

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣ  
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ**

υπό

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΜΑΛΛΙΑΡΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου και Αεροναυπηγού Μηχανικού Π.Π., 2001

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6724/1  
Ημερ. Εισ.: 10-11-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
669.967 22  
ΜΑΛ

© 2008 Κωνσταντίνος Μαλλιάρος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Σπύρος Καραμάνος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τέταρτος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου καθηγητή του Π.Θ. Δρ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Δρ. Νικόλαο Αράβα, Δρ. Σπύρο Καραμάνο, Δρ. Αλέξιο Κερμανίδη και Δρ. Νικόλαο Ανδρίτσο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές τους στα θέματα των επιστημονικών τους πεδίων. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη Δρ. Άννα Ζερβάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας με τις συμβουλές της και το υλικό που μου παραχώρησε από τη διδακτορική της διατριβή. Τη Δρ. Ελένη Καμούστη για την βοήθειά της στον εξοπλισμό του εργαστηρίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ΣΗΛΜΑΝ Α.Ε. για τον εξοπλισμό συγκολλήσεων που μου παραχώρησε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω του συγκολλητές της εταιρίας ΣΗΛΜΑΝ Α.Ε. κκ Χρήστο Λιβογιάννη και Δήμο Γκιντσιδίδη για την βοήθειά τους στη συγκόλληση των δοκιμίων.

Τους φίλους και συναδέλφους μου από την ΣΗΛΜΑΝ Α.Ε., Δρ. Γεώργιο Στρατάκη για την παρότρυνση και την βοήθειά του να κάνω τις Μεταπτυχιακές μου Σπουδές, Χρήστο Κοζανίτη και Μαρία Κεμεντζη για την υποστήριξη και την κατανόησή τους. Όλους τους φίλους μου που με «έχασαν» κατά τη διάρκεια των Μεταπτυχιακών μου Σπουδών.

Τέλος, αλλά με ιδιαίτερη για μένα σημασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Ελένη, η συμπαράσταση της οποίας ήταν πολύτιμη για μένα, καθώς και τη φίλη μου Λίνα Κουσιά που είχε την «ατυχία» να γνωριστούμε τις πρώτες βδομάδες των Μεταπτυχιακών Σπουδών.

Την Εργασία αυτή την αφιερώνω στον πατέρα μου Γιώργο.

Κωνσταντίνος Μαλλιάρος

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΘΕΖ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΛΛΙΑΡΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής  
Μεταλλουργίας, Ανάπτυξης Κραμάτων και Σύγχρονων  
Κατεργασιών

## Περίληψη

Η ανάγκη για μείωση του κόστους και αύξηση της παραγωγικότητας στην αεροπορική βιομηχανία, οδηγεί στην είσοδο νέων παραγωγικών μεθόδων, όπως οι συγκολλήσεις.

Μέχρι σήμερα οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ανοχής στη βλάβη των συγκολλήσεων, δεν λαμβάνουν υπόψη τις μεταβολές της μικροδομής στη ΘΕΖ. Οι μεταβολές αυτές συνοδεύονται με υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Σε αυτή την εργασία έγινε μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της μεταβολής μικροσκληρότητας στη ΘΕΖ. Έγινε μέτρηση του προφίλ μικροσκληρότητας συγκολλημένου ελάσματος αλουμινίου 6013-T6, πάχους 1.6mm, με την μέθοδο TIG. Στη συνέχεια, με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες, σε δοκίμια ίδιου κράματος αναπαρήχθησαν οι τιμές μικροσκληρότητας της ΘΕΖ. Οι συνθήκες των ισόθερμων θερμικών κατεργασιών επιλέχθηκαν με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος Mathematica, με το οποίο υπολογίστηκε η θερμοκρασία των ελασμάτων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Οι συνδυασμοί θερμοκρασίας – χρόνου θερμικής κατεργασίας αντιστοιχήθηκαν με τις μετρούμενες τιμές μικροσκληρότητας σε συγκεκριμένα σημεία της ΘΕΖ.

Το βασικότερο συμπέρασμα της παρούσας διατριβής είναι ότι με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες είναι δυνατόν να γίνει προσομοίωση της μεταβολής της μικροδομής στη ΘΕΖ. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι είναι εφικτό να κατασκευαστούν δοκίμια εύρεσης ρυθμού εξέλιξης ρωγμής κόπωσης (fatigue crack growth) για να μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά της ανοχής σε βλάβη (Damage Tolerance behavior) συγκολλητών κατασκευών.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Κράματα Αλουμινίου</b>	<b>6</b>
2.1.1 Συμβολισμός Κραμάτων Αλουμινίου	6
2.1.2 Συμβολισμός Κατάστασης (Temper Designations)	6
2.1.3 Χαρακτηριστικά Επεξεργασίας (Fabrication Characteristics)	7
<b>2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου</b>	<b>8</b>
2.2.1 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	9
2.2.2 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη Συγκόλλησης Κραμάτων Αλουμινίου (Heat Affected Zone)	11
<b>2.3 Επίδραση Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ στην Ανοχή στη Βλάβη</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Σκληρότητα – Μέτρηση Σκληρότητας</b>	<b>17</b>
2.4.1 Γενικά	17
2.4.2 Δοκιμή Σκληρότητας Κατά Vickers	18
<b>2.5 Κράμα Αλουμινίου 6013-T6</b>	<b>20</b>
<b>2.6 Μετάδοση Θερμότητας στις Συγκολλήσεις</b>	<b>21</b>
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Συγκόλληση Δοκιμίων</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) με τη Χρήση του Προγράμματος Mathematica</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Ισόθερμες Θερμικές Κατεργασίες</b>	<b>37</b>
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>48</b>
<b>5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ</b>	<b>49</b>



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 – Χημική Σύνθεση Κράματος Αλουμινίου 6013.....	20
Πίνακας 2.2 – Μηχανικές Ιδιότητες Κράματος Αλουμινίου 6013 σε Temper T6.....	20
Πίνακας 3.1 – Χαρακτηριστικά Συγκόλλησης.....	28
Πίνακας 3.2 – Συνθήκες Συγκόλλησης.....	34
Πίνακας 3.3 – Φυσικές Ιδιότητες Κράματος Αλουμινίου 6013-T6.....	34
Πίνακας 3.4 – Συνθήκες Κοπής.....	37
Πίνακας 3.5 – Πρόγραμμα Θερμικών Κατεργασιών.....	38
Πίνακας 3.6 – Πρόγραμμα Θερμικών Κατεργασιών Γήρανσης.....	43

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 – Συγκολλήσεις Έναντι Ηλώσεων.....	1
Εικόνα 1.2 – Εφαρμογή συγκολλήσεων laser σε τμήματα της ατράκτου σύγχρονων επιβατικών αεροσκαφών (πηγή Airbus Deutschland GMBH).....	2
Εικόνα 1.3 – Απλοποιημένη σχηματική παφάστιαση συγκόλλησης συμβολής σε κράμα Al : Η επίδραση της μεταβολής της μικροδομής στη συγκόλληση (ΜΣ, ΖΜΓ, ΘΕΖ) καθώς και των παραμενοουσών τάσεων.....	4
Εικόνα 2-1 – Τυπικό Setup για Συγκόλληση με την Μέθοδο TIG.....	10
Εικόνα 2.2 – Σχηματική Παφάστιαση Συγκόλλησης.....	10
Εικόνα 2.3 – Σχηματική Απεικόνιση ΘΕΖ Συγκόλλησης Αλουμινίου.....	11
Εικόνα 2.4 – Προφίλ Σκληρότητας ΘΕΖ.....	12
Εικόνα 2.5 – Τμήμα του Διαγράμματος Φάσεων του Συστήματος Al-Cu με τις Καμπύλες Solvus των Διαφόρων Φάσεων.....	13
Εικόνα 2.6 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης.....	15
Εικόνα 2.7 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ Κοντά σε Αυτή.....	15
Εικόνα 2.8 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ Κοντά σε Αυτή.....	16
Εικόνα 2.9 – Σκληρομέτρηση κατά Vickers.....	18
Εικόνα 2.10 – Σκληρόμετρο Δοκιμής κατά Vickers.....	18
Εικόνα 2.11 – Παραμορφωμένη Περίμετρος Αποτυπώματος Σκληρομέτρησης.....	19
Εικόνα 2.12 – Ρωγμή Κατά Μήκος της Συγκόλλησης Λόγω Χρήσης Βέργας Σειράς 5XXX.....	21
Εικόνα 2.13 – Γεωμετρικό Μοντέλο για την Επίλυση του Προβλήματος Μετάδοσης Θερμότητας σε Συγκολλήσεις.....	23
Εικόνα 2.14 – Φάσεις κατά την Πραγματοποίηση της Συγκόλλησης.....	25
Εικόνα 3.1 – MasterTig AC DC 3500W Panel AC DC Pulse.....	28
Εικόνα 3.2 – Δοκίμιο Συγκόλλησης.....	29
Εικόνα 3.3 – Δοκίμιο Θερμικών κατεργασιών.....	37

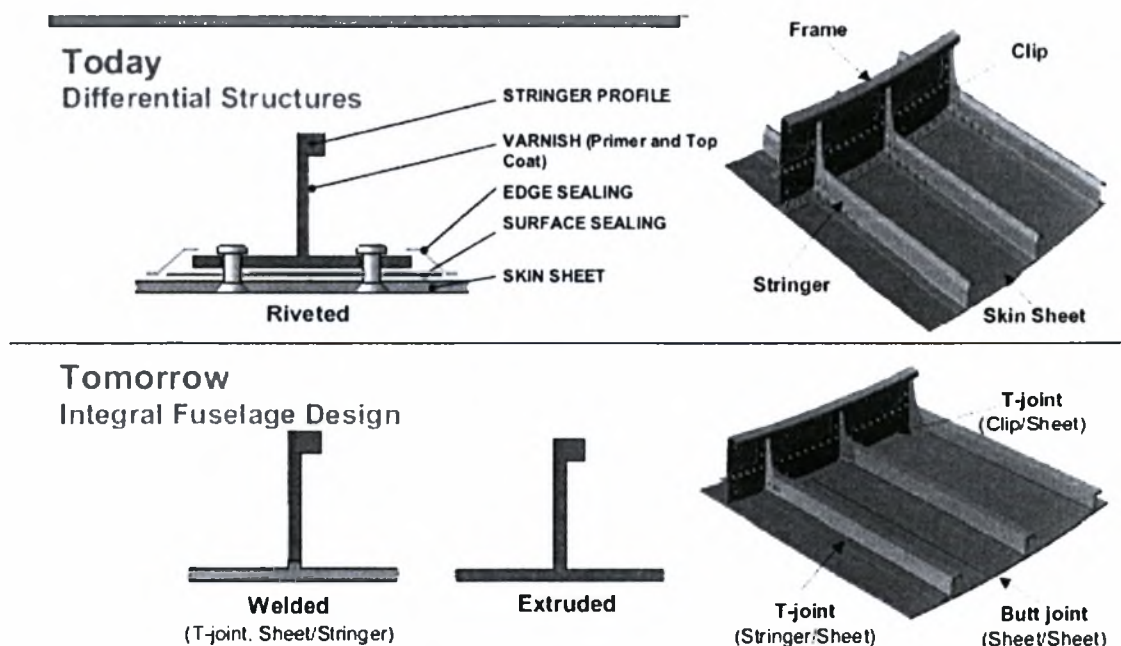
# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<i>Διάγραμμα 3.1 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο1</i> .....	30
<i>Διάγραμμα 3.2 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο2</i> .....	31
<i>Διάγραμμα 3.3 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο3</i> .....	31
<i>Διάγραμμα 3.4 - Συγκεντρωτικό Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίων</i> .....	32
<i>Διάγραμμα 3.5 - Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) στο Σημείο <math>x=0, z=0,75</math></i> .....	35
<i>Διάγραμμα 3.6 - Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) στο Σημείο <math>x=0, z=0,75</math> (Μεγέθυνση)</i> .....	35
<i>Διάγραμμα 3.7 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 190°C</i> .....	39
<i>Διάγραμμα 3.8 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 250°C</i> .....	39
<i>Διάγραμμα 3.9 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 300°C</i> .....	40
<i>Διάγραμμα 3.10 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 400°C</i> .....	40
<i>Διάγραμμα 3.11 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 450°C</i> .....	41
<i>Διάγραμμα 3.2 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 500°C</i> .....	41
<i>Διάγραμμα 3.13 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος 6013-T6 με το χρόνο θερμικής κατεργασίας</i> ..	43
<i>Διάγραμμα 3.14 - Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 190°C</i> .....	44
<i>Διάγραμμα 3.15 - Προσομοίωση Μικροσκληρότητας με Ισόθερμες Θερμικές Κατεργασίες</i> .....	47

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κράματα αλουμινίου είναι ιδιαίτερα σημαντικά τεχνολογικά υλικά, κατάλληλα για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική βιομηχανία) λόγω του εξαιρετικού συνδυασμού ιδιοτήτων μηχανικής αντοχής, αντοχής σε οξειδωση-διάβρωση και χαμηλής πυκνότητας που διαθέτουν. Διατίθενται στο εμπόριο ως ελάσματα ή χυτά αντικείμενα, καθώς και με μορφή προϊόντων εξέλασης και σφυρηλασίας. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και αποτελούν βασική κατασκευαστική επιλογή για μεγάλο εύρος εφαρμογών που περιλαμβάνουν από ταχύπλοα οχηματαγωγά τύπου catamaran έως υλικά συσκευασίας για τη βιομηχανία τροφίμων. Είναι φυσικό η πλήρης αξιοποίηση τους να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα ασφαλούς και πλήρως ελεγχόμενης συγκόλλησής τους για παραγωγή σύνθετων κατασκευών.

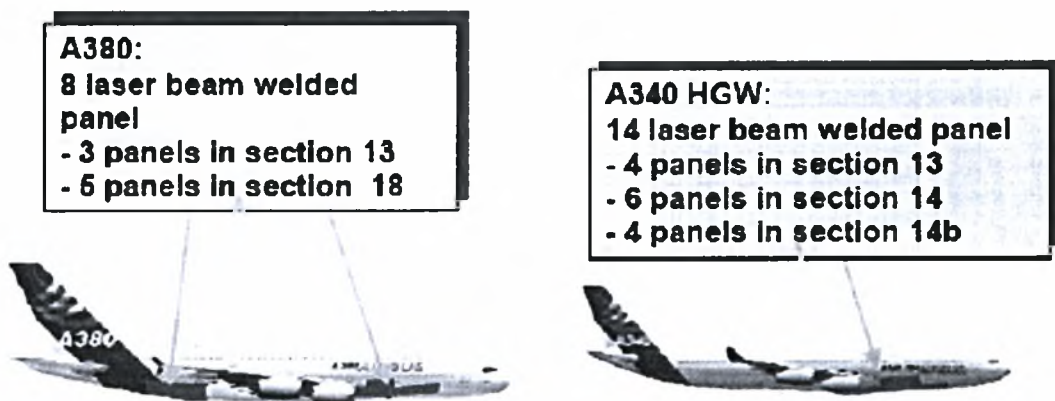
Η εισαγωγή συγκολλητών κατασκευών των κραμάτων αυτών στους διάφορους κλάδους της κατασκευαστικής βιομηχανίας (αεροπορική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία, βιομηχανία ηλεκτρονικών συσκευών) συνεπάγεται προφανή πλεονεκτήματα.



Εικόνα 1.1 – Συγκολλήσεις Έναντι Ηλώσεων

Στην αεροπορική βιομηχανία η συγκόλληση ευρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος ως εναλλακτική λύση στις συνδέσεις με ηλώσεις και σε κολλήσεις (adhesive bonding) που εφαρμόζονται τώρα (Εικόνα 1.1 ). Η βελτίωση στην ποιότητα συγκόλλησης και στις ιδιότητες της, η εξοικονόμηση πόρων και βάρους είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της απλοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας και της μείωσης των επιπρόσθετων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τις ενώσεις όπως οι ήλοι και οι κόλλες. Τα πλεονεκτήματα από την υιοθέτηση της συγκόλλησης με laser αφορούν την παραγωγή συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας, τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους που φτάνει το 20%, την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας ωφέλιμου φορτίου, καθώς και τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Η υψηλή ταχύτητα της συγκόλλησης (8-10 m/min), συγκρινόμενη με τη μέθοδο των ηλώσεων καθιστά τη διαδικασία 40 φορές ταχύτερη.

Οι συγκολλήσεις με laser (LBW) εφαρμόζονται ήδη από την Ευρωπαϊκή αεροπορική βιομηχανία για την κατασκευή συγκεκριμένων τμημάτων της ατράκτου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το νέο αεροσκάφος A380 καθώς και το A340 (Εικόνα 1.2) .



Εικόνα 1.2 – Εφαρμογή συγκολλήσεων laser σε τμήματα της ατράκτου σύγχρονων επιβατικών αεροσκαφών ( πηγή Airbus Deutschland GMBH)

Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές - σειρές 2xxx, και 6xxx-, ανήκουν στην κατηγορία των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων και οφείλουν την αντοχή τους στη θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυτής αναπτύσσεται στη μήτρα του

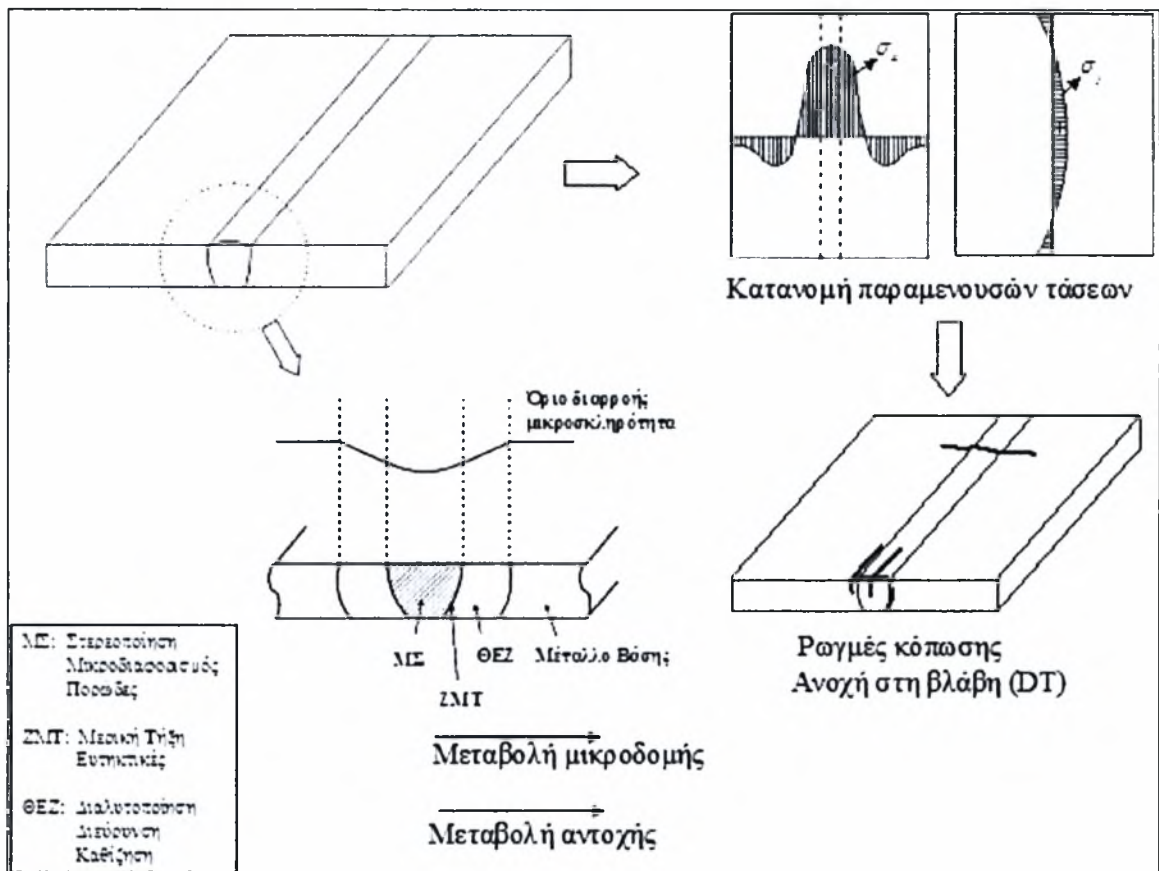
κράματος, μέσω μίας συγκεκριμένης σειράς καθίζησης (precipitation sequence) μία λεπτομερής διασπορά σωματιδίων ισχυροποίησης, που στην περίπτωση του κράματος 6013 είναι οι φάσεις  $\beta$ - $Mg_2Si$  και  $\theta$ - $Al_2Cu$ . Οι φάσεις αυτές επικρατούν στο τέλος της σειράς καθίζησης σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Μετά την κατεργασία της τεχνητής γήρανσης (T6) το κράμα χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη μικροδομή και μικροσκληρότητα. Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης, επιφέρει δραστική μεταβολή των χαρακτηριστικών της μικροδομής και κατά συνέπεια της σκληρότητας της ΘΕΖ και της αντοχής της συγκόλλησης. Οι διεργασίες οι οποίες επιφέρουν μεταβολή στα χαρακτηριστικά της μικροδομής είναι η διαλυτοποίηση (dissolution), η διεύρυνση (coarsening) η οποία αναφέρεται και ως υπεργήρανση (overaging) καθώς και η καθίζηση (precipitation) ή επανακαθίζηση (reprecipitation) που αφορά τον σχηματισμό της φάσης ισχυροποίησης κατά τον θερμικό κύκλο (π.χ. κατά την ψύξη της ΘΕΖ μετά από διαλυτοποίηση).

Οι αεροπορικές κατασκευές που έχουν γίνει με τη χρήση LBW, πρέπει να πληρούν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις αντοχής στη βλάβη. Όλες οι τεχνολογικές καινοτομίες που εφαρμόζονται για την παραγωγή νέων ελαφρών και οικονομικά αποδοτικών κατασκευών με συγκολλησίμα υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου, πρέπει να συνοδεύονται εξελιγμένες μεθόδους ανάλυσης αντοχής στη βλάβη. Είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων:

- Κατά τη συγκόλληση όλων των αεροπορικών κραμάτων, στην περιοχή της συγκόλλησης δημιουργείται μεγάλη διακύμανση στην αντοχή του κράματος. Η διακύμανση αυτή προέρχεται από την μεταβολή της μικροδομής στην ΘΕΖ λόγω της θερμικής καταπόνησης από την συγκόλληση.
- Επιπρόσθετα η διάδοση ρωγμών σε περιοχή με διαρκώς μεταβαλλόμενη μικροδομή μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά. Πρέπει να μελετηθούν οι μηχανισμοί ανάπτυξης, το μέγεθος και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων για κάθε περιοχή της ΘΕΖ με διαφορετική μικροδομή / μικροσκληρότητα.



- Οι συγκολλήσεις είναι δυνατόν να περιέχουν ατέλειες σε διάφορα μεγέθη και σημεία. Πόροι, εγκλείσματα ή άλλες ατέλειες επηρεάζουν τη ζωή της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, ρωγμές κόπωσης είναι πιθανό να ξεκινήσουν από την επιφάνεια της συγκόλλησης. Οι μηχανισμοί ανάπτυξης και διάδοσης επιφανειακών ρωγμών είναι απαραίτητο να μελετηθούν διεξοδικά (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 – Απλοποιημένη σχηματική παράσταση συγκόλλησης συμβολής σε κράμα Al : Η επίδραση της μεταβολής της μικροδομής στη συγκόλληση (ΜΣ, ΖΜΤ, ΘΕΖ) καθώς και των παραμεινουσών τάσεων.

Η περιοχή της ΘΕΖ στην συγκόλληση με laser έχει ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις (~ 2 - 5 mm) με συνέπεια να μην είναι τεχνικά εφικτό να κατασκευαστούν δοκίμια εύρεσης ρυθμού εξέλιξης ρωγμής κόπωσης (fatigue crack growth) για να μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά της ανοχής σε βλάβη (Damage Tolerance behavior) . Επιλέχθηκε λοιπόν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι συγκολλήσεις να πραγματοποιηθούν με τη μέθοδο TIG προκειμένου να επιτευχθεί μια τεχνητή μεγέθυνση των σημείων της ΘΕΖ.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση της μεταβολής της μικροσκληρότητας στη ΘΕΖ με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες προκειμένου σε επόμενο στάδιο να κατασκευαστούν δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά περιοχών της ΘΕΖ με διαφορετική μικροδομή/μικροσκληρότητα σε διάφορες μηχανικές καταπονήσεις.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Κράματα Αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου συμβολίζονται με ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων που έχει αναπτυχθεί από την Aluminum Association. Ο συμβολισμός αυτός είναι ο πιο διαδεδομένος στις Η.Π.Α. και έχει επικρατήσει και στην Ευρώπη. Συνοπτικά [2]:

- 1XXX: Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99,0% ή περισσότερο
- 2XXX: Κράματα αλουμινίου με κύριο κραματικό στοιχείο τον Χαλκό (Cu)
- 3XXX: Κράματα αλουμινίου με κύριο κραματικό στοιχείο το Μαγγάνιο (Mn)
- 4XXX: Κράματα αλουμινίου με κύριο κραματικό στοιχείο το Πυρίτιο (Si)
- 5XXX: Κράματα αλουμινίου με κύριο κραματικό στοιχείο το Μαγνήσιο (Mg)
- 6XXX: Κράματα αλουμινίου με κύρια κραματικά στοιχεία το Μαγνήσιο (Mg) και το Πυρίτιο (Si)
- 7XXX: Κράματα αλουμινίου με κύριο κραματικό στοιχείο τον Ψευδάργυρο (Zn). Στοιχεία όπως ο Χαλκός (Cu), Μαγνήσιο (Mg), Χρώμιο (Cr) και Ζιρκόνιο (Zr) βρίσκονται σε υπολογίσιμες ποσότητες.
- 8XXX: Κράματα αλουμινίου τα οποία περιέχουν Κασσίτερο (Sn) και ενώσεις Λιθίου (Li).
- 9XXX: Έχει δεσμευτεί για μελλοντικά κράματα.

Το σύστημα συμβολισμού κατάστασης Temper Designation System βασίζεται στην ακολουθία μηχανικών ή/και θερμικών κατεργασιών που έχει υποστεί το κράμα αλουμινίου.



Οι κύριες κατηγορίες συμβολίζονται με ένα λατινικό κεφαλαίο γράμμα, στη συνέχεια του οποίου ένα ή περισσότερα νούμερα προστίθενται, τα οποία προσδιορίζουν τις υποκατηγορίες.

#### Κύριες κατηγορίες κατάστασης (Temper Designation)

- F: Όπως κατασκευάστηκε (As Fabricated). Δεν έχει υποστεί καμία θερμική ή μηχανική κατεργασία.
- O: Annealed. Έχει υποστεί θερμική κατεργασία για μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων στο ελάχιστο.
- H: Strain Hardened. Χαρακτηρίζει προϊόντα που έχουν ισχυροποιηθεί με Strain Hardening, με ή χωρίς επιπλέον θερμική κατεργασία.
- W: Solution Heat Treated. Είναι μια ασταθής κατάσταση (temper) η οποία είναι εφαρμόσιμη μόνο σε κράματα που η αντοχή (strength) τους αλλάζει σε θερμοκρασία δωματίου μέσα σε διάστημα μηνών ή ακόμα και ετών μετά την διαλυτοποίηση (Solution Heat Treatment).
- T: Θερμικά Κατεργασμένα (Heat Treated). Χαρακτηρίζει προϊόντα που έχουν ισχυροποιηθεί με θερμική κατεργασία, με ή χωρίς επιπλέον Strain Hardening.

Είναι σημαντικό να δοθεί μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών επεξεργασίας των κραμάτων αλουμινίου.

- Κατεργασιμότητα (Machinability): Η κατεργασιμότητα των περισσοτέρων κραμάτων αλουμινίου είναι πάρα πολύ καλή (excellent). Εξαρτάται από το κράμα και από το temper. Ειδικά εργαλεία και τεχνικές χρειάζονται σε αρκετές περιπτώσεις για την κατεργασία.
- Chemical Milling: Πρόκειται για αφαίρεση υλικού με χημική προσβολή από αλκαλικό ή όξινο διάλυμα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη μείωση του πάχους σύνθετων κατασκευών. Χρησιμοποιείται ευρέως σε σύνθετα αεροπορικά εξαρτήματα για να επιτευχθεί η μέγιστη αναλογία αντοχής/βάρους.

- Διαμορφωσιμότητα: Η διαμορφωσιμότητα είναι από τα πιο σπουδαία χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου. Η επιλογή του temper είναι πολύ σημαντική. Σε ορισμένες περιπτώσεις annealed temper είναι απαραίτητη, όπως για παράδειγμα σε διεργασίες deep drawing.
- Σφυρηλατότητα: Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να σφυρηλατηθούν σε μια πληθώρα σχημάτων. Σε γενικές γραμμές η σφυρηλατότητά τους είναι μικρότερη συγκρινόμενη με αυτή των ανθρακούχων χαλύβων (carbon steels) και πολλών άλλων χαλύβων. Σε σύγκριση όμως με τα κράματα νικελίου/κοβαλτίου, είναι πιο εύκολα σφυρηλατήσιμα.
- Συνδεσιμότητα: Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να συνδεθούν με ένα μεγάλο εύρος μεθόδων, όπως resistance welding, brazing, soldering, μηχανικές συνδέσεις όπως riveting και bolting.

## 2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου είναι:

- Aluminum Oxide Coating
- Θερμική Αγωγιμότητα
- Συντελεστής Θερμικής Διαστολής
- Χαρακτηριστικά Τήξης (Melting Characteristics)
- Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Οξειδία του αλουμινίου δημιουργούνται στην επιφάνεια του αλουμινίου αμέσως με την επαφή του με τον αέρα. Για την συγκόλληση με μεθόδους που απαιτούν τήξη, το στρώμα οξειδίου πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανικούς ή χημικούς τρόπους. Σε αντίθετη περίπτωση, ψήγματα οξειδίου θα εγκλειστούν στην συγκόλληση με αποτέλεσμα την μείωση της ολκιμότητας (ductility) και πιθανή εμφάνιση ρωγμών στη συγκόλληση.

Η θερμική αγωγιμότητα είναι η φυσική ιδιότητα η οποία επηρεάζει περισσότερο απ' όλες τις ιδιότητες του αλουμινίου την συγκολλησιμότητά του. Η θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου είναι περίπου η μισή απ' αυτή του χαλκού και τέσσερις φορές πιο μεγάλη απ' αυτή των συγκολλησιμων χαλύβων

(low carbon steels). Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα πρέπει να δοθεί τέσσερις φορές πιο γρήγορα στο αλουμίνιο απ' ό τι στο χάλυβα, ώστε να αυξηθεί τοπικά η θερμοκρασία κατά το ίδιο ποσό. Ωστόσο, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου, βοηθάει στη στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης και βοηθάει στην εξέλιξη της συγκόλλησης.

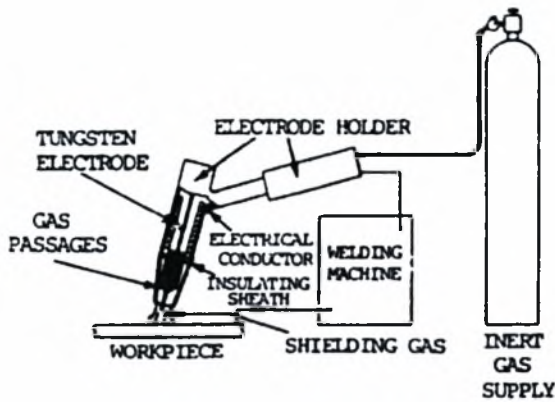
Ο συντελεστής θερμικής διαστολής των κραμάτων αλουμινίου είναι ο διπλάσιος από τον αντίστοιχο του χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στο διάκενο των συγκολλημένων τεμαχίων. Ο συνδυασμός του υψηλού συντελεστή θερμικής διαστολής και υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, συχνά οδηγεί σε παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ιδιαίτερα όταν υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης δεν είναι εφικτές.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου με μεθόδους τήξης, σε αντίθεση με την resistance welding μέθοδο. Η θερμοκρασία που απαιτείται για να γίνει η συγκόλληση, παράγεται από την ροή ρεύματος μέσα από το υλικό. Το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη ηλεκτρικά αγωγιμότητα από το χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται πιο μεγάλη ποσότητα (amount) ρεύματος για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας θερμότητας.

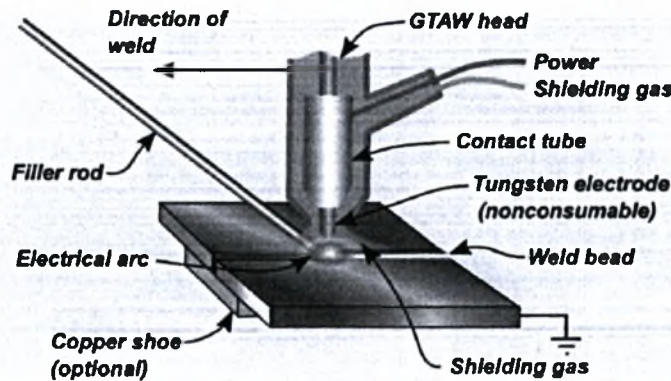
### 2.2.1 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Η συγκόλληση με την μέθοδο TIG θεωρείται η πιο δύσκολη από όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Επειδή ο συγκολλητής πρέπει να διατηρεί πολύ μικρό μήκος ηλεκτρικού τόξου συγκόλλησης, πρέπει και η τεχνική του και η εκπαίδευσή του να είναι άρτια. Σε αντίθεση με πολλές άλλες μεθόδους συγκόλλησης, η TIG συνήθως απαιτεί τη χρήση και των δύο χεριών του συγκολλητή. Στις περισσότερες των εφαρμογών, απαιτείται από τον ίδιο τον συγκολλητή πλήρωση με υλικό συγκόλλησης (filler material), ενώ ταυτόχρονα γίνεται χειρισμός και της τσιμπίδας συγκόλλησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις,

κυρίως σε λεπτά ελάσματα, δεν είναι απαραίτητη η παρουσία υλικού συγκόλλησης (filler material).



Εικόνα 2-1 – Τυπικό Setup για Συγκόλληση με την Μέθοδο TIG



Εικόνα 2.2 – Σχηματική Παράσταση Συγκόλλησης

Η συγκόλληση με την Μέθοδο TIG χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία, αλλά δεν περιορίζεται σε αυτήν. Πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούν την μέθοδο αυτή για την συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, κυρίως μη σιδηρούχων. Είναι ευρέως διαδεδομένη στην κατασκευή διαστημικών οχημάτων, καθώς στην συγκόλληση σωλήνων μικρού πάχους.

## 2.2.2 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη Συγκόλλησης Κραμάτων Αλουμινίου (Heat Affected Zone)

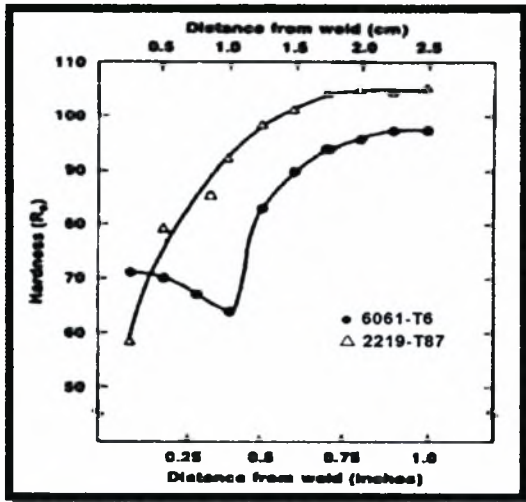
Κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων δημιουργείται μια Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) στην περιοχή γύρω από την λίμνη συγκόλλησης. Αποτέλεσμα της ζώνης αυτής είναι μια μείωση των ιδιοτήτων του υλικού συγκόλλησης. Η μείωση αυτή προκαλείται από τους μετασχηματισμούς της μικροδομής, που πραγματοποιούνται λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών στην περιοχή αυτή. Στα θερμικά ισχυροποιήσιμα κράματα αλουμινίου, η ΘΕΖ χαρακτηρίζεται από διαλυτοποίηση ή ανάπτυξη των φάσεων ισχυροποίησης. Στη σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XXX, η ΘΕΖ χαρακτηρίζεται από διαλυτοποίηση, ενώ ο πρωτεύων μετασχηματισμός στη σειρά κραμάτων 6XXX είναι η ανάπτυξη των φάσεων ισχυροποίησης. Παρόλο που η φύση των δύο αυτών ΘΕΖ είναι διαφορετική, είναι και οι δύο αποτέλεσμα της τήξης και θερμικά εξαρτώμενες. Μια κοινή μέθοδος για τον καθορισμό του εύρους της ΘΕΖ είναι η μέτρηση της σκληρότητας (ή μικροσκληρότητας) κατά μήκος της ζώνης αυτής. Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της ΘΕΖ.



Εικόνα 2.3 – Σχηματική Απεικόνιση ΘΕΖ Συγκόλλησης Αλουμινίου

Δεξιά και αριστερά από την συγκόλληση (περιοχή I) παρουσιάζεται σχηματικά η ΘΕΖ, ενώ πέρα αυτών των περιοχών παρουσιάζεται το μέταλλο βάσης που δεν έχει επηρεαστεί θερμικά από την συγκόλληση.

Ένα τυπικό προφίλ σκληρότητας συγκόλλησης αλουμινίου με την μέθοδο Gas Tungsten Arc Welding (GTAW ή TIG), δυο κοινών θερμικά κατεργάσιμων (heat treatable) κραμάτων 2219-T87 και 6061-T6 φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.4):



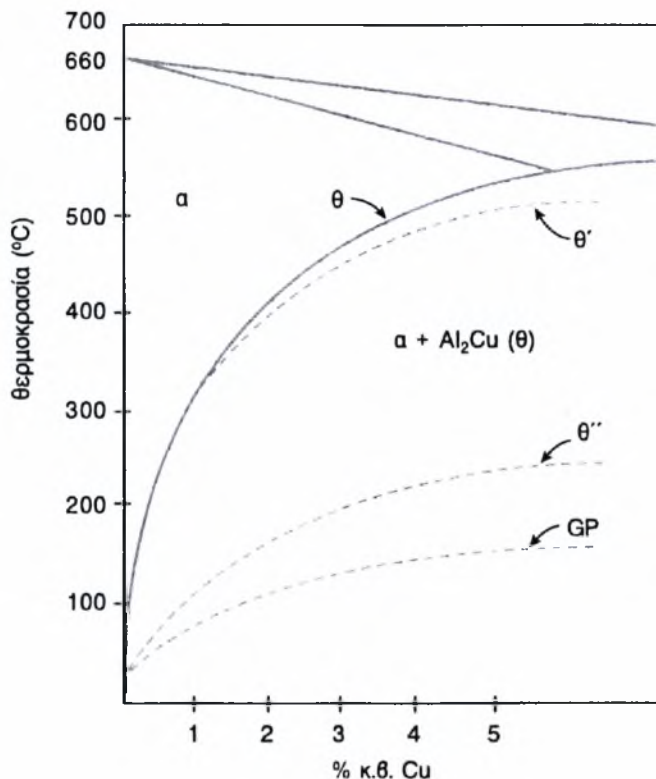
Εικόνα 2.4 – Προφίλ Σκληρότητας ΘΕΖ

Το προφίλ σκληρότητας του κράματος 2219-T87 φανερώνει διαλυτοποίηση (dissolution) των φάσεων. Η ισχυροποίηση αυτών των κραμάτων πραγματοποιείται με καθίζηση (precipitation hardening). Πρόκειται για ένα διαχυτικό μετασχηματισμό φάσεων που πραγματοποιείται με πυρήνωση και ανάπτυξη. Η θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται για την ισχυροποίηση με καθίζηση αποτελείται από τρία βήματα:

- Θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus (540 °C) για διάλυση της φάσης θ και τον σχηματισμό ομογενούς στερεού διαλύματος Al-Cu (φάση α). η κατεργασία αυτή ονομάζεται διαλυτοποίηση.
- Απότομη ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου. Λόγω της απουσίας διαχύσεως, το στερεό διάλυμα της φάσης α παραμένει ως έχει με τη διαφορά ότι καθίσταται υπέρκορο στη θερμοκρασία δωματίου.
- Θέρμανση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (100-200 °C). Προκαλείται καθίζηση της φάσης θ. Η φάση ισορροπίας θ δεν σχηματίζεται αμέσως. Προηγείται ο σχηματισμός μεταβατικών φάσεων, οι οποίες είναι μετασταθείς. Ανάλογα με την θερμοκρασία που πραγματοποιείται η κατεργασία αυτή, εμφανίζονται ή όχι οι ενδιάμεσες μετασταθείς φάσεις. Η κατεργασία αυτή ονομάζεται γήρανση.

Οι καμπύλες solvus αυτών των φάσεων απεικονίζονται στην Εικόνα 2.5.





Εικόνα 2.5 – Τμήμα του Διαγράμματος Φάσεων του Συστήματος Al-Cu με τις Καμπύλες Solvus των Διαφόρων Φάσεων

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, όταν οι θερμοκρασία στην ΘΕΖ ξεπερνάει κάποια από τις solvus, οι αντίστοιχες φάσεις διαλύονται. Σε περιοχές κοντά στην λίμνη συγκόλλησης παρατηρούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες και πραγματοποιείται πιο μεγάλη διάλυση φάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή μείωση της αντοχής/σκληρότητας στην ΘΕΖ των κραμάτων Al-Cu.

Το προφίλ σκληρότητας της ΘΕΖ του κράματος 6061-T6 είναι αντιπροσωπευτικό της σειράς 6XXX και είναι αποτέλεσμα μια ακολουθίας μετασχηματισμού φάσεων. Η ακολουθία αυτή αποτελείται από τον σχηματισμό μετασταθών φάσεων, με τη βασική φάση ισχυροποίησης να εμφανίζεται νωρίς στην ακολουθία με την μορφή ζωνών GP. Το ελάχιστο στην τιμή της σκληρότητας που παρατηρείται για το κράμα 6061-T6 στην Εικόνα 2.4, αντιπροσωπεύει περιοχές της ΘΕΖ που η θερμοκρασία τους κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης φτάνει ανάμεσα στους 290 και 425 °C. Το ίδιο ελάχιστο αποκαλείται συχνά και ως η περιοχή υπεργήρανσης (over-aged zone). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, που αντιστοιχούν σε περιοχές πιο κοντά στην περιοχή συγκόλλησης έχουμε

διαλυτοποίηση (σχηματισμό στερεού διαλύματος) και μετά την ψύξη σχηματισμό φάσεων ισχυροποίησης. Αυτό συνεισφέρει (εξηγεί) την μικρή αύξηση στις σκληρότητας που παρουσιάζεται κοντά στην περιοχή συγκόλλησης στα κράματα της σειράς 6XXX.

## 2.3 Επίδραση Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ στην Ανοχή στη Βλάβη

Μέχρι σήμερα είναι περιορισμένες οι προσπάθειες που έχουν γίνει για να μελετηθεί το πώς επηρεάζει η μικροδομή και η μεταβολή της στην περιοχή συγκόλλησης, στην ανάπτυξη παραμένουσων τάσεων καθώς στην ανοχή στη βλάβη των διάφορων συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου. Συνήθως όλοι αυτοί οι παράγοντες αγνοούνται και η περιοχή συγκόλλησης θεωρείται ότι είναι ομογενής. Ομοίως, δεν έχει μελετηθεί η διάδοση ρωγμής στην περιοχή αυτή. Στις τεχνικές υπολογισμού ανοχής στη βλάβη, το μέταλλο βάσης και η περιοχή συγκόλλησης θεωρούνται ιδανικές και ομογενείς. Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων, της μεταβολής της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων στην ανάπτυξη και διάδοση της ρωγμής και ο ρόλος των ατελειών (πχ πόροι) δεν έχουν περιγραφεί. Τα υλικά ως τώρα θεωρούνται ισότροπα και ομογενή, δεν έχουν ασυνέχειες και θεωρείται ότι είναι σε τέλεια κατάσταση.

Αντίθετα, είναι γνωστό ότι η περιοχή συγκόλλησης δεν είναι ομογενής και χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

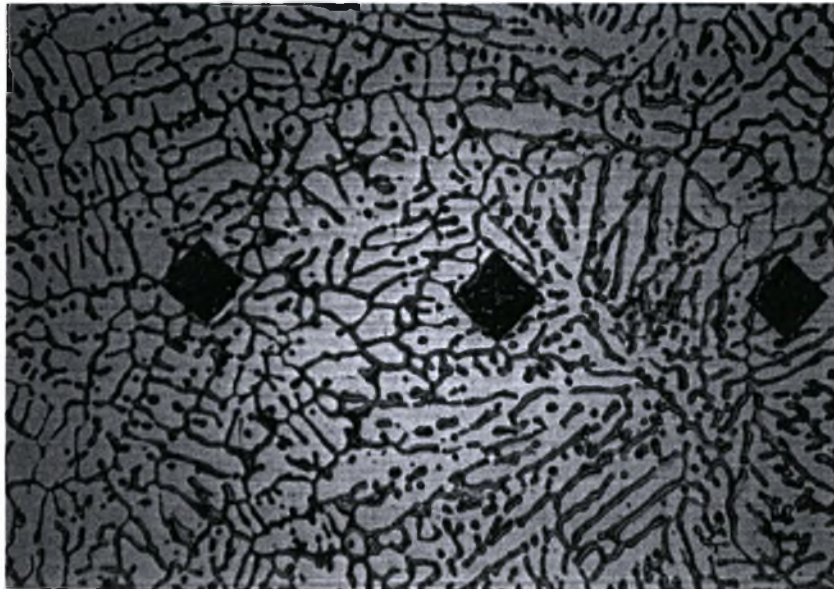
- Περιοχή Συγκόλλησης
- Θερμικά Επηηρεασμένη Ζώνη
- Μέταλλο Βάσης

Στις συγκολλήσεις των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου, αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από έντονες μεταβολές της αντοχής και της ολκιμότητας. Το εύρος των περιοχών αυτών είναι πολύ μικρό. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις συγκολλήσεις με laser είναι της τάξης του 1mm. Οι περιοχές παρουσιάζουν μειωμένες και ταυτόχρονα μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, η περιοχή συγκόλλησης είναι δυνατόν να περιέχει ατέλειες

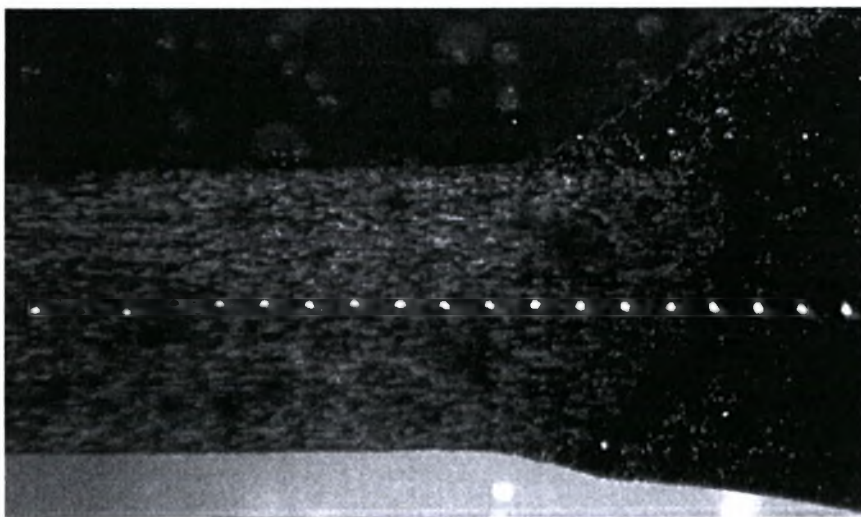


όπως πόροι, ρωγμές εγκλείσματα καθώς και μικροδομή εντελώς διαφορετική από αυτή του μετάλλου βάσης.

Οι ακόλουθες φωτογραφίες παρουσιάζουν την μεταβολή της μικροδομής από την περιοχή συγκόλλησης προς την ΘΕΖ. Ακόμα και μέσα στη ΘΕΖ υπάρχουν μεταβολές στη μικροδομή. Στην περιοχή συγκόλλησης η μικροδομή είναι όμοια με αυτή των χυτών (Εικόνα 2.6), ενώ μέσα στη ΘΕΖ έχουμε μικροδομές διαλυτοποίησης και υπεργήρανσης.



Εικόνα 2.6 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης



Εικόνα 2.7 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ Κοντά σε Αυτή



Εικόνα 2.8 – Μικροδομή Περιοχής Συγκόλλησης και ΘΕΖ Κοντά σε Αυτή

Οι αλλαγές τις μικροδομής και οι συνοδευόμενες μειώσεις των ιδιοτήτων στην ευρύτερη περιοχή της συγκόλλησης, επηρεάζουν την συμπεριφορά των συγκολλημένων τεμαχίων στην ανοχή βλάβης μέσω των:

- Παραμένουσων Τάσεων Συγκόλλησης
- Διάδοση Ρωγμών στην τοπικά Μεταβαλλόμενη Μικροδομή

Στις περισσότερες αναλυτικές προσεγγίσεις για την διάδοση ρωγμής κόπωσης για συγκολλημένα τεμάχια, θεωρείται μια υπάρχουσα περιοχή παραμένουσων τάσεων και οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται βάση του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού που μεταβάλλονται μέσα στη ΘΕΖ δεν λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της πιθανής ανάπτυξης και διάδοσης ρωγμής.

## 2.4 Σκληρότητα – Μέτρηση Σκληρότητας

Σκληρότητα χαρακτηρίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα όταν μέσα σ' αυτό τείνει να διεισδύσει ένα άλλο σκληρότερο. Για αυτό όλες οι μέθοδοι σκληρομέτρησης χρησιμοποιούν σκληρά διεισδυτικά έμβολα (από σκληρό χάλυβα ή διαμάντι) που δημιουργούν στο ελεγχόμενο υλικό τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις και αποτυπώματα.

Συνήθως το διεισδυτικό έμβολο επιδρά με μια ορισμένη δύναμη πάνω στο εξεταζόμενο σώμα για ένα χρονικό διάστημα και εκτιμάται το μέγεθος του αποτυπώματος. Η δοκιμή γενικά είναι πολύ απλή και οδηγεί συμπεράσματα που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του υλικού. Ως μέτρηση παίρνεται η δύναμη διείσδυσης αναγόμενη στην επιφάνεια του αποτυπώματος ή του βάθους διείσδυσης.

Η σκληρότητα ιδιαίτερα για τα μέταλλα, δίνει χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν:

- Την ποιότητα της θερμικής κατεργασίας των μετάλλων
- Τις δυνατότητες κατεργασίας μεταλλικών υλικών σε τόνους και φρέζες (π.χ. ταχύτητα κοπής κλπ)
- Την κατεργασιμότητα του μετάλλου (σφυρηλάτηση κλπ)
- Τη σύγκριση όμοιων υλικών
- Την ποιότητα συγκολλήσεων

Οι μέθοδοι σκληρομέτρησης διακρίνονται στις ακόλουθες τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Μέθοδος ΣΤΑΤΙΚΗΣ δοκιμής σκληρότητας
2. Μέθοδος ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ δοκιμής σκληρότητας
3. Μέθοδος μέτρησης σκληρότητας με ΕΓΧΑΡΑΞΗ

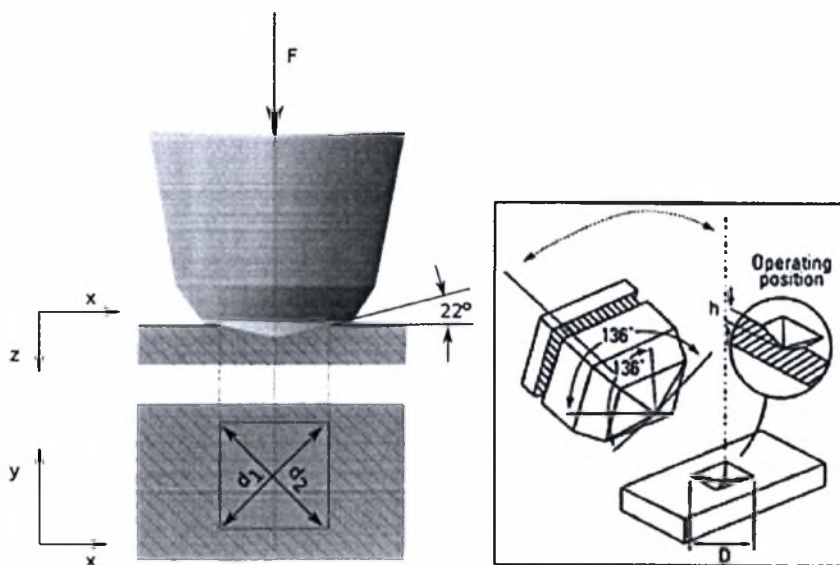
Οι δυο πρώτες κατηγορίες και ιδιαίτερα η μέθοδος σταθερού φορτίου, όπως είναι η μέθοδος μέτρησης σκληρότητας κατά Brinell, Vickers και Rockwell είναι οι πιο συνηθισμένες.



Στην παρούσα διατριβή, γίνεται χρήση της μεθόδου μέτρησης σκληρότητας κατά Vickers.

#### 2.4.2 Δοκιμή Σκληρότητας Κατά Vickers

Στη δοκιμή κατά Vickers το δεισδυτικό σώμα είναι μια κανονική τετράπλευρη διαμάντινη πυραμίδα με άνοιγμα  $136^\circ$ . Η επιφάνεια του αποτυπώματος (στην ιδανική περίπτωση) έχει τη μορφή που παριστάνεται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 – Σκληρομέτρηση κατά Vickers



Εικόνα 2.10 – Σκληρόμετρο Δοκιμής κατά Vickers

Με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου (Εικόνα 2.10) μετράται η διαγώνιος  $d_1$  και  $d_2$  του αποτυπώματος και υπολογίζεται η μέση τιμή του  $d$ :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

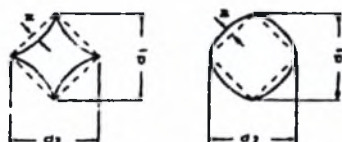
Στη συνέχεια υπολογίζεται η επιφάνεια του αποτυπώματος από την ακόλουθη σχέση:

$$A = \frac{d^2}{1.854} \quad (2)$$

Σαν σκληρότητα κατά Vickers ορίζεται ο λόγος της εξασκούμενης δύναμης προς την επιφάνεια του αποτυπώματος και συμβολίζεται με HV, δηλαδή:

$$HV = \frac{P}{A} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3)$$

Συχνά το αποτύπωμα έχει την περιμέτρο του παραμορφωμένη, όπως δείχνει η Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11 – Παραμορφωμένη Περίμετρος Αποτυπώματος Σκληρομέτρησης

Σε αυτή την περίπτωση εκτός των διαγωνίων  $d_1$  και  $d_2$  προσδιορίζονται και οι διαστάσεις  $z$ . Στην περίπτωση αυτή η τιμή της σκληρότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HV = \frac{1.854P}{\left(\frac{d}{\sqrt{2}} \pm z\right)^2} \quad (4)$$

Η δύναμη στη δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers, εφαρμόζεται ομαλά, δίχως να αναπτυχθούν κρουστικά φαινόμενα ή ταλαντώσεις. Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η δύναμη στην ονομαστική της τιμή είναι περίπου 15 δευτερόλεπτα, ενώ ο χρόνος δοκιμής φτάνει και τα 30 δευτερόλεπτα. Ανάλογα με

το πάχος του υπό μέτρηση σώματος, η δοκιμή γίνεται με την άσκηση διαφόρων δυνάμεων, όπως 60kp, 30kp ή 10kp. Οι τιμές της σκληρότητας συμβολίζονται αντίστοιχα με HV60, HV30 και HV10. Για παράδειγμα, HV30=640kp/mm<sup>2</sup> σημαίνει σκληρότητα κατά Vickers 640kp/mm<sup>2</sup> με διάρκεια δοκιμής 10 έως 15 δευτερόλεπτα. HV50/30=180kp/mm<sup>2</sup>, σημαίνει σκληρότητα κατά Vickers 180kp/mm<sup>2</sup> με δύναμη δοκιμής 50kp και χρόνο δοκιμής 30 δευτερόλεπτα.

## 2.5 Κράμα Αλουμινίου 6013-T6

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της διατριβής ήταν κράμα αλουμινίου 6013-T6. Στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακες 2.1, 2.2) φαίνεται η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του κάματος.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Each	Other Total	Al
0.6-1.0	0.5 max	0.6-1.1	0.2-0.5	0.8-1.2	0.10 max	0.25 max	0.10 max	0.05 max	0.015 max	REM

Πίνακας 2.1 – Χημική Σύσταση Κράματος Αλουμινίου 6013

Hardness (HV)	148 HV
Tensile Strength	359 MPa
Yield Strength	317 MPa

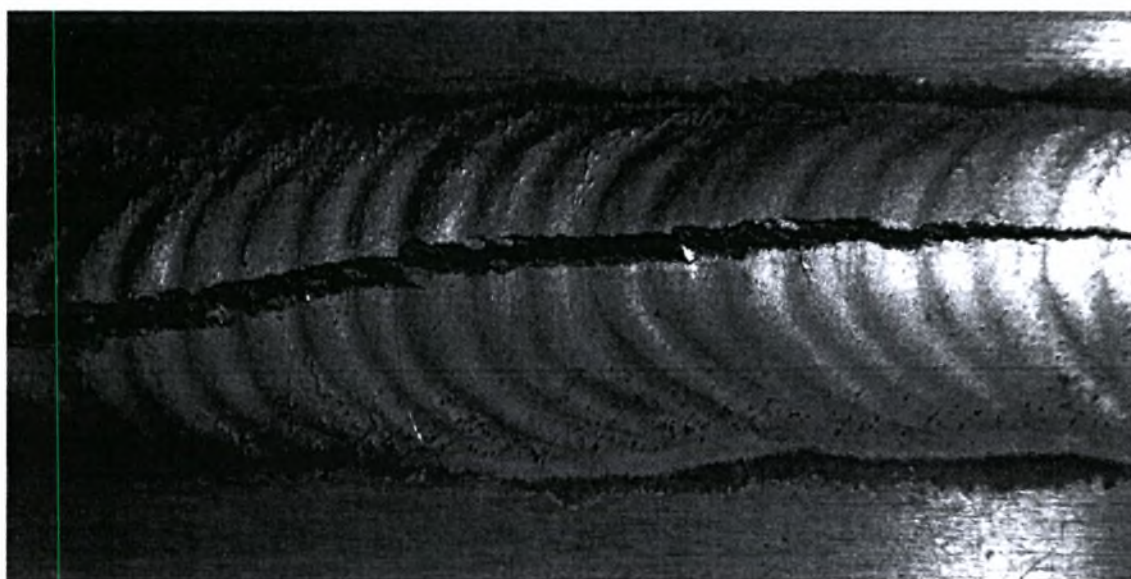
Πίνακας 2.2 – Μηχανικές Ιδιότητες Κράματος Αλουμινίου 6013 σε Temper T6

Για την επίτευξη του temper T6, το κράμα θερμάνθηκε στους 570°C για πλήρη διαλυτοποίηση και στη συνέχεια υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία γήρανσης στους 190°C για 4 ώρες.

Το κράμα 6013 είναι ένα καινούργιο κράμα αλουμινίου, μεσαίας αντοχής, για αεροπορική χρήση. Χαρακτηριστικό του είναι η βελτιωμένη αντίσταση που παρουσιάζει στην διάβρωση και αυξημένη διαμορφωσιμότητα, σε σχέση με τα αντίστοιχα κράματα της σειράς του. Η εταιρία Lockheed έχει επιλέξει το 6013-T6 για την άτρακτο του αεροσκάφους P-7A του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α. Η Questair κατασκευάζει το «Questair Kit Aircraft» εξ' ολοκλήρου από το κράμα 6013-T6. Τα τελευταία χρόνια οι αεροπορικές Βιομηχανίες χρησιμοποιούν το

συγκεκριμένο κράμα όλο και πιο συχνά, λόγω της βελτιωμένης διαμορφωσιμότητας και αυξημένης αντοχής στη διάβρωση.

Το αλουμίνιο 6013 είναι μπορεί να συγκολληθεί και με την μέθοδο MIG και με την μέθοδο TIG. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κράματα της σειράς 6XXX, η συγκόλλησή του πρέπει να γίνεται μόνο με βέργες συγκόλλησης (filler metal) της σειράς 4XXX (για παράδειγμα 4043, 4643) για να μην παρουσιαστούν ρωγμές κατά μήκος της συγκόλλησης (Fusion Line Crack). Η σειρά 6XXX συνίσταται να συγκολλείται με βέργες συγκόλλησης της σειράς 5XXX. Το αλουμίνιο 6013, λόγω της περιεκτικότητάς του σε χαλκό, παρουσιάζει ρωγμές κατά μήκος της συγκόλλησης, εάν συγκολληθεί με βέργα συγκόλλησης σειράς 5XXX (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 – Ρωγμή Κατά Μήκος της Συγκόλλησης Λόγω Χρήσης Βέργας Σειράς 5XXX

## 2.6 Μετάδοση Θερμότητας στις Συγκολλήσεις

Κατά την συγκόλληση τήξεως αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή της συγκόλλησης ενώ σε περιοχές μακριά από την συγκόλληση οι θερμοκρασίες παραμένουν χαμηλές. Επίσης, κατά την διάρκεια μιας συγκόλλησης, το ηλεκτρικό τόξο κινείται πάνω στο έλασμα. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται ένα ισχυρά ανομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο, τόσο τοπικά όσο και χρονικά. Το θερμοκρασιακό πεδίο επηρεάζει σημαντικά μηχανικά και μεταλλουργικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης όπως:

- Το εύρος και την δομή του μετάλλου συγκόλλησης
- Το εύρος και την δομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ)
- Τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις

Όλα τα πιο πάνω επηρεάζουν την αντοχή, την ποιότητα και την μηχανική συμπεριφορά των συγκολλητών κατασκευών.

### 2.6.1 Η θερμότητα που παράγει το ηλεκτρικό τόξο

Όταν πραγματοποιείται μία συγκόλληση τόξου με τάση  $V$  και ένταση ρεύματος  $I$ , η ηλεκτρική ισχύς του τόξου είναι  $VI$ . Βέβαια δεν αξιοποιείται όλη αυτή η ισχύς λόγω απωλειών. Έτσι η θερμική ισχύς  $Q$ , που εισέρχεται στο μέταλλο και καταναλώνεται για την συγκόλληση είναι

$$Q = \eta VI \quad (5)$$

Όπου  $\eta$  είναι ο βαθμός απόδοσης του τόξου, ο οποίος εξαρτάται από την μέθοδο συγκόλλησης. Ο βαθμός συγκόλλησης της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στη διατριβή αυτή (GTAW) είναι 0,7-0,9.

Επειδή στις συγκολλήσεις το συνολικό ποσό της θερμότητας που εισάγεται στο μέταλλο εξαρτάται και από την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η συγκόλληση (ταχύτητα του τόξου  $u$ ), ορίζουμε τον ρυθμό εισαγωγής θερμότητας,  $h$ , (ΡΕΘ) ως εξής:

$$h = \frac{\eta VI}{u} \quad (6)$$

Εκτός από την ηλεκτρική ισχύ του τόξου  $VI$ , υπάρχουν δύο ακόμα πηγές θερμότητας σε μία συγκόλληση:

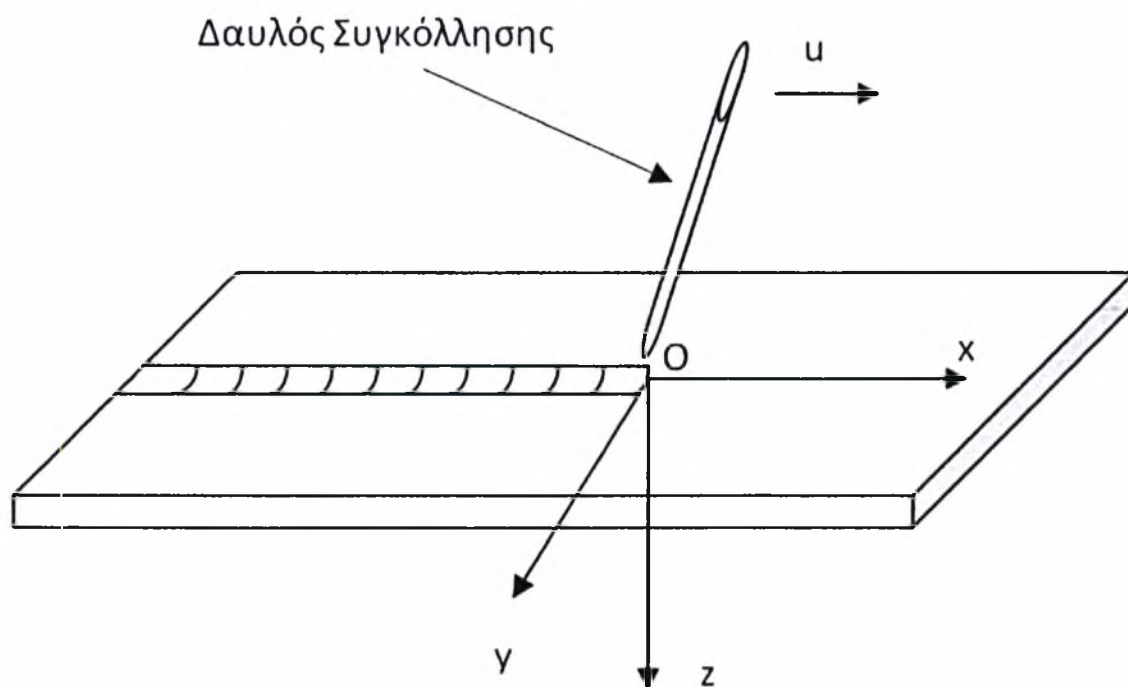
- Θερμότητα από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των στοιχείων της επένδυσης του ηλεκτροδίου, των αερίων που περιβάλλουν το τόξο και της λίμνης συγκόλλησης
- Θερμότητα που παράγεται από πιθανούς αλλοτροπικούς μετασχηματισμούς του μετάλλου



Στην πράξη, αυτές οι πηγές είναι αμελητέες σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ του τόξου.

### 2.6.2 Το πρόβλημα της μετάδοσης θερμότητας

Το γεωμετρικό μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για την διαμόρφωση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας φαίνεται στην Εικόνα 2.13. Η αρχή των αξόνων  $O$  είναι στην πάνω επιφάνεια του ελάσματος ακριβώς κάτω από το ηλεκτρικό τόξο. Ο άξονας  $x$  υποδεικνύει την κατεύθυνση της συγκόλλησης (άξονας συγκόλλησης). Ο άξονας  $y$  τοποθετείται εγκάρσια στον άξονα συγκόλλησης (κατά το πλάτος του ελάσματος), ενώ ο άξονας  $z$  τοποθετείται κατά το πάχος του ελάσματος.



Εικόνα 2.13 – Γεωμετρικό Μοντέλο για την Επίλυση του Προβλήματος Μετάδοσης Θερμότητας σε Συγκολλήσεις

Η βασική παραδοχή στην διαμόρφωση του προβλήματος είναι ότι η μετάδοση θερμότητας γίνεται με αγωγή. Στην περίπτωση αυτή η θεμελιώδης εξίσωση μετάδοσης θερμότητας είναι:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_G + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

Όπου

$\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού (Kg/m<sup>3</sup>)

$c$  είναι η ειδική θερμότητα (J/Kg.K)

$k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα (W/m.K)

$\dot{Q}_G$  είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας από εσωτερικές πηγές (W/m<sup>3</sup>)

Η εξίσωση (7) γίνεται

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_G + k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial k}{\partial T} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Τώρα θα θεωρήσουμε ότι:

$$\dot{Q}_G = 0 \quad (9)$$

ότι δηλαδή δεν υπάρχει παραγωγή ή απώλεια θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού και

$$\frac{\partial k}{\partial T} = 0 \quad (10)$$

ότι δηλαδή ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας

Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις η (8) γίνεται:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

Όπου  $\alpha = k/\rho c$  είναι η θερμοδιαχυτότητα του υλικού σε m<sup>2</sup>/s.

Σημειώνουμε ότι η θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας καθιστά την εξίσωση (8) μη-γραμμική. Για τον λόγο αυτό

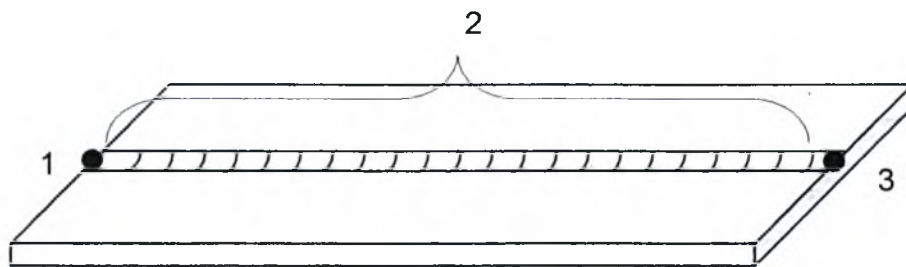
χρησιμοποιούμε την παραδοχή (10), η οποία οδηγεί στην διαμόρφωση της εξίσωσης (11).

Το πρόβλημα διακρίνεται χρονικά σε τρεις φάσεις (Εικόνα 2.14):

Φάση 1: έναυση του τόξου

Φάση 2: μετακίνηση του τόξου για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης

Φάση 3: σβήσιμο του τόξου



Εικόνα 2.14 – Φάσεις κατά την Πραγματοποίηση της Συγκόλλησης.

Στις φάσεις 1 και 3 επικρατούν ισχυρά μη-μόνιμες συνθήκες και το πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας είναι αρκετά σύνθετο. Εάν αγνοήσουμε τις φάσεις αυτές, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στη φάση 2 επικρατούν μόνιμες συνθήκες σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το τόξο. Θεωρούμε δηλαδή ότι το σύστημα των αξόνων  $Oxyz$  της Εικόνας 2.13 κινείται μαζί με το τόξο με ταχύτητα  $u$ . Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε ημι-μόνιμες συνθήκες (quasi-stationary state). Το κινούμενο μαζί με το τόξο σύστημα είναι πλέον το  $Oxyw$ , όπου η μεταβλητή  $w$  είναι

$$w = x - ut \quad (12)$$

Σε σχέση με το κινούμενο σύστημα (ΚΣ) οι συνθήκες είναι μόνιμες, ενώ σε σχέση με το ακίνητο σύστημα (ΑΣ), οι συνθήκες είναι μη-μόνιμες. Τώρα θα μετατρέψουμε την εξίσωση (11), η οποία ισχύει για το ακίνητο σύστημα, σε μία αντίστοιχη σχέση για το κινούμενο σύστημα αναφοράς. Από την σχέση (12) έχουμε

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 1 \quad (13\alpha)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \quad (13\beta)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial w} \quad (13\gamma)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial w^2} \quad (13\delta)$$

Η χρονική παράγωγος στο ακίνητο σύστημα (ΑΣ) είναι

$$\left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ΑΣ} = \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ΚΣ} + \frac{\partial T}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (14)$$

Επειδή στο κινούμενο σύστημα (ΚΣ) επικρατούν μόνιμες συνθήκες έχουμε

$$\left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ΚΣ} = 0 \quad (15)$$

Οπότε η (10) γίνεται

$$\left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ΑΣ} = -u \frac{\partial T}{\partial w} \quad (16)$$

Με την βοήθεια των (9) και (12) η σχέση (7) γίνεται

$$\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{u}{\alpha} \left( \frac{\partial T}{\partial w} \right) \quad (17)$$

Όπου η θερμοκρασία είναι τώρα συνάρτηση των  $w$ ,  $y$  και  $z$ , δηλαδή  $T=T(w,y,z)$ . Η εξίσωση αποτελεί την διαμόρφωση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας με αγωγή για ημι-μόνιμες συνθήκες, δηλαδή σε ένα σύστημα που κινείται με το ηλεκτρικό τόξο. Για την λύση της (17) πρέπει να θεωρήσουμε αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

Το πρόβλημα είναι τρισδιάστατο με κινούμενη σημειακή πηγή σε έλασμα πεπερασμένου πάχους  $H$ . Για τις συνοριακές συνθήκες θα θεωρήσουμε μηδενικές θερμικές απώλειες από την πάνω και την κάτω επιφάνεια του ελάσματος, οπότε

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ για } z=0 \text{ και } z=H \quad (18)$$

Σύμφωνα με τις λύσεις Rosenthal έχουμε:

$$T - T_o = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2\alpha} z} \left[ \frac{e^{-\frac{u}{2\alpha} R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\frac{u}{2\alpha} R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{u}{2\alpha} R'_n}}{R'_n} \right) \right] \quad (19)$$

όπου

$$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH - z)^2} \quad (20)$$

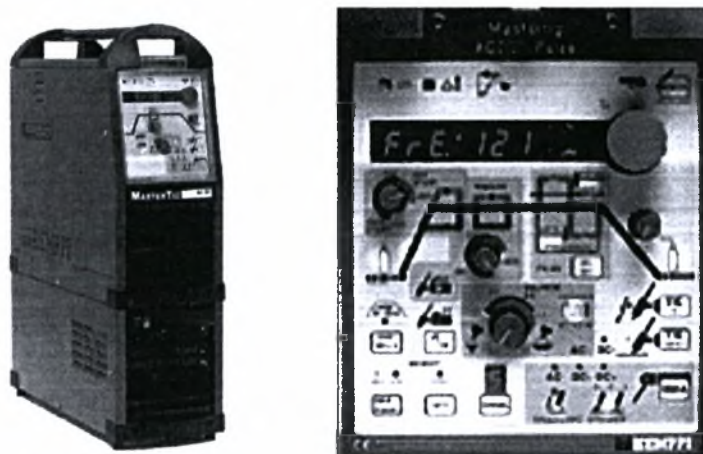
και

$$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nH + z)^2} \quad (21)$$

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Συγκόλληση Δοκιμίων

Τα δοκίμια συγκολλήθηκαν στην εταιρία ΣΗΛΜΑΝ Α.Ε. με την μέθοδο TIG. Για την συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε η μηχανή συγκόλλησης MasterTig AC/DC 3500W της εταιρίας ΚΕΜΡΡΙ, με πάνελ ελέγχου λειτουργιών το AC/DC Pulse (Εικόνα 3.1).



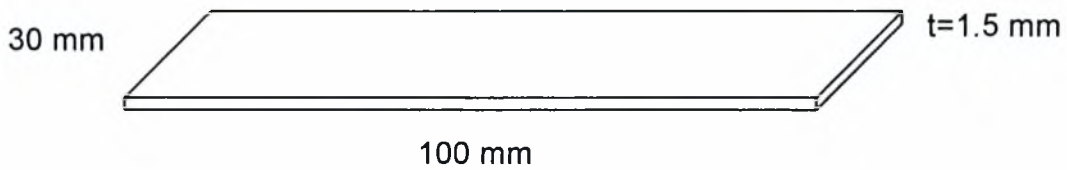
Εικόνα 3.1 - MasterTig AC/DC 3500W – Panel AC/DC Pulse

Για την συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε βέργα συγκόλλησης κράματος 4043, διαμέτρου Φ2,4mm. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.1) αναφέρονται οι ρυθμίσεις της μηχανής συγκόλλησης και τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης.

Ένταση Ρεύματος	70 A
Τάση	14,5 V
Balance Τόξου	-70%
Παλμός	Μονός
Συχνότητα	64 Hz
Αέριο Συγκόλλησης	Argon 99,99%
Παροχή Αερίου	10 lt/min
Μήκος Ραφής	90mm (0,09m)
Χρόνος Συγκόλλησης	24,5 sec

Πίνακας 3.1 – Χαρακτηριστικά Συγκόλλησης

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν είχαν τις ακόλουθες διαστάσεις (Εικόνα 3.2):



Εικόνα 3.2 – Δοκίμιο Συγκόλλησης

Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε κατά μήκος της πλευράς μήκους 100mm, με την βοήθεια δύο σημειακών κολλήσεων στις δύο άκρες των δοκιμίων, για συγκράτηση.

Με την χρήση της Υδροκοπής της εταιρίας ΣΗΛΜΑΝ Α.Ε., για αποφυγή θερμικών καταπονήσεων των συγκολλημένων δοκιμίων, κόπηκαν κομμάτια μήκους περίπου 10mm, κάθετα στην συγκόλληση, για μέτρηση του προφίλ σκληρότητας.

Στη συνέχεια έγινε εγκιβωτισμός με χρήση της ρητίνης Acryfix. Για την παρασκευή της αναμειγνύονται 2 μέρη σκόνης με 1 μέρος καταλύτης.

Για το γυάλισμα και την στίλβωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου.

Στους λειαντικούς υλικά χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC), με πρώτο μέγεθος κόκκου 320 grit, και με ακολουθία 500, 800, 1000 και 2000 grit.

Η στίλβωση έγινε σε δύο πάνινους τροχούς. Ο πρώτος περιέχει κόκκους διαμαντιού διαμέτρου 3μm και ο δεύτερος κόκκους διαμαντιού διαμέτρου 1μm.

Επειδή τα δοκίμια είναι κράμα αλουμινίου χρειάζονται επιπλέον γυάλισμα. Το αλουμίνιο είναι ένα μαλακό υλικό, και χαράζεται με το παραμικρό. Ως αποτέλεσμα η παρατήρηση του δοκιμίου στο μικροσκόπιο μετά την λείανση στο δίσκο με τους κόκκους διαμαντιού 1μm, αποκαλύπτει γρατσουινές. Οι γρατσουινές αυτές εξαλείφονται με γυάλισμα του δοκιμίου με το υλικό OP-U, για μη σιδηρούχα υλικά. Το

OP-U είναι υγρό και τροφοδοτείται στον κατάλληλο πάνινο δίσκο. Στη διάρκεια της λείανσης παίζει τον ρόλο του λειαντικού υλικού καθώς και του υγρού ψύξης.

Η μέτρηση του προφίλ σκληρότητας (μικροσκληρομέτρηση) έγινε με τη χρήση του σκληρόμετρου του WOLPERT Micro-Vickers tester 401-MVD του εργαστηρίου. Ως βάρος δοκιμής επιλέχτηκαν τα 200gr και ο χρόνος δοκιμής ήταν 10 δευτερόλεπτα

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη μέση του πάχους των δοκιμίων (απόσταση 0,75mm από την ελεύθερη επιφάνεια των δοκιμίων). Με σημείο εκκίνησης των μετρήσεων το μέσο της συγκόλλησης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά 250μm στην περιοχή συγκόλλησης και σε μήκος 15mm στο μέταλλο βάσης. Στο υπόλοιπο μήκος των 10mm του μετάλλου βάσης, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαστήματα των 500μm. Οι μετρήσεις στο μέταλλο βάσης δεξιά και αριστερά της κόλλησης ήταν, όπως αναμένονταν, συμμετρικές. Για λόγους ευκολίας της ανάλυσης στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του μισού μόνο δοκιμίου.



Διάγραμμα 3.1 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο1





Διάγραμμα 3.2 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο2



Διάγραμμα 3.3 - Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίου Νο3



Διάγραμμα 3.4 - Συγκεντρωτικό Προφίλ Μικροσκληρότητας Δοκιμίων

Το προφίλ μικροσκληρότητας των τριών δοκιμίων είναι τυπικό προφίλ σκληρότητας συγκολλημένου κράματος σειράς 6XXX. Στα σχηματικά διαγράμματα διακρίνονται δύο βασικές περιοχές.

Η περιοχή Μ.Σ. απεικονίζει την σκληρότητα του μετάλλου συγκόλλησης (filler material).

Η περιοχή ΘΕΖ απεικονίζει το προφίλ σκληρότητας της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (Heat Affected Zone) και μπορεί να χωριστεί σε δύο υπο-περιοχές, την ΘΕΖ<sub>1</sub> και την ΘΕΖ<sub>2</sub>. Στην περιοχή ΘΕΖ<sub>1</sub> παρατηρείται αυξημένη τιμή σκληρότητας κοντά στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης. Στην περιοχή, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, η θερμοκρασία φτάνει κοντά στους 570°C, οπότε πραγματοποιείται διαλυτοποίηση (σχηματισμός στερεού διαλύματος). Ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά γρήγορος ώστε να δημιουργηθεί υπέρκορο διάλυμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ξεκινήσει διαδικασία γήρανσης στην περιοχή αυτή, όπου τελικά παρατηρείται αύξηση σκληρότητας.

Στην περιοχή ΘΕΖ<sub>2</sub>, η θερμοκρασία δεν φτάνει σε αυτή της διαλυτοποίησης. Είναι όμως αρκετά υψηλή ώστε να υπάρξει διεύρυνση της φάσης β'. Σε αυτή την περιοχή το κράμα υφίσταται υπεργήρανση (over aging) με

αποτέλεσμα την μείωση της σκληρότητας. Το σημείο με την ελάχιστη τιμή που παρατηρείται στο προφίλ σκληρότητας, αντιστοιχεί στην περιοχή του μετάλλου βάσης με τον μεγαλύτερο ρυθμό διεύρυνσης, δηλαδή την μεγαλύτερη υπεργήρανση που μπορεί να υποστεί το υλικό.

Στο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για την συγκόλληση, λόγω της γεωμετρίας (διαστάσεων) του, δεν παρατηρείται στο προφίλ σκληρότητας περιοχή που δεν έχει επηρεαστεί από την θερμοκρασία συγκόλλησης (περιοχή M.B. δηλαδή μετάλλου βάσης). Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε είχε μικρό πλάτος και πάχος, με αποτέλεσμα να επηρεαστεί θερμικά στο σύνολό του. Σε δοκίμιο διαστάσεων που θα εμφανίζονταν η περιοχή M.B. στο προφίλ μικροσκληρότητας, το διάγραμμα θα συνεχίζονταν δεξιά της ΘΕΖ μέχρι την τιμή μικροσκληρότητας του μετάλλου βάσης, οπότε και θα σταθεροποιούνταν στην τιμή των 148HV.

### 3.2 Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) με τη Χρήση του Προγράμματος Mathematica

Με την χρήση του προγράμματος Mathematica, υπολογίστηκε το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται κατά μήκος της y διεύθυνσης (εγκάρσια της διεύθυνσης συγκόλλησης), με τη χρήση των εξισώσεων που περιγράφονται στη παράγραφο 2.6.

Οι συνθήκες συγκόλλησης που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Mathematica είναι αυτές του δοκιμίου συγκόλλησης στο οποίο καταγράφηκε το προφίλ μικροσκληρότητας (Πίνακας 3.2).

Ένταση Ρεύματος	70 A
Τάση	14,5 V
Μήκος Ραφής	0,09m (90mm)
Χρόνος Συγκόλλησης	24,5 sec

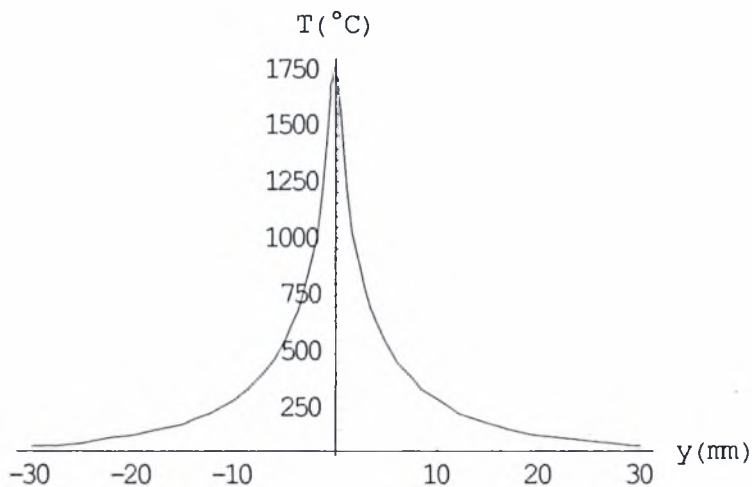
Πίνακας 3.2 – Συνθήκες Συγκόλλησης

Οι φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 6013-T6 φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.3). Αρχική θερμοκρασία (θερμοκρασία προβάλλοντος) θεωρήθηκε  $T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

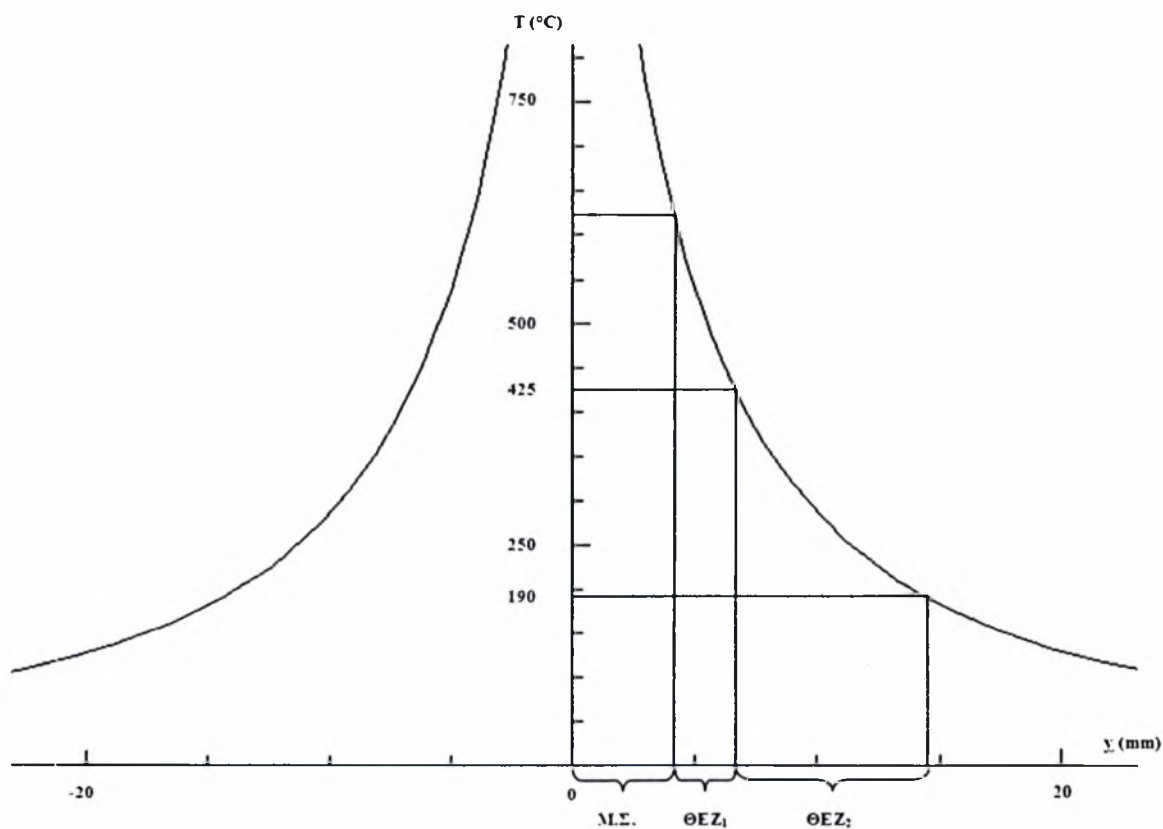
Θερμική Αγωγιμότητα	267 W/(m-K)
Ειδική Θερμότητα	896 J/(kg-K)
Πυκνότητα Υλικού	2700 kg/m <sup>3</sup>

Πίνακας 3.3 – Φυσικές Ιδιότητες Κράματος Αλουμινίου 6013-T6

Το θερμοκρασιακό πεδίο (T-y) υπολογίστηκε σε βάθος 0,75mm ( $z=0.75\text{mm}$ ) από την ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου, στο σημείο μηδέν (στο σημείο του δαυλού συγκόλλησης) και παρουσιάζεται στα ακόλουθα διαγράμματα (Διάγραμμα 3.5, Διάγραμμα 3.6).



Διάγραμμα 3.5 – Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) στο Σημείο  $x=0, z=0,75$



Διάγραμμα 3.6 – Θερμοκρασιακό Πεδίο (T-y) στο Σημείο  $x=0, z=0,75$  (Μεγέθυνση)

Στο σημείο  $x=0$  η θερμοκρασία σχεδόν απειρίζεται. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή της λύσης Rosenthal για σημειακή πηγή. Στην πραγματικότητα έχουμε τήξη του υλικού βάσης (base material) και του υλικού της βέργας συγκόλλησης (filler material).

Η θερμοκρασία τήξης του κράματος 6013 είναι περίπου 630°C. Η περιοχή του δοκιμίου συγκόλλησης που η θερμοκρασία ξεπερνά την τιμή αυτή, ονομάζεται Μ.Σ. Στην περιοχή αυτή πραγματοποιείται τήξη του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης.

Η περιοχή όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη των 630°C ονομάζεται Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ). Ως την θερμοκρασία των 425°C περίπου (περιοχή ΘΕΖ<sub>1</sub>), στο κράμα αλουμινίου πραγματοποιείται διαλυτοποίηση. Στην πορεία της συγκόλλησης, καθώς η θερμοκρασία της περιοχής ελαττώνεται, πραγματοποιείται καθίζηση και η μικροσκληρότητα του υλικού παρουσιάζεται αυξημένη. Κάτω από την θερμοκρασία των 425 °C περίπου και ως αυτή των 190°C (ΘΕΖ<sub>2</sub>) στο υλικό πραγματοποιείται υπεργήρανση. Οι φάσεις ισχυροποίησης διευρύνονται και η μικροσκληρότητα του ελαττώνεται.

Στην περιοχή όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη των 190°C, το υλικό δεν επηρεάζεται θερμικά και η μικροσκληρότητά του δεν παρουσιάζει μεταβολές.

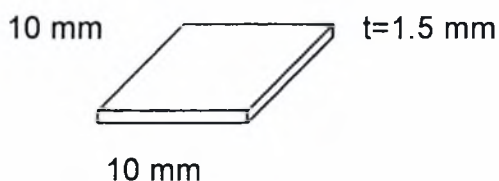
Η ΘΕΖ που υπολογίζεται με το πρόγραμμα Mathematica εκτίνεται κατά περίπου 8mm από την περιοχή συγκόλλησης. Ο υπολογισμός αυτός είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται με σύγκριση με το μέγεθος της ΘΕΖ που μετρήθηκε στο δοκίμιο συγκόλλησης.



## 3.2 Ισόθερμες Θερμικές Κατεργασίες

Για την προσομοίωση του προφίλ σκληρότητας, ένας αριθμός δοκιμίων του ίδιου κράματος, υποβλήθηκε σε μια σειρά θερμικών κατεργασιών. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες καθώς και οι διαφορετικοί χρόνοι παραμονής, έχουν ως σκοπό να κάνουν την μικροδομή των δοκιμίων ίδια με αυτή των διαφόρων σημείων της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν των ακόλουθων διαστάσεων:



Εικόνα 3.3 - Δοκίμιο Θερμικών κατεργασιών

Η κοπή των δοκιμίων σε αυτές τις διαστάσεις, έγινε με τη χρήση της αυτόματης μηχανής κοπής Struers Accutom-5 του εργαστηρίου, με τροχούς από αλουμίνια (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Οι συνθήκες κοπής φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.4):

Ταχύτητα Κοπής	0,140 mm/sec
Ταχύτητα Περιστροφής Δίσκου Κοπής	3000 RPM
Χρήση Ψυκτικού Υγρού	ΝΑΙ

Πίνακας 3.4 – Συνθήκες Κοπής

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια σειρά θερμικών κατεργασιών για την προσομοίωση της ΘΕΖ<sub>2</sub>. Οι θερμικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 190°C και στους 500°C. Στις θερμοκρασίες αυτές πραγματοποιείται υπεργήρανση του κράματος.

Το πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών που ακολουθήθηκε, φαίνεται στον Πίνακα 3.5. Για της θερμικές κατεργασίες χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός του εργαστηρίου:

- a. Θάλαμος Θερμικών Κατεργασιών: Thermawatt TGT-50
- b. Ελεγκτής Θερμοκρασίας: JUMO iTRON 16

Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος Θερμικής Κατεργασίας (Ωρες)			
	2	4	8	16
500°	2	4	8	16
450°	2	4	5	16
400°	4	8	16	
300°	4	8	16	24
250°	4	8	16	32
190°	8	16	32	64

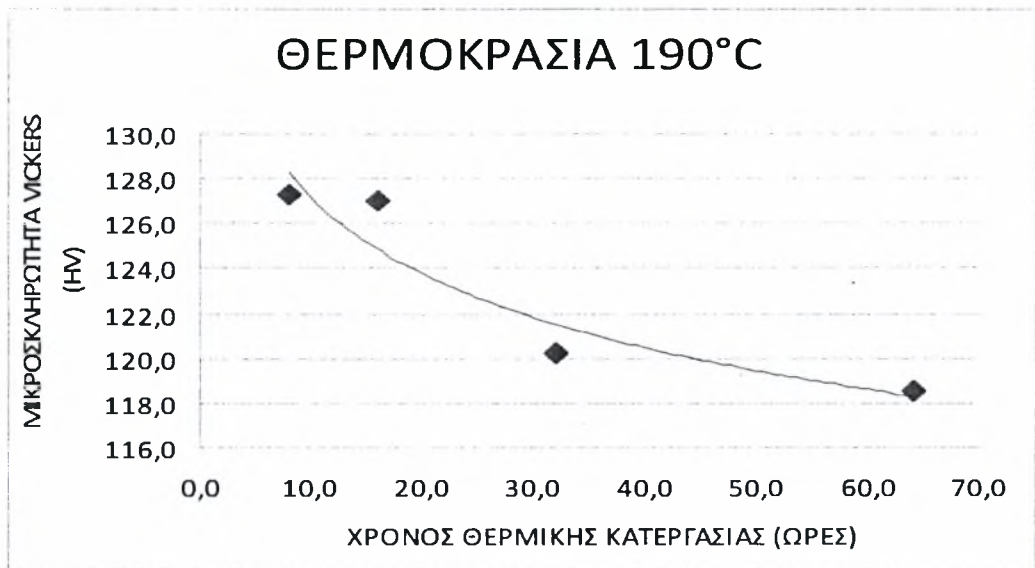
Πίνακας 3.5 – Πρόγραμμα Θερμικών Κατεργασιών

Για την συγκράτηση των δοκιμών στο θάλαμο, χρησιμοποιήθηκε ανοξειδωτο σύρμα AISI302 διαμέτρου Φ0,51mm (0,020").

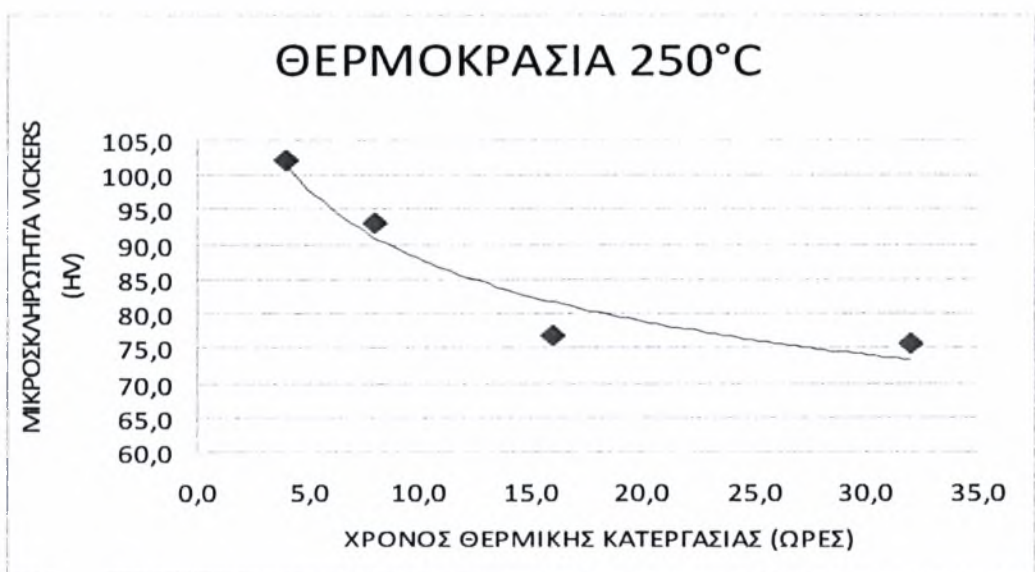
Με το πέρας του αντίστοιχου χρόνου παραμονής στο θάλαμο, το δοκίμιο ψύχθηκε απότομα σε θερμοκρασία δωματίου (βαφή).

Τα δοκίμια γυαλίστηκαν ώστε να απομακρυνθεί το φιλμ οξειδωσης από την επιφάνειά τους ώστε να γίνει η σκληρομέτρηση σε επιφάνεια αλουμινίου. Στους λειαντικούς υλικά χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Με πρώτο μέγεθος κόκκου 320 grit, και με ακολουθία 500 και 800 grit.

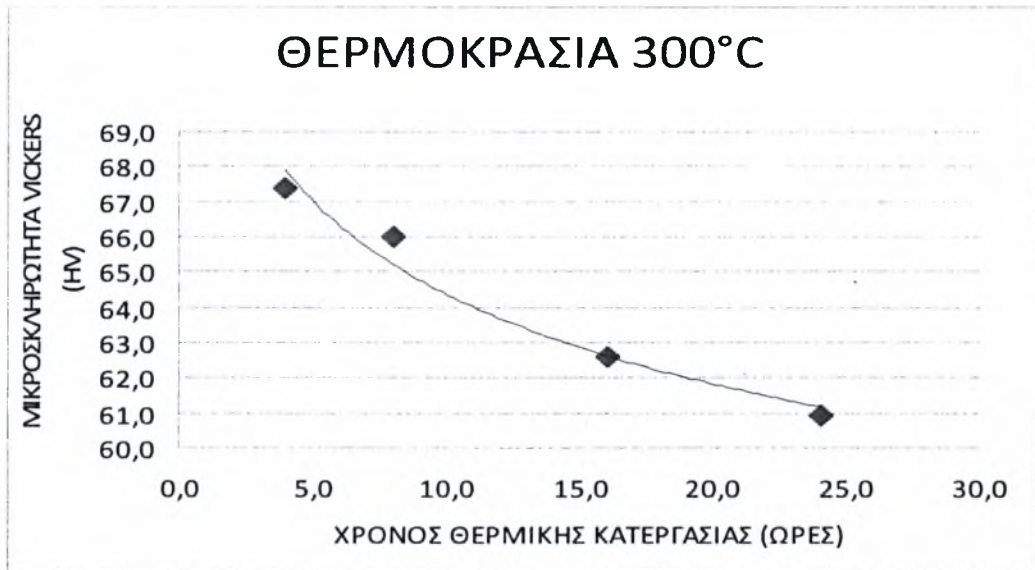
Η μέτρηση του προφίλ σκληρότητας (μικροσκληρομέτρηση) έγινε με τη χρήση του σκληρόμετρου του WOLPERT Micro-Vickers tester 401-MVD του εργαστηρίου. Ως βάρος δοκιμής επιλέχτηκαν τα 200gr και ο χρόνος δοκιμής ήταν 10 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων των αντιστοιχών δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία κατεργασίας, δίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



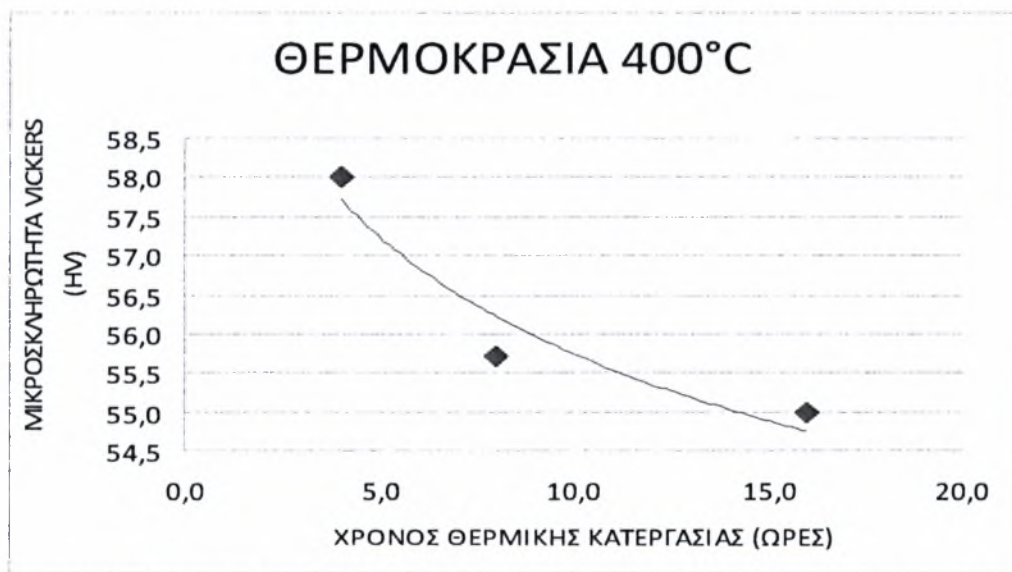
Διάγραμμα 3.7 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 190°C



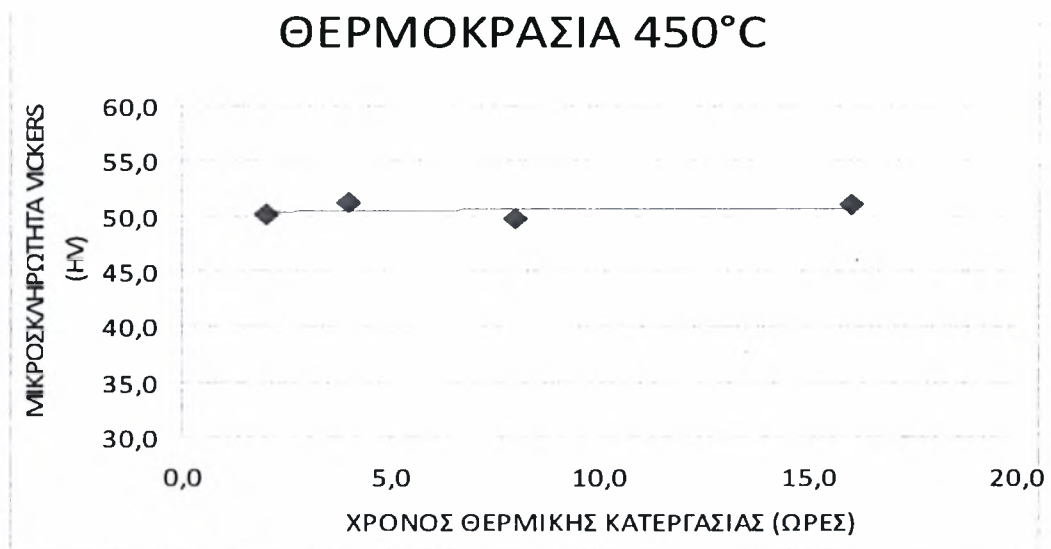
Διάγραμμα 3.8 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 250°C



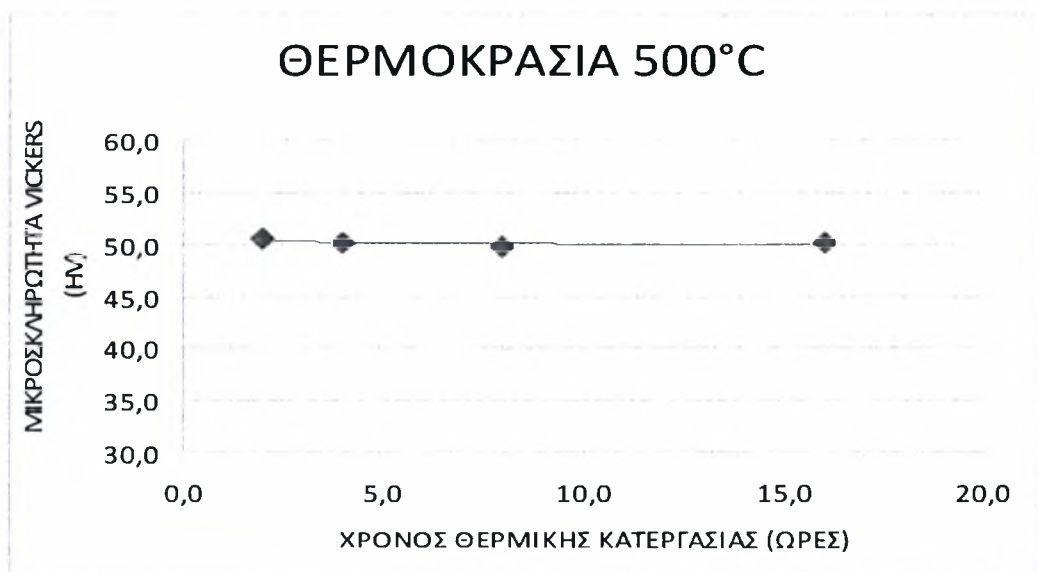
Διάγραμμα 3.9 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 300°C



Διάγραμμα 3.10 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 400°C



Διάγραμμα 3.11 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 450°C



Διάγραμμα 3.2 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 500°C

Στη θερμοκρασία των 190°C το υλικό υπόκειται σε υπεργήρανση. Οι φάσεις ισχυροποίησης διευρύνονται με αποτέλεσμα την μείωση της μικροσκληρότητας. Η τιμή της φτάνει στα 119HV μετά από 64 ώρες θερμικής κατεργασίας.

Στην θερμοκρασία των 250°C η διεύρυνση πραγματοποιείται σε πιο γρήγορο ρυθμό από ότι στους 190°C. Έχουμε μεγαλύτερη μείωση της μικροσκληρότητας για μικρότερο χρόνο θερμικής κατεργασίας. Μετά από 4 ώρες θερμικής κατεργασίας στους 250°C η μικροσκληρότητα είναι 102 HV, ενώ στους 190°C μειώθηκε στα 119HV μετά από 64 ώρες. Στις 16 ώρες παρατηρείται η μέγιστη διεύρυνση, για την θερμοκρασία αυτή, των φάσεων ισχυροποίησης. Η μικροσκληρότητα αλλάζει ελάχιστα για επιπλέον παραμονή στη θερμοκρασία αυτή. Μετά από 16 ώρες, η μετρούμενη μικροσκληρότητα είναι περίπου η ίδια με αυτή που μετράται έπειτα από 32 ώρες θερμικής κατεργασίας.

Στις θερμικές κατεργασίες των 300°C και 400°C τα φαινόμενα είναι όμοια με αυτά που περιγράφηκαν για τους 250°C. Επειδή οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες, τα φαινόμενα διάχυσης είναι πιο έντονα. Η διεύρυνση πραγματοποιείται με πιο μεγάλη ταχύτητα. Στους 300°C η μικροσκληρότητα πέφτει στα 67HV με 4 ώρες θερμικής κατεργασίας, ενώ φτάνει στα 61HV μετά από 24 ώρες. Στους 400°C πέφτει στα 58HV μετά από 4 ώρες, ενώ στις 16 ώρες ελαττώνεται μόλις κατά 3HV. Η θερμοκρασία αυτή είναι στο όριο της θερμοκρασίας γήρανσης και της εκκίνησης της διαλυτοποίησης.

Στις θερμοκρασίες θερμικών κατεργασιών των 400°C και 500°C, υπάρχει πλήρης διαλυτοποίηση των φάσεων ισχυροποίησης. Σχηματίζεται ένα υπέρκορο διάλυμα με μικροσκληρότητα 50HV. Η μεταβολή της μικροδομής παρατηρείται μετά από 4 ώρες θερμικής κατεργασίας. Η επιπλέον θερμική κατεργασία δεν αλλάζει την μικροδομή. Από τα διαγράμματα μικροσκληρότητας δεν παρατηρείται μεταβολή της μικροσκληρότητας για παραμονή στις θερμοκρασίες αυτές για περισσότερες των 4 ωρών.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η μεταβολή της μικροσκληρότητας με το χρόνο θερμικής κατεργασίας για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων.





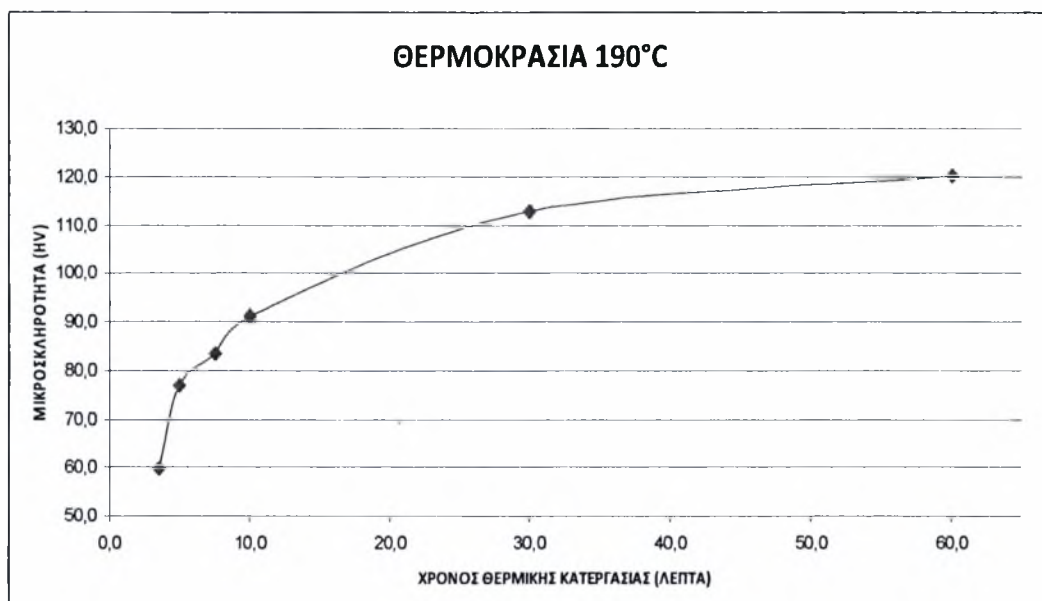
Διάγραμμα 3.13 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος 6013-T6 με το χρόνο θερμικής κατεργασίας.

Στη συνέχεια, δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο θερμικών κατεργασιών σε θερμοκρασία 500°C, με σκοπό την πλήρη διαλυτοποίηση, για δύο ώρες. Μετά την απότομη ψύξη τους σε θερμοκρασία δωματίου, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία γήρανσης (aging) στους 190°C, σύμφωνα με το πρόγραμμα του ακόλουθου πίνακα (Πίνακας 3.6). Σκοπός των θερμικών κατεργασιών που ακολουθούν είναι η προσομοίωση της ΘΕΖ<sub>1</sub>.

Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος Θερμικής Κατεργασίας (Λεπτά)					
	3,5	5	7,5	10	30	60
190°						

Πίνακας 3.6 – Πρόγραμμα Θερμικών Κατεργασιών Γήρανσης

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Διάγραμμα 3.14) παρουσιάζεται η μεταβολή της μικροσκληρότητας μετά από τις θερμικές κατεργασίες γήρανσης. Ενεργοποιείται η διάχυση και δημιουργούνται οι φάσεις ισχυροποίησης του κράματος και διεύρυνση αυτών. Στα πρώτα δέκα λεπτά η αύξηση της σκληρότητας είναι πολύ γρήγορη, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης ελαττώνεται. Στα πρώτα 3,5 λεπτά η σκληρότητα παίρνει την τιμή των 60HV, στα δέκα λεπτά φτάνει στα 91HV, ενώ στην μία ώρα έχει την τιμή των 120HV.



Διάγραμμα 3.54 – Μεταβολή της μικροσκληρότητας κράματος αλουμινίου 6013-T6 με θερμική κατεργασία στους 190°C

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Διάγραμμα 3.15) παρουσιάζεται η αντιστοιχία του προφίλ μικροσκληρότητας του κράματος 6013-T6 συγκολλημένου με την μέθοδο TIG και με συνθήκες όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, με τις ισόθερμες θερμικές κατεργασίες της παρούσας διατριβής. Αριστερά της ελάχιστης τιμής σκληρότητας της ΘΕΖ (ΘΕΖ<sub>1</sub>), η αντιστοίχιση έχει γίνει την ακολουθία θερμικής κατεργασίας διαλυτοποίησης και τις ισόθερμες θερμικές κατεργασίες γήρανσης στους 190°C. Η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, ξεπερνάει αυτή της διαλυτοποίησης και πραγματοποιείται εκ νέου καθίζηση στο κράμα. Η περιοχή δεξιά της ελάχιστης τιμής σκληρότητας της ΘΕΖ (ΘΕΖ<sub>2</sub>) έχει αντιστοιχηθεί με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες υπεργήρανσης. Στην περιοχή αυτή, η θερμοκρασία κατά τη συγκόλληση είναι χαμηλότερη από αυτή της διαλυτοποίησης και το κράμα υπόκειται σε υπεργήρανση.

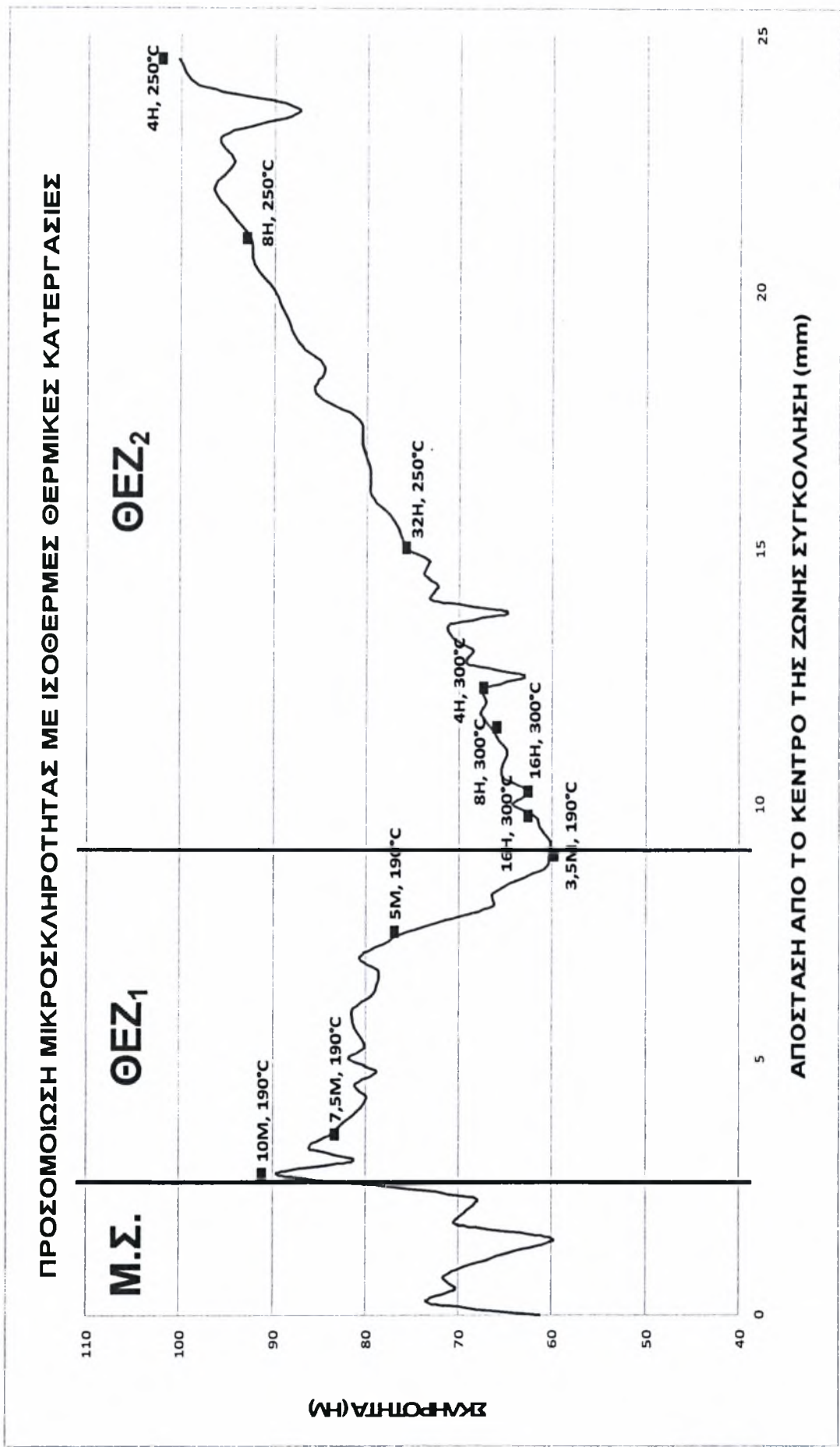
Στην αντιστοίχιση των σημείων της ΘΕΖ<sub>1</sub>, για την επίτευξη της ελάχιστης μικροσκληρότητας απαιτούνται 3,5 λεπτά θερμικής κατεργασίας, ενώ για την επίτευξη της μέγιστης απαιτούνται 10 λεπτά. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης η θερμοκρασία στη ΘΕΖ<sub>1</sub> κοντά στην περιοχή Μ.Σ. είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη στα όρια της ΘΕΖ<sub>1</sub> με την ΘΕΖ<sub>2</sub>. Το γεγονός αυτό έχει ως επακόλουθο

το υλικό στη περιοχή αυτή, κατά τη διάρκεια της ψύξης και μόλις η θερμοκρασία πέσει κάτω από όριο της διαλυτοποίησης, να παραμένει την περισσότερη ώρα σε θερμοκρασία που προκαλεί καθίζηση, με αποτέλεσμα την μέγιστη σκληρότητα στην περιοχή. Στην περιοχή της ΘΕΖ<sub>1</sub> που είναι στο όριο της ΘΕΖ<sub>1</sub> με την ΘΕΖ<sub>2</sub>, η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλότερη και κατά τη διάρκεια της ψύξης και μόλις η θερμοκρασία πέσει κάτω από όριο της διαλυτοποίησης το υλικό παραμένει λιγότερη ώρα σε θερμοκρασία που προκαλείται γήρανση (άνω των 190°C). Η σκληρότητα που παρατηρείται είναι η ελάχιστη στη ΘΕΖ<sub>1</sub>.

Στην περιοχή ΘΕΖ<sub>2</sub> η αντιστοίχιση στο όριο των περιοχών ΘΕΖ<sub>2</sub> και ΘΕΖ<sub>1</sub> έχει γίνει με ισόθερμη θερμική κατεργασία γήρανσης στους 300°C διάρκειας 16 ωρών. Όσο προχωράει η ΘΕΖ<sub>2</sub> προς τα δεξιά, η αντιστοίχιση γίνεται με μικρότερους χρόνους θερμικής κατεργασίας στους 300°C. Συνεχίζοντας, η αντιστοίχιση γίνεται με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες χαμηλότερης θερμοκρασίας (250°C) και με χρόνους που ξεκινούν από τις 24 ώρες και μειώνονται στις 4 ώρες. Χαμηλότερη θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας σημαίνει μικρότερος ρυθμός γήρανσης, άρα μικρότερη πτώση στην μικροσκληρότητα του κράματος.

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, στην περιοχή της ΘΕΖ<sub>2</sub> κοντά την ΘΕΖ<sub>1</sub>, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι πολύ υψηλή (οριακά κάτω από αυτή της διαλυτοποίησης) με αποτέλεσμα την ταχεία διεύρυνση των φάσεων ισχυροποίησης. Ταυτόχρονα, λόγω της υψηλότερης τιμής που παρουσιάζει στη ΘΕΖ<sub>2</sub>, η περιοχή αυτή παραμένει την περισσότερη ώρα σε θερμοκρασία που προκαλεί υπεργήρανση συγκρινόμενη με την υπόλοιπη ΘΕΖ<sub>2</sub>. Όσο προχωράει η ΘΕΖ<sub>2</sub>, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι χαμηλότερη και συνεπώς οι αντίστοιχες περιοχές παραμένουν λιγότερο χρόνο σε θερμοκρασία που προκαλεί υπεργήρανση. Ταυτόχρονα, χαμηλότερη θερμοκρασία τεμαχίου συνεπάγεται μικρότερος ρυθμός διεύρυνσης. Έτσι, η αντιστοίχιση έχει γίνει με ισόθερμη θερμική κατεργασία υψηλής (σχετικά) θερμοκρασίας και χρονικής διάρκειας, ενώ όσο προχωράει η ΘΕΖ<sub>2</sub> μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος θερμικής κατεργασίας αλλά και η απαιτούμενη ταχύτητα διεύρυνσης, που μεταφράζεται σε μείωση της θερμοκρασίας κατεργασίας.

Είναι φανερό ότι η αντιστοιχία μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια, σε όλο το εύρος της ΘΕΖ. Με τη χρήση μιας μήτρας θερμικών κατεργασιών, με αρχική προσέγγιση αυτή που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, μπορεί να προσομοιωθεί κάθε σημείο της ΘΕΖ.



Διάγραμμα 3.15 – Προσομοίωση Μικροσκληρότητας με Ισόθερμες Θερμικές Κατεργασίες

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βασικότερο συμπέρασμα της παρούσας διατριβής είναι ότι με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες είναι δυνατόν να γίνει προσομοίωση της διαμόρφωσης της δομής της ΘΕΖ των συγκολλήσεων θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου.

Πραγματοποιώντας μια σειρά ισόθερμων θερμικών κατεργασιών σε δοκίμια ίδιου κράματος και κατάστασης (temper) με τα προς συγκόλληση τεμάχια, μπορεί να δημιουργηθεί μια αντιστοιχία Θερμοκρασίας – Χρόνου με την μικροσκληρότητα του υλικό.

Γνωρίζοντας το προφίλ μικροσκληρότητας των συγκολλημένων τεμαχίων, με την βοήθεια της αντιστοιχίας μπορεί να δημιουργηθεί με θερμική κατεργασία η μικροδομή που πρέπει να μελετηθεί, σε μεγαλύτερη κλίμακα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσει να γίνει μελέτη των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς σε διάφορες καταπονήσεις, της συγκεκριμένης δομής πλέον, που αντιστοιχούν στις καταπονήσεις σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με ιδιαίτερη ευκολία.



## 5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ

Σε αυτή την εργασία έγινε μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της μεταβολής μικροσκληρότητας στη ΘΕΖ συγκόλλησης με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες. Η προσομοίωση είναι εφικτή.

Με βάση την εργασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σειρά θερμικών κατεργασιών ώστε να προσεγγιστούν όλα τα σημεία της ΘΕΖ. Ακολούθως, δοκίμια κατάλληλα για μηχανικές δοκιμές μπορούν να υποβληθούν στις αντίστοιχες θερμικές κατεργασίες για μεταβολή της μικροδομής τους, και να υποβληθούν στις αναγκαίες μηχανικές καταπονήσεις για μελέτη της αντοχής τους. Με την μεθοδολογία αυτή μπορεί να μελετηθεί πολύ αναλυτικά κάθε σημείο της ΘΕΖ των συγκολλήσεων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASM Metals Handbook, Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special – Purpose Materials, ASM International Materials, Ohio, USA, 1992.
- Άννα Ζερβάκη, Συγκολλήσεις Κραμάτων Αλουμινίου με LASER: Πειραματική Μελέτη και Προσομοίωση της Διαμόρφωσης Μικροδομής της ΘΕΖ, Διδακτορική Διατριβή, ΤΜΜΒ, 2004.
- Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, σημειώσεις συγκολλήσεων.
- Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, Materials park, Ohio, 1996.
- Θ. Κερμανίδης, Εργαστήρια Αντοχής Υλικών I & II, Πάτρα 1994.
- Μεταλλουργική Διερεύνηση της Κόπωσης σε Συγκολλήσεις LASER Αεροπορικών Κραμάτων Αλουμινίου, Παρουσίαση 3<sup>ου</sup> Συνεδρίου Μεταλλικών Υλικών, Α. Ζερβάκη, Π. Τσιγανίδου, Γ.Ν.Χαϊδεμενόπουλος
- Al. Th. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis, "Fatigue Crack Growth Analysis of 2024 T3 Aluminum Specimens Under Aircraft Service Spectra", *Fatigue Fract.Engng. Mater. Struct.*, Vol. 24, pp.699-710, 2001.
- W. V. Vaidyaa, M. Koçak, M. Horstmann, V. Ventzkea, M. Pakdila and J. Hackiusb, "Effect of Porosity on Fatigue Crack Propagation Behaviour of a Laser Beam Welded Aluminium Alloy", *Proceedings of the International Conference, Fatigue Design 2005*, November 16-18, 2005,
- Zervaki, A.D., Haidemenopoulos G.N. Computational kinetics Simulation of the Dissolution and Coarsening in the HAZ during Laser Welding of 6061-T6 Al-alloy. *Research Supplement, Welding Journal*, August 2007. pp. 211-220.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091659