπορεί να επιτευχθεί μείωση της συνολικής παραμόρφωσης ωστόσο, είναι δυνατό να δημιουργηθούν σημεία σημαντικής συγκέντρωσης τάσεων, στις περιοχές σύνδεσης των τμημάτων που μπορεί να έχουν επιπτώσεις στη συνολική αντοχή της συγκολλητής κατασκευής.

Βιβλιογραφία

1. C.M. Adams, 'Cooling Rate and Peak Temperatures in Fusion Welding', *Welding Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 210s-215s, 1958
2. B.A.B. Anderson, 'Thermal Stresses in Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations', *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 356-362, October 1978, *Transactions of the ASME*
3. K. Masubuchi, 'Analysis of welded structures', Pergamon Press, Oxford, 1980
4. K. Masubuchi et al., 'Analysis of thermal stresses and metal movements of weldments: A basic study toward computer-aided analysis and control of welded structures', *TRANS SNAME*, Vol. 83, 1975
5. J.F.W. Bishop, R. Hill, 'A Theory for the Plastic Distortion of a Polycrystalline Aggregate Under Combined Stress', *Philosophical Magazine*, Vol. 42, 1951
6. J.B. Andrews, M. Arita, K. Masubuchi, 'Analysis of thermal stress and metal movement during welding', NASA Contract Report, NASA CR-61351, Prepared for the G.C. Marsall Space Flight Centre, Dec. 1970
7. V.J. Papazoglou, K. Masubuchi, E. Gonçaves, A. Imakita, 'Residual Stresses due to welding: Computer aided analysis of their formation and consequences', *SNAME Transactions*, Vol. 90, 1982, pp. 365-390
8. N.R. Mandal, C.V. Sundar, 'Analysis of Welding Shrinkage', *Welding Journal*, Vol. 76, No 6, June 1997, pp. 233s-238s
9. L.J. Yangl, Z.M. Xiao, 'Elastic-Plastic Modeling of the Residual Stress Caused by Welding', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 48, 1995, pp. 589-601
10. D. Radaj, 'Heat effects of welding, temperature field, residual stress, distortion', Springer-Verlag, 1992
11. P. Michaleris, J. Dantzig, D. Tortorelli, 'Minimization of Welding Residual Stress and Distortion in Large Structures', *Welding Journal*, Vol. 76, No.4, 1999, pp. 361s-366s.

- 12.** L.J. Yang, Z.M. Xiao, 'Elastic - Plastic Modelling of the Residual Stress Caused by Welding', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 48, Issues 1-4, 1995, pp. 589-601
- 13.** S. Kumar, S.C. Bhaduri, 'Theoretical Investigation of Penetration Characteristics in Gas Metal Arc Welding Using Finite Element Method', *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 26B, No. 3, June 1995, pp. 661-624
- 14.** X.K. Zhu, Y.J. Chao, 'Numerical Simulation of Transient Temperature and Residual Stresses in Friction Stir Welding of 304L Stainless Steel', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, Issues 2, 2004, pp. 263-272
- 15.** N.T. Nguyen, A. Ohta, k. Matsuoka, N. Susuki, Y. Maeda, 'Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi - Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Source', *Welding Journal*, Vol. 78, No 8, August 1999, pp. 265s-274s
- 16.** N.T. Nguyen, Y.W. Mai, S. Simpson, A. Ohta, 'Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate', *Welding Journal*, Vol. 83, No 3, March 2004, pp. 82s-93s
- 17.** E. Friedman, 'Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method', *Journal Pressure Vessel Technology*, Vol. 97, pp. 206-213, August 1975, *Transactions of the ASME*
- 18.** D. Couédel, P. Rogeon, P. Lemasson, M. Carin, J. C. Parpillon, R. Berthet, '2D-Heat Transfer Modelling Within Limited Regions Using Moving Sources: Application to Electron Beam', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, Issue 23, 2003, pp. 4553-4559
- 19.** J. Goldak, M. Gu, L. Karlsson, 'Numerical Aspects of Modeling Welds', *ASM Handbook of Welding*, Vol. 6, 1993, pp. 1131-1140
- 20.** J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, 'A New Finite Element Model for Welding Heat Sources', *Metallurgy Transactions B*, Vol. 15B, pp. 299-305, June 1984
- 21.** O. Grong, 'Metallurgical Modelling of Welding', *The Institute of Materials, London*, 1st Edition, 1994

- 22.** S.K. Jeong, H.S. Cho, 'An Analytical Solution to Predict the Transient Temperature Distribution in Fillet Arc Welds', *Welding Journal*, Vol. 76, No 6, June 1997, pp. 223s-232s
- 23.** P. E. Murray, A. Scotti, 'Depth of Penetration in Gas Metal Arc Welding', *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 2, 1999, pp. 112-117
- 24.** I.S. Kim, A. Basu, 'A Mathematical Model of Heat Transfer and Fluid Flow in the Gas Metal Arc Welding Process', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, Issues 1-3, 1998, pp. 17-24
- 25.** Hrivnak, 'Theory of Welding of Weldability of Metals and Alloys', Faculty of Metalurgy, Technical University of Kosice, Elsevier, Czechoslovakia, 1992
- 26.** K.C. Tsao, C.S. Wu, 'Fluid - Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools', *Welding Journal*, Vol. 67, No 3, March 1988, pp. 70s-75s
- 27.** G.M. Oreper, T.W. Eagar, J. Szekely, 'Convection in Arc Weld Pools', *Welding Journal*, Vol. 62, No 11, November 1983, pp. 307s-312s
- 28.** T.W. Eagar, N.S. Tsai, 'Temperature Fields Produced by Travelling Distributed Heat Sources', *Welding Journal*, Vol. 62, No 12, December 1983, pp. 346s-355s
- 29.** P.G. Jönsson, T. W. Eagar, J. Skekely, 'Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding Using Argon and Helium', *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 26B, No. 2, April 1995, pp. 383-395
- 30.** P. Tekriwal, J. Mazumder, 'Finite Element Analysis of Three - Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding', *Welding Journal*, Vol. 67, No 7, July 1988, pp. 150s-156s
- 31.** S.B. Brown, H. Song, 'Implications of Three - Dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures', *Welding Journal*, Vol. 71, No 2, February 1992, pp. 55s-62s
- 32.** S. Krenk, 'Non-Linear Analysis with Finite Elements', Dept. of Building Technology and Structural Engineering, DK-9000, Aalborg University, 1993
- 33.** G.W. Krutz, L.J. Segerlind, 'Finite Element Analysis of Welded Structures', *Welding Journal*, Vol. 57, No. 7, pp. 211-215, 1978

- 34.** R.E. Vaughan, W.P. Schonberg, 'An Inelastic Analysis of a Welded Aluminum Joint', Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 26B, No. 6, December 1995, pp. 1253-1261
- 35.** C.-H. Kim, W. Zhang, T. DebRoy, 'Modeling of Temperature Field and Solidified Surface Profile During Gas Metal Arc Fillet Welding', Journal of Applied Physics, Vol. 94, No. 4, 15 August 2003, pp. 2667-2679
- 36.** L.-E. Lindgren, 'Finite Element Modelling and Simulation of Welding Part 1: Increased Complexity', Journal of Thermal Stresses, Vol. 24, No. 2, February 2001, pp. 141-192
- 37.** L.-E. Lindgren, 'Finite Element Modelling and Simulation of Welding Part 2: Improved Material Modeling', Journal of Thermal Stresses, Vol. 24, No. 3 March 2001, pp. 195-231
- 38.** J. Mackerle, 'FEM and BEM Analysis and Modelling of Residual Stresses: A Bibliography (1998-1999)', Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, Issue 3, 2001, pp. 253-262
- 39.** J. Mackerle, 'Finite Element Analysis and Simulation of Welding - An Addendum: A Bibliography (1996-2001)', Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 10, No. 3, May 2002, pp. 295-318
- 40.** J. Mackerle, 'Finite Element Analysis and Simulation of Welding of Welding: A Bibliography (1976-1996)', Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 4, No. 5, September 1996, pp. 501-533
- 41.** J. Rudolph, E. Weib, M. Forster, 'Modeling of Welded Joints for Design Against Fatigue', Engineering with Computers, Vol. 19, Nos. 2-3, 2003, pp. 142-151
- 42.** O.S. Hopperstad, M. Langseth, L. Hanssen, 'Ultimate Compressive Strength of Plate Elements in Aluminium: Correlation of Finite Element Analyses and Tests', Thin - Walled Structures, Vol. 29, Nos. 1-4, 1997, pp. 31-46
- 43.** Z.L. Zhang, J. Ødegård, O.R. Myhr, H. Fjær, 'From Microstructure to Deformation and Fracture Behaviour of Aluminium Welded Joints - A Holistic Modelling Approach', Computational Materials Science, Vol. 21, Issue 3, July 2001, pp. 261-451

- 44.** V. Pavelic, R. Tanbakuchi, O.A. Uyehara, P.S. Myers, 'Experimental and Computed Temperature Histories in Gas Tungsten Arc Welding', *Welding Journal*, Vol. 48, pp. 295s-305s, 1969
- 45.** P. Nègre, D. Steglich, W. Brocks, M. Koçak, 'Numerical Simulation of Crack Extension in Aluminium Welds', *Computational Materials Science*, Vol. 21, Issues 3-4, November 2003, pp. 723-731
- 46.** M.A. Ramírez, G. Trapaga, J. McKelliget, 'A CoMParison Between Two Different Numerical Formulations of Welding Arc Simulation', *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 11, No. 4, July 2003, pp. 675-695
- 47.** D. Rosental, 'Theory of moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments', *Transaction of ASME*, pp. 849-866, Nov. 1946
- 48.** D. Rosental, 'Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cuting', *Welding Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 220s-234s, 1941
- 49.** N.N. Rykalin, 'Calculation of Thermal Processes During Welding', The Governmental Technical Science Publishing Firm for Machine Literature, Moscow, 1951
- 50.** T. Zacharia, J.M. Vitek, J.A. Goldak, T.A. DebRoy, M. Rappaz, H. K. D. H. Bhadeshia, 'Modeling of Fundamental Phenomena in Welds', *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 3, No. 2, March 1995, pp. 265-288
- 51.** K. Satoh, 'Handbook on the Strength of Weld Joints', Rikogakusha Publishing CoMPany, 3rd Edition, 1990
- 52.** K. Satoh, Y. Ueda, T. Fujimoto, 'Welding Deformations, Residual Inherent Stress', Sanho Syuppan Publishing CoMPany, 1979
- 53.** V. Pavlyk, U. Dilthey, 'Simulation of Weld Solidification Microstructure and its Coupling to The Macroscopic Heat and Fluid Flow Modelling', *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 12, No. 1, January 2004, pp. s33-s45

- 54.** F. Wang, W.K. Hou, S.J. Hu, E. Kannatey-Asibu, W.W. Schultz, P.C. Wang, 'Modelling and Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding', *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 9, 7 May 2003, pp. 1143-1152
- 55.** Y.S. Tarng, H.L. Tsai, S.S. Yeh, 'Modeling, Optimization and Classification of Weld Quality in Tungsten Inert Gas Welding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, Issue 9, September 1999, pp. 1427-1438
- 56.** P.J. Webster, N. Ananthaviravakumar, D.J. Hughes, G. Mills, R.V. Preston, H.R. Shercliff, P.J. Withers, 'Measurement and Modelling of Residual Stresses in a TIG Weld', *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Vol. 74, Supplement 1, December 2002, pp. s1421-s1423
- 57.** H. Potente, J. Schnieders, M. Bornemann, 'Theoretical Model for the One - Dimensional Temperature and Stress Calculation of Simple Hot Plate Welded Geometries', *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 287, Issue 11, November 2002, pp. 843-853
- 58.** Q. Li, C. Harris, M.R. Jolly, 'Finite Element Modelling Simulation of Transverse Welding Phenomenon in Aluminium Extrusion Process', *Materials and Design*, Vol. 24, Issue 7, October 2003, pp. 493-496
- 59.** V. Tvergaard, 'Plasticity and Creep in Structural Material', Dept. of Solid Mechanics, DTU, Denmark, 1997
- 60.** M. B.-Sørensen, 'Simulation of Welding Distortions in Ship Section', EF611 Industrial Ph.D. Thesis, ATV Odense Steel Shipyard Ltd., Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, April 1999
- 61.** J.D. Francis, 'Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis', MSc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, April 2002
- 62.** R.W. Messler Jr., 'Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy', John Wiley & Sons, Inc., New York, NY 1999, pp. 23-25, 131
- 63.** J. Zhang, P. Dong, F. Brust, 'Residual Stress Analysis and Fracture Assessment of Weld Joints in Moment Frames', *ASME PVP- Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress*, 393, 1999, pp. 201-207

- 64.** R. Preston, S. Smith, H. Shercliff, P. Withers, 'An Investigation into the Residual Stresses in an Aluminum 2024 Test Weld', ASME PVP- Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, 1999, pp. 265-277
- 65.** P. Dong, J. Hong, J. Bynum, P. Rogers, 'Analysis of Residual Stresses in Al-Li Alloy Repair Welds', ASME PVP- Approximate Methods in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping Components, 347, 1997, pp. 61-75
- 66.** R.I. Karlsson, B.L. Josefson, 'Three-Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in a Single-Pass Butt-Welded Pipe', ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 112, 1990, pp. 76-84
- 67.** L.G. Boyles, 'Computer Analysis of Failure Modes in Welded Joints', ASME PVP Weld Residual Stress and Plastic Deformation, 173, 1989, pp. 1-4
- 68.** Y. Chao, X. Qi, 'Thermo-mechanical Modeling of Residual Stress and Distortion During Welding Process', ASME PVP- Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, 1999, pp. 209-213
- 69.** A.S. Oddy, J.A. Goldak, J.M.J. McDill, 'Transformation Plasticity and Residual Stresses in Single-Pass Repair Welds', ASME PVP- Weld Residual Stresses and Plastic Deformation, 173, 1989, pp. 13-18
- 70.** P. Michaleris, Z. Feng, G. Campbell, 'Evaluation of 2D and 3D FEA Models for Predicting Residual Stress and Distortion', ASME PVP- Approximate Methods in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping Components, 347, 1997, pp. 91-102.
- 71.** C.L. Tsai, S.C. Park, W.T. Cheng, 'Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure', Welding Journal, Vol. 78, No. 5, May 1999, pp. 156s - 165s
- 72.** J.M.J. McDill, A.S. Oddy, J.A. Goldak, 'CoMParing 2-D Plane Strain and 3-D Analyses of Residual Stresses in Welds', International Trends in Welding Science and Technology, Proceedings of the 3rd International Conference on Trends in Welding Research, ASM International, Materials Park, OH, 1993, pp.105-108
- 73.** J.K. Hong, C.L. Tsai, P. Dong, 'Assessment of Numerical Procedures for Residual Stress Analysis of Multipass Welds', Welding Journal, Vol. 77, No. 9, Sept. 1998, pp. 372s - 382s

- 74.** L. Junek, M. Slovacek, V. Magula, V. Ochodek, 'Residual Stress Simulation Incorporating Weld HAZ Microstructure', ASME PVP- Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, 1999, pp. 179-192
- 75.** Y. Vincent, J.F. Jullien, N. Cavallo, L. Taleb, V. Cano, S. Taheri, Ph. Gilles, 'On the Validation of the Models Related to the Prevision of the HAZ Behaviour', ASME PVPFracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, 1999, pp. 193-200
- 76.** D. Dubois, J. Devaux, J.B. Leblond, 'Numerical Simulation of a Welding Operation: Calculation of Residual Stresses and Hydrogen Diffusion', ASME Fifth International Conference on Pressure Vessel Technology, Materials and Manufacturing, II, San Francisco, CA, 1984, pp. 1210 - 1238
- 77.** J. Goldak, M. Gu, 'Computational Weld Mechanics of the Steady State', Mathematical Modelling of Weld Phenomena 2, The Institute of Materials, London, 1995, pp. 207 - 225
- 78.** A.S. Oddy, J.M.J. McDill, J.A. Goldak, 'Consistent Strain Fields in 3D Finite Element Analysis of Welds', ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Technical Briefs, 112, 1990, pp. 309-311
- 79.** P. Dong, P.N. Ghadiali, F.W. Brust, 'Residual Stress Analysis of a Multi-pass Girth Weld', ASME PVP- Fatigue, Fracture, and Residual Stresses, 373, 1998, pp. 421-431
- 80.** Z. Feng, X.L. Wang, S. Spooner, G.M. Goodwin, P.J. Maziasz, C.R. Hubbard, T. Zacharia, 'A Finite Element Model for Residual Stress in Repair Welds', ASME PVPResidual Stresses in Design, Fabrication, Assessment and Repair, 327, 1996, pp. 119-125
- 81.** L. Karlsson, M. Jonsson, L.E. Lindgren, M. Nasstrom, L. Troive, 'Residual Stresses and Deformations in a Welded Thin-walled Pipe', ASME PVP- Weld Residual Stress and Plastic Deformation, 173, 1989, pp. 7-10
- 82.** O. Grong, O.R. Myhr, 'Modelling of the Strength Distribution in the Heat Affected Zone of 6082-T6 Aluminum Weldments', Mathematical Modelling of Weld Phenomena, The Institute of Materials, London, 1993, pp. 300-311

- 83.** J.B. Leblond, G. Mottet, J.C. Devaux, 'A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels During Phase Transformations - I. Derivation of General Relations', *J. Mech. Phys. Solids*, 34, 1986, pp. 395-409
- 84.** J.B. Leblond, G. Mottet, J.C. Devaux, 'A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels During Phase Transformations - II. Study of Classical Plasticity for Ideal-Plastic Phases', *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, 1986, pp. 411-432
- 85.** G.W. Greenwood, R.H. Johnson, 'The Deformation of Metals Under Small Stresses During Phase Transformations', *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 283, 1965, pp. 403-422
- 86.** J.B. Martin, 'Plasticity: Fundamentals and General Results', The MIT Press, Cambridge, MA, 1975, pp. 63-65
- 87.** J.E. Hatch, 'Aluminum: Properties and Physical Metallurgy', American Society for Metals, Metals Park, OH, 1984, pp. 42
- 88.** L.E. Malvern, 'Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium', Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1969, pp. 233, 338
- 89.** E.A. Thornton, 'Thermal structures for aerospace applications, American Institute of Aeronautics and Astronautics', Reston, VA, 1996, pp. 54, 58
- 90.** T.R. Hsu, 'The Finite Element Method in Thermomechanics', Allen & Unwin, Inc., Winchester, MA, 1986, pp. 24 - 76
- 91.** K.H. Huebner, E.A. Thornton, T.G. Byrom, 'The Finite Element Method for Engineers', John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1995, pp. 600
- 92.** G. Beck, S. Denis, A. Simon, 'The Influence of Thermomechanical Treatment on Residual Elastic Microstrain in an Aluminium Alloy', 2nd International Conference on Residual Stresses, Nancy, France, 1988, pp. 765-770
- 93.** R.K. Wyss, R.E. Sanders, Jr., 'Microstructure-Property Relationship in a 2XXX Aluminum Alloy with Mg Addition', *Metallurgical Transactions A*, 19A, 1988, pp. 2523-2530

- 94.** J. Thiery, P. Archambault, F. Moreaux, 'Influence of a Traction Stress on the Hardening Kinetics of Aluminium Alloys', 2nd International Conference on Residual Stresses, Nancy, France, 1989, pp. 771-776
- 95.** O.R. Myhr, O. Grong, 'Process Modelling Applied to 6082-T6 Aluminium Weldments-I. Reaction Kinetics', Acta. metall. mater., 39, 1991, pp. 2693-2702
- 96.** X.K. Zhu, Y.J. Chao, 'Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation', Computers and Structures, Vol. 80, 2002, pp. 967-976
- 97.** J. Cãnas, R. Picón, F. Paris, A. Blazquez and J. C. Marin, 'A Simplified Numerical Analysis of Residual Stresses in Aluminum Welded Plates', Computers & Structures, Vol. 58, No. 1, 1996, pp. 59-69
- 98.** D. Rosenthal, 'The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments', Trans ASME, Vol. 68, 1946, pp 849-865
- 99.** Rykalin R.R., 'Energy sources for welding', Welding in the World, Vol. 12, No. 9-10, 1974, pp. 227-248
- 100.** J.A. Goldak, B. Patel, M. Bibby, J. Moore, 'Computational weld mechanics', AGARD Conf. Proceedings No. 398, June 1985
- 101.** M. Gu, J.A. Goldak, M.J. Bibby, 'Computational heat transfer in welds with complex weld pool shapes', Adv. Manuf. Eng., Vol. 3, Jan. 1991
- 102.** R.R. Rykalin, 'Energy sources for welding', Welding in the World, Vol. 12, No. 9-10, 1974, pp. 227-248
- 103.** T. Ohji, A. Ohkubo, K. Nishiguchi, 'Mathematical modeling of molten pool in arc welding', Mechanical Effects of Welding, Springer, Berlin 1992, pp. 207-214
- 104.** J.A. Goldak, M. Akhlaghi, 'Computational Welding Mechanics', Springer 2005
- 105.** ASM Metals Handbook, 'Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials', ASM Handbook 10th Edition, Vol. 2, ASM, November 1990
- 106.** Γ. Τσαμασφύρος, Ε. Θεοτόκογλου, 'Η μέθοδος των πεπερασμένων Στοιχείων', Αθήνα 1994

- 107.** Α. Κανάραχος, 'Πεπερασμένα Στοιχεία και Ανάλυση Κατασκευών στη Μηχανολογία', Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε., Αθήνα 1995
- 108.** Simulia Abaqus on line documentation <http://abaqusdoc.ucalgary.ca/v6.9>
- 109.** S. Jana, S. Ray, F. Durst, 'A numerical method to compute solidification and melting processes' Applied Mathematical Modelling, Vol. 31 (2007), pp. 93-119
- 110.** N.Siva Shanmugam, G. Buvanashakaran, K. Sankaranarayananasamy, S. Ramesh Kumar, 'A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds' Materials and Design, Vol. 31 (2010), pp. 4528-4542
- 111.** Guillermo Araya, Gustavo Gutierrez, 'Analytical solution for a transient, three-dimensional temperature distribution due to a moving laser beam' International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49 (2006), pp. 4124-4131
- 112.** Jerzy Winczek, 'Analytical solution to transient temperature field in a half-infinite body caused by moving volumetric heat source' International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53 (2010), pp. 5774-5781
- 113.** V.K. Goyal, P.K. Ghoshb, J.S. Sainic, 'Analytical studies on thermal behaviour and geometry of weld pool in pulsed current gas metal arc welding' Journal of materials processing technology, Vol. 209 (2009), pp. 1318-1336
- 114.** L.K. Keppas, R.C. Wimpory, D.E. Katsareas, C. Ohms, 'Combination of simulation and experiment in designing repair weld strategies: A feasibility study' Nuclear Engineering and Design, Vol. 240 (2010), pp. 2897-2906
- 115.** Dean Deng, Shoichi Kiyoshima, Kazuo Ogawa, Nobuyoshi Yanagida, Koichi Saito, 'Predicting welding residual stresses in a dissimilar metal girth welded pipe using 3D finite element model with a simplified heat source' Nuclear Engineering and Design, Vol. 241 (2011), pp. 46-54
- 116.** C.V. Goncalves, L.O. Vilarinho, A. Scotti, G. Guimaraes, 'Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques' Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172 (2006), pp. 42-51

- 117.** L. Depradeux and J.-F. Jullien, 'Experimental and numerical simulation of thermomechanical phenomena during a TIG welding process' *Journal of Physics IV, France*, Vol. 120 (2004), pp. 697-704
- 118.** M.J. Tobar, I.M. Lamas, A. Yanez, J.M. Sanchez-Amaya, Z. Boukha, F.J. Botana, 'Experimental and simulation studies on laser conduction welding of AA5083 aluminium alloys' *Physics Procedia*, Vol. 5 (2010), pp. 299-308
- 119.** Muhammad Zain-ul-abdein, Daniel Nélias, Jean-Francois Jullien, Dominique Deloison, 'Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527 (2010), pp. 3025-3039
- 120.** Yanhong Tian, Chunqing Wang, Danyang Zhu, Y. Zhou, 'Finite element modeling of electron beam welding of a large complex Al alloy structure by parallel computations' *Journal of materials processing technology*, Vol. 199 (2008), pp. 41-48
- 121.** Andrés Anca, Alberto Cardona, José Risso, Víctor D. Fachinotti, 'Finite element modeling of welding processes' *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35 (2011), pp. 688-707
- 122.** G. Casalino, A.D. Ludovico, 'Finite element simulation of high speed pulse welding of high specific strength metal alloys' *Journal of materials processing technology*, Vol. 197 (2008), pp. 301-305
- 123.** J. Hu, H.L. Tsai, 'Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc' *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50 (2007), pp. 833-846
- 124.** J. Hu, H.L. Tsai, 'Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal' *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50 (2007), pp. 808-820
- 125.** Shoichi Kiyoshima, Dean Deng, Kazuo Ogawa, Nobuyoshi Yanagida, Koichi Saito, 'Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint' *Computational Materials Science*, Vol. 46 (2009), pp. 987-995
- 126.** J.R. Choa, B.Y. Lee, Y.H. Moon, C.J. Van Tyne, 'Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156 (2004), pp. 1690-1695

127. S.A. Tsirkas, P. Papanikos, Th. Kermanidis, 'Numerical Simulation of the laser welding process in butt-joint specimens' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134 (2003), pp. 59 - 69

128. Zhi Zeng, Lijun Wang, Yue Wang, Han Zhang, 'Numerical and experimental investigation on temperature distribution of the discontinuous welding' *Computational Materials Science*, Vol. 44 (2009), pp. 1153-1162

129. Peng-Hsiang Chang, Tso-Liang Teng, 'Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints' *Computational Materials Science*, Vol. 29 (2004), pp. 511-522

130. M. Adak, N.R. Mandal, 'Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion' *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34 (2010), pp. 146-158

131. L.-E. Lindgren, 'Numerical modelling of welding' *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 195 (2006), pp. 6710-6736

132. Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Wei Liang, 'Numerical simulation of welding distortion in large structures' *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 196 (2007), pp. 4613-4627

133. M. Abid, M. Siddique, 'Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82 (2005), pp. 860-871

134. S. Fricke, E. Keim, J. Schmidt, 'Numerical weld modeling – a method for calculating weld-induced residual stresses' *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 206 (2001), pp. 139-150

135. K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, 'Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches - A reference guide' *Advances in Engineering Software*, Vol. 39 (2008), pp. 483-496

136. Shadong Wang, John Goldak, Jianguo Zhou, Stanislav Tchernov, Dan Downey, 'Simulation on the thermal cycle of a welding process by space-time convection-diffusion finite element analysis' *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48 (2009), pp. 936-947

- 137.** M.J. Attarha, I. Sattari-Far, 'Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211 (2011), pp. 688–694
- 138.** G. Xu, J. Hub, H.L. Tsai, 'Three-dimensional modeling of arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding' *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52 (2009), pp. 1709–1724, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86 (2009), pp. 110–121
- 139.** Li Laiping, Chen Shanben, Lin Tao, 'The modeling of welding pool surface reflectance of aluminum alloy pulse GTAW' *Materials Science and Engineering A*, Vol. 394 (2005), pp. 320–326
- 140.** M.A. Wahab, M.J. Painter, M.H. Davies, 'The prediction of the temperature distribution and weld pool geometry in the gas metal arc welding process' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77 (1998), pp. 233–239
- 141.** R. Spina, L. Tricarico, G. Basile, T. Sibillano, 'Thermo-mechanical modeling of laser welding of AA5083 sheets' *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191 (2007), pp. 215–219
- 142.** X. Shan, C.M. Davies, T. Wangsdan, N.P. O'Dowd, K.M. Nikbin, 'Thermo-mechanical modelling of a single-bead-on-plate weld using the finite element method' *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86 (2009), pp. 110–121
- 143.** M. Mazar Atabaki, M. Nikodinovski, P. Chenier, J. Ma, W. Liu, R. Kovacevic, "Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration", *Optics & Laser Technology*, Vol. 59 (2014), pp. 68 – 92

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η

**Γενική σύνοψη, απήχηση και καινοτομία,
λοιπές γενικές θεωρήσεις**

Κεφάλαιο 15°

15.1 Γενικές παρατηρήσεις επί της διατριβής

Στην παρούσα διατριβή, πραγματοποιήθηκε τόσο πειραματική όσο και υπολογιστική μελέτη ρομποτικών συγκολλήσεων λεπτών ελασμάτων (< 6mm), κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5xxx. Στην πειραματική μελέτη οι βασικοί άξονες ήταν η μεταλλογραφία των συγκολλήσεων, οι θερμικοί κύκλοι, οι στρεβλώσεις – παραμορφώσεις και οι παραμένουσες τάσεις ενώ, κατά την υπολογιστική μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της συγκόλλησης λεπτού ελάσματος μεγάλων διαστάσεων, με χρήση προγράμματος που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS®). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των πειραματικών και των αντίστοιχων υπολογιστικών αποτελεσμάτων ενώ, διερευνήθηκε και η επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης στα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυρίως σε ότι αφορά στους θερμικούς κύκλους στις παραμορφώσεις και στις παραμένουσες τάσεις.

Έτσι, παρουσιάζεται μια πολυεπίπεδη μελέτη πάνω σε όλα τα θέματα που αφορούν στις συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου. Επιπλέον, η σύγκριση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων, δεν γίνεται με σκοπό να προταθεί η μια ή η άλλη ακολουθία μελέτης (πειραματική ή υπολογιστική) ως η βέλτιστη για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των συγκολλήσεων. Ουσιαστικά, μέσα από τη διατριβή αναδεικνύεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου.

Θα ήταν αδύνατο, χωρίς να υπάρξουν οι πειραματικές παρατηρήσεις και μετρήσεις, να γίνουν οι κατάλληλες παραδοχές κατά την ανέγερση του μοντέλου. Αντίστοιχα, τα πειράματα πιθανότατα να ήταν ανεπιτυχή αν βασιζόντουσαν μόνο στις βιβλιογραφικές αναφορές ή/και στις βασικές αρχές της φυσικής, των μαθηματικών, της θερμοδυναμικής κ.λπ., πόσο μάλλον από τη στιγμή που όλες οι πειραματικές συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση ρομποτικού βραχίονα.

Το πείραμα και η παρατήρηση μέσω αυτού ήταν καθοριστικό τόσο για την εισαγωγή ρεαλιστικών παραδοχών και δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, όσο και για τη σωστή ερμηνεία και συσχέτιση της υπολογιστικής απεικόνισης με την πραγματική κατάσταση.

Έτσι, για παράδειγμα, από τις πέντε γενιές μοντελοποίησης της πηγής θερμότητας που περιγράφονται βιβλιογραφικά (Παράγραφοι 12.2.2 – 12.2.6), μέχρι τις παραδοχές για τη

μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν στα μοντέλα της διατριβής (Παράγραφος 13.9.5) παρεμβλήθηκαν τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης.

Από την επιλογή των πειραματικών μετρήσεων έγινε αντιληπτό πως για την υλοποίηση της προσομοίωσης δεν μπορεί να αποτελέσει επίκεντρο μελέτης η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης. Αν επιλεγόταν η εμφάνιση στα σύνθετα φαινόμενα (θερμοδυναμικά, ρευστομηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά κ.λπ.) που συμβαίνουν στο τήγμα της περιοχής της λίμνης συγκόλλησης, ενδεχομένως να οδηγούνταν σε αποτυχία η πρόβλεψη των θερμικών κύκλων και των στρεβλώσεων - παραμορφώσεων σε σημεία μακριά από τον άξονα της συγκόλλησης όπου και υπήρχαν πειραματικά δεδομένα.

Έτσι, υιοθετήθηκε μια προσέγγιση σύμφωνα με την οποία μοντελοποιήθηκε η συνολική θερμομηχανική συμπεριφορά των συγκολλητών στοιχείων, εφαρμόζοντας μια απλοποιημένη μορφή γεωμετρίας για την πηγή θερμότητας στην οποία συμπεριλήφθηκαν παράμετροι και παραδοχές τόσο θεωρητικές και από τη βιβλιογραφία όσο, κυρίως, από την πειραματική μελέτη, η οποία τελικά αποδείχθηκε αξιόπιστη καθώς οδήγησε σε αποτελέσματα με πολύ καλή σύγκλιση με τα πειραματικά.

Αντίστροφα, ενώ όπως φάνηκε από τη σύγκριση των πειραματικών με τις υπολογιστικές καμπύλες της γωνιακής παραμόρφωσης (Παράγραφος 14.2.2) δεν υπάρχει η επιθυμητή σύγκλιση (τουλάχιστο σε ότι αφορά στις μεταβατικές τιμές), κρίνεται ότι οι υπολογιστικές καμπύλες περιγράφουν καλύτερα το φυσικό φαινόμενο και το σφάλμα των πειραματικών μετρήσεων εντοπίζεται στον τρόπο συγκράτησης των πραγματικών δοκιμίων. Επιπλέον, η σταθερότητα και η αξιοπιστία που επέδειξε το μοντέλο προσομοίωσης βοήθησε στη διερεύνηση διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης από την οποία, ενώ προκύπτει πρόταση που μπορεί με ευχέρεια να εφαρμοστεί στην πράξη και οδηγεί σε μικρότερες παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης, ταυτόχρονα επισημαίνει τα ευπαθή σημεία συγκέντρωσης τάσεων που σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσαν να είναι εμφανή από το φυσικό πείραμα.

Τελικά, ξεκινώντας από την εμπέδωση της γνώσης γύρω από τα κράματα αλουμινίου και τη συγκολλησιμότητά τους (Ενότητα 1) και τις απλές δοκιμές απόθεσης μετάλλου προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης (Παράγραφος 6.1), επιτεύχθηκαν αξιόπιστες συγκολλήσεις μικρών και μεγάλων διαστάσεων λεπτών ελασμάτων από κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx (Παράγραφος 6.2 και 6.3) οι οποίες οδήγησαν στη λήψη ποιοτικών μετρήσεων σε ότι αφορά στους θερμικούς κύκλους (Παράγραφοι 6.2.1.4, 6.2.2.4, 6.2.3.4, 6.3.4), στις μεταβατικές θερμικές παραμορφώσεις, στις παραμορφώσεις και στις παραμένουσες τάσεις

(Κεφάλαια 10 και 11). Η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, βοήθησε με τη σειρά της στην ανέγερση ενός ρεαλιστικού μοντέλου προσομοίωσης της συγκόλλησης (Κεφάλαιο 13) η αξιοπιστία του οποίου (Παράγραφοι 14.1 και 14.2) βοήθησε με τη σειρά της στην παραμετρική μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων του υλικού στα εξαγόμενα αποτελέσματα (Παράγραφος 14.3) αλλά και τη μελέτη της επίδρασης διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης στα εξαγόμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Παράγραφος 14.4).

Έτσι, προέκυψε για παράδειγμα και το συμπέρασμα ότι, ακόμα κι αν όλες οι ιδιότητες του υλικού εισαχθούν στο μοντέλο ως σταθερές με τις τιμές τους που ισχύουν σε συνθήκες περιβάλλοντος και το όριο διαρροής ως γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας λαμβάνονται αποτελέσματα με απόκλιση της τάξης του 10% σε σύγκριση με το πλήρες μοντέλο όπου όλες οι ιδιότητες του υλικού εισάγονται ως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία (Παράγραφος 14.3.4). Το αποτέλεσμα αυτό γίνεται εξαιρετικά ενδιαφέρον αν λάβουμε υπόψη και την παράμετρο του χρόνου υπολογισμού.

Πράγματι, ενώ ο χρόνος υπολογισμού για το πλήρες μοντέλο ήταν 325min για το απλοποιημένο μοντέλο ήταν 219min δηλαδή, κατά 32,62% μικρότερος. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η ταχύτητα των ηλεκτρονικών υπολογιστών βελτιώνεται κατά 1,7 φορές περίπου κάθε χρόνο^[1], προκύπτει ότι η παρούσα διατριβή, μεταξύ άλλων, ανέδειξε και ένα μοντέλο με πολύ καλή σύγκλιση, ανεξάρτητο από την επίπονη, έως συχνά αδύνατη, διαδικασία εισαγωγής ιδιοτήτων εξαρτωμένων από τη θερμοκρασία, το οποίο, παρόλο που διαθέτει σημαντικό αριθμό στοιχείων και κόμβων (6.475 στοιχεία, 13.376 κόμβοι), επί του παρόντος απαιτεί συγκριτικά μικρό υπολογιστικό χρόνο ενώ, μελλοντικά (π.χ. σε βάθος 4 - 5 ετών) θα ολοκληρώνεται (πλήρης θερμο-μηχανική ανάλυση) σε χρόνο της τάξης των 20min.

15.2 Καινοτομία της παρούσας διδακτορικής διατριβής

Συνοπτικά, ως καινοτομίες της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορούν να χαρακτηριστούν τα εξής:

- Η πειραματική καταγραφή μεταβατικών φαινομένων όπως οι μικρο-παραμορφώσεις και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω γωνιακής παραμόρφωσης, σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και μέχρι το τέλος του κύκλου απόψυξης σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων, μεγάλων διαστάσεων, ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, με χρήση ρομποτικού βραχίονα συγκόλλησης.

- Η φιλοσοφία ανέγερσης του μοντέλου προσομοίωσης, για τόσο λεπτά ελάσματα μεγάλων διαστάσεων, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων κατά την οποία έγιναν οι εξής παραδοχές:

- η πηγή εισήχθη αποκλειστικά ως ορθογωνική επιφανειακή κατανομή με διαστάσεις οι οποίες προέκυψαν από συνδυασμό βιβλιογραφικών αναφορών και πειραματικών δεδομένων.

- αμελήθηκαν οι απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας και αντί αυτών ορίστηκε σύνορο 25°C στο μέγιστο πλάτος του υπό προσομοίωση δοκιμίου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απαγωγή θερμότητας από την περιοχή της συγκόλλησης λόγω αγωγής

- Οι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία ιδιότητες του υλικού εισήχθησαν ως γραμμικές εξισώσεις ενώ ιδιαίτερα σε ότι αφορά στο όριο διαρροής, αυτό εισήχθη στο μοντέλο σύμφωνα με απλοποιημένη μορφή που προτείνεται στη βιβλιογραφία η οποία ωστόσο δεν έχει εφαρμοστεί σε πλήρη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων

- Τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τις συγκεκριμένες παραδοχές τα οποία περιέγραψαν επαρκώς το φυσικό πρόβλημα με μικρά ποσοστά σφαλμάτων

- Η παραμετρική μελέτη της επίδρασης των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων του υλικού που αφενός πιστοποίησε τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του αρχικού μοντέλου προσομοίωσης αφετέρου απέδωσε χρήσιμα στοιχεία που αφορούν στις συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων, μεγάλων διαστάσεων, από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου που εξαιτίας των φυσικών και μηχανικών του ιδιοτήτων παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες.

- Η μελέτη των διαφορετικών ακολουθιών συγκόλλησης που έδωσε σημαντικά στοιχεία που αφορούν τόσο στην επίδρασή τους στην τελική παραμόρφωση λόγω συγκόλλησης όσο και στις

τυχόν ατέλειες που παράγει η εφαρμογή τους, κυρίως σε ότι αφορά στις παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης.

15.3 Απήχηση και μελλοντική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της διατριβής

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε η μεθοδολογία και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα μετρήσεων μεταβατικών φαινομένων όπως οι μικρο-παραμορφώσεις οι κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω γωνιακής παραμόρφωσης και οι θερμικοί κύκλοι συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων από κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx.

Στη σύγχρονη υπολογιστική των συγκολλήσεων, τέτοια ψηφιακά δεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα καθώς σε συνδυασμό με εξελιγμένα συστήματα υπολογισμού μηχανικής συμπεριφοράς με τη βοήθεια H/Y (CAE) και πρότυπων κατασκευαστικών στοιχείων υπό κλίμακα (mock-ups) μπορούν να οδηγήσουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς ολόκληρης της συγκολλητής κατασκευής, τόσο κατά την ανέγερσή της όσο, κυρίως, κατά τη λειτουργία της (Εικ. 16.1 – 16.3).

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η εξέλιξη των μηχανών συγκόλλησης είναι ήδη τέτοια ώστε, με τη βοήθεια ψηφιακών ελεγκτών, να προβλέπουν σύνθετους κύκλους κατά την έναρξη και την περάτωση του τόξου συγκόλλησης, γίνεται κατανοητό πως η επιπλέον γνώση μεταβατικών φαινομένων για ολόκληρη τη διαδικασία συγκόλλησης, σαν κι αυτά που μετρήθηκαν πειραματικά στην παρούσα διδακτορική διατριβή, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ελεγκτών που θα παρεμβαίνουν στη φύση και στην ποσότητα της εισερχόμενης θερμικής ισχύος, στο συνολικό χρόνο συγκόλλησης, με στόχο π.χ. την ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης.

Τέλος, δεν μπορεί παρά να αναφερθεί η ιδέα της δημιουργίας μεταβλητών μηχανισμών συγκράτησης/περιορισμού των υπό συγκόλληση στοιχείων (π.χ. υδραυλικές/πνευματικές αρπάγες πολλών βαθμών ελευθερίας) τέτοιων ώστε να ενεργούν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τρόπο τέτοιο ώστε να εξαλείφουν κάθε παραγόμενη τάση ή παραμόρφωση που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, προφανώς απαιτούνται συγκολλήσεις υψηλής επαναληψιμότητας και δεδομένα σαν κι αυτά της παρούσας διατριβής που θεωρητικά θα εισέρχονταν μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή στους ελεγκτές των μηχανισμών αυτών, η κατάλληλη μετατόπιση των οποίων θα αναιρούσε την εμφάνιση μόνιμης παραμόρφωσης ή παραμενουσών τάσεων στο συγκολλημένο στοιχείο.

Πιθανότατα βέβαια και προκειμένου να διερευνηθεί αν μια τέτοια ιδέα είναι εφικτό να εφαρμοστεί, η ανέγερση ενός μοντέλου προσομοίωσης της συγκόλλησης με συνοριακές συνθήκες, σε κατάλληλες θέσεις, τέτοιες ώστε να περιλαμβάνουν καμπύλες συναρτήσεως του χρόνου σαν κι

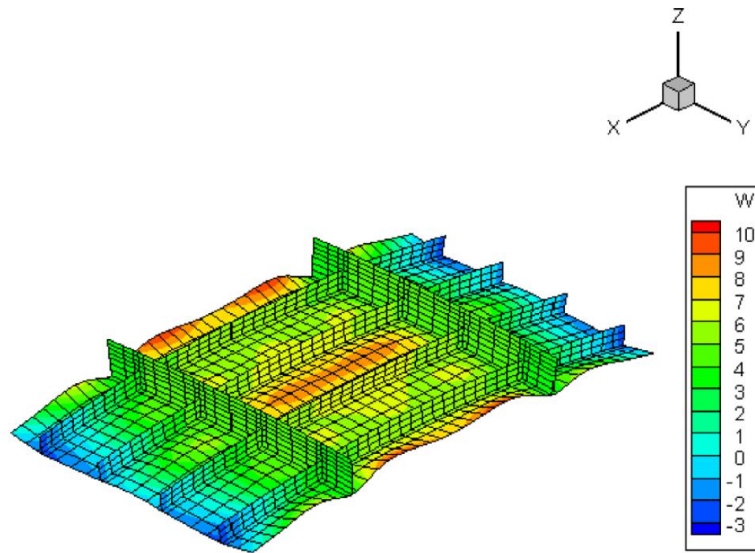
αυτές που καταγράφηκαν στη διατριβή αυτή να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα και το ερώτημα ωστόσο πού τίθεται είναι το κατά πόσο μπορεί ένα τέτοιο μοντέλο να συγκλίνει και να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σε ότι αφορά στο μοντέλο προσομοίωσης, όπως αυτό αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή και στον τρόπο που αυτό αξιοποιήθηκε (παραμετρική μελέτη επίδρασης ιδιοτήτων του υλικού εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία και παραμετρική μελέτη επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης), σημειώνεται ότι:

- μπορεί να αξιοποιηθεί με ασφάλεια για την προσομοίωση συγκολλήσεων λεπτότερων ελασμάτων από κράμα αλουμινίου ή άλλων μεταλλικών κραμάτων με αντίστοιχα μεγάλη τιμή θερμικής αγωγιμότητας και σε διαφορετικές γεωμετρίες συγκόλλησης (π.χ. αυχενική συγκόλληση ή συγκόλληση σωλήνων).

- μπορεί, με μικρές διαφοροποιήσεις, να αξιοποιηθεί για την προσομοίωση συγκολλήσεων GTAW, λεπτών ελασμάτων, ή συγκολλήσεων παλμικού ρεύματος (όπου η εισερχόμενη θερμότητα δεν έχει ομοιόμορφη αδιάλειπτη ροή αλλά αποδίδεται σε συγκεκριμένα χρονικά βήματα) π.χ. ενεργοποιώντας/ απενεργοποιώντας - προκειμένου να προσομοιωθεί η κίνηση του ηλεκτρικού τόξου - όχι μεμονωμένα στοιχεία αλλά ομάδες στοιχείων σε συγκεκριμένα χρονικά βήματα.

- περισσότερο απ' οτιδήποτε όμως, μπορεί να αξιοποιηθεί σε προσομοιώσεις συγκολλήσεων μεγάλων προκατασκευασμένων στοιχείων (Εικ. 16.2β, Εικ. 16.2γ) και ενιαίων τμημάτων μεταλλικής κατασκευής (prefabrication elements, block assembly) αλλά και σε προσομοιώσεις συγκολλήσεων ανέγερσης (erection) ολοκληρωμένων συγκολλητών μεταλλικών κατασκευών, με έμφαση αφενός στην πρόβλεψη των παραμορφώσεων (Εικ. 16.1) αφετέρου, στην αναζήτηση κατάλληλων ακολουθιών συγκόλλησης που θα ελαχιστοποιούν τις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης και θα περιορίζουν τους κινδύνους αστοχίας κατά τη διάρκεια της ανέγερσής τους.



Εικόνα 15.1 Πρόβλεψη παραμορφώσεων σε μοντέλο προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων προκατασκευασμένου στοιχείου μεταλλικής κατασκευής^[4]



(α)

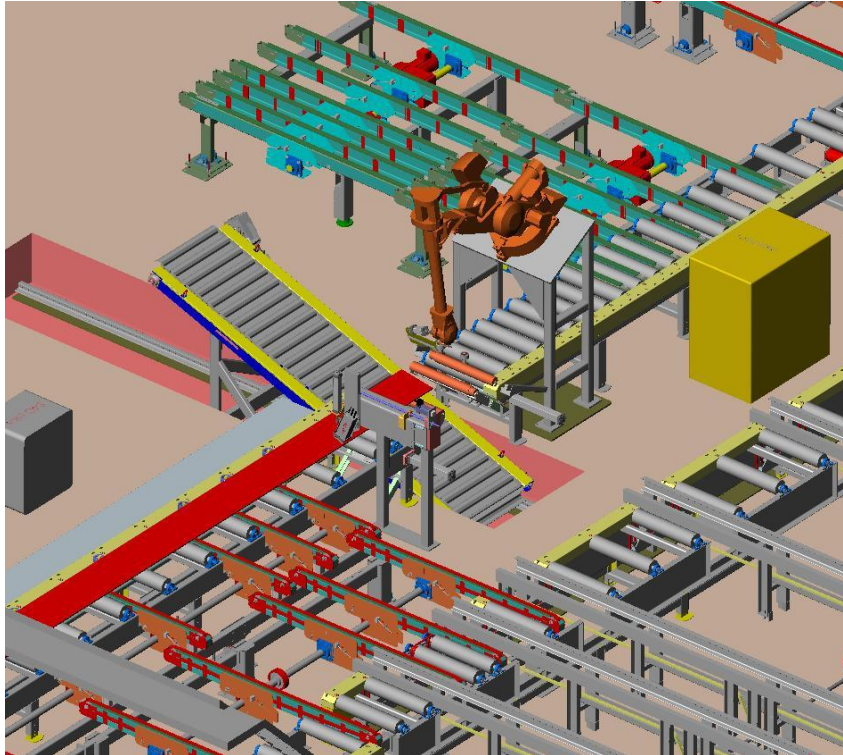


(β)

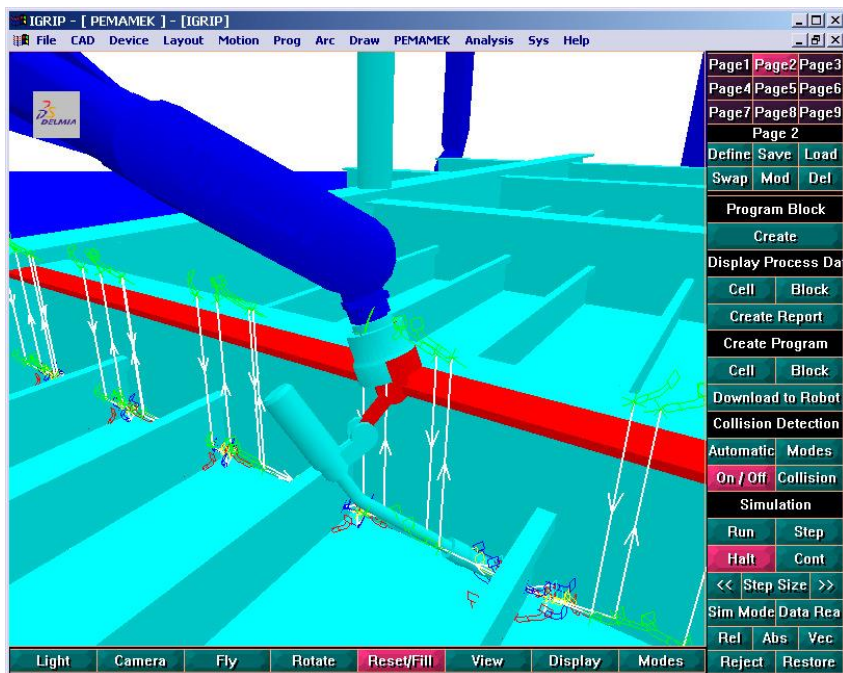


(γ)

Εικόνα 15.2 Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες^[3]

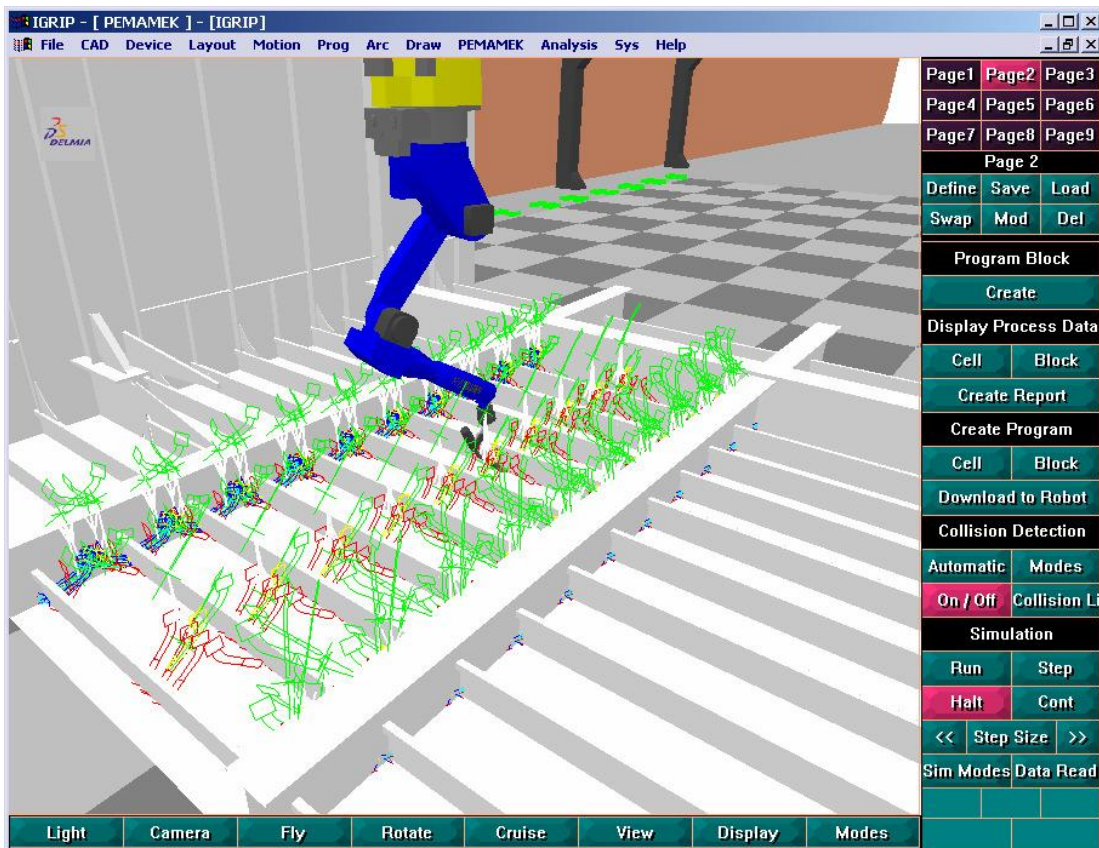


(α)

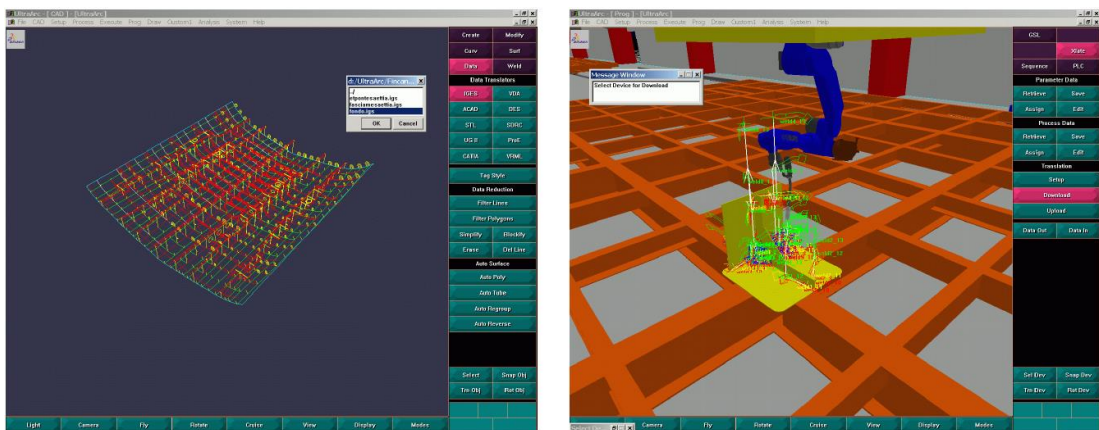


(β)

Εικόνα 15.3 Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες^[3]



(α)



(β)

Εικόνα 15.4 Ολοκληρωμένα συστήματα εφαρμογής της υπολογιστικής μηχανικής των συγκολλήσεων σε σύγχρονες ναυπηγικές μονάδες^[3]

Βιβλιογραφία

1. J.A. Goldak, M. Akhlaghi, 'Computational Welding Mechanics', Springer 2005
2. Simulia Abaqus on line documentation <http://abaqusdoc.ucalgary.ca/v6.9>
3. Pemamek Oy Ltd, PEMA welding automation <http://www.pemamek.com/>
4. Dean Deng, Hidekazu Murakawa, 'FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures' Computational Materials Science, Vol. 43, 2008, pp. 591-607

ΕΝΟΤΗΤΑ 6^η

Παράρτημα

Παράρτημα 1

Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη Διδακτορική Διατριβή

A. Πρωτότυπες Δημοσιεύσεις σε Έγκριτα Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με Κριτές

STAVROS K. CHIONOPOULOS, DIMITRIS I PANTELIS

"From Transient to Permanent Phenomena during GMAW of a Thin-Walled Marine Aluminium Alloy", International Journal of Materials Science and Applications. 03/2014; 3(3):58-69.

B. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων με Διαδικασία Κρίσης Ολόκληρου του Κειμένου

D. I. PANTELIS, S. CHIONOPOULOS

"Aspects thermiqques, metallurgiques et mechaniques des joints soudes en alliages d' aluminium utilises en construction navale", Proc. of the "TransAl 2002: Congres International sur l' aluminium et sa mise en forme a chaud: moulage et forgeage" CORDA, Lyon, 9-12 June 2002 (in CD form). Also published in Fonderie-Fondeur d'Aujourd'hui, Issue 217, August 2002, Page 17.

Γ. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Εθνικών Συνεδρίων με Διαδικασία Κρίσης Περίληψης

Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Δ. ΣΠΑΘΗΣ, Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Β. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

«Μελέτη μετωπικής συγκόλλησης GMAW ελασμάτων ναυπηγικού κράματος αλουμινίου», 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 29-30 Νοεμβρίου 2001, Πρακτικά, σελ. 76-81.

Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

«Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων GMAW ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Ε.Μ.Π., Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 25-26 Νοεμβρίου 2004, Πρακτικά, σελ. 485-490.

Α.Π. ΚΥΡΙΑΚΟΠΤΟΝΑΣ, Σ.Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ

«Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων FCAW ελασμάτων από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα AISI 316L», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα-Ρίο, 6-7 Δεκεμβρίου 2007, Πρακτικά, σελ. 255-260.

Παράρτημα 2

Βιογραφικό Σημείωμα

ΣΤΑΥΡΟΣ Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, MSc.

ΣΠΟΥΔΕΣ

1992: Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Εισαγωγή με το σύστημα των Πανελλαδικών Εξετάσεων

1993-1999: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Διπλωματική Εργασία: Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, θέμα:

«Επιφανειακή Κραμάτωση Σκόνης WC-12%Co σε Σιδηρούχα Υποστρώματα με Χρήση Ηλιακής Ενέργειας».

Δίπλωμα: Οκτώβριος, 1999

2000 - 2002: Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη».

Μεταπτυχιακή εργασία: Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, θέμα:

«Συγκόλληση GMAW του Ναυπηγικού Κράματος Αλουμινίου 5383 - H116, πάχους 6 mm, με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα συγκόλλησης».

Τίτλος: Οκτώβριος 2002

2012: International Welding Engineer (EWE/IWE)

Πρόγραμμα εκπαίδευσης από την Ελληνική Εταιρεία Συγκολλήσεων, Πιστοποιημένο Εθνικό Φορέα Εκπαίδευσης του συγκεκριμένου προγράμματος (Certified National Training Body - NTB) από το Ελληνικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων, τον Εξουσιοδοτημένο Εθνικό Φορέα (Authorised National Body - ANB) του Διεθνούς Ινστιτούτου Συγκολλήσεων (International Institute of Welding - IIW) στην Ελλάδα.

Τίτλος - Δίπλωμα: Σεπτέμβριος, 2012

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ - ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

11/2012 έως σήμερα:

Εισηγητής στο πρόγραμμα εκπαίδευσης που οδηγεί στον Διεθνώς αναγνωρισμένο Τίτλο του Διεθνούς Μηχανικού Συγκολλήσεων.

11/2005 έως 06/10/2008:

✓ Επιβλέπων Μηχ/κός Συγκολλήσεων & Επιβλέπων Μηχανικός Έργων.

Βιομηχανικές και Ναυπηγικές Επιχειρήσεις Ελευσίνας Α.Ε.

06/10/2008 έως σήμερα:

- ✓ Προϊστάμενος Τμήματος Ηλεκτροσυγκολλήσεων
Βιομηχανικές και Ναυπηγικές Επιχειρήσεις Ελευσίνας Α.Ε.

Τμήμα αποτελούμενο από 60 τεχνίτες ηλεκτροσυγκολλητές συμπεριλαμβανομένου και των τεχνικών προϊσταμένων αυτών (Εργοδηγοί, Υπερφοδηγοί)

01/11/2011 έως σήμερα:

- ✓ Προϊστάμενος Τμήματος Ποιοτικού Ελέγχου
Βιομηχανικές και Ναυπηγικές Επιχειρήσεις Ελευσίνας Α.Ε.

03/2000 έως σήμερα:

Ερευνητής Μηχανολόγος Μηχανικός, Ε.Μ.Π.

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

2008 ως σήμερα:

- ✓ Hellenic Welding Association
Welding Engineering, Welding Inspection, Welding Training Responsibilities

ΓΝΩΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ - ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

- ❖ Συγκολλήσεις μεταλλικών υλικών με συμβατικές (GMAW - GTAW) και άλλες (Friction Stir Welding - FSW) μεθόδους
- ❖ Επιφανειακές κατεργασίες μεταλλικών υλικών
- ❖ Διερεύνηση αιτιών αποτυχίας ναυπηγικών και μηχανολογικών στοιχείων ή/και κατασκευών (Πραγματογνωμοσύνες)

ΕΙΔΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

- ❖ Εμπειρία σε προηγμένες Εργαστηριακές Μεθόδους Χαρακτηρισμού και Ποιοτικού Ελέγχου Μεταλλικών Υλικών και Συγκολλητών Κατασκευών:
 - Μέθοδοι χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων και δομής υλικών:
 - Οπτική Μικροσκοπία (Optical Macroscopy - Microscopy)
 - Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)
 - Ανάλυση εικόνας (Image Analysis)
 - Μέθοδοι μέτρησης και χαρακτηρισμού συγκολλητών κατασκευών:
 - Μεταλλουργικός χαρακτηρισμός συγκολλήσεων
 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συγκόλλησης
 - Μελέτη μικροδομής
 - Σκληρομετρήσεις, μικροσκληρομετρήσεις
 - Μέτρηση θερμικών κύκλων

- Μέτρηση παραμενουσών τάσεων (Hole – Blind hole drilling method), στρεβλώσεων - παραμορφώσεων
- Μηχανικές δοκιμές (εφελκυσμός – θλίψη, κόπωση) κατά τα διεθνή και εθνικά πρότυπα
- Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι
 - Δεισδοτικά υγρά
 - Μαγνητικά σωματίδια
 - Αναγνώριση σφαλμάτων ραδιογραφιών
 - Αναγνώριση σφαλμάτων εφαρμογής μεθόδων υπερήχου
- Μέθοδοι μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων - χαρακτηρισμού επιφανειών:
 - Σκληρομέτρηση
 - Τριβολογικοί χαρακτηρισμοί (αντοχή σε τριβή και φθορά)
 - Προσδιορισμός τραχύτητας
 - Έλεγχος πρόσφυσης επιστρωμάτων (adhesion/scratching).
- ❖ Θερμομηχανική Προσομοίωση Συγκολλήσεων με χρήση αριθμητικών μεθόδων και τη βοήθεια αντίστοιχων υποστηρικτικών πακέτων προγραμμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (ABAQUS, ALGOR).
- ❖ Προγραμματισμός σε περιβάλλον Matlab, Visual Basic, Fortran.
- ❖ Συγκόλληση με ρομποτικό βραχίονα συγκόλλησης.
- ❖ Χειρονακτική συγκόλληση (SMAW, GMAW) Μεταλλικών Κραμάτων
- ❖ Άριστη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε περιβάλλον Microsoft Windows και σε περιβάλλον UNIX.
- ❖ Άριστη χρήση του πακέτου προγραμμάτων Microsoft Office (Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Access, Microsoft PowerPoint).
- ❖ Εμπειρία στην εκπόνηση και υλοποίηση προτάσεων χρηματοδότησης έρευνας μέσω Ευρωπαϊκών και Εθνικών προγραμμάτων.
- ❖ Εμπειρία σε κατασκευή Ιστοσελίδων (Web Pages) - Γνώσεις html.

ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΞΙΩΤΗΤΩΝ

✓ NDT - Inspection of Welds in acc. to the European Standards GSI-SLV DUISBURG / DVS - Welding School

ΜΟΝΟΓΡΑΦΙΕΣ

1. Σ. Κ. Χιονόπουλος, «Συγκόλληση GMAW του Ναυπηγικού Κράματος Αλουμινίου 5383 – H116, πάχους 6 mm, με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα συγκόλλησης» Μεταπτυχιακή Εργασία στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών – Ε.Μ.Π.», Σεπτέμβριος, 2002.

2. Σ. Κ. Χιονόπουλος, «Σύγχρονες εξελίξεις στην κατασκευή, επισκευή και εγκατάσταση μεταλλικών προϊόντων και εξοπλισμού», Εκδόσεις Άποψη Α.Ε., 2013, ISBN: 978-618-80385-2-3.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ – ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

A. ΠΡΩΤΟΤΥΠΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ

1. PANTELIS, D.I., CHIONOPOULOS, S.

'Thermal, metallurgical and mechanical aspects of welding joints in aluminum alloys used in naval construction', Fonderie-Fondeur d'Aujourd'hui, Issue 217, August 2002, Page 17.

2. STAVROS K. CHIONOPOULOS, DIMITRIS I PANTELIS

"From Transient to Permanent Phenomena during GMAW of a Thin-Walled Marine Aluminium Alloy", International Journal of Materials Science and Applications. 03/2014; 3(3):58-69.

B. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΡΙΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΤΟΥ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

1. D. I. PANTELIS, S. CHIONOPOULOS

"Aspects thermiques, metallurgiques et mecaniques des joints soudes en alliages d' aluminium utilises en construction navale", Proc. of the "TransAl 2002: Congres International sur l' aluminium et sa mise en forme a chaud: moulage et forgeage" CORDA, Lyon, 9-12 June 2002 (in CD form).

2. S.K. CHIONOPOULOS, CH.I. SARAFIOGLOU, D.I. PANTELIS, V.J. PAPAIOGLOU

"Effect of tool pin and welding parameters on friction stir welded (FSW) marine aluminium alloys", proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), Chalkidiki (Greece), 1-3 October 2008, pp. 307-316.

3. S.K. CHIONOPOULOS, D.I. PANTELIS, V.J. PAPAIOGLOU, N. DANIOLOS

"Influence of process variables and tool's design on friction stir welding (FSW) of marine aluminium alloys", proceedings of the 13th International Congress of the International Maritime Association of Mediterranean, IMAM 2009, Istanbul (Turkey), 12-15 October 2009, Vol. II, pp. 429-436.

Γ. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΕΘΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗΣ

1. Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Α. ΓΚΡΙΝΙΑΡΗ, Α. ΧΟΥΝΔΡΗ, Χ. ΣΑΡΑΦΟΓΛΟΥ, Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ

«Επιφανειακή κραμάτωση σκόνης SiC σε μεταλλικά υποστρώματα με χρήση ηλιακής ενέργειας», 6^ο Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας: «Βελτιστοποίηση ενεργειακών

διεργασιών», Ι.Η.Τ. (Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής), Βόλος, 3-5 Νοεμβρίου 1999, Πρακτικά, Τόμος Β', σελ. 225-232.

2. Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Δ. ΣΠΑΘΗΣ, Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Β. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

«Μελέτη μετωπικής συγκόλλησης GMAW ελασμάτων ναυπηγικού κράματος αλουμινίου», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 29-30 Νοεμβρίου 2001, Πρακτικά, σελ. 76-81.

3. Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Α. ΓΚΡΙΝΙΑΡΗ, Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ

«Τριβολογική συμπεριφορά επιφανειακών κραμάτων παραγομένων με χρήση ηλιακής ενέργειας», 7^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 6-8 Νοεμβρίου 2002, Πρακτικά, Τόμος Β', σελ. 303-310.

4. Σ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

«Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων GMAW ελασμάτων μεγάλων διαστάσεων από ναυπηγικό κράμα αλουμινίου», 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Ε.Μ.Π., Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 25-26 Νοεμβρίου 2004, Πρακτικά, σελ. 485-490.

5. Α.Π. ΚΥΡΙΑΚΟΓΤΟΝΑΣ, Σ.Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ

«Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων FCAW ελασμάτων από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα AISI 316L», 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα-Ρίο, 6-7 Δεκεμβρίου 2007, Πρακτικά, σελ. 255-260.

6. Ν.Μ. ΔΑΝΙΟΛΟΣ, Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Β.Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Σ.Κ. ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Γ.Χ. ΧΡΙΣΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

«Βελτιστοποίηση αυτογενών και ετερογενών μετωπικών συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου», 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Θεσσαλονίκη, 4-5 Νοεμβρίου 2010, Πρακτικά, σελ.87-92.

Δ. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΜΠΟΣΙΑ

1. D.I. PANTELIS, A.CHOUNDRI, A.GRINIARI, S. CHIONOPOULOS, Ch.SARAFOGLOU

"Cladding of ceramic powders on ferrous substrates using solar energy", Report of research activities in 1998 in the framework of the TMR Program.

2. D. I. PANTELIS, A. GRINIARI, CH. SARAFOGLOU, S. CHIONOPOULOS

"Further Study on Surface Treatments of Different Combinations of Advanced Materials Using Concentrated Solar Energy", Paper presented at the IHP-Users Workshop 2001.

ΕΤΕΡΟΑΝΑΦΟΡΕΣ

S.K. CHIONOPOULOS, CH.I. SARAFOGLOU, D.I. PANTELIS, V.J. PAPAZOGLU

"Effect of tool pin and welding parameters on friction stir welded (FSW) marine aluminium alloys", proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), Chalkidiki (Greece), 1-3 October 2008, pp. 307-316.

- R. Palanivel, P. Koshy Mathews, N. Murugan, "Influences of tool pin profile on the mechanical and metallurgical properties of friction stir welding of dissimilar aluminum alloy", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(6), 2010, 2109-2115.
- S.J. Vijay, N. Murugan, "Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al-10 wt.% TiB₂ metal matrix composite", *Materials & Design*, Volume 31, Issue 7, August 2010, Pages 3585-3589
- C.A. Charitidis, D.A. Dragatogiannis, E.P. Koumoulos, I.A. Kartsonakis, *Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation*, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 540, 1 April 2012, Pages 226-234.
- M.Karthikeyan, Dr.A.K.Shaik Dawood, "Influence of Tool Design on the Mechanical Properties and Microstructure in Friction Stir Welding of AA6351 Aluminium Alloy", *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, ISSN: 2250-3498, Vol.2, No. 2, April 2012
- VIJAY, S.J., MURUGAN, N., PARAMESWARAN, "Optimization of Tensile Strength of Friction Stir Welded Al-(10 to 14 Wt.%) TiB₂ Metal Matrix Composites", *TMS ANNUAL MEETING, VOLUME 1, 2012, PAGES 783-790, 141ST ANNUAL MEETING AND EXHIBITION, TMS 2012, ORLANDO.*
- Ramadan.R. Abuaisha, "Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA5xxx Aluminium Alloys", 2012, PhD Thesis, The School of Materials Corrosion and Protection Centre, University of Manchester.
- Mikhail, J., Ibrahim, R., Lathabai, S., "Effect of tool design on the microstructure and microhardness of friction stir processed 5005-H34 aluminium alloy", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 8793 , 2013, art. no. 879319.
- Elias P. Koumoulos, Costas A. Charitidis, Nikolaos M. Daniolos, Dimitrios I. Pantelis, "Determination of onset of plasticity (yielding) and comparison of local mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys using the micro- and nano-indentation techniques", *International Journal of Structural Integrity* Volume: 4 Issue: 1 2013, pp. 143-158.
- P.Prasanna, Dr.Ch.Penchalayya, Dr.D.Anandamohana Rao, *Effect of tool pin profiles and heat treatment process in the friction stir welding of aa 6061 aluminium alloy*, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Volume-02, Issue-01, pp-07-15.
- Salari, E., Jahazi, M., Khodabandeh, A., Ghasemi-Nanesa, H., "Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets", *Materials and Design*, Volume 58, June 2014, Pages 381-389

S.K. CHIONOPOULOS, D.I. PANTELIS, V.J. PAPAZOGLU, N. DANIOLOS

"Influence of process variables and tool's design on friction stir welding (FSW)

of marine aluminium alloys", proceedings of the 13th International Congress of the International Maritime Association of Mediterranean, IMAM 2009, Istanbul (Turkey), 12-15 October 2009, Vol. II, pp. 429-436.

- E.P. Koumoulos C.A. Charitidis N.M. Daniolos D.I. Pantelis, *Nanomechanical properties of friction stir welded AA6082-T6 aluminum alloy*, *Materials Science and Engineering: B*, Volume 176, Issue 19, 2011, Pages 1585-1589.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

1. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Γ., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Αξιολόγηση Σταδίων Παραγωγής Βαλβίδων και Ποιοτικός Έλεγχος Προϊόντος και Παραγωγικών Μονάδων του Λεκανοπεδίου Αττικής», Τεχνική Έκθεση προς Δ.Ε.Η./Δ.Π.Ν., Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-137-F-02, Δεκέμβριος 2002.

2. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΣΑΡΑΦΟΓΛΟΥ, Χ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Προηγμένες Μέθοδοι Συγκόλλησης Υψηλής και Χαμηλής Θερμοκρασίας Κραμάτων Αργυροχρυσοχοΐας», Παραδοτέο Β': «Τεχνικές συγκόλλησης brazing και soldering. Ατέλειες και έλεγχος αυτών», προς το ΕΛ.Κ.Α. στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος 'BRASOLD', Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-199-I-05, Ιούνιος 2005.

3. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΣΑΡΑΦΟΓΛΟΥ, Χ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Προηγμένες Μέθοδοι Συγκόλλησης Υψηλής και Χαμηλής Θερμοκρασίας Κραμάτων Αργυροχρυσοχοΐας», Παραδοτέο Γ': «Μεθοδολογία βελτιστοποίησης συγκόλλησης brazing και soldering», προς το ΕΛ.Κ.Α. στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος 'BRASOLD', Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-200-I-05, Σεπτέμβριος 2005.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

1. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Β.Ι., ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Μελέτη Αστοχίας Πρυμναίου Μεσαίου Τονοδηγού του Ε/Γ-Ο/Γ ΑΙΟΛΟΣ ΕΞΙΠΡΕΣ II», Τεχνική Έκθεση προς Υπολιμεναρχείο Πάρου, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-124-F-02, Μάιος 2002.

2. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

"Material Study of Helical Springs of VHF Center-Fed Antenna Base (Type: ant 213)", Τεχνική Έκθεση προς ΙΝΤΡΑΚΟΜ Α.Ε., Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-146-F-03, Μάιος 2003.

3. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

Microstructural Study and Fractography of the Main Bearing CUP. TMX. 4N-0614", Τεχνική Έκθεση προς ELTRAK CAT S.A., Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-151-F-03, Ιούνιος 2003.

4. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Μελέτη Υλικού Στοιχείου Λέβητα STAR», Τεχνική Έκθεση προς Ε.Ν. ΚΑΖΗΣ Α.Β.Ε.Ε., Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-152-F-03, Ιούνιος 2003.

5. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

"Fractography and Microstucrural Study of Yacht 'Althea' Fractured Propeller", Τεχνική Έκθεση προς Γ. Γιουρούκο, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-164-F-03, Δεκέμβριος 2003.

6. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

"Damage Analysis of Internal Combustion Engine Exhaust Valve", Τεχνική Έκθεση προς KAPPA MARINE CONSULTANTS LTD, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-168-F-04, Ιανουάριος 2004.

7. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Μελέτη αστοχίας βαλβίδας εισαγωγής μηχανής Diesel εσωτερικής καύσης του Μ/Υ MIRENA», Τεχνική Έκθεση προς KAPPA MARINE CONSULTANTS LTD, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-177-F-04, Σεπτέμβριος 2004.

8. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Δ.Ι., ΧΙΟΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ.Κ.

«Μελέτη Αστοχίας Συρματόσχοινου Ανυψωτικής Μηχανής», Τεχνική Έκθεση προς Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Report No STL-198-F-05, Σεπτέμβριος 2005.

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

1. Πρόγραμμα ΠΑΒΕ (1999-2001), σε συνεργασία με την ΕΡΓΟΤΕΜ ΑΤΕΒΕ

«Επιφανειακή κατεργασία βαλβίδων και εδρών βαλβίδων νηζελομηχανών με συνδυασμό συμβατικών και μη συμβατικών τεχνικών»

2. Πρόγραμμα "Access to Large-Scale Facilities Activity of the Training & Mobility of Researchers" (1998 και 2000), σε συνεργασία με την "Plataforma Solar d' Almeria", στην Αλμερία της Ν. Ισπανίας.

«Επιφανειακές κατεργασίες κραμάτων με χρήση ηλιακής ενέργειας»

3. "Shipbuilding Low Cost, Versatile and Safe Welding by YAG - LASER Applications (SHIPYAG)"

«Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας προκειμένου για την εφαρμογή υβριδικής τεχνικής συγκόλλησης με χρήση τόξου-σύρματος ακολουθούμενη από δέσμη LASER με σκοπό την ελαχιστοποίηση των στρεβλώσεων παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης. Μοντελοποίηση - προσομοίωση της διαδικασίας με χρήση αριθμητικών μεθόδων και τη βοήθεια αντίστοιχων υποστηρικτικών πακέτων προγραμμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή»

4. Πρόγραμμα Π.Α.Β.Ε.Τ. 2000 (2001-2003)

«Διάσωση και ενίσχυση της αντοχής εξαρτημάτων μηχανών DIESEL με χρήση συμβατικών και νανοκρυσταλλικών Επικαλύψεων Θερμικού Ψεκασμού»

5. Πρόγραμμα διμερούς συνεργασίας με Γαλλία - ΠΛΑΤΩΝ 2001 (2001-2003):

«Δημιουργία επιστρωμάτων βιοϊατρικών εφαρμογών, με Προηγμένες Τεχνικές Ψεκασμού Πλάσματος»

6. Ερευνητικό πρόγραμμα με τη ΔΕΗ / ΔΠΝ (2002)

«Αξιολόγηση διαδικασιών παραγωγής βαλβίδων, ποιοτικός έλεγχος προϊόντος και αξιολόγηση παραγωγικών μονάδων Λεκανοπεδίου Αττικής»

7. Ερευνητικό πρόγραμμα με το Ελληνικό Κέντρο Αργυροχρυσοχόας - ΕΛΚΑ, (2003-2006)

«Ανάπτυξη εργαλείων προσομοίωσης χύτευσης ακριβείας»

8. Ερευνητικό πρόγραμμα με το Ελληνικό Κέντρο Αργυροχρυσοχοίας – ΕΛΚΑ, (2004-2007)
«Μελέτη συγκολλήσεων brazing και soldering»
9. Πρόγραμμα ΕΠΕΑΕΚ II «Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια» - ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ I (2004-2007)
«Μελέτη της διάβρωσης συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής και των επιπτώσεων της στην αξιοπιστία θαλάσσιων κατασκευών».
10. Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ. II (2002-2005) - «Αναμόρφωση Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.»
Δράση 6.1: «Εμπλουτισμός των υπαρχόντων μαθημάτων με τη χρήση της πληροφορικής» και Δράση 6.1.3: «Αναμόρφωση μαθήματος «Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων»:
11. Πρόγραμμα EQUAL – Χρηματοδότης Γ' ΚΠΣ – Υπ. Απασχόλησης (2005-2007)
«Ενσωμάτωση μηχανισμών και προγραμμάτων δια βίου μάθησης από τις ΜΜΕ – Πιστοποίηση εκπαιδευτικών πακέτων και αναγνώριση της αποκτηθείσας γνώσης στους τομείς των εφαρμογών της Πληροφορικής και των Τεχνικών Επαγγελμάτων (εκπ@ιδευτείτε)»
12. Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο: «Μελέτη της επίδρασης της συρρίκνωσης και του υλικού της πρώτης ύλης στην κατασκευή μητρών για την παραγωγή παραδοσιακών κεραμικών».
13. Ερευνητικό πρόγραμμα με τη ΔΕΗ / ΔΠΝ (2005)
«Μελέτη Αστοχίας Μηχανής Εσωτερικής Καύσης της Μονάδας DG3 4PC4-2B-V 23.4 MW της ΔΕΗ – Ρόδου» και αντικείμενο την ανάλυση ευρημάτων από την αστοχία της μονάδας DG3, θραυστογραφία και μικροδομή του υλικού.
14. Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο: «Μηχανική συμπεριφορά υλικών και απλών κατασκευών».
15. Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο: «Ολοκληρωμένο Πρόγραμμα για άνεργους και επαπειλούμενους άνεργους των βιομηχανικών κλάδων της ευρύτερης περιοχής του Πειραιά, μέσω της παροχής υπηρεσιών επαγγελματικής συμβουλευτικής, κατάρτισης/επανακατάρτισης με στόχο την αναβάθμιση των επαγγελματικών τους δεξιοτήτων» Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Εθνικό Αποθεματικό Απροβλέπτων 2007-2013» Άξονας προτεραιότητας 1, ΕΣΠΑ (κωδικός MIS 375331).

ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΟ ΕΡΓΟ – ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

-
- A.** Επικουρική συνδιδασκαλία Προπτυχιακών Μαθημάτων και εργαστηρίων Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών:
1. «Ναυπηγική Τεχνολογία και Εργαστήριο», 7^ο Εξαμήνου.
 2. «Κατεργασίες Υλικών με Συμβατικές Μηχανές», στα πλαίσια του Μαθήματος «Μηχανολογικό και Ναυπηγικό Σχέδιο II», 2^ο Εξαμήνου.
 3. «Συγκόλληση Τόξου με Επενδεδυμένο Ηλεκτρόδιο, Υγιεινή και Πρόληψη Ατυχημάτων», στα πλαίσια του Μαθήματος «Ναυπηγική Τεχνολογία και Εργαστήριο».

B. Συνεπίβλεψη φοιτητών (προπτυχιακών και μεταπτυχιακών) στην περάτωση των Διπλωματικών και Μεταπτυχιακών Εργασιών τους, σε θέματα που αφορούν τις συγκολλήσεις Ναυπηγικού Αλουμινίου

ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟΥΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ - ΕΠΙΤΡΟΠΕΣ

- ✓ Μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (2000)
- ✓ Μέλος του Ελληνικού Ινστιτούτου Συγκολλήσεων
- ✓ Μέλος της Ελληνικής Μεταλλουργικής Εταιρείας (2001)
- ✓ Τεχνική Επιτροπή ΕΛΟΤ/ΤΕ 70 “Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι Υλικών” (2007)
- ✓ (Εκπροσωπώντας τον Σύνδεσμο Ελλήνων Βιομηχάνων του οποίου είναι μέλος Ναυπηγεία Ελευσίνας. Ο ορισμός μου έγινε έπειτα από εισήγηση της Διεύθυνσης Παραγωγής και αποδοχής της από τον Αντιπρόεδρο της Εταιρείας κ. Γ. Ταβουλάρη)
- ✓ Εισηγητής προγραμμάτων κατάρτισης ΛΑΕΚ εγγεγραμμένος στο μητρώο των εισηγητών του ΟΑΕΔ με Αριθμό Μητρώου Εισηγητή από τον ΟΑΕΔ

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

- ✓ Αγγλικά
- ✓ Γαλλικά

ΑΛΛΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ - ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

- ✓ Αθλητισμός:

Κατά το παρελθόν, υπήρξα αθλητής του ερασιτεχνικού συλλόγου καλαθοσφαίρισης «ΝΙΚΗΦΟΡΟΣ» όπως και του ερασιτεχνικού κολυμβητικού συλλόγου «ΑΡΤΕΜΙΣ» με τον οποίο και διακρίθηκα, σε πολλά τοπικά αλλά και Πανελλήνια πρωταθλήματα, αγωνιζόμενος στα 100 και 200 μέτρα εμπρόσθιας κολύμβησης. Σήμερα, εξασκώμαι και στα δύο αυτά αθλήματα σε ψυχαγωγικό επίπεδο.

