



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων  
συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου με τη  
μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της  
νανοδιείσδυσης**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΠΥΡΙΔΩΝ Ν. ΣΚΙΑΔΑΣ**

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2014**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων  
συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου με τη  
μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της  
νανοδιείσδυσης**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΠΥΡΙΔΩΝ Ν. ΣΚΙΑΔΑΣ**

**Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Κ.Α. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ**

**Δ. Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ**

**Ε. ΚΟΝΤΟΥ-ΔΡΟΥΓΚΑ, Καθηγήτρια ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2014**



## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της νανοδιείσδυσης» εκπονήθηκε στη Σχολή Χημικών Μηχανικών (Ε.Μ.Π.) στην Εργαστηριακή Μονάδα Νανομηχανικής και Νανοτεχνολογίας του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών.

Με την ολοκλήρωση της Μεταπτυχιακής αυτής εργασίας νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στα άτομα που συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Α. Χαριτίδη για την ανάθεση της εργασίας αυτής και κυρίως για τη χρήσιμη καθοδήγηση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο Διδάκτορα Δημήτρη Δραγατογιάννη για την συνεχή υποστήριξη, καθοδήγηση και τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις μας για τα επιστημονικά θέματα μοντελοποίησης.

Με την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών θέλω να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στους γονείς μου Νίκο και Λένα για την στήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου, την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και αγάπη τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά τη **μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού** για συγκολλημένα κράματα αλουμινίου, όπου στη ζώνη ανάδευσης έχει πραγματοποιηθεί προσθήκη νανοσωματιδίων.

Πιο συγκεκριμένα τα κράματα τα οποία έχουν συγκολληθεί είναι αλουμίνια της σειράς AA6082 και AA5083 και στη ζώνη συγκόλλησης έχουν προστεθεί νανοσωματίδια TiC.

Η προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου «**ANSYS**». Τα υπολογιστικά πειράματα αφορούν δυο βασικές προσομοιώσεις αυτή της **εγκάρσιας** και αυτή την **διαμήκους διεύθυνσης συγκόλλησης**, σε σχέση με τα φορτία εφελκυσμού. Όπου και για τις δυο περιπτώσεις εξετάστηκε η **ελαστική και πλαστική παραμόρφωση**.

Το λογισμικό ANSYS, βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων και είναι ένα ευρέως διαδεδομένο λογισμικό για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής με σύνθετη γεωμετρία, διαφορετικές καταστατικές σχέσεις και συνοριακές συνθήκες.

Συγκεκριμένα, στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς συγκολλήσεων με τον όρο σύνθετη γεωμετρία δεν εννοούμε μόνο τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, αλλά και την **κατανομή των τοπικών μηχανικών ιδιοτήτων** και διαφορετικά χαρακτηριστικά δομής που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της διεργασίας. Δηλαδή την **διαμόρφωση των Μέτρων Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής κατά το μήκος του δοκιμίου**, όπως αυτά διαμορφώνονται μετά από μια κατεργασία όπως είναι αυτή της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση (FSW).

Η μέθοδος με την οποία αντλούνται τοπικά οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής γίνεται μέσω της τεχνικής της νανοδιείσδυσης.

## ABSTRACT

This thesis concerns the **modeling tensile experiment** welded aluminum alloys, where the stir zone has been added nanoparticles.

More specifically, the alloys which have been welded are series aluminum AA6082 and AA5083 and the weld zone have been added nanoparticles TiC.

The simulation experiment tensile performed with the help of the software package «**ANSYS**». Computational experiments involving two basic simulations that the **transverse** and the **longitudinal direction of this welding**, relative to tensile loads. Where for both cases examined the **elastic and plastic deformation**.

The software ANSYS, based on the theory of **finite elements** and is a widely used software to solve engineering problems with complex geometry, different constitutive relations and boundary conditions.

Specifically, the simulation of the mechanical behavior of welds with the word complex geometry does not just mean design features, but also the distribution of **local mechanical properties** and structure of different features that arise as a result of the process. That the formation of **elastic modulus and yield strength along the length of the specimen**, as they are formed after a treatment such as that of welding and friction stir (FSW).

The method by which locally derived values of modulus and yield strength is through the technique of nano indentation.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ</b> .....	<b>2</b>
1.1. Ιστορική Αναδρομή .....	2
1.2. Μέθοδος .....	2
1.3. Παράμετροι.....	5
1.3.1. - ) .....	6
.....	6
1.4. Ζώνες Συγκόλλησης.....	7
1.4.1. Ζώνη ανάδευσης (stir zone).....	7
1.4.2. νη νη (Thermomechanical Affected Zone).....	8
(Heat Affected Zone) .....	8
1.6. Περιβάλλον – Οικονομία – Πλεονεκτήματα .....	9
1.7. Μειονέκτημα.....	11
1.8. ....	11
1.9. Εφαρμογές .....	12
1.10. Μελλοντικές εφαρμογές – Προβλήματα .....	12
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>14</b>
<b>2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ</b> .....	<b>16</b>
2.1 Τα κράματα του Αλουμινίου .....	17
2.1.1. Κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου και η επίδρασή τους .....	17
2.1.2. Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου .....	17
.....	20
.....	22
.....	22
5083 .....	24
2.1.6 Κράμα Αλουμινίου 6082.....	25
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>27</b>
<b>3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ</b> .....	<b>29</b>
Vickers.....	31
.....	33
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>35</b>

.....	37
.....	37
.....	38
.....	46
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....</b>	<b>52</b>
<b>5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΟΛΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ .....</b>	<b>55</b>
5.1. Μηχανική συμπεριφορά μετάλλων .....	55
5.2. Θραύση.....	57
5.2.2. Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση.....	58
5.3. Κόπωση.....	59
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....</b>	<b>62</b>
<b>6. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....</b>	<b>64</b>
.....	64
.....	64
.....	69
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....</b>	<b>73</b>
<b>7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....</b>	<b>74</b>
<b>7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>75</b>
7.1 Εισαγωγή .....	75
7.2 Μέρος Πρώτο: Συγκόλληση .....	76
7.2.1 Πρώτες ύλες.....	76
7.2.2 Εξοπλισμός FSW .....	78
7.2.3 Μακροσκοπική και Μικροσκοπική Παρατήρηση.....	78
7.3 Μέρος Δεύτερο: Μελέτη Νανομηχανικών Ιδιοτήτων.....	80
7.4 Μέρος Τρίτο: Πειράματα εφελκυσμού .....	85
<b>8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....</b>	<b>88</b>
8.2 Προσομοίωση μηχανικών ιδιοτήτων μέσω πεπερασμένων στοιχείων. ....	90
.Σ. ....	90
.Σ. ....	94
8.3 Μοντέλο Πειράματος Εφελκυσμού.....	96
8.3.1 Προσομοίωση εγκάρσιας συγκόλλησης.....	96



8.3.1.1 Προσομοίωση ελαστικής περιοχής.....	96
8.1.1.1 Επίδραση της πυκνότητας διακριτοποίησης.....	99
8.3.1.2 Προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στην πλαστική περιοχή.....	107
8.3.1.2.1 Υπολογιστικό Πείραμα 1 στην Πλαστική περιοχή.....	109
8.3.1.2.2 Υπολογιστικό Πείραμα 2 στην Πλαστική περιοχή.....	110
8.3.1.2.3 Υπολογιστικό Πείραμα 3 στην Πλαστική περιοχή.....	112
8.3.1.2.4 Υπολογιστικό Πείραμα 4 στην Πλαστική περιοχή.....	113
8.3.1.2.5 Αξιοποίηση των δεδομένων.....	116
8.3.1.2.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	119
8.3.2 Προσομοίωση διαμήκους συγκόλλησης.....	124
8.3.2.1 Προσομοίωση στην ελαστική περιοχή.....	124
8.3.2.2 Προσομοίωση πλαστικής περιοχής.....	126
8.3.2.2.1 Πείραμα 1 <sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή.....	127
8.3.2.2.2 Πείραμα 2 <sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή.....	128
8.3.2.2.3 Πείραμα 3 <sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή.....	129
8.3.2.2.4 Πείραμα 4 <sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή.....	131
8.3.2.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	133
8.3.2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την διαμήκη συγκόλληση.....	135
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 8ου Κεφαλαίου.....</b>	<b>140</b>
<b>9. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –</b>	
<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>142</b>
<b>9.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....</b>	<b>142</b>
<b>9.2 Μελλοντική Έρευνα.....</b>	<b>145</b>

# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

# 1. Εισαγωγή στη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

## 1.1. Ιστορική Αναδρομή

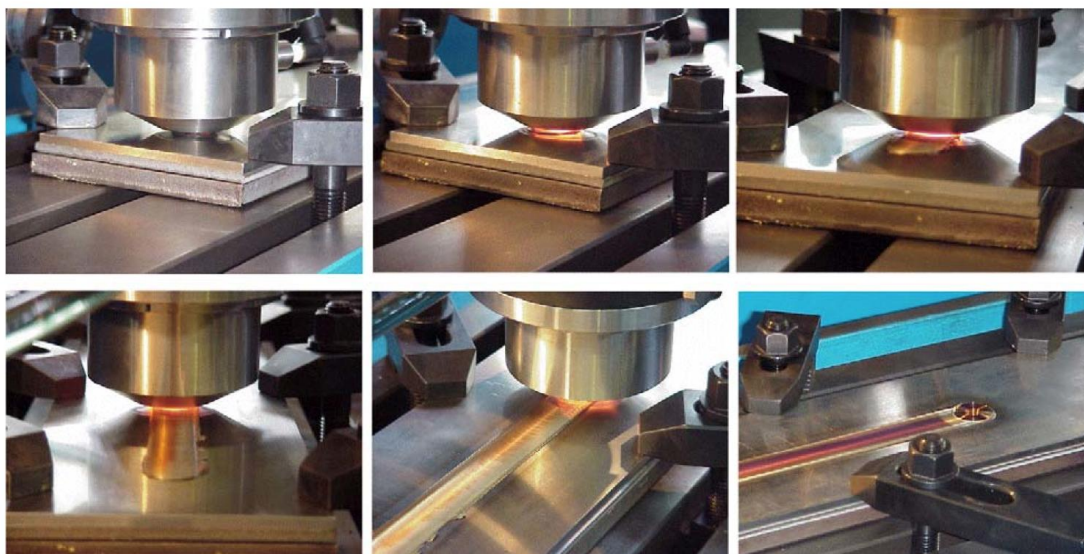
Τον Οκτώβριο του 1945 σε μια επιστημονική δημοσίευση

μεταξύ

[1]. Στη

συνέχεια το 1991 στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων κατοχυρώθηκε η μέθοδος αυτή ως πατέντα. Υιοθετήθηκε αρχικά στην βιομηχανία εναερίων επίγειων και θαλάσσιων μέσων μεταφοράς προς σύνδεση κραμάτων αργιλίου,

[2].



Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση βημάτων συγκόλλησης με την μέθοδο FSW

## 1.2. Μέθοδος

Είναι μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, όπου μέσω της τριβής στα προς συγκόλληση υλικά, παρέχεται επαρκείς ποσότητα θερμότητας ώστε να χάσουν τοπικά ποσοστό της σκληρότητας τους και κατά συνέπεια να

παραμορφωθούν πλαστικά, χωρίς να φτάσουν στο σημείο τήξης τους. Αυτό

συ

σε θερμι

Friction Stir Welding

“non-consumable” περ

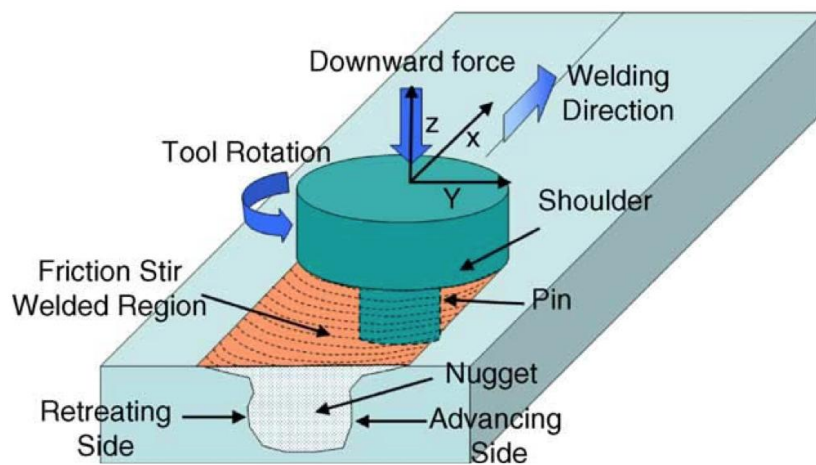
“pin

“shoulder”

και προσδένονται

με την εφαρμογ

της  
του αναμεμιγμένου



Εικόνα 1.2: Αρχή της μεθόδου FSW

Οι εσς ναι η ρμανση (heating) του ου, η του  
(material flow) στε να η νδεση και λος, η τηση  
(containment) του τω το ο.  
Για να ας τητας λληση (sound weld), η  
α του πει να ο , ρια  
μφωνα με τη τη των St-Georges et al [3]:

(T<sub>liquidus</sub>),

τ .

2. του shoulder

το 0.7·T<sub>liquidus</sub>.

Η

εκ

“shoulder”

“pin

το

“shoulder”

από τη σχέση:

$$q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3$$

- q<sub>0</sub>
- (μ)
- (P )
- (N)
- (R)

Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση, η

του.

### 1.3. Παράμετροι

1.3.1.

-

)

της F.S.W

π

σε σ

.

σημ

της FSW

το περιουχένιο

:

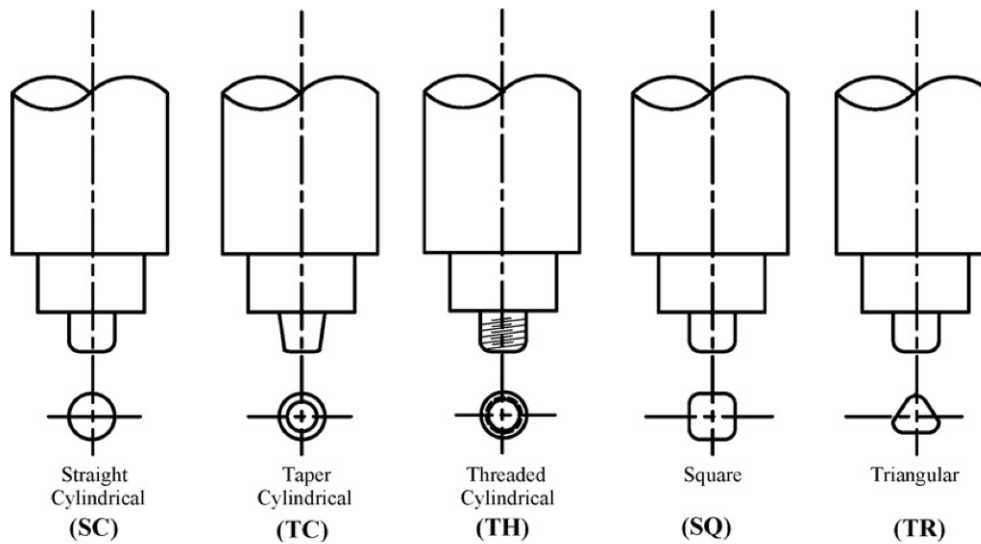
που εφάπτονται

του περιουχένι

αναμιγνύει

τη συ

.



Εκκ

F.S.W

## 1.4. Ζώνες Συγκόλλησης

(stir zone or weld nugget  
 (Thermomechanical Affected Zone, TMAZ  
 (Heat Affected Zone, HAZ) [2].

### 1.4.1. Ζώνη ανάδευσης (stir zone)

και

που συντελείται

FSW

η.

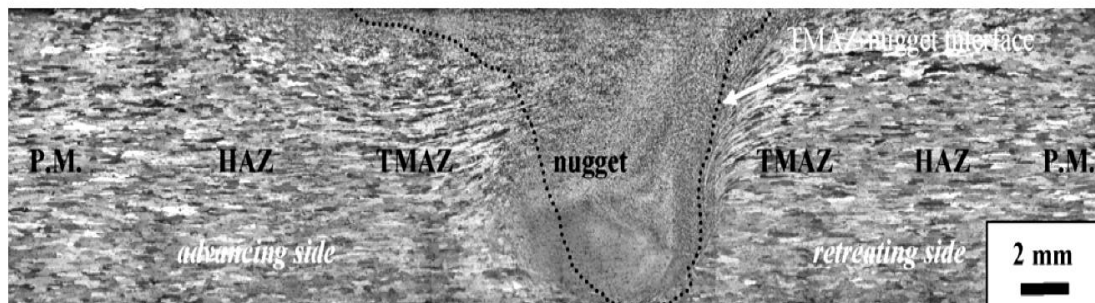


1.4.2.  
Zone)

νη νη (Thermomechanical Affected

(Heat Affected Zone)

FSW



Εικόνα 1.4: Μικρογραφία κάθετης τομής της FSW.

Στην εικόνα 1.4 που αφορά την μικρογραφία κάθετης τομής της FSW παρατηρείται η αλλαγή μεγέθους των κόκκων ανάλογα με την ζώνη συγκόλλησης που βρίσκονται, αυτό οφείλεται στην θερμότητα που προσδόθηκε στο μέταλλο μέσω της τριβής και της μηχανικής παραμόρφωσης

## 1.5. Ροή του υλικού

$\Omega$

ταχ

του

υλικ

. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζεται η ροή του υλικού [3].



Εικόνα 1.5: Η ροή του υλικού

## 1.6. Περιβάλλον - Οικονομία - Πλεονεκτήματα

η F.S.W

κλπ [2, 6].

FSW

,

H

, δε

χρησι

- "shielding gases

- "argon gas"

FSW

FSW

των  $1,28 \cdot 10^{13}$  Btu/year

500

million lb/year

που

FSW

[6].

συγ

GTAW και GMAW

επαναληψι

των

συγκ

και

2xxx και 7xxx

και η δυ

[7, 8].

## 1.7. Μειονέκτημα

(end crater or pin hole  
FSW

- "exit hole"  
επίση

ως tunnel defect, kissing bond, cracks

[8].

με την κ

. Ένα ακόμα μειο

π

την FSW

## 1.8.

ν

. Έχει παρατηρηθεί

κα

να αναφερθ

FSW

## 1.9. Εφαρμογές

της FSW

ολοκ

60000m

FSW

TWI

Space Shuttle external tank,  
Boeing Delta II and Delta IV Expendable Launch Vehicles and the SpaceX Falcon  
1 rocket, EclipseAviation etc

ς FSW

το TWI

και επισ

## 1.10. Μελλοντικές εφαρμογές – Προβλήματα

(R&D

departments

, τα ο

FSW

των

(high-performance alloys

FSW

των Mishra et al

:

✓

✓

✓

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- 1.H. Klopstock, A. Rupert. An Improved method of joining or welding metals. Patent Specification (1945)
- 2.Balasubramanian,V.: Relationship between base metal properties and friction stir welding parameters Materials Science and Engineering A 480, 2008, P.397-403
- 3.St-Georges,L.;Dasylva Raymond,P.;Kiss,L.I.;Perron,A.L.: Prediction of optimal parameters of friction stir welding 6 Friction Stir Welding Symposium, Saint Sauveur (Kanada) 2006
4. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R, vol 50, pp 1-78, 200510.
5. M. Guerra, C. Schmidt, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes, “Flow patterns during friction stir welding”, Materials Characterization, vol. 49, no. 2, pp 95-101, 2002.
6. The Welding Institute- [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)
7. Doubourg,L.;Dachaux,P.: Design and properties of FSW tools: A literature review 6 Friction Stir Welding Symposium, Saint-Sauveur (Kanada) 2006
8. Βάϊα Α. Αντωνακη. 2012. Μεταπτυχιακή εργασία ΕΜΠ «Χαρακτηρισμός προηγμένων δομών παραγομένων με χρήση της κατεργασίας δια τριβής με ανάδευση (FSP)»
- 9.Schofer,P.: Rührreibschweißen Wärmearmes Verbindenvon Aluminiumlegierungen Material Wissenschaft und Werkstofftechnik 30/11,1999, P.693-696.
10. Rajiv S. Mishra and Murray W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, Ch.14, p.290, (2007)

# 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο





## **2.1 Τα κράματα του Αλουμινίου**

### **2.1.1. Κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου και η επίδρασή τους**

- Με την προσθήκη χαλκού έως 12% προκαλείται βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας, η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
- Με την προσθήκη χαμηλού ποσοστού σιδήρου βελτιώνεται η αντοχή και η σκληρότητα καθώς μειώνεται η πιθανότητα θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση.
- Η προσθήκη Μαγγανίου βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με την προσθήκη σιδήρου τη χυτευσιμότητα.
- Η προσθήκη μαγνησίου βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
- Η προσθήκη του πυριτίου, βελτιώνει τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
- Η προσθήκη Ψευδαργύρου, μειώνει την τη χυτευσιμότητα, άλλα, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει την μηχανική αντοχή.

### **2.1.2. Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου**

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminium Association (A. A.), αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερεις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης.

Όσον αφορά τα κράματα διαμόρφωσης, ο πρώτος αριθμός αναφέρεται στο κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος αριθμός δηλώνει τροποποιήσεις των

ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Οι δύο τελευταίοι αριθμοί, της σειράς 1XXX, δηλώνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%. Στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

Όσον αφορά τα κράματα χύτευσης ο πρώτος αριθμός φανερώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης αντίστοιχα ο δεύτερος και τρίτος αριθμός υποδηλώνει την ειδική κατηγορία του κράματος την οικείας ομάδας. Επιπλέον ο τέταρτος αριθμός που χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους αριθμούς αναφέρεται στη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης:

- το μηδέν (0) συμβολίζει το χυτό που έχει την τελική του μορφολογία με κατευθείαν χύτευση
- το ένα (1) συμβολίζει το πλίνθωμα.
- μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης συμβολίζεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

**Πίνακας 2.1: Προσθήκες στοιχείων ανάλογα με το κωδικό κράματος αλουμινίου**

<b>ΚΩΔΙΚΟΣ</b>	<b>ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ</b>
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99.00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και χαλκός ή μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

και στην π

»

Πίνακας 2.2: Κωδικός κραμάτων Αλουμινίου και η αντίστοιχη κατεργασία.

F	
O	
H	E
H1X	<p>)</p> <p>25%</p> <p>50%</p> <p>75%</p> <p>100%</p> <p>H</p>
H2X	
H3X	
T	

W	

, το

εγκλεισμ

•  
**1000**

αυτ

ν 99% Al

εν ψυχρώ

τι

κ.α.

•

3000

του Mn στο Al

1,8% στους 659ο C

Το Mn

με το Al

Al<sub>6</sub>Mn

του Al

Mn

τη

Al<sub>6</sub>Mn

κη Mg

Al-Mn

•

5000

ς του Mg

Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>

, σε

κατεργα

2000, 6000 και 7000.

• κ

**6000**

Al - Mg - Si

Mg<sub>2</sub>Si

Mg και Si

(Mg/Si προς 1,7

Si

Mn

του 0,8%, και Cr, σε

μ

τους 150°C

**ου**

Τα ειδ

:

- 
- 
- 
- 
- 

ως εξής:

:

μικρ

:

πα

:

αυ

ΕΥΤΗΚΤΙΚ

:

- 

**5XX.X**



η εξαιρετι

[1].

## 5083

. Στους πίνακες (2.3, 2.4, 2.5) που ακολουθούν παρουσιάζεται η χημική σύσταση, οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες του κράματος 5083, αντίστοιχα [2, 3].

Πίνακας 2.3: Χημική σύσταση του κράματος AA5083

	%
Si	0,4
Fe	0,4
Cu	0,1
Mn	0,4 - 0,1
Mg	4,0 - 4,9
Zn	0,25
Ti	0,15
Cr	0,05 - 0,25
Al	Balance

Πίνακας 2.4: Μηχανικές ιδιότητες του κράματος AA5083

Temper	H32	0/H111
Proof Stress 0.2% (MPa)	240	145
Tensile Strength (MPa)	330	300
Shear Strength (MPa)	185	175
Elongation A5 (%)	17	23

<b>Hardness Vickers (HV)</b>	15	75
------------------------------	----	----

Πίνακας 2.5: Φυσικές ιδιότητες του κράματος AA5083

Property	Value
<b>Density</b>	2.65 g/cm <sup>3</sup>
<b>Melting Point</b>	570°C
<b>Modulus of Elasticity</b>	72 GPa
<b>Electrical Resistivity</b>	0.058x10 <sup>-6</sup> Ω.m
<b>Thermal Conductivity</b>	121 W/m.K
<b>Thermal Expansion</b>	25x10 <sup>-6</sup> /K

:

- 
- 
- 
- 
- 

### 2.1.6 Κράμα Αλουμινίου 6082

Το κράμα αλουμινίου 6082 είναι ένα κράμα με εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Έχει την υψηλότερη αντοχή των κραμάτων της σειράς 6000 και είναι γνωστό ως δομικό κράμα. Ως ένα σχετικά νέο κράμα, με την υψηλή αντοχή έχει αρχίσει να αντικαθιστά το κράμα AA6061 σε πολλές εφαρμογές. Έχει πολύ καλή ικανότητα συγκόλλησης, αλλά η αντοχή του μειώνεται στη ζώνη συγκόλλησης.

#### Εφαρμογές του AA6082:

Σε κατασκευές που δέχονται ισχυρές δυνάμεις όπως: δικτυώματα, γέφυρες, γερανοί. Επιπλέον χρησιμοποιείται στις μεταφορές.

Στους πίνακες (2.6, 2.7) που ακολουθούν παρουσιάζεται η χημική σύσταση του κράματος και οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες, αντίστοιχα [2, 3].

Πίνακας 2.6: Χημική σύσταση του κράματος A60823

<b>Χημική Σύσταση AA6082 - T6</b>	
<b>Στοιχείο</b>	<b>Σύσταση (% κ.β.)</b>
<b>Al</b>	97.67
<b>Cr</b>	-
<b>Cu</b>	-
<b>Fe</b>	0.34
<b>Mg</b>	0.56
<b>Mn</b>	0.30
<b>Si</b>	1.13
<b>Ti</b>	-
<b>Zn</b>	-

Πίνακας 2.7: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του κράματος A60823

<b>Φυσικές και μηχανικές Ιδιότητες AA6082</b>	
<b>ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΤΙΜΗ</b>
<b>Πυκνότητα</b>	2700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Σημείο τήξης</b>	555 °C
<b>Μέτρο ελαστικότητας</b>	71,7 GPa
<b>Θερμική αγωγιμότητα</b>	180 W/mK
<b>Ηλεκτρική αντίσταση</b>	0.38 x 10 <sup>-6</sup> Ωm
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό</b>	340 Typical Mpa
<b>Σκληρότητα κατά Vickers</b>	110 HV0.3
<b>Poisson Ratio</b>	0.33

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Βασιλίου Δ., Κωνσταντίνου Ι., Κωνσταντίνου Ι. «Μηχανική και συμπεριφορά των υλικών», Επιστήμη, 2008.

2. Leitão, C., Louro, R., & Rodrigues, D. M. (2012). Analysis of high temperature plastic behaviour and its relation with weldability in friction stir welding for aluminium alloys AA5083-H111 and AA6082-T6. *Materials & Design*, 37, 402-409.

3. Svensson, L. E., Karlsson, L., Larsson, H., Karlsson, B., Fazzini, M., & Karlsson, J. (2000). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloys with special reference to AA 5083 and AA 6082. *Science and technology of welding and joining*, 5(5), 285-296.

# 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### 3 Μέθοδοι Σκληρομέτρησης

:

- Η
- Η
- Η δυ
- Η
- Η ,

[1].

ASTM (American Society for Testing and Materials) και ο ISO (International Standardization Organization

. Η κανονικοπ

[2].

H

**Brinell, Rockwell και Vickers** ο  
[3].

κ

. '0

τιμές της σκληρότητας με ακρίβεια 5 - 10%. Για παράδειγμα στην περίπτωση του χαλκού, ορύχαλκου και μπρούτζου η σχέση μεταξύ της αντοχής σε εφελκυσμό και της σκληρότητας είναι:

- Για αναπτοημένα υλικά:  $\sigma_t = 0,55 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$

- Για σκληρυμένα με παραμόρφωση:  $\sigma_{\tau} = 0,40 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$
- Ενώ για το αλουμίνιο και των κραμάτων του για σκληρότητες μεταξύ 20 και 25 HB ισχύει ότι  $\sigma_{\tau} = 0,33 - 0,36 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$ .

### Vickers

	136°. H	Vickers
Brinell		
( $\delta_1$ και $\delta_2$ , σχ		120 kgf
των 0,3mm/s	30s	
Vickers		
		:

$$HV = \frac{F}{A} = 1,854 \frac{F}{\delta^2}$$

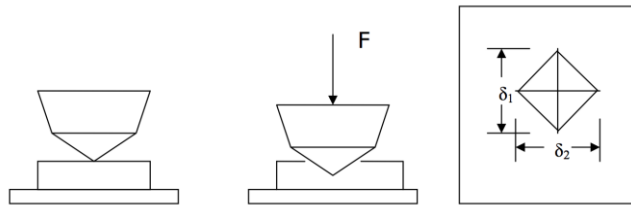
$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$$

Vickers



Vickers

H Vickers X HV/F/t.  
 15s 700 Vickers 10 kgf 700HV  
 15 s.



Εικόνα3.1: Σκληρομέτρηση Vickers. Προσδιορισμός διαγωνίων αποτυπώματος

Brinell

Vickers Brinell  
 400HV Vickers  
 [4].

- S , δηλ.  $S > 1,5$

δ, για να μ

- F:

○

0,2-0,3-0,5-1-2-3-5 Kgf

F

○

10-20-30-50-100 kgf

F.

●

τους [3], [4].

:

Για διευκ

(ASTM E

. [5], [6].



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1

», Παπασωτηρ , 1996.

2

ASTM.

3

, 2007.

4

, 2004.

5

, 2008.

6. W.F. Smith “Foundations of Materials Science and Engineering”, Mc Graw Hill,  
5<sup>th</sup> edition, 2010.

# 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

#### 4. Νανοδ

1 $\mu$ m -

(Vickers, Brinell

. Οι Oliver και Pharr

[6]:

1.

2.

διασ

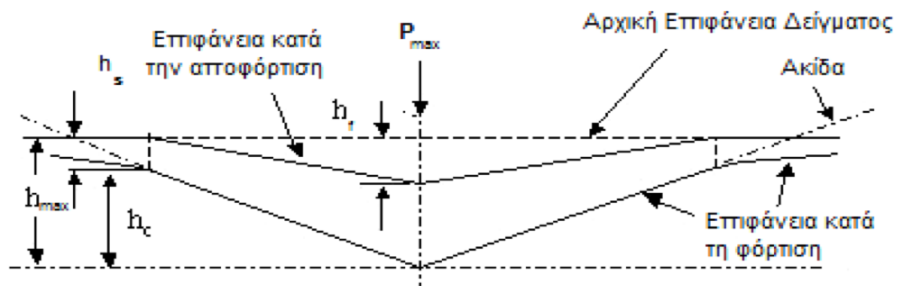
3.

ας.

την

, αποτυπ

4.1.



Σχήμα 4.1:

και οι πα

την

0

(P

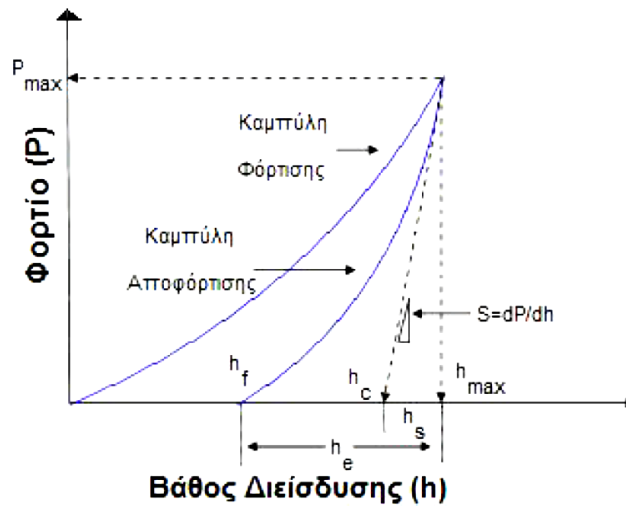
(h

4

(S

(E

(H



Σχήμα 4.2:

- :
- $h_{max}$ :
  - $P_{max}$ :
  - $h_f$
  - $h_c$
  - $h_e$
  - $h_s$

$h_c$

$$A = f(h_c).$$

1. ,
2. ,
- 3.
4. .



H 4  
τ

. To

(E  
(σ (ε Hooke: σ =  
E· ε

H 4 ,  
μη αντιστρ

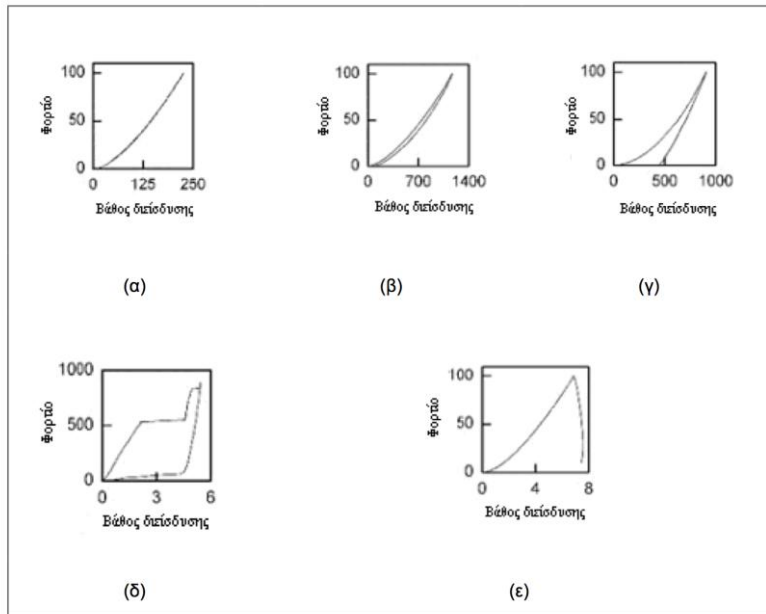
4.3γ).

H

το

-  
4

4  
[6].



Σχήμα 4.3: Διάφορα είδη παραμορφώσεων

Οι μηχαν

Oliver & Pharr

(S

, (

4.1 [7-9].

$$S = \frac{dP}{dh} \quad (4.1)$$

:

$h_c$

4.2:

$$h_c = h_{\max} - h_s \quad (4.2)$$

$h_s$

Sneddon [10].

$$\left. \begin{aligned} h_s &= \frac{\pi-2}{\pi}(h_{\max} - h_f) \\ 2\varepsilon &= \frac{\pi-2}{\pi} \\ h_{\max} - h_f &= \frac{2P}{S} \end{aligned} \right\} h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (4.3)$$

Όπου  $\varepsilon$

Berkovich  $\varepsilon$

$h_c$

A

$A=f(h_c)$ .

4.4 [4]:

$$S = \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \cdot \sqrt{A} \cdot E \quad (4.4)$$

:

- S
- A
- $E_r$

$E_r$

Sneddon

Sneddon

P h 4.5:

$$P = \frac{4 \cdot \mu \cdot \alpha}{1 - \nu} \cdot h \quad (4.5)$$

:

- $\alpha$
- $\mu$
- $\nu$

Poisson

$\alpha^2$

4.6:

$$E = 2 \mu (1 + \nu) \quad (4.6)$$

P h

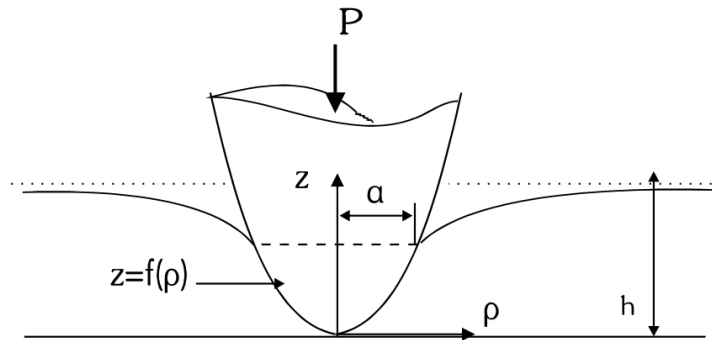
4.7:

$$\frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (4.7)$$

ι να αποδε 4

(Sneddon).

4.4.



Σχήμα 4.4: της διαδικ

$$z = f(\rho)$$

$z$   
 $f$

$P$

$h$

$\alpha$

,  $x$

$$= \rho/\alpha$$

$$\alpha \quad 0 < x$$

$$z = f(x)$$

Hankel, ο Sneddon

$P$  και  $h$

4.8:

$$h = \int_{x=0}^{x=1} \frac{f'(x) \cdot dx}{\sqrt{1-x^2}} \quad (4.8)$$

4.9:

$$P = \frac{4 \cdot \mu \cdot \alpha}{(1-\nu)} \cdot \int_{x=0}^{x=1} \frac{x^2 \cdot f'(x) \cdot dx}{\sqrt{1-x^2}} \quad (4.9)$$

f(x) ως προς x

4 :

$$P = \frac{4 \cdot \mu \cdot \alpha}{(1 - \nu)} \cdot \left[ \int_{x=0}^{x=1} \frac{f'(x) \cdot dx}{\sqrt{1-x^2}} - \int_{x=0}^{x=1} \sqrt{1-x^2} \cdot f'(x) \cdot dx \right] \quad (4.10)$$

h

4

) και να

προκύψει η σχέση (4.11):

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\alpha} &= \frac{4 \cdot \alpha \cdot \mu}{1 - \nu} \cdot \frac{dh}{d\alpha} + \frac{P}{\alpha} - \frac{4 \cdot \mu \cdot \alpha}{1 - \nu} \cdot \frac{d}{d\alpha} \int \sqrt{1-x^2} \cdot f'(x) \cdot dx \Rightarrow \\ \frac{dP}{dh} &= \frac{dP/d\alpha}{dh/d\alpha} = \frac{4 \cdot \mu \cdot \alpha}{1 - \nu} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$A = \pi \alpha^2 \text{ και } \mu = E/2(1-\nu) \quad 4.12$$

:

$$\frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (4.12)$$

4

4

$$\text{OK} \quad 4.13:$$

$$\frac{dP}{dh} = \beta \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A} \cdot E_r \quad (4.13)$$

β

:

$\beta$

$\beta$

$\beta$

$E$	Poisson $\nu$
$E_i$	Poisson $\nu_i$

4.14:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (4.14)$$

H

4.15:

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (4.15)$$

$P_{\max}$

A

$P_{\max}$

,  $\eta$

### 4.3

:

- $1\eta$

:

(compliance

Oliver & Pharr

mm/mN

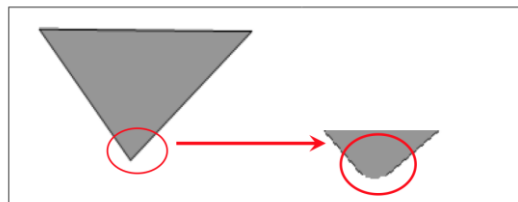
$10^7$ N/m

0.1

• 2<sup>η</sup>

:

#### 4.5). Οι Mencik και Swain



Σχήμα 4.5: Αναπαράσταση της καμπυλότητας της ακίδας



v

4

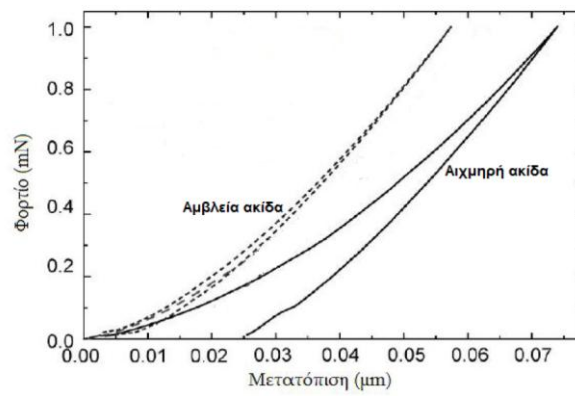
4

- 
- 
- 

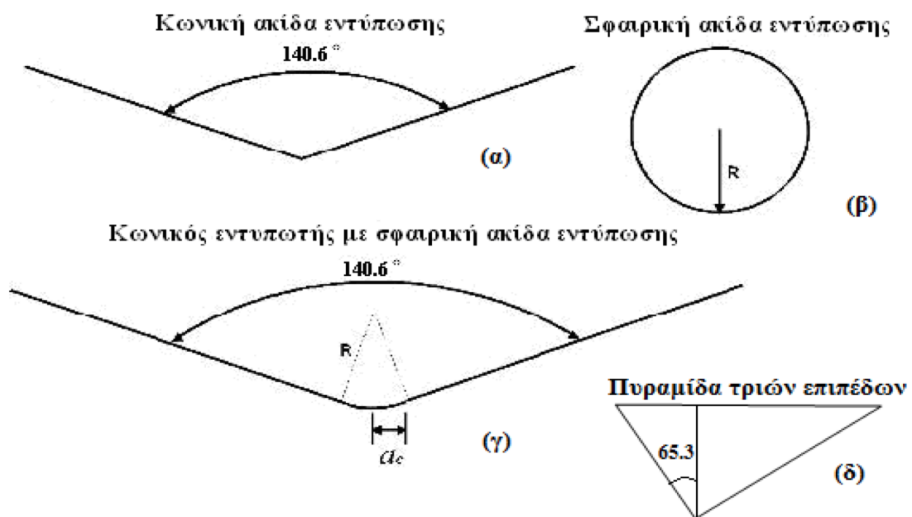
140.6°,

R και

R.



Σχήμα 4.6: Σύγκριση αμβλείας και αιχμηρής ακίδας.



Σχήμα 4.7:

R

140.6°

R.

R

$$a_c = R \cos 70.3^\circ = 0.34R$$

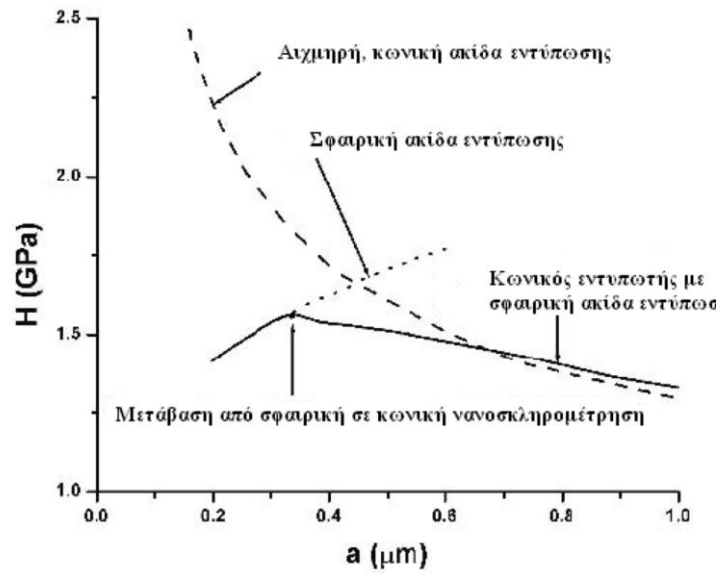
$a < a_c$

Brinell

, για  $a > a_c$

$a < a_c$

$a > a_c$



Σχήμα 4.8: Αναπαράσταση μετάβασης από σφαιρική σε κωνική νανοσκληρομέτρηση

, οι Oliver και Pharr

4.16:

$$A(h_c) = 24.5 \cdot h_c^2 + C_1 \cdot h_c + C_2 \cdot h_c^{1/2} + C_3 \cdot h_c^{1/4} + \dots + C_8 \cdot h_c^{1/228} \quad (4.16)$$

C<sub>1</sub>-C<sub>8</sub>

Berkovich.

- $3^n$  :

(pile up

Oliver & Pharr  
[16].

(thermal drift rates

0.1 nm/s

$\kappa\lambda$  ).

~45%.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου**

1. Tabor, D. The Hardness of Metals. Clarendon. Oxford U.K. **1951**.
2. Pethica, J. B.; Hutchings, R.; Oliver, W. C. *Phil. Mag. A*, 48, 593, **1983**.
3. Newey, D.; Wilkens, M. A.; Pollock, H. M. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 15, 119, **1982**.
4. Pharr, G. M.; Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic-modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 7, 1564, **1992**.
5. Zhao, M. et al. Rate- and depth-dependent nanomechanical behavior of individual living Chinese hamster ovary cells probed by atomic force microscopy. *J. Mater. Res.*, 21, 1906, **2006**.
6. Oyen, M. L.; Cook, R. F. A practical guide of nanoindentation data. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2, 396, **2009**.
7. Pharr, G. M.; Oliver, W. C.; Brontzen, F. R. *J. Mater. Res.*, 7, 613, **1992**.
8. Pharr, G. M.; Oliver, W. C. Measurement of thin-film mechanical properties using nanoindentation *MRS Bull.*, 17, 28, **1992**.
9. Tsui, T. Y.; Oliver, W. C.; Pharr G. M. *J. Mater. Res.*, 11, 752, **1996**.
10. Sneddon, I.N. *Int.J.eng.Sci.*, 3, 47, **1968**.
11. Menic, J.; Swain, M. V. *J. Mater. Res.*, 10, 1491, **1995**.
12. Lepienski, C. M.; Foerster, C. E. Nanomechanical Properties by Nanoindentation in *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* Edited by H.S. Nalwa, Vol. 7.
13. Chudoba T., Measurement of Hardness and Young's Modulus by Nanoindentation, in *Book Nanostructured Coatings*, Albano Cavaleiro and Jeff Th. M. De Hosson (Editors), Springer, pp.216-260, New York, **2006**.
14. Qu, S.; Huang, Y. Nix, W. D. Jiang, H.; Zhang, F. Wang, K. C. Indenter Tip Radius Effect on the Nix-Gao Relation in Micro- and Nanoindentation Hardness Experiments. *J. Mater. Res.*, 19, 3423, **2004**.
15. McElhaney, K. W.; Vlassak, J. J.; Nix, W. D. Determination of Indenter Tip Geometry and Indentation Contact Area for Depth-Sensing Indentation Experiments, *J. Mater. Res.*, 10, 1300, **1998**.
16. Thurn, J; Cook, R. F. *J. Mater. Res.*, 17, 5, **2002**.
17. Carrillo, F.; Gupta, S.; Balooch, M.; Marshall, S. J.; Marshall, G. W.; Pruitt, L.;

- Puttlitz, C. M. Nanoindentation of polydimethylsiloxane elastomers: Effect of crosslinking, work of adhesion, and fluid environment on elastic modulus. *J. Mater. Res.*, 20, 2820, **2005**.
18. Wei J.P., Shen X. W., Lin F. J., *Journal of Non-Crystalline Solids* 354, 3911-3918, **2008**
  19. Li H. W., Shin K., Lee G. C., Wei C. B., Zhang H. T., He Z. Y., *Materials Science and Engineering A* 478, 371-375, **2008**.
  20. Briscoe, B. J. et al. *J. Phys. D, Appl. Phys.* 31, 2395, **1998**.
  21. Tang, B.; Ngan, A. H. W. *J. Mater. Res.*, 18, 1141, **2003**.
  22. Cheng, Y. T.; Cheng, C. M. *Mater. Sci. Eng. R*, 44, 91, **2004**.
  23. Rho, J. Y.; Pharr, G. M. *J. Mater. Sci.: Mater. Med.*, 10, 485, **1999**.
  24. Oyen, M. L. *J. Mater. Res.*, 20, 2094, **2005**.
  25. Kaufman, J.D.; Klapperich, C. M. Surface detection errors cause overestimation of the modulus in nanoindentation of soft materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.*, 2, 312, **2009**.
  26. Ebenstein, D. M.; and Pruitt, L. A. Nanoindentation of biological materials. *J. Biomed. Mater. Res., Part A*, 69A, 222, **2004**.
  27. VanLandingham et al. Nanoindentation of polymers: An overview. *Macromolecular Symposia*, 167, 15, **2001**.
  28. Cao Y. et al. Nanoindentation method for determining the initial contact and adhesion characteristics of soft polydimethylsiloxane. *J. Mater. Res.*, 20, 2004, **2005**.
  29. Charitidis, C. A., & Dragatogiannis, D. A. (2013). Finite element analysis, stress-strain distribution and size effects rise during nanoindentation of welded aluminum alloy. *International Journal of Structural Integrity*, 4(1), 78-90
  30. Zhou, J.; Komvopoulos, K. Surface and interface viscoelastic behaviors of thin polymer films investigated by nanoindentation. *Journal of Applied Physics*, 100, 114329, **2006**.
  31. Charitidis, C. A., Dragatogiannis, D. A., Koumoulos, E. P., & Kartsonakis, I. A. (2012). Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation. *Materials Science and Engineering: A*, 540, 226-234.

# 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## **5. Μηχανισμοί όλκιμης και ψαθυρής θραύσης**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μηχανισμοί της όλκιμης και της ψαθυρής θραύσης καθώς και η εξάρτηση τους από τη θερμοκρασία, τη σύσταση και την μικροδομή των κραμάτων. Γίνεται αναφορά στον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης, την διάρκεια ζωής από υπό κόπωση καθώς και η επίδραση των μεταλλουργικών παραμέτρων στην κόπωση. Επίσης περιγράφονται οι μηχανισμοί ερπυσμού καθώς και η επίδραση της μικροδομής, της σύστασης και της κατεργασίας στην ταχύτητα του ερπυσμού όπως και περιγραφή των χαρακτηριστικών των μετάλλων που είναι ανθεκτικά στον ερπυσμό.

### **5.1. Μηχανική συμπεριφορά μετάλλων**

Με τον όρο μηχανική συμπεριφορά μετάλλων εννοούμε την απόκριση του υλικού στην επιβολή μηχανικών καταπονήσεων. Οι καταπονήσεις που μπορεί να δέχεται ένα υλικό μπορεί να είναι στατική, δυναμική, σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, με την ταυτόχρονη έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η απόκριση ενός μετάλλου στις καταπονήσεις αυτές είναι σε γενικές γραμμές η παραμόρφωση ή η θραύση και εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος των εξωτερικών δυνάμεων – φορτίων που ασκούνται καθώς και από την μικροδομή του κάθε μετάλλου. Στην μικροδομή περιλαμβάνονται η χημική σύσταση, η κατανομή και η μορφολογία των φάσεων, το μέγεθος των κόκκων, η πυκνότητα των αταξιών, οι διεπιφάνειες και τα εγκλήσματα. Κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά επηρεάζει μέσω συγκεκριμένων μηχανισμών τη μηχανική συμπεριφορά του μετάλλου.

Η συμβολή της δομής στη μηχανική συμπεριφορά εκφράζεται μέσω των μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου. Εάν γνωρίζουμε τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόκριση του στις μηχανικές καταπονήσεις. Στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μετάλλων σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων που



πραγματοποιείται με τις μηχανικές δοκιμές (το όριο διαρροής προσδιορίζεται με την δοκιμή του εφελκυσμού).

Η συσχέτιση δομής - ιδιοτήτων στη μηχανική συμπεριφορά ολοκληρώνεται με την επίδραση της κατεργασίας. Η κατεργασία μπορεί να είναι χύτευση, μηχανική διαμόρφωση, θερμική κατεργασία όπου τα παραπάνω επηρεάζουν τη δομή, όπου η δομή διαμορφώνει τις μηχανικές ιδιότητες και την μηχανική συμπεριφορά του μετάλλου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της ελαστικής παραμόρφωσης, της πλαστικής παραμόρφωσης, της θραύσης, της κόπωσης, του ερπυσμού.

**Ελαστική παραμόρφωση:** το μέταλλο φορτίζεται κάτω από το όριο διαρροής. Η φόρτιση προσφέρει αντιστρεπτή παραμόρφωση. Το μέγεθός της ελαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας. Το κύριο στοιχείο της δομής που διαμορφώνει το μέτρο ελαστικότητας είναι η ισχύς του μεταλλικού δεσμού.

**Πλαστική παραμόρφωση:** το υλικό φορτίζεται πάνω από το όριο διαρροής όπου λαμβάνει χώρα γενικευμένη ολίσθηση των αταξιών. Η φόρτιση επιφέρει μόνιμη παραμόρφωση. Με την πλαστική παραμόρφωση το μέταλλο ισχυροποιείται (εργοσκλήρυνση). Οι συνιστώσες της δομής που διαμορφώνουν το όριο διαρροής είναι πολλές όπως το κρυσταλλικό πλέγμα, πυκνότητα αταξιών, κραματικά στοιχεία, σωματίδια, μέγεθος κόκκων κ.α. Σχετικές μηχανικές δοκιμασίες είναι ο εφελκυσμός και η δοκιμή της σκληρότητας.

**Θραύση:** η φόρτιση επιφέρει διαχωρισμού του υλικού. Η θραύση είτε αποτελεί συνέχεια της πλαστικής παραμόρφωσης του μετάλλου οπότε χαρακτηρίζεται ως όλκιμη είτε συμβαίνει χωρίς πρότερη πλαστική παραμόρφωση, οπότε χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή. Έκτος από τη φόρτιση στη θραύση σημαντικό ρόλο παίζουν προϋπάρχουσες ασυνέχειες στο υλικό με την μορφή ρωγμών. Η αντοχή του υλικού σε θραύση εκφράζεται από την διασθραυστότητα. Σχετικές μηχανικές δοκιμές είναι η δυσθραυστότητα και η κρούση.

**Κόπωση:** το μέταλλο υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση. Κόπωση είναι η προοδευτική τοπική πλαστική παραμόρφωση συσσώρευση βλάβης στο υλικό που περιλαμβάνει την δημιουργία και ανάπτυξη ρωγμών μέχρι την τελική

θραύση. Η αντοχή του υλικού σε κόπωση εκφράζεται από το όριο διαρκούς αντοχής και τη ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής. Σχετικές μηχανικές δοκιμασίες είναι κόπωση και η δοκιμασία αναπτύξεως ρωγμής.

**Ερπυσμός:** η φόρτιση με ταυτόχρονη έκθεση υπό σταθερή τάση του μετάλλου σε υψηλή θερμοκρασία (συνήθως πάνω από το 30% της απόλυτης θερμοκρασίας τήξεως) προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση η οποία αυξάνεται με τον χρόνο. Αυτή τη χρονικά μεταβαλλόμενη παραμόρφωση υπό σταθερό φορτίο ονομάζουμε ερπυσμό. Η αντοχή σε ερπυσμό εκφράζεται συνήθως από τη ταχύτητα σταθερού ερπισμού και τον χρόνο θραύσεως. Σχετικές μηχανικές δοκιμασίες είναι η δοκιμασία ερπισμού και η δοκιμασία θραύσεως από ερπυσμό.

## 5.2. Θραύση

Συνηθίζεται να λέγεται ότι τα μέταλλα είναι όλκιμα σε σχέση με τα άλλα υλικά αφού η θραύση επέρχεται μετά μετά από σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Αυτή τη θραύση την ονομάζουμε όλκιμη, έτσι μια μεταλλική κατασκευή θα έπρεπε να αστοχήσει από πλαστική παραμόρφωση όταν η τάση υπερβεί το όριο διαρροής του μετάλλου. Αυτό που συμβαίνει στην πράξη όμως είναι ότι πολλές φορές μεταλλικές κατασκευές όπως δεξαμενές, πλοία, αεροσκάφη, γέφυρες και μεταλλικά κτίρια έχουν αστοχήσει από ψαθυρή θραύση, η οποία συμβαίνει χωρίς να προηγηθεί πλαστική παραμόρφωση, με εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα και σε καταπονήσεις που γενικά δεν υπερβαίνουν το όριο διαρροής του μετάλλου. Οι ψαθυρές θραύσεις δεν συμβαίνουν τόσο συχνά όσο άλλες αστοχίες των μετάλλων όπως η κόπωση ή αστοχία από πλαστική παραμόρφωση. Όταν όμως συμβούν έχουν σοβαρότερες επιπτώσεις που περιλαμβάνουν ανθρώπινα θύματα και σημαντικές υλικές ζημιές.

## 5.2.2. Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση

Τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά της όλκιμης και ψαθυρής θραύσεως. Μικροσκοπικά οι δυο τύποι θραύσεως διαφέρουν σημαντικά. Ο πιο συνήθης μηχανισμός ψαθυρής θραύσης είναι ο σχισμός ή το σχίσσιμο κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων με διάσπαση των ατομικών δομών. Έτσι σε κλίμακα κόκκου η επιφάνεια θραύσεως είναι επίπεδη. Όμως σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό οι γειτονικοί κόκκοι έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς και η ρωγμή αλλάζει κατεύθυνση από κόκκο σε κόκκο για να συνεχίσει την διάδοση της κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων σχισμού, προκαλώντας αυτό που ονομάζεται διακρυσταλλική θραύση. Μια ρωγμή κατά την ψαθυρή θραύση δεν διαδίδεται μόνο διακρυσταλλικά αλλά μπορεί να ακολουθήσει τα σύνορα των κόκκων προκαλώντας περικρυσταλλική θραύση. Το παραπάνω συμβαίνει διότι από την εξασθένηση των συνόρων των κόκκων, που προκαλείται από τον διαφορισμό ανεπιθύμητων στοιχείων (ο φώσφορος και θείο στους χάλυβες) ή από την καθίζηση των φάσεων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με την καθίζηση καρβιδίων του χρωμίου κατά την ευαισθητοποίηση των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων. Επίσης η θραύση από ερπυσμό, που συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι συνήθως περικρυσταλλική.

Αντίθετα με την ψαθυρή θραύση, ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσεως περιλαμβάνει σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Τα μεταλλικά κράματα περιέχουν διασπορείς φάσεων με την μορφή σωματιδίων διαφόρων μορφών και μεγεθών, οι οποίες προέρχονται είτε από καθίζηση (καρβίδια, νιτρίδια, ενδομεταλλικές ενώσεις) είτε αποτελούν εγκλείσματα (οξειδία και σουφλίδια). Με την πλαστική παραμόρφωση τα σωματίδια αυτά είτε θραύονται είτε αποκολλώνται από τη μήτρα επειδή δεν μπορούν να παρακολουθήσουν την παραμόρφωση της, και στις δυο περιπτώσεις σχηματίζονται μικροόπες. Στην συνέχεια με την πρόοδο της πλαστικής παραμόρφωσης οι μικροόπες μεγαλώνουν και τελικά συνενώνονται σχηματίζοντας ρωγμή. Η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται με τον ίδιο μηχανισμό δηλαδή δημιουργία, ανάπτυξη και συνένωση μικροόπων που προέρχονται από σωματίδια διασποράς. Η μικροσκοπική εμφάνιση της όλκιμης θραύσης χαρακτηρίζεται από μικρές

κοιλότητες μέσα στις οποίες συνήθως παραμένουν τα σωματίδια από τα οποία προήλθαν οι μικροόπες. Λόγω των μικρών κοιλοτήτων η επιφάνεια της όλκιμης θραύσης σκεδάζει το φως και είναι πιο σκοτεινή από την επιφάνεια της ψαθυρής θραύσεως.

Η εξέταση των επιφανειών θραύσεως με γυμνό μάτι, μεγενθυτικό φακό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το είδος της θραύσης. Η μελέτη των επιφανειών θραύσεως ονομάζεται fractography και αποτελεί μια από τις κύριες διαδικασίες για την ανάλυση των στοιχείων των κατασκευών

### 5.3. Κόπωση

Έχει γίνει αναφορά στο ότι ένα μέταλλο, που υποβάλλεται σε στατική ή μονοτονική φόρτιση μπορεί να είναι ασφαλές στη θραύση όταν η φόρτιση δεν υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη δυσθραυστότητα του υλικού. Όταν όμως το ίδιο υλικό υποβληθεί σε κυκλική φόρτιση, τότε μπορεί να αστοχήσει σε τιμές του φορτίου πολύ χαμηλότερες από αυτές που απαιτούνται για θραύση από στατικά φορτία. Στη περίπτωση αυτή λέμε ότι η αστοχία οφείλεται σε κόπωση (fatigue) του μετάλλου.

Χαρακτηριστικά της κόπωσης:

1. Φόρτιση πιο συγκεκριμένα κυκλική φόρτιση δηλαδή το υλικό υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής.
2. Η βλάβη που προκαλείται στο υλικό, που περιλαμβάνει την τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, σχηματισμό και διάδοση μιας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική και προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως από την αύξηση του μήκους της ρωγμής.

Η τελική, γρήγορη θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, έτσι ώστε να ικανοποιείται η κρίσιμη συνθήκη θραύσεως. Ενώ στην στατική φόρτιση η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται με αύξηση της τάσεως, στην κόπωση γίνεται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής.

Στην στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση είναι ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο μέχρι η ρωγμή να αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος.

Στην κόπωση μιλάμε για διάρκεια ζωής (fatigue life) του υλικού. Την διάρκεια ζωής δεν την μετράμε σε μέρες ή σε χρόνια αλλά σε κύκλους φορτίσεως και την συμβολίζουμε με  $N_f$ .

Στην κόπωση διακρίνουμε δυο φάσεις στην διάρκεια ζωής. Η πρώτη φάση αποτελείται από τους κύκλους  $N_i$  που απαιτούνται για την δημιουργία της ρωγμής. Η δεύτερη φάση αποτελείται από τους κύκλους  $N_p$ , που απαιτούνται για για την ανάπτυξη ή διάδοση ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος. Η διάρκεια ζωής είναι επομένως  $N_f = N_i + N_p$

Στο σημείο αυτό καλό είναι να διαχωρίσουμε δυο μεθοδολογίες που αφορούν την ανάλυση και τον σχεδιασμό για την διαχείριση της κόπωσης στις κατασκευές.

Σε μεγάλες, σύνθετες κατασκευές καθώς και σε συγκολλητές κατασκευές, δεχόμαστε ότι προϋπάρχουν ρωγμές με μήκος τουλάχιστον ίσο με το όριο ανίχνευσης των μη καταστρεπτικών μεθόδων που χρησιμοποιούμε. Στην περίπτωση αυτή  $N_f = 0$  και η διάρκεια ζωής είναι οι κύκλοι φόρτισης για την ανάπτυξη προϋπάρχουσας ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος. Αυτές οι κατασκευές σχεδιάζονται με τη μεθοδολογία ανοχής στη βλάβη. Αντίθετα σε μικρά κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών (άξονες, οδοντώσεις κ.α.) θεωρούμε ότι δεν προϋπάρχουν ρωγμές. Στην περίπτωση αυτή το  $N_i$  μπορεί να είναι ένα μεγάλο ποσοστό του  $N_f$ . Το  $N_i$  αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των επιβαλλόμενων κυκλικών φορτίσεων και εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού. Σε πολύ λεία δοκίμια το  $N_i$  μπορεί να αποτελεί έως και το 80% της διάρκειας ζωής, ενώ σε διαβρωμένα δοκίμια ή σε δοκίμια που έχουν επιφανειακές εγχοπές και γενικότερα σημεία συγκέντρωσης των τάσεων, το  $N_i$  μπορεί να είναι μόλις το 10% της διάρκειας ζωής.

Στην μηχανολογία συναντάμε διάφορους τύπους κοπώσεων.

1. Η μηχανική κόπωση ή απλά κόπωση αφορά την συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό υποβάλλεται σε κυκλικές μηχανικές τάσεις ή παραμορφώσεις.
2. Όταν η κυκλική φόρτιση επιβάλλεται ενώ το υλικό εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, τότε έχουμε συνδυασμό ερπυσμού – κοπώσεως.

3. Όταν μαζί με τα μηχανικά φορτία αυξομειώνεται και η θερμοκρασία τότε έχουμε την θερμομηχανική κόπωση.
4. Όταν η κυκλική φόρτιση πραγματοποιείται με ταυτόχρονη έκθεση του υλικού σε διαβρωτικό περιβάλλον, έχουμε τον συνδυασμό κοπώσεως – διαβρώσεως.
5. Κυκλική φόρτιση με ταυτόχρονη ολίσθηση ή κύλιση μεταξύ δυο μεταλλικών επιφανειών προκαλεί κόπωση επαφής κυλίσεως.
6. Τέλος, η κυκλική φόρτιση με σχετική παλινδρομική κίνηση και τριβή ολισθήσεως μεταξύ δυο μεταλλικών επιφανειών προκαλεί κόπωση με εκτριβή.

Οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές αστοχούν με έναν από τους παραπάνω τύπους κοπώσεως. [1, 2]

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου**

1. Βεννησιδάκης Δ., Τριανταφυλλίδης Ι., Κωνσταντίνου Α., «Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, 2008.

2. Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης Ν «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.

# 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο



## 6. Πεπερασμένα στοιχεία

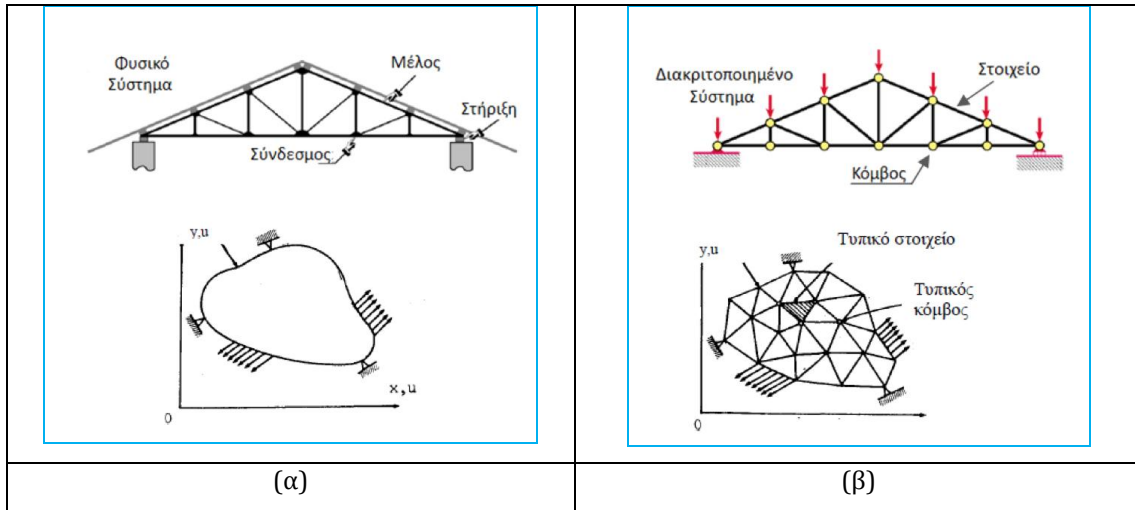
Η (Finite Element Method,  
FEM

ων (elements  
{nodes

6.2

V, ο οποίος

α



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση δημιουργίας πεπερασμένων στοιχείων σε απλά σχήματα.

(Finite element

, τους (nodes

(Degrees Of Freedom, DOF

**u**

».

..

. Το όφελος

:

1.

2.

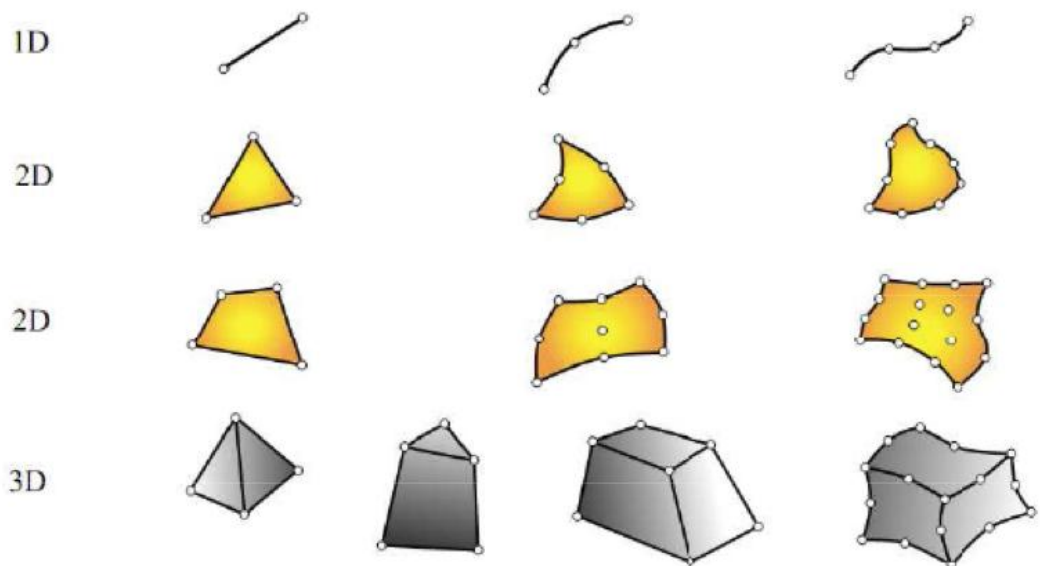
3.

4.

[1], [2].

Τα π

. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αντίστοιχα σχήματα.



Εικόνα 6.2: Σχηματική αναπαράσταση των πεπερασμένων στοιχείων.

Η

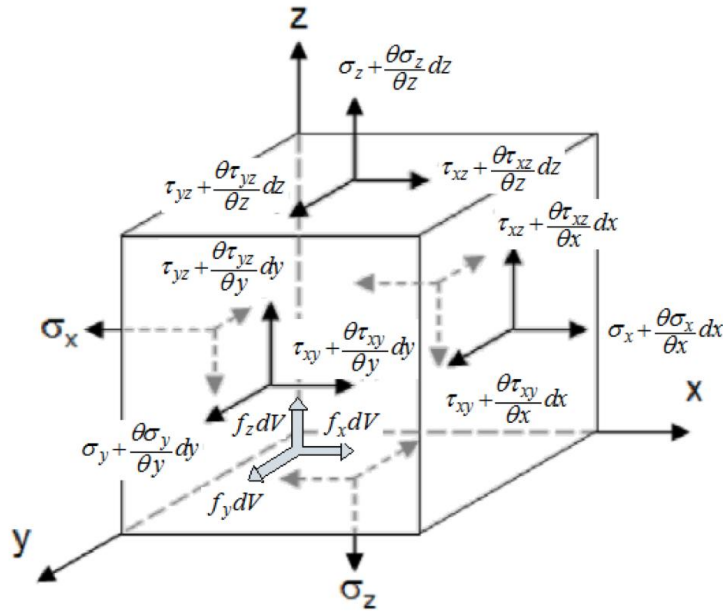
μαθηματική

φυσικού

εις που επιλύονται ευκολότερα.

[u

σεις.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση τυπικού πεπερασμένου στοιχείου με τις διευθύνσεις των τάσεων.

Εξισώσεις Ισορροπίας

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned}$$

Εξισώσεις γεωμετρικής Συμβιβαστότητας

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \end{aligned}$$

σε

υπάρχουν οι

) και οι

καλούνται

, για την

οποίων απαιτείται η

. Ωστόσο

.

.

ε

Rayleigh-Ritz

Galerkin

Saint

Venant

Von Mises ( $\sigma_{VM}$ )

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y$$

.

, να χωρ

).

$$[K].u=F \quad [3], [4], [5].$$

**u**

. To **F**

**n**

**n**

). 0

[K

**nxn**

σ

[K

[K

υση, η

οποία αυξάνεται με την περαιτέρω

[K].u=F

u

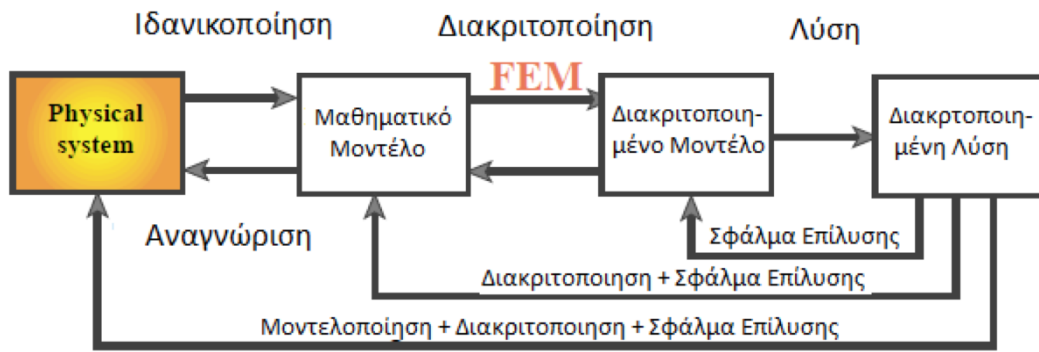
u

K

### 6.3

Στο

(Σχήμα 6.1)



. Σ

points-nodes). Το αποτέλεσμα του

α (discrete

points-nodes

(nodal  
(mesh

(mesh size

[6].

του διακριτοπο

. Σ

.

:

A

- Discretize the continuum.

.

- Select interpolation or shape

functions

.

- Form element equations

.

IV

- Assemble the element

equations



συναρ

$$: [K]\{u\} = \{F\} .$$

- *Solve the system of equations*

$$([K]\{u\} = \{F$$

VI  
quantities

- *Calculate the secondary*

υπο

. [7]

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου**

1.

-ΕΜΠ.1996.

2.

-ΕΜΠ.

3. Fagan M.J., Finite element analysis theory and practice, Publisher: Longman Scientific & Technical ; 1992, ISBN: 0470218177 (USA)

4.

, Ε.Μ.Π., 1988

5.

, Ε.Μ.Π.,1991

6.

.

7.

ων, ΔΠΘ

# 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## 7. Πειραματική Διαδικασία

### 7.1 Εισαγωγή

Παρουσιάζοντας συνοπτικά την ροή της **πειραματικής διαδικασίας** έχουμε τέσσερα βασικά στάδια, το **πρώτο** είναι η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου AA6082 και AA5083 με την τεχνική της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Σε **δεύτερο** στάδιο ακολουθεί η εξαγωγή των τιμών του Μέτρου Ελαστικότητας και της Σκληρότητας για τις διάφορες ζώνες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση. Το **τρίτο** στάδιο είναι η δοκιμή του εφελκυσμού στα συγκολλημένα δοκίμια με σκοπό την παρατήρηση της περιοχής αστοχίας άρα και της ζώνης συγκόλλησης που την περιλαμβάνει καθώς και η εξαγωγή των καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το **τέταρτο** στάδιο που αφορά τη δημιουργία μοντέλου με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στο λογισμικό πρόγραμμα ANSYS. Για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού των συγκολλημένων δοκιμίων εξετάζεται η **ελαστική** και **πλαστική** συμπεριφορά σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις συγκόλλησης, **κάθετη** και **διαμήκη**, σε σχέση με τα φορτία της εφελκυστικής δύναμης. Στο μοντέλο εισάγονται οι τιμές των τοπικών μηχανικών ιδιοτήτων (**local mechanical properties**) που μετρήθηκαν με δοκιμές νανοδιείσδυσης και σκληρομέτρησης για τα συγκολλημένα δοκίμια. Βασικός στόχος του μοντέλου αυτού είναι η προσέγγιση των καμπυλών φόρτισης-επιμήκυνσης, του μέτρου ελαστικότητας, του ορίου διαρροής και της θέσης αστοχίας που προέκυψαν για τα συγκολλημένα δοκίμια από τα πειράματα εφελκυσμού.

## 7.2 Μέρος Πρώτο: Συγκόλληση

Πραγματοποιήθηκε συγκόλληση με τριβή υπό ανάδευση των ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου AA5083-H111 και AA6082-T6 με προσθήκη νανοσωματιδίων καρβιδίων του Τιτανίου TiC ως υλικά ενίσχυσης στη ζώνη συγκόλλησης. Η παραπάνω διαδικασία έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Μηχανολογικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κατά την διαδικασία των συγκολλήσεων έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων διεργασίας έτσι ώστε να επιτευχθούν συγκολλήσεις χωρίς ατέλειες και στην συνέχεια ακολούθησε μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των βέλτιστων συγκολλήσεων. Οι μετρήσεις των νανομηχανικών ιδιοτήτων των κατεργασμένων δοκιμίων, η παροχή των καρβιδίων του Τιτανίου TiC καθώς και ο χαρακτηρισμός τους πραγματοποιήθηκαν στην Εργαστηριακή Μονάδα Νανομηχανικής και Νανοτεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 7.2.1 Πρώτες ύλες

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά βάσης (dissimilar welding), ένα θερμικά κατεργάσιμο (AA6082-T6) και ένα μη θερμικά κατεργάσιμο (AA5083-H111) κράμα αλουμινίου διαστάσεων 200x100x3 mm<sup>3</sup>. Το κράμα AA6082-T6 έχει ως κύρια κραματικά στοιχεία το Μαγνήσιο (Mg) και το Πυρίτιο (Si) ενώ ο όρος T6 δηλώνει ότι το κράμα έχει υποστεί διαλυτοποίηση, υπερβαφή και τεχνητή γήρανση. Η σκλήρυνση της δομής του οφείλεται στο σχηματισμό και στην κατανομή της ένωσης Mg<sub>2</sub>Si εντός του υλικού, στην οποία, συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si. Το κράμα αυτό παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στην διάβρωση, εξαιρετική διελασιμότητα και ενδείκνυται για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπως είναι η βιομηχανία της αεροναυπηγικής. Το κράμα AA5083-H111 έχει ως κύρια προσθήκη το Μαγνήσιο (Mg) ενώ ο όρος H111 δηλώνει ότι το κράμα έχει υποστεί ενδοτράχυνση. Τα κράματα της σειράς AA5xxx διαθέτουν μέση έως υψηλή αντοχή,

παρουσιάζουν καλή συγκολλησιμότητα και υψηλή αντοχή στο θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται κυρίως στις βιομηχανίες μεταφοράς καθώς και για στρατιωτικές εφαρμογές.

H

χημική σύσταση καθώς και οι βασικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των δύο πιο πάνω κραμάτων παρουσιάζονται στους πίνακες 7.1 και 7.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 7.1: Χημική Σύσταση κραμάτων AA5083-H111 και AA6082-T6

Χημική Σύσταση AA5083-H111		Χημική Σύσταση AA6082 - T6	
Στοιχείο	Σύσταση (% κ.β.)	Στοιχείο	Σύσταση (% κ.β.)
Al	93.63	Al	97.67
Cr	0.14	Cr	-
Cu	0.26	Cu	-
Fe	0.22	Fe	0.34
Mg	4.95	Mg	0.56
Mn	0.61	Mn	0.30
Si	-	Si	1.13
Ti	-	Ti	-
Zn	0.20	Zn	-

Πίνακας 7.2: Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες κραμάτων AA5083-H111 και AA6082-T6

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ AA5083-H111		ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ AA6082 - T6	
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ	ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Πυκνότητα	2650 kg/m <sup>3</sup>	Πυκνότητα	2700 kg/m <sup>3</sup>
Σημείο τήξης	591-638 °C	Σημείο τήξης	555 °C
Μέτρο ελαστικότητας	71,7 GPa	Μέτρο ελαστικότητας	71,7 GPa
Θερμική αγωγιμότητα	117 W/mK	Θερμική αγωγιμότητα	180 W/mK
Ηλεκτρική αντίσταση	5,9 x 10 <sup>-6</sup> Ωm	Ηλεκτρική αντίσταση	0.38 x 10 <sup>-6</sup> Ωm
Αντοχή σε εφελκυσμό	228 Mpa	Αντοχή σε εφελκυσμό	340 Typical Mpa

<b>Σκληρότητα κατά Vickers</b>	85 HV0.3	Σκληρότητα κατά Vickers	110 HV0.3
<b>Poisson Ratio</b>	0.33	Poisson Ratio	0.33

### 7.2.2 Εξοπλισμός FSW

Η μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια κατάλληλα τροποποιημένη φρέζα Universal Milling Machine FU-32 (Εικόνα 7.1) με δυνατότητα ανάπτυξης ταχυτήτων περιστροφής από 30 rpm έως 1500 rpm και ταχυτήτων πρόωσης από 19 mm/min έως 950 mm/min ενώ επίσης υπήρχε δυνατότητα αλλαγής της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης.



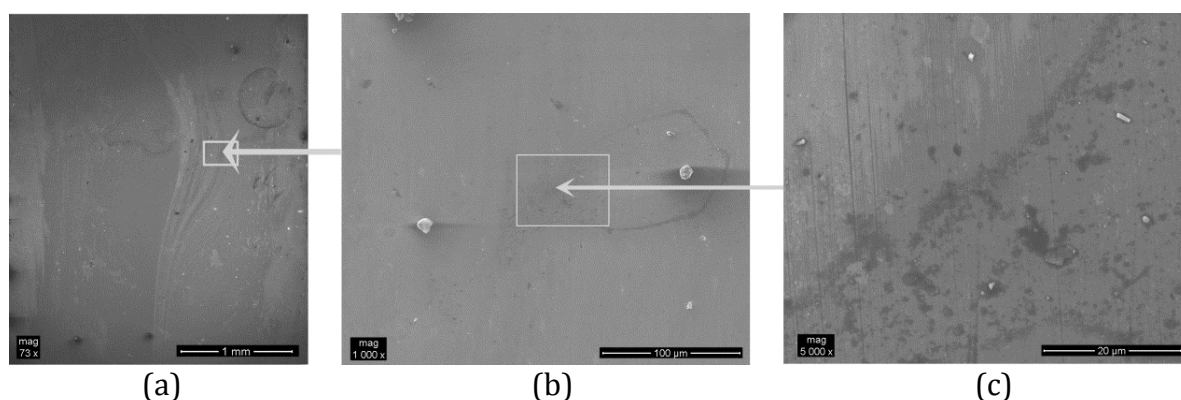
Εικόνα 7.1: Διάταξη μηχανής συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης.

Η συγκόλληση με τριβή υπό ανάδευση πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός επίπεδου περιαιχενίου διαμέτρου 23mm και ενός κυλινδρικού πείρου διαγωνίου 6mm και ύψους 3mm. Ο κύριος λόγος που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες γεωμετρίες του εργαλείου είναι λόγω της πολύ καλής ροής του πλαστικοποιημένου υλικού που παρατηρείτε σε σχέση με άλλες γεωμετρίες.

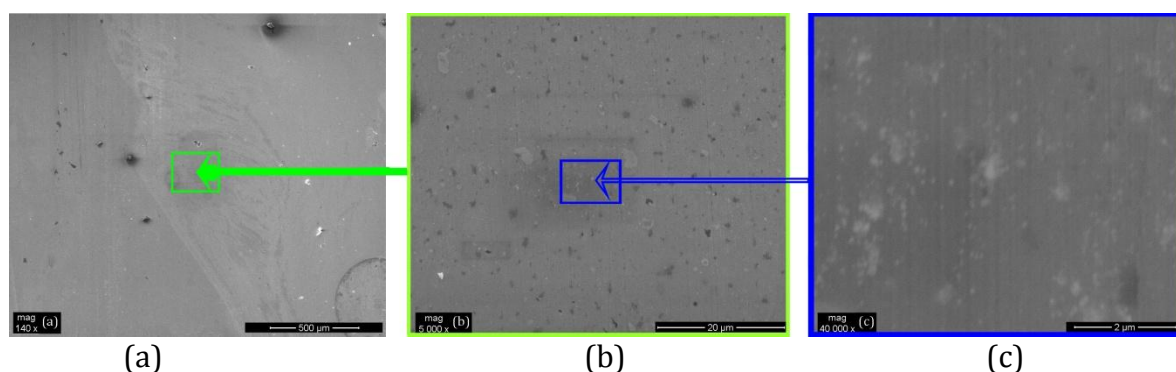
### 7.2.3 Μακροσκοπική και Μικροσκοπική Παρατήρηση

Η μορφολογία της επιφάνειας των συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου χαρακτηρίζεται μέσω Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM). Στην εικόνα (7.2) παρατηρούμε μεγεθυμένες φωτογραφίες από το μικροσκόπιο SEM στο σημείο της συγκόλλησης - ανάδευσης. Στην επιφάνεια δεν παρατηρούνται ατέλειες και μακροσκοπικές βλάβες. Οι κυματομορφές μπορούν να αποδοθούν στην διεργασία της συγκόλλησης δια τριβή υπό ανάδευση. Στις

εικόνες παρατηρούμε επίσης, σκοτεινές και φωτεινές περιοχές. Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν σε στοιχεία με χαμηλό και υψηλό ατομικό αριθμό, αντίστοιχα. Για τις περιοχές αυτές πραγματοποιείται εξέταση στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με την επιλογή των οπισθοσκεδαζόμενων (backscattered) ηλεκτρονίων εικόνα (7.3)



Εικόνα 7.2: Εικόνες μικρογραφίας SEM με τη χρήση δευτερογενών ηλεκτρονίων στη ζώνη συγκόλλησης - ανάδευσης

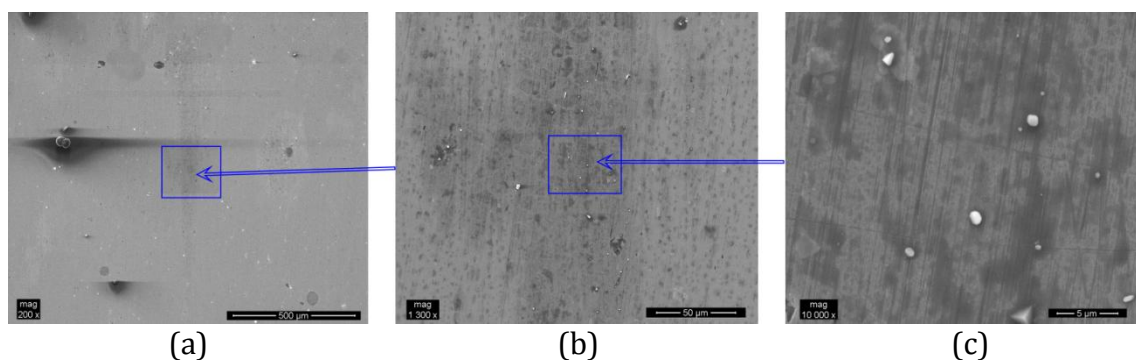


Εικόνα 7.3: Εικόνες μικρογραφίας SEM με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων στη ζώνη συγκόλλησης - ανάδευσης

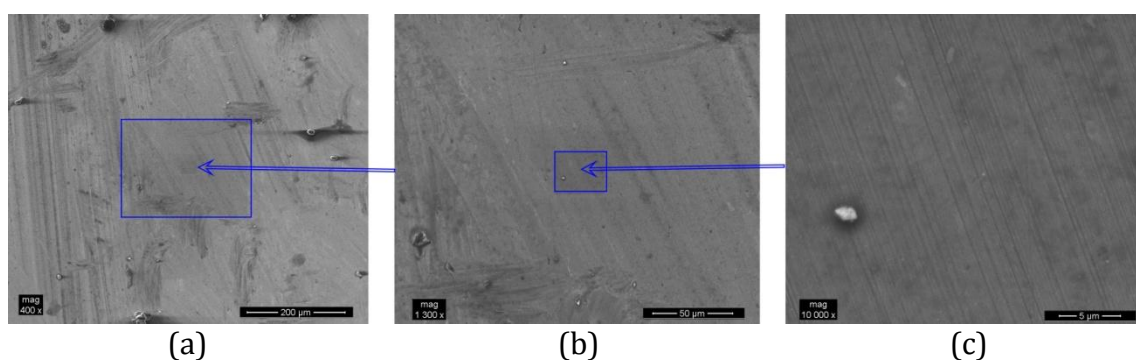
Οι εικόνες SEM με αυξημένες μεγεθύνσεις (Σχ. 7.2.β, 7.2.γ) απεικονίζουν σαφώς μικρές περιοχές φωτός που μπορούν να αποδοθούν στο στοιχείο του Τιτανίου (Ti), δεδομένου του γεγονότος ότι έχει υψηλότερο ατομικό αριθμό από Αλουμίνιο (Al). Επιπλέον, το Τιτάνιο (Ti) έχει υψηλότερο ατομικό αριθμό και από τα στοιχεία Μαγνησίου Mg και Πυριτίου (Si) που αμφότερα ενσωματώνονται στα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται. Η εμφάνιση των σκοτεινών περιοχών αποδίδεται στην παρουσία των στοιχείων Al, Mg και Si. Η παρουσία του Τιτανίου (Ti) υποδηλώνει ότι νανοσωματίδια των καρβιδίων του Τιτανίου (TiC) έχουν επιτυχώς ενσωματωθεί στα κράματα των μετάλλων κατά τη διαδικασία της ανάδευσης - συγκόλλησης. Επιπλέον, προκειμένου να



διερευνηθεί αν οι προαναφερθείσες φωτεινές περιοχές αποτελούνται από Σίδηρο (Fe) ή Μαγγάνιο (Mn) (δεδομένο ότι είναι στοιχεία που βρίσκονται και στα δυο χρησιμοποιούμενα κράματα Αλουμινίου) και έχουν υψηλότερο ατομικό αριθμό από το Τιτάνιο (Ti), χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από το SEM με οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια από τα μέταλλα AA5083-H111 (εικόνα 7.4) και A-6082-T6 (Εικόνα 7.5). Οι εικόνες 7.4 και 7.5 απεικονίζουν σκοτεινές και φωτεινές περιοχές καθώς και τα δύο κράματα αλουμινίου αποτελούνται από διάφορα στοιχεία, αλλά η μορφολογία των φωτεινών περιοχών δεν είναι η ίδια με εκείνα που αντιστοιχεί στο στοιχείο του Τιτανίου (Ti) που εμφανίζονται στην εικόνα 7.2.β, 7.2.γ. Έτσι λοιπόν, αποδεικνύεται ότι οι φωτεινές περιοχές στη ζώνη ανάδευσης αντιστοιχούν στο στοιχείο του Τιτανίου, άρα επιβεβαιώνεται η ενσωμάτωση των καρβιδίων του Τιτανίου (TiC) στη ζώνη αυτή.



Εικόνα 7.4: Εικόνες μικρογραφίας SEM με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων στο μέταλλο βάσης AA 5083-H111.



Εικόνα 7.5: Εικόνες μικρογραφίας SEM με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων στο μέταλλο βάσης

### 7.3 Μέρος Δεύτερο: Μελέτη Νανομηχανικών Ιδιοτήτων

Για την εκτενέστερη μελέτη της επίδρασης των καρβιδίων του Τιτανίου στη ζώνη ανάδευσης των συγκολλημένων αλουμινίων πραγματοποιήθηκε μελέτη των μηχανικών τους ιδιοτήτων με τη μέθοδο της νανοδιείσδυσης. Οι μετρήσεις της νανοδιείσδυσης πραγματοποιούνται στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών με την διάταξη TriboLab® της Hysitron (εικόνα ) υπό τον χειρισμό του Υπ. Διδάκτορα Δ. Αθ. Δραγατογιάννη, με την επίβλεψη του Καθηγητή Κ. Χαριτίδη. Βασικά χαρακτηριστικά του οργάνου είναι η υψηλή διακριτική του ικανότητα στη μετατόπιση της ακίδας του εγχαράκτη (0.04 nm), ενώ το μέγιστο βάθος διείσδυσης είναι 3μm και στο εφαρμοζόμενο φορτίο (1nN) με μέγιστη τιμή φορτίου 10 mN. Τα δείγματα τοποθετούνται σε ειδικές θέσεις πάνω στην X-Y τράπεζα η κίνηση της οποίας ελέγχεται από τον υπολογιστή. Μετακινώντας το δειγματοφορέα φέρεται η στήλη, στην οποία στηρίζεται ο εντυπωτής, επάνω από το δείγμα. Εποπτεύεται η επιφάνεια του υλικού με Μικροσκόπιο Σάρωσης Ακίδας - Scanning Probe Microscope (scan size 10-20 μm, scan rate 1-2 Hz) και επιλέγουμε τις θέσεις στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η νανοδιείσδυση.



**Εικόνα 7.6: Διάταξη Νανοδιείσδυσης Hysitron TriboLab**

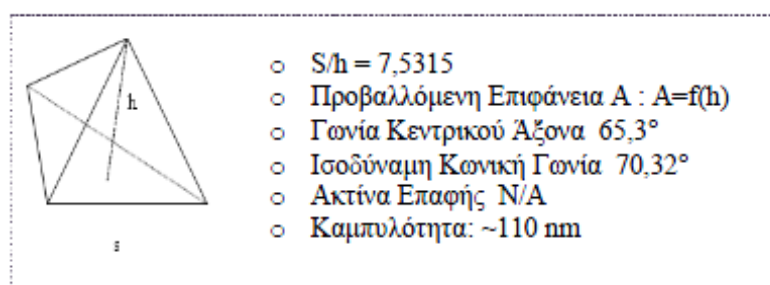
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διάταξη είναι εξοπλισμένη με ένα μικροσκόπιο σάρωσης με ακίδα (Scanning Probe Microscope - SPM), στο οποίο η ακίδα κινείται κατά μήκος του δείγματος ώστε να είναι δυνατή η λήψη εικόνων του. Στο συγκεκριμένο πείραμα καταγράφεται το βάθος διείσδυσης του εντυπωτή και το εφαρμοζόμενο φορτίο, τα οποία καταγράφονται αυτόματα κατά την επαφή της ακίδας με το δείγμα. Όταν η ακίδα νανοδιείσδυσης έρθει πάνω από την προεπιλεγμένη περιοχή του δείγματος, τότε εφαρμόζεται φορτίο στην ακίδα, το οποίο μεταβάλλεται σύμφωνα με το ρεύμα φόρτισης ενός πηνίου,

ακολουθώντας τις προεπιλεγμένες συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος. Το βάθος διείσδυσης της ακίδας νανοδιείσδυσης προσδιορίζεται από χωρητικό αισθητήρα μετατόπισης, η έξοδος του οποίου συνδέεται με DC αισθητήρα μετατόπισης, ο οποίος ψηφιοποιεί το DC σήμα μετατόπισης, και το οδηγεί σε ψηφιακό βολτόμετρο συνδεδεμένο με τον υπολογιστή.

Το φορτίο που εφαρμόζεται στην ακίδα νανοδιείσδυσης καταγράφεται από DC ανιχνευτή ρεύματος, ο οποίος «διαβάζει» το DC ρεύμα φόρτισης στο πηνίο. Το DC ρεύμα φόρτισης ψηφιοποιείται από ανιχνευτή συνδεδεμένο με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο με την σειρά του συνδέεται σε είσοδο του υπολογιστή. Τα παραπάνω, οι μετρήσεις και συνθήκες πειράματος, εισέρχονται στο υπολογιστή και στην συσκευή mass storage. Τα στοιχεία αυτά αξιοποιούνται στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων.

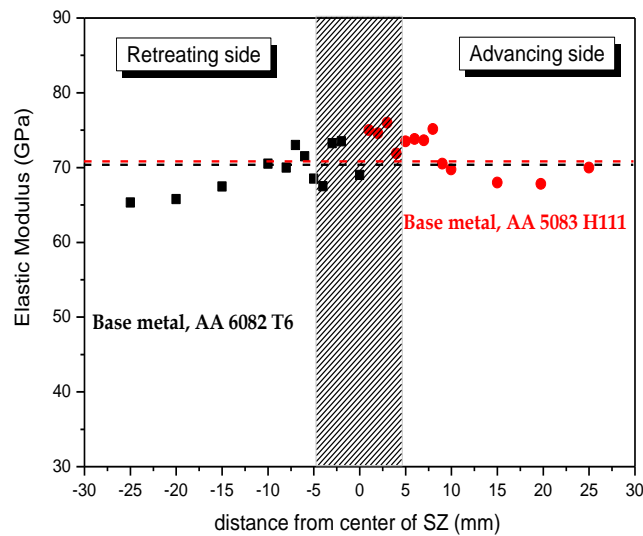
Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ακίδα τύπου Berkovich

120nm. Η ακίδα αυτή είναι ένα διαμάντι με γεωμετρία πυραμίδας τριών επιπέδων. Τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά τις οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1. Οι τιμές σκληρότητας (H) και σύνθετου μέτρου ελαστικότητας ( $E_r$ ) εξάγονται από τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Oliver και Pharr.

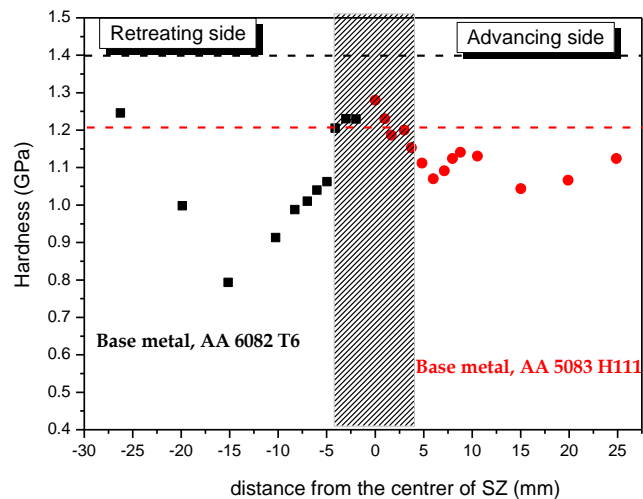


Σχήμα 7.1: Ακίδα γεωμετρίας Berkovich

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέρχονται από ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε τις τιμές του Μέρου Ελαστικότητας (διάγραμμα 7.1) και της Σκληρότητας (διάγραμμα 7.2) των δοκιμίων σε συνάρτηση με το μήκος του δοκιμίου

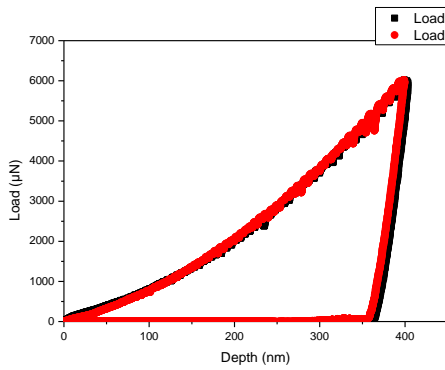


Διάγραμμα 7.1: Τιμές Μέρου Ελαστικότητας από τις μετρήσεις της νανοδιείσδυσης

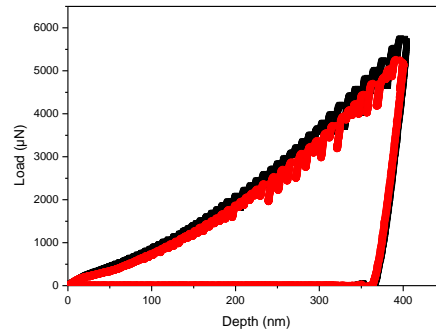


Διάγραμμα 7.2: Τιμές σκληρότητας από τις μετρήσεις μικροσκληρότητας

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης για τα συγκολλημένα κράματα αλουμινίου AA5083-H111 και AA6082-T6 αντίστοιχα.

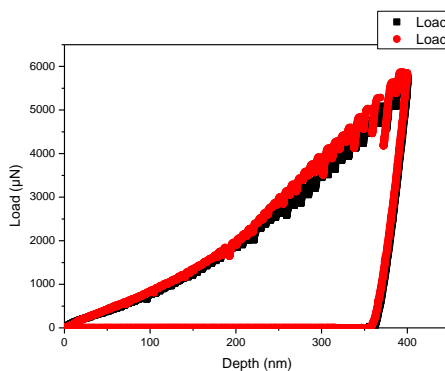


A

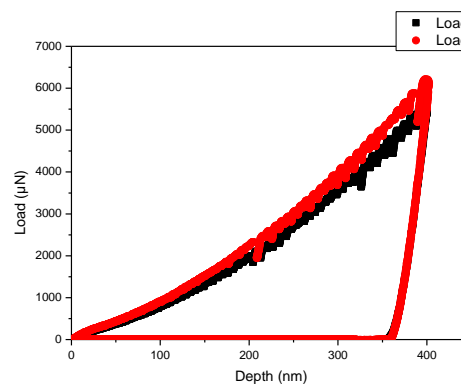


B

**Διάγραμμα 7.3:** Καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης για βάθος διείσδυσης 400nm για τα δοκίμια παρουσία TiC, σε απόσταση 2mm και 1mm από το κέντρο (προωθούμενη πλευρά 5083 H111)



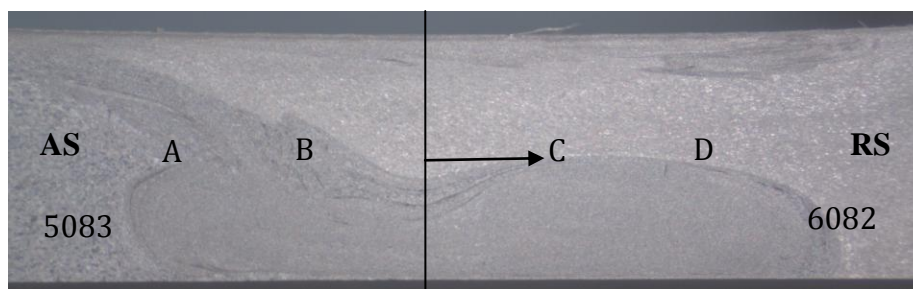
C



D

**Διάγραμμα 7.4:** Καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης για βάθος διείσδυσης 400nm για τα δοκίμια παρουσία TiC, σε απόσταση 1mm και 2mm από το κέντρο (υποχωρούσα πλευρά 6082 T6)

Στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται τοποθέτηση των καμπυλών της νανοδιείσδυσης και μικροσκληρότητας στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου.



Εικόνα 7.7: Θέσεις διεξαγωγής μετρήσεων νανοδιείσδυσης και σκληρομέτρησης στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου με την προσθήκη TiC στη ζώνη ανάδευσης.

## 7.4 Μέρος Τρίτο: Πειράματα εφελκυσμού

Τα πειράματα εφελκυσμού για τα συγκολλημένα δοκίμια με την μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής υπό ανάδευση διεξήχθησαν στο

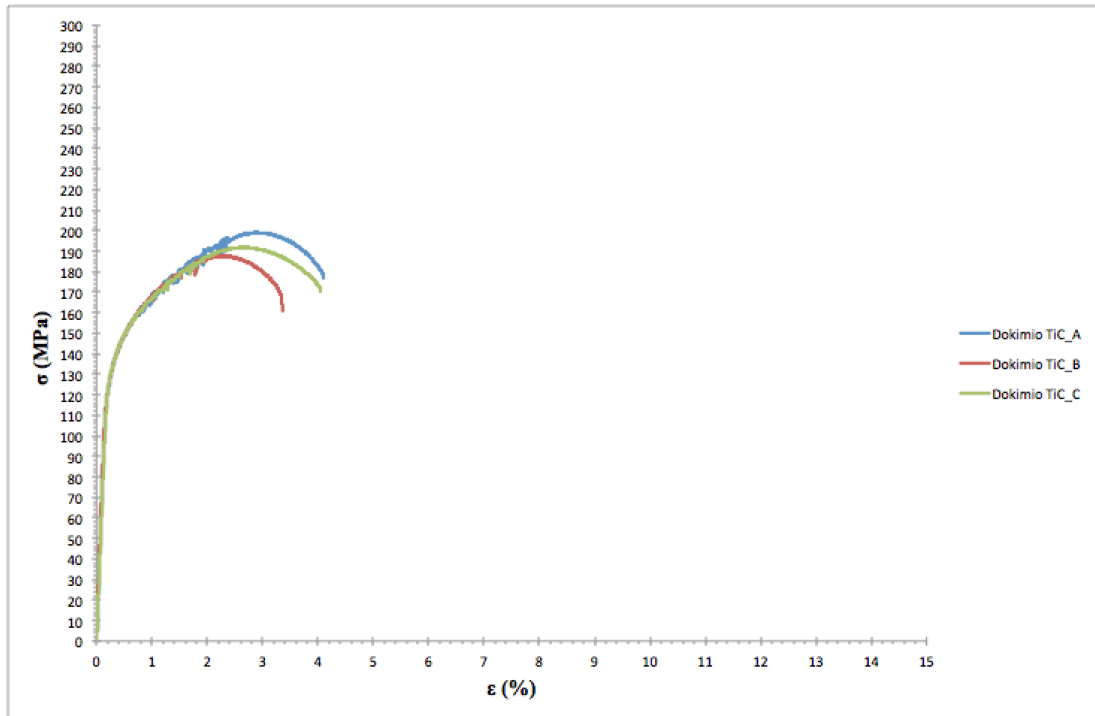
Εργαστήριο Εφελκυσμών (ENT) της Σχολής Μηχανικών Μεταλλουργίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την κοπή και τον εφελκυσμό των συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου με την προσθήκη νανοσωματιδίων TiC στη ζώνη ανάδευσης χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα πρότυπα. Στη εικόνα που ακολουθεί παρατίθεται το πρότυπο διαστάσεων δοκιμίων για εφελκυσμό [1].



	Dimensions						
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Specimen 6	Specimen 7
	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.
G—Gage length	2.000 ± 0.005	2.000 ± 0.005	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	4.000 ± 0.005	2.000 ± 0.005	4.000 ± 0.005
W—Width (Note 1)	0.500 ± 0.010	1½ + ⅙ - ¼	1½ + ⅙ - ¼	0.750 ± 0.031	0.750 ± 0.031	1.000 ± 0.062	1.000 ± 0.062
T—Thickness	measured thickness of specimen						
R—Radius of fillet, min	½	1	1	1	1	1	1
A—Length of reduced section, min	2¼	2¼	9	2¼	4½	2¼	½
B—Length of grip section, min (Note 2)	3	3	3	3	3	3	3
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	1¼	2	2	1	1	1½	1½

Εικόνα 7.8: Πρότυπο διαστάσεων δοκιμίων για εφελκυσμό.

Το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για τα δοκίμια εφελκυσμού με την παρουσία TiC στη ζώνη ανάδευσης παρουσιάζεται στη συνέχεια.



**Διάγραμμα 7.1: Τάση – παραμόρφωση για τα συγκολλημένα δοκίμια με την παρουσία TiC στη ζώνη ανάδευσης.**

# 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο



## 8 Μοντελοποίηση πειράματος εφελκυσμού

### 8.1 Γενικά

Σε αυτή τη μελέτη εξετάζονται δυο περιπτώσεις που έχουν να κάνουν με τη διεύθυνση της συγκόλλησης ως προς τον άξονα του φορτίου εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη αφορά προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού των συγκολλημένων κραμάτων με συγκόλληση **εγκάρσια** στα φορτία εφελκυσμού και η δεύτερη με συγκόλληση **διαμήκη** στα φορτία εφελκυσμού. Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις εξετάζονται η **ελαστική** και η **πλαστική** περιοχή παραμόρφωσης. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού για συγκολλημένα κράματα αλουμινίου κάνοντας χρήση των μηχανικών ιδιοτήτων που προέκυψαν από τα πειράματα νανοδιείσδυσης και σκληρομέτρησης.

Το λογισμικό ANSYS, βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων, που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 6 και είναι ένα ευρέως διαδεδομένο λογισμικό για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής με σύνθετης γεωμετρίας δοκίμια. Με τον όρο σύνθετη γεωμετρία δεν εννοούμε μόνο τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, αλλά και τα χαρακτηριστικά δομής. Δηλαδή την κατανομή των Μέτρων Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής κατά μήκος του δοκιμίου, όπως αυτά διαμορφώνονται μετά από μια κατεργασία όπως είναι αυτή της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση (FSW). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα η μέθοδος με την οποία αντλούνται τοπικά οι τιμές του Μέρου Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής γίνεται μέσω της τεχνικής της νανοδιείσδυσης και της μικροσκληρότητας.



## 8.2 Προσομοίωση μηχανικών ιδιοτήτων μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

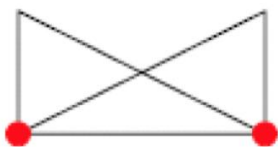
“finite” στο FEA

.Σ.

.)

(one-dimensional element)

1D FEM:



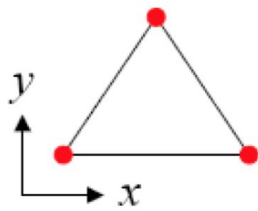
$$w(x) = a_1 + a_2x \quad (\text{linear interpolation})$$

Εικόνα 8.1: Μονοδιάστατο στοιχείο

(2D element

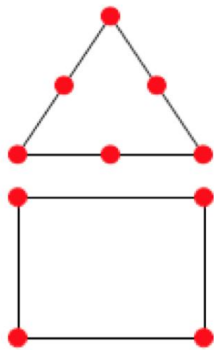
(triangle) και

## quadrilateral element



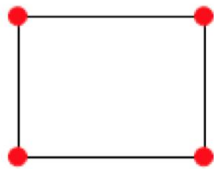
3 noded triangle (linear element)

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y$$



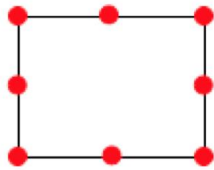
6 noded triangle

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2$$



4 noded quadrilateral

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy$$



8 noded quadrilateral

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2$$

Εικόνα 8.2: Σχήματα πεπερασμένων στοιχείων στις δυο διαστάσεις

Τα

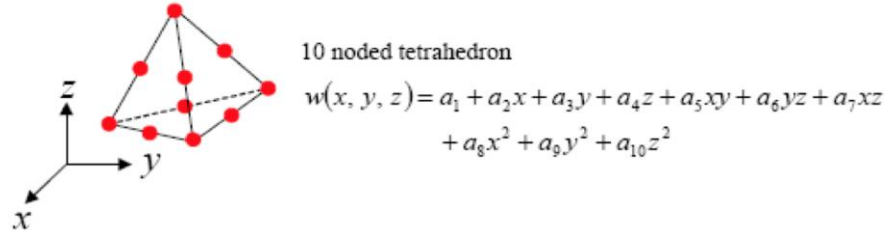
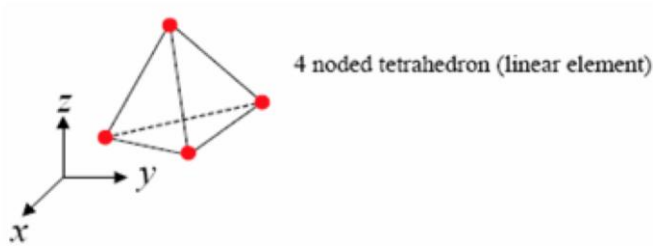
(3D elements

:

(brick) (hexahedrons “hex”) και  
“tets”).

(pyramids) ή tetrahedrons (

$$w(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$$



Εικόνα 8.3: Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

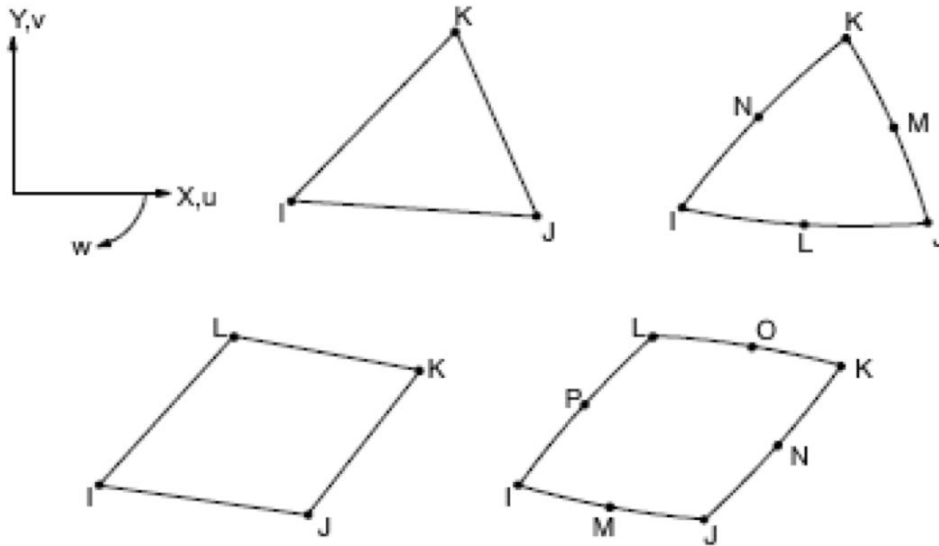
πίνακα:

Πίνακας 8.1: 0

Dimension	Degree	Element Shape	Element Type
1D (Line)	Linear		Beam, Truss
	Quadratic		Beam
	Cubic		Beam
2D (Area)	Linear		Plane stress Plane strain Plate, Shell
	Quadratic		
	Cubic		
3D (Volume)	Linear		
	Quadratic		

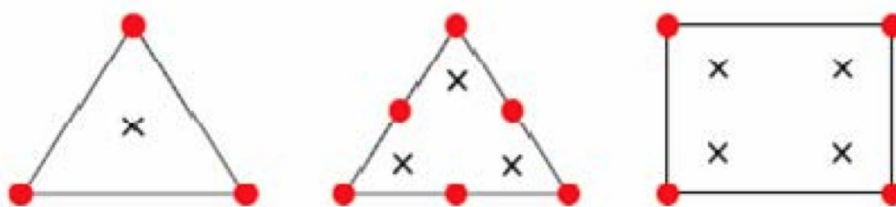
( "nodes" )

κυρίως



Εικόνα 8.4: Δισδιάστατα στοιχεία

(solver)



Εικόνα 8.5: Τάσεις στα δισδιάστατα στοιχεία

Η του προβλήματός  
είναι:

και τα υλι :

- 

(bi-material

την κίνηση του)

- 

(Linear Contact).

- 

- 

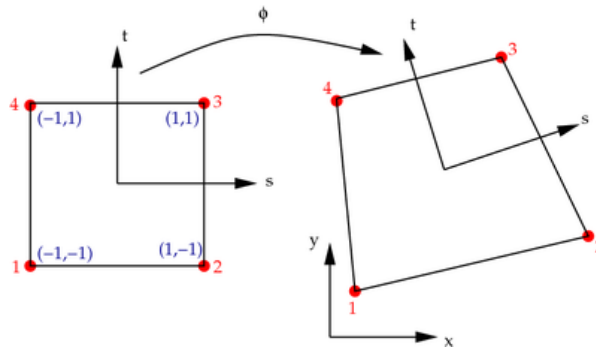
«δεν ε ».

- Δ

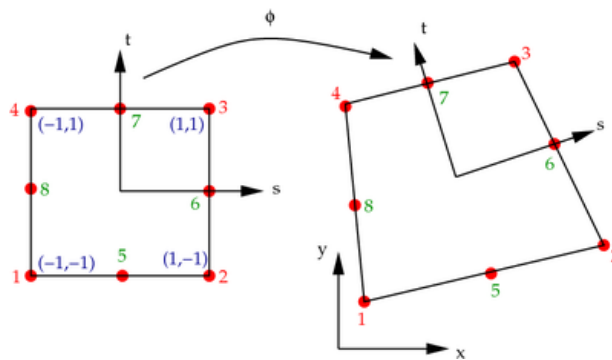
- 

(STATIC ANALYSIS).

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμέριση του δοκιμίου ήταν Element Type PLANE 42 στοιχεία τεσσάρων κόμβων (εικόνα 8.6), Element Type PLANE 82 και Element Type PLANE 182 (εικόνα 8.7).



Εικόνα 8.6: Element Type PLANE 42



Εικόνα 8.7 Element Type PLANE 82

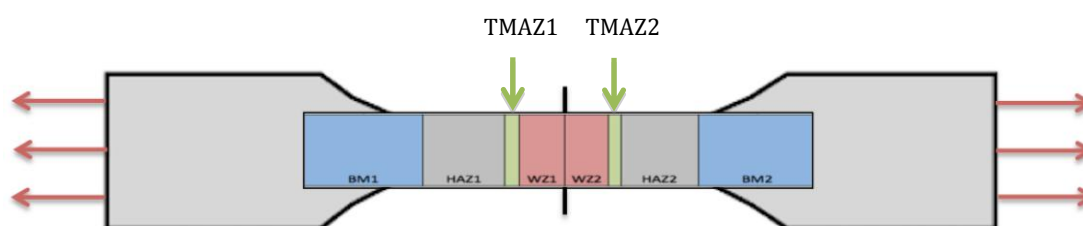
Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διαμέριση κοντά στην περιοχή συγκόλλησης και στις ζώνες που δημιουργούνται από την FSW. Η μέθοδος φόρτισης που επιλέχθηκε ήταν της ελεγχόμενης μετατόπισης, κατά την οποία η μετατόπιση του δοκιμίου αυξανόταν σε βήματα χρόνου ως τη μέγιστη τιμή, ενώ ο κώδικας υπολόγιζε σε κάθε βήμα, τη συνισταμένη των δυνάμεων αντίδρασης στους κόμβους του μοντέλου. Επιλέχθηκε έναντι της μεθόδου ελεγχόμενου φορτίου, γιατί συγκλίνει γρηγορότερα και είναι περισσότερο σταθερή στα αρχικά βήματα.



## 8.3 Μοντέλο Πειράματος Εφελκυσμού

### 8.3.1 Προσομοίωση εγκάρσιας συγκόλλησης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού για την εγκάρσια συγκόλληση στο λογισμικό ANSYS. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) δημιουργεί διάφορες ζώνες κατά την ολοκλήρωσή της. Στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται σχεδιαγραμματική αναπαράσταση των ζωνών που δημιουργούνται καθώς και η διεύθυνση της εγκάρσιας συγκόλλησης και των φορτίων εφελκυσμού.



Εικόνα 8.8 : Σχεδιαγραμματική αναπαράσταση των ζωνών συγκόλλησης και η διεύθυνση της εγκάρσιας συγκόλλησης και των φορτίων εφελκυσμού.

Η ανάλυση διακρίνεται στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή, όπου με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης στην πρώτη αντλούνται οι τιμές των Μέτρων Ελαστικότητας. Έτσι λοιπόν, η προσομοίωση που επιτυγχάνει την καλύτερη προσέγγιση του Μέτρου Ελαστικότητας σε σχέση με την πειραματική τιμή και μετά τον έλεγχο σύγκλισης λαμβάνεται ως η καλύτερη προσεγγιστική λύση. Και για αυτή τη λύση ακολουθείται προσομοίωση στην πλαστική περιοχή.

#### 8.3.1.1 Προσομοίωση ελαστικής περιοχής

Για την προσομοίωση της ελαστικής περιοχής ελέχθησαν διάφοροι παράμετροι όπως:

- γεωμετρικές διαστάσεις (μήκος, ύψος,)
- διαμέριση του μοντέλου σε περιοχές με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες
- element type
- διακριτοποίηση

ώστε να καταλήξουμε στην εξαγωγή του βέλτιστου μοντέλου που προσεγγίζει με ακρίβεια αλλά και ικανοποιητική σύγκλιση την πειραματική τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας.

Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά την επίλυση του μοντέλου του πειράματος εφελκυσμού διαμορφώνεται σε τρεις βασικές εντολές κώδικα:

1. την «πάκτωση» των αριστερών κόμβων του δοκιμίου,
2. την εντολή τις σταδιακής μετατόπισης των ελεύθερων δεξιών κόμβων
3. και τον σταδιακό -ανάλογα με την σταδιακή μετατόπιση- υπολογισμό της δύναμης από αντίδραση που δημιουργείται στο δοκίμιο.

Όπως έχει αναφερθεί η

- (a part/assembly model

***pre-processing***

***(solving***

, ***post-processing.*** Με αυτή τη σειρά γίνεται η εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό του ANSYS, για την προσομοίωση του εφελκυσμού στην ελαστική περιοχή με βάση τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, έτσι προκύπτουν συγκεκριμένοι κώδικες για κάθε μια από τις περιπτώσεις που εξετάσαμε.

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 8.1) των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε για διαφορετικό μήκος, ύψος, περιοχές ιδιοτήτων, Λόγο Poisson, element type και διακριτοποίηση.

**Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας για διαφορετικό μήκος, ύψος, περιοχές ιδιοτήτων, Λόγο Poisson, element type και διακριτοποίηση.**

Αριθμός πειράματος	Μήκος $\chi$ (mm)	Ύψος $y$ (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Συνολική Δύναμη F (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
1 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,28	0,439	121,944
2	50	2	42	8	0,3	0,428	118,888
3 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,305	0,427	118,611
4 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,308	0,428	118,888
5 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,31	0,429	119,166
6 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,315	0,4307	119,638
7 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,32	0,432	119,98
8 <sup>ο</sup>	50	2	42	8	0,35	0,441	122,52
9 <sup>ο</sup>	50	3	42	8	0,28	0,6319	175,527
10 <sup>ο</sup>	50	3	42	8	0,305	0,6444	178,99
11 <sup>ο</sup>	50	3	42	8	0,33	0,6566	182,388
12 <sup>ο</sup>	100	3	42	8	0,28	0,298	165,63
13 <sup>ο</sup>	100	3	42	8	0,3	0,302	167,77
14 <sup>ο</sup>	100	3	42	8	0,33	0,307	170,55
15 <sup>ο</sup>	150	3	42	8	0,33	0,1938	161,49
16 <sup>ο</sup>	150	3	42	8	0,36	0,1965	163,74
17 <sup>ο</sup>	50	3	42	21	0,28	0,61884	171,91
18 <sup>ο</sup>	50	3	42	21	0,3	0,9249	256,91
19 <sup>ο</sup>	50	3	42	21	0,33	0,6429	178,583
20 <sup>ο</sup>	50	3	42	21	0,36	0,65709	182,525
21 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	0,2931	162,833
22 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,33	0,29874	165,96
23 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,36	0,30428	169,04

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι διαφορετικές γεωμετρίες των δοκιμίων που προσομοιώθηκαν.



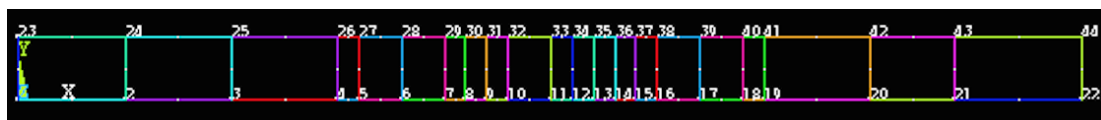
Εικόνα 8.9: 8 περιοχές, μήκος 50mm, ύψος 2mm



Εικόνα 8.10: 8 περιοχές, μήκος 100mm, ύψος 3mm



Εικόνα 8.11: 8 περιοχές, μήκος 150mm, ύψος 3mm



Εικόνα 8.12: 21 περιοχές, μήκος 50mm, ύψος 3mm



Εικόνα 8.13: 21 περιοχές, μήκος 100mm, ύψος 3mm

### 8.1.1.1 Επίδραση της πυκνότητας διακριτοποίησης

Στη συνέχεια έγινε επιλογή των χαρακτηριστικών με βάση την τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας που ήταν πιο αντιπροσωπευτική σε σχέση με το πραγματικό πείραμα εφελκυσμού (πείραμα 21) και σε αυτή την κατηγορία εκτελέστηκαν δοκιμές με αλλαγή στη διακριτοποίηση του δοκιμίου. Έτσι προέκυψε ο κάτωθι πίνακας:

**Πίνακας 8.2: Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με τη διακριτοποίηση**

Αριθμός πειράματος	Μήκος $\chi$ (mm)	Ύψος $y$ (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Διακριτοποίηση (Meshing)	Συνολική Δύναμη $F$ (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	5	0,28124	156,24
2 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	10	0,293168	162,86
3 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	15	0,311679	173,15
4 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	20	0,328616	182,56
5 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	25	0,343516	190,84
6 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	28	0,351632	195,35
7 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	29	0,354217	196,78
8 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	30	0,356748	198,19
9 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	31	0,359225	199,57
10 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	32	0,361652	200,82
11 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	35	0,368651	204,80

Στις εικόνες 8.14 – 8.17 απεικονίζεται η διακριτοποίηση του δοκιμίου για την προσομοίωση με 21 διαφορετικές περιοχές μήκος 100mm και ύψος 3mm.



**Εικόνα 8.14: Διακριτοποίηση ίση με 5**



**Εικόνα 8.15: Διακριτοποίηση ίση με 10**



**Εικόνα 8.16: Διακριτοποίηση ίση με 15**



**Εικόνα 8.17: Διακριτοποίηση ίση με 20**

Στη συνέχεια εκτελέσαμε «πειράματα» εφελκυσμού για την ελαστική περιοχή με αναλογική διακριτοποίηση με βάση το ύψος του δοκιμίου ( $\psi=3$  mm). Αρχικά, έγινε διακριτοποίηση ίση με πέντε (5), δηλαδή τα 3 mm τα χωρίζουμε σε πέντε (5) ίσα τμήματα και τις υπόλοιπες διαστάσεις του δοκιμίου τις διακριτοποιούμε με βάση αυτή την αναλογία. Ακολούθησαν «πειράματα» για διακριτοποίηση ίση με δέκα (10), δεκαπέντε (15), είκοσι (20), εικοσιπέντε (25) και τριάντα (30) για την διάσταση του  $\psi$  άξονα (3 mm) και αναλογικά υπολογίστηκε η διακριτοποίηση στις διαστάσεις που βρίσκονται στον  $x$  άξονα. Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την συνολική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο καθώς και το Μέτρο Ελαστικότητας του δοκιμίου για τις παραπάνω διακριτοποιήσεις.

**Πίνακας 8.3: Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την αναλογική διακριτοποίηση στον άξονα  $x$**

Αριθμός πειράματος	Μήκος $x$ (mm)	Ύψος $y$ (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Αναλογική Διακριτοποίηση (Meshing) για άξονα $\psi$	Συνολική Δύναμη $F$ (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	5	0,304100	168,94
2 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	10	0,317018	176,12
3 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	15	0,334270	185,70
4 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	20	0,350166	194,53
5 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	25	0,364037	202,20
6 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	30	0,376988	209,42

Παρατηρούμε από την τελευταία στήλη του Πίνακα 8.3 ότι οι τιμές του Μέρου Ελαστικότητας δεν παρουσιάζουν κάποια σύγκλιση, ώστε να έχουμε κριτήριο για ποιο «πείραμα», δηλαδή για ποια διακριτοποίηση, θα επιλέξουμε να εξετάσουμε την ελαστική περιοχή. Για τον λόγο αυτό στους πίνακες (8.4), (8.5) που ακολουθούν εξετάστηκε μεταβλητή διακριτοποίηση στις γραμμές του «δοκιμίου» στον άξονα  $x$  και στον άξονα  $y$ , όπου στην κάθε περίπτωση η διακριτοποίηση στον μη εξεταζόμενο άξονα παρέμεινε σταθερή και ίση με δέκα (10).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας «υπολογιστικών πειραμάτων» με σταθερή διακριτοποίηση δέκα (10) στον άξονα  $\chi$  και μεταβλητή διακριτοποίηση στον άξονα  $\psi$ .

**Πίνακας 8.4: Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την μεταβλητή διακριτοποίηση στον άξονα  $y$**

Αριθμός πειράματος	Μήκος $\chi$ (mm)	Ύψος $y$ (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Διακριτοποίηση (Meshing) για άξονα $\psi$	Συνολική Δύναμη $F$ (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	5	0,293402	163,00
2 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	10	0,293168	162,87
3 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	15	0,299563	166,42
4 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	20	0,306023	170,01
5 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	25	0,311859	173,25
6 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	30	0,317054	176,14

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας «υπολογιστικών πειραμάτων» με σταθερή διακριτοποίηση δέκα (10) στον άξονα  $\psi$  και μεταβλητή διακριτοποίηση στον άξονα  $\chi$ .

**Πίνακας 8.5: Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την μεταβλητή διακριτοποίηση στον άξονα  $x$**

Αριθμός πειράματος	Μήκος $\chi$ (mm)	Ύψος $y$ (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Διακριτοποίηση (Meshing) για άξονα $\chi$	Συνολική Δύναμη $F$ (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	5	0,272564	151,42
2 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	10	0,293168	162,87
3 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	15	0,302368	167,98
4 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	20	0,307226	170,682
5 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	25	0,310048	172,24
6 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	30	0,311820	173,23

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε ότι η τιμή του Μέρου Ελαστικότητας συγκλίνει για διακριτοποίηση ίση με: εικοσιπέντε (25). Άρα το 5<sup>ο</sup> πείραμα αποδίδει την βέλτιστη προσέγγιση της πειραματικής τιμής του Μέρου Ελαστικότητας σε συνάρτηση με τη διακριτοποίηση. Σε αυτή την κατηγορία δύναται να εξετάσουμε την ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου και πως τα

αποτελέσματα του μοντέλου συμβαδίζουν με τα πραγματικά αποτελέσματα του πειράματος εφελκυσμού. Παρόλα αυτά η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα υψηλή (172,24 GPa) σε σχέση με το πραγματικό Μέτρο Ελαστικότητας των συγκολλημένων κραμάτων που ανέρχεται στα 68,5GPa. Εξαιτίας της παραπάνω παρατήρησης εισάγουμε στο δισδιάστατο μοντέλο ένα πάχος της τάξης του 0.3mm το οποίο αντιστοιχεί στο 1/10 του ύψους του δοκιμίου που είναι 3mm.

Με τη αλλαγή αυτή εκτελούνται πειράματα εφελκυσμού για element type 42 που δημιουργεί στοιχεία με τέσσερις (4) κόμβους. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δύναμης από αντίδραση που δημιουργείται για επιμήκυνση 0,2mm και το Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την διακριτοποίηση που έχει εφαρμοστεί.

**Πίνακας 8.6: Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την διακριτοποίηση του δοκιμίου για element type 42 για επιμήκυνση 0,2mm**

Αριθμός πειράματος	Μήκος χ (mm)	Ύψος y (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson (ν)	Διακριτοποίηση (Meshing)	Συνολική Δύναμη F (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	5	0,08437	46,874
2 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	10	0,08797	48,866
3 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	15	0,09354	51,944
4 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	20	0,09866	54,777
5 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	25	0,10303	57,222
6 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	30	0,10700	59,444
7 <sup>ο</sup>	100	3	42	21	0,3	35	0,11050	61,389

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι η τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας είναι αρκετά χαμηλές σε σχέση με το πραγματικό Μέτρο Ελαστικότητας, η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο να εξεταστεί η συμπεριφορά του δοκιμίου με την επιλογή του element type 82 όπου σε κάθε στοιχείο αντιστοιχούν οκτώ (8) κόμβοι και όχι οι τέσσερις του element type 42. Τα αποτελέσματα αυτής της σειράς πειραμάτων για την δύναμη από αντίδραση για επιμήκυνση 0,2mm και το Μέτρο Ελαστικότητας παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα.



**Πίνακας 8.7: Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την διακριτοποίηση του δοκιμίου για element type 82 για επιμήκυνση 0,2mm**

Αριθμός πειράματος	Μήκος χ (mm)	Ύψος y (mm)	element type	Αριθμός περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά	Λόγος Poisson (ν)	Διακριτοποίηση (Meshing)	Συνολική Δύναμη F (kN) για επιμήκυνση 0,2 mm	Ολικό Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
1 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	5	0,0865	48,09
2 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	10	0,10488	58,22
3 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	15	0,1177	65,39
4 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	17	0,1218	67,66
5 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	20	0,1273	70,72
6 <sup>ο</sup>	100	3	82	21	0,3	22	0,1305	72,5

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η τιμή του Μέρου Ελαστικότητας έχει προσεγγιστεί ικανοποιητικά. Άρα με την επιλογή των οκτώ κόμβων είναι το βέλτιστο δυνατό να εξετάσουμε την ελαστική και πλαστική συμπεριφορά του δοκιμίου.

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται η προσομοίωση του «πειράματος», δηλαδή σε χρονικά βήματα επίλυση του προβλήματος στο λογισμικό του ANSYS για element type 82 δηλαδή για οκτώ κόμβους σε κάθε στοιχείο ή διαφορετικά απεικονίζονται τα διάφορα βήματα του εφελκυσμού στην **ελαστική περιοχή**. Το κάθε βήμα (step) της προσομοίωσης αναφέρεται σε επιμήκυνση του δοκιμίου 0,01mm και δίνεται από τη σχέση  $A=A_0+0,01$ , όπου  $A_0=0,01$ .



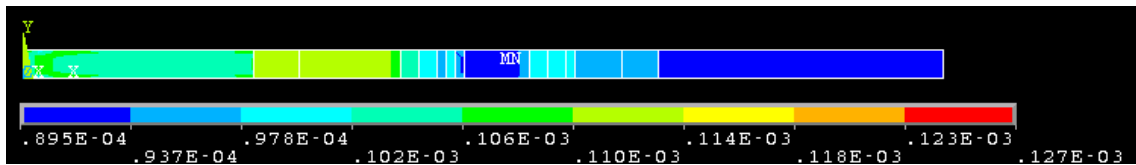
**Εικόνα 8.18: Εμφάνιση 21 περιοχών**



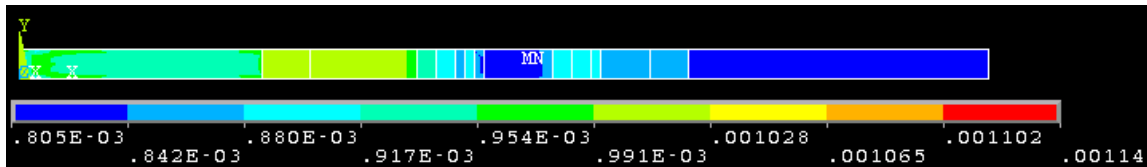
**Εικόνα 8.19: step 0**



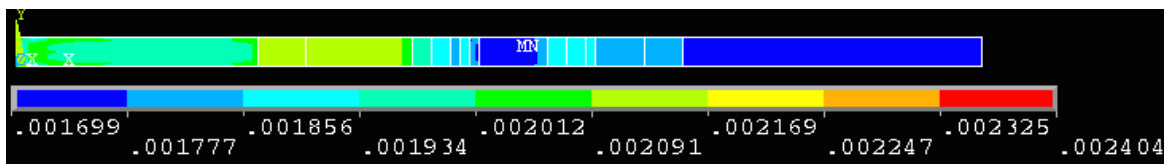
Εικόνα 8.20: step 1



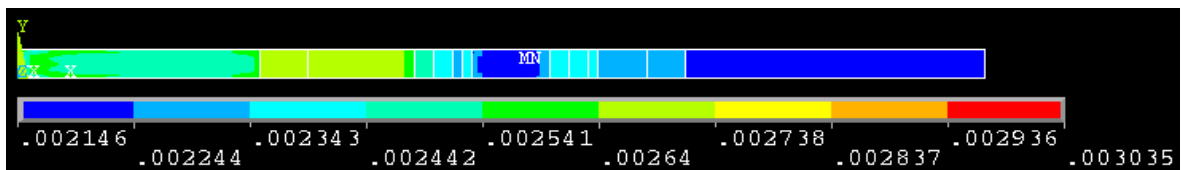
Εικόνα 8.21: step 2



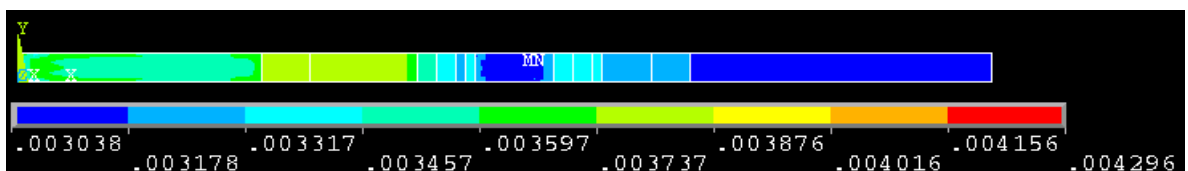
Εικόνα 8.22: step 10



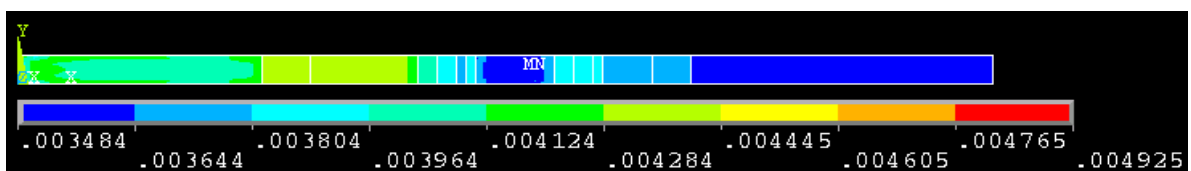
Εικόνα 8.23: step 20



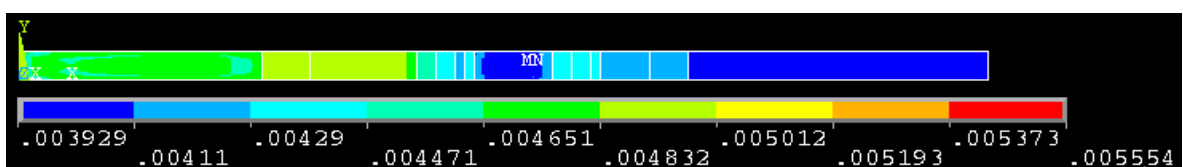
Εικόνα 8.24: step 25



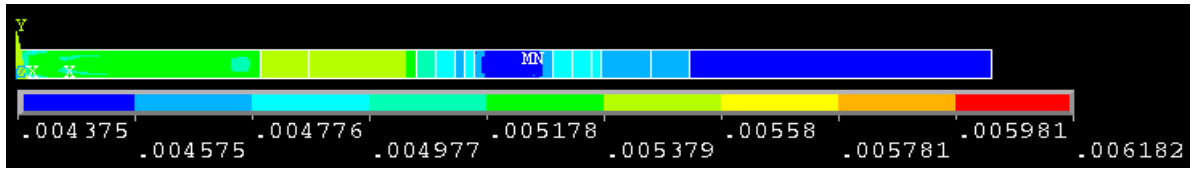
Εικόνα 8.25: step 35



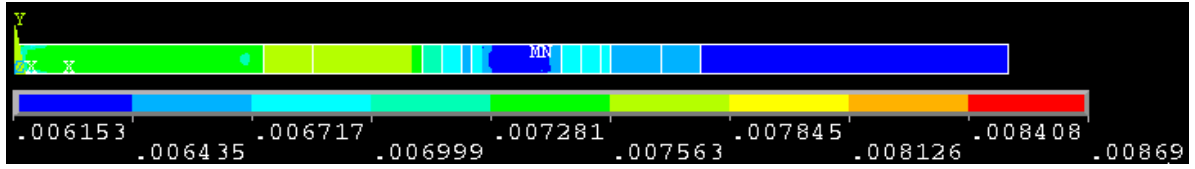
Εικόνα 8.26: step 40



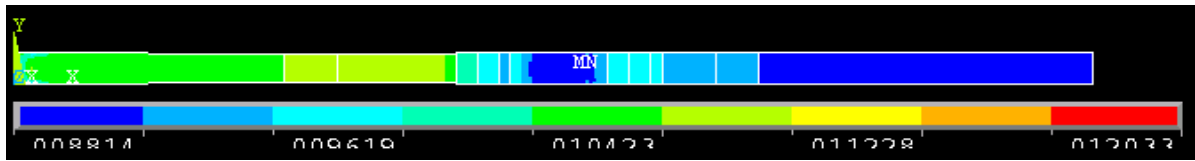
Εικόνα 8.27: step 45



Εικόνα 8.28: step 50



Εικόνα 8.29: step 70



Εικόνα 8.30: step 100

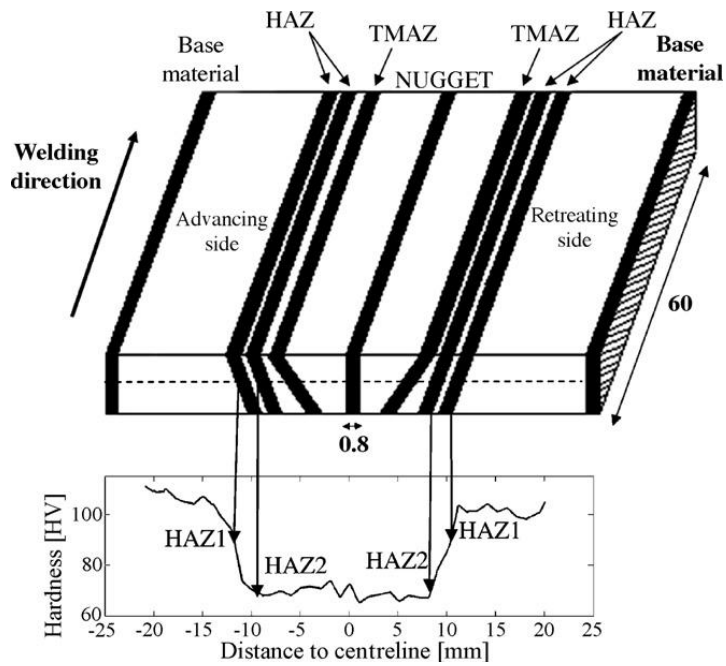
### 8.3.1.2 Προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στην πλαστική περιοχή

Το υλικό του δείγματος ακολούθησε την καταστατική εξίσωση του ελαστικού-τέλεια πλαστικού υλικού, σύμφωνα με την οποία για τάσεις μικρότερες του ορίου διαρροής αυτό συμπεριφέρεται ως ελαστικό, ενώ όταν οι τάσεις γίνουν ίσες με το όριο διαρροής το υλικό διαρρέει χωρίς περαιτέρω αύξηση της τάσης του.

Για την εύρεση του κατάλληλου μοντέλου, όπου κατάλληλο εννοείται το μοντέλο όπου τα αποτελέσματα επίλυσης είναι όμοια με αυτά που προκύπτουν από τα πραγματικά πειράματα εφελκυσμού, χρησιμοποιήθηκε η εξής μεθοδολογία: δημιουργία δοκιμίων με διαφορετική κατανομή ιδιοτήτων κατά το μήκος τους.

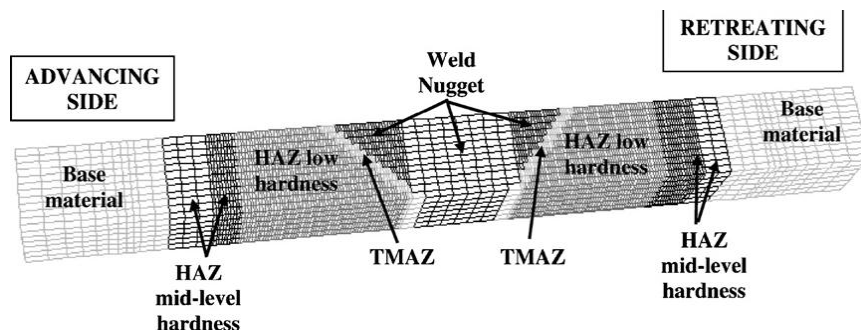
Στις ιδιότητες περιλαμβάνεται το Μέτρο Ελαστικότητας καθώς και το Όριο Διαρροής δεδομένου ότι αναφερόμαστε στην πλαστική περιοχή. Οι παραπάνω τιμές - όπως και στην ελαστική περιοχή - προκύπτουν από τις μετρήσεις νανοδιείσδυσης και μικροσκληρότητας που έχουν πραγματοποιηθεί στα συγκολλημένα δοκίμια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέρχονται από ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων.

Στο σχέδιο που ακολουθεί γίνεται αναπαράσταση των ζωνών του συγκολλημένου δοκιμίου και οι τιμές της σκληρότητας που προκύπτουν για την κάθε ζώνη, το σχέδιο προέρχεται από την βιβλιογραφία.



Σχέδιο 8.1: Αναπαράσταση ζωνών συγκόλλησης και οι αντίστοιχες τιμές σκληρότητας για κάθε ζώνη [1].

Στη συνέχεια παρατίθεται σκαρίφημα από τις διακριτοποιήσεις των διαφορετικών ζωνών συγκόλλησης με τις διαφορετικές τοπικές μηχανικές τους ιδιότητες όπως προκύπτει από την προσομοίωση του σε πείραμα εφελκυσμού.



Σκαρίφημα 8.1: Διακριτοποιήσεις των διαφορετικών ζωνών συγκόλλησης με τις διαφορετικές τοπικές μηχανικές τους ιδιότητες [2].

Εκτελέστηκαν τέσσερις κατηγορίες πειραμάτων όπου εξετάστηκε η προσομοίωση του πειράματος σε σχέση με τις τοπικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.

### 8.3.1.2.1 Υπολογιστικό Πείραμα 1 στην Πλαστική περιοχή

Αξιοποίηση όλων των μετρήσεων για την δημιουργία μιας τιμής για κάθε ιδιότητα. Δηλαδή υπολογισμός του μέσου όρου για τις τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής και εισαγωγή των τιμών αυτών στο μοντέλο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται διαχωρισμός για τις ζώνες που δημιουργούνται στο υλικό μας μετά την διαδικασία την συγκόλλησης, αλλά θεωρείται το υλικό μας ως μια ζώνη ιδιοτήτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές ιδιοτήτων που μελετήσαμε, ο χαρακτηρισμός της κάθε περιοχής ανάλογα με την ζώνη ανάδευσης που τις περιλαμβάνει καθώς και η διάσταση της κάθε περιοχής.

Πίνακας 8.8: περιοχές ιδιοτήτων - συγκόλλησης και διαστάσεις.

Δοκίμιο με 1 περιοχή		
περιοχή	ζώνες συγκόλλησης	Διαστάσεις περιοχών (mm)
1	Ενοποιημένες σε μια περιοχή	100

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζονται οι διάφορες περιοχές του δοκιμίου που μελετάμε.



Εικόνα 8.31: Δοκίμιο με 1 περιοχή ιδιοτήτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η περιοχή των ιδιοτήτων που μελετήσαμε, δηλαδή η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας, η τιμή της Σκληρότητας

καθώς και η τιμή του Ορίου Διαρροής για την κάθε περιοχή που εξετάσαμε. Οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και της Σκληρότητας αντλούνται από τα διαγράμματα των μετρήσεων της νανοδιείσδυσης. Η τιμή του Ορίου Διαρροής υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο που συσχετίζει το Όριο Διαρροής με την Σκληρότητα Vickers.

$$\sigma_y = 3 H_v$$

**Πίνακας 8.9: Περιοχές, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής**

1 περιοχή			
περιοχή	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)
1	68,53	79.33	238

### **8.3.1.2.2 Υπολογιστικό Πείραμα 2 στην Πλαστική περιοχή**

Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται αξιοποίηση έξι τιμών από τις μετρήσεις της νανοδιείσδυσης με σκοπό την δημιουργία έξι ζωνών. Δηλαδή έξι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και έξι του Ορίου Διαρροής και εισαγωγή των τιμών αυτών στο μοντέλο

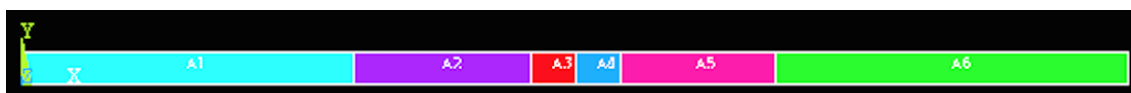
Στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται διαχωρισμός για τις ζώνες που δημιουργούνται στο υλικό μας μετά την διαδικασία την συγκόλλησης, οι ζώνες αυτές είναι: το Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές ιδιοτήτων που μελετήσαμε, ο χαρακτηρισμός της κάθε περιοχής ανάλογα με την ζώνη ανάδευσης που τις περιλαμβάνει καθώς και η διάσταση της κάθε περιοχής.

**Πίνακας 8.10: περιοχές ιδιοτήτων - συγκόλλησης και διαστάσεις**

Δοκίμιο με 6 περιοχές		
περιοχές	ζώνες συγκόλλησης	Διαστάσεις περιοχών (mm)
1	Μέταλλο Βάσης AA6082	30
2	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	16
3	Ζώνη ανάδευσης AA6082	4
4	Ζώνη ανάδευσης AA5083	4
5	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA5083	12
6	Μέταλλο Βάσης AA5083	34

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζονται οι διάφορες περιοχές του δοκιμίου που μελετάμε.



**Εικόνα 8.32: Δοκίμιο με 6 περιοχές ιδιοτήτων**

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η περιοχή των ιδιοτήτων που μελετήσαμε, δηλαδή η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας, η τιμή της Σκληρότητας καθώς και η τιμή του Ορίου Διαρροής για την κάθε περιοχή που εξετάσαμε. Οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και της Σκληρότητας αντλούνται από τα διαγράμματα των μετρήσεων της νανοδιείσδυσης.

**Πίνακας 8.11: Περιοχές, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής**

6 περιοχές			
περιοχές	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)
1	71,7	105	315
2	64,43	75	225
3	70,68	82	246
4	73,43	80	240
5	67,8	80	240
6	71,71	80	240



### 8.3.1.2.3 Υπολογιστικό Πείραμα 3 στην Πλαστική περιοχή

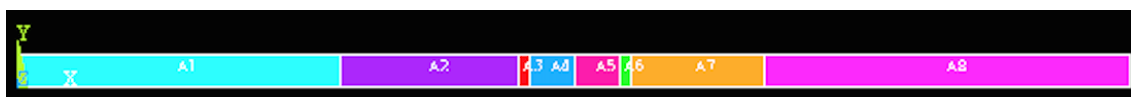
Κατά την τρίτη προσομοίωση στην πλαστική περιοχή χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις της νανοδιείσδυσης οκτώ τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και οκτώ τιμές του Ορίου Διαρροής με σκοπό την δημιουργία οκτώ ζωνών: το Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 5083, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές ιδιοτήτων που μελετήσαμε, ο χαρακτηρισμός της κάθε περιοχής ανάλογα με την ζώνη ανάδευσης που τις περιλαμβάνει καθώς και η διάσταση της κάθε περιοχής.

Πίνακας 8.12: περιοχές ιδιοτήτων - συγκόλλησης και διαστάσεις

Δοκίμιο με 8 περιοχές		
περιοχή	ζώνες συγκόλλησης	Διαστάσεις περιοχών (mm)
1	Μέταλλο Βάσης AA6082	29
2	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	16
3	Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	1
4	Ζώνη ανάδευσης AA6082	4
5	Ζώνη ανάδευσης AA5083	4
6	Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	1
7	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA5083	12
8	Μέταλλο Βάσης AA5083	33

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζονται οι διάφορες περιοχές του δοκιμίου που μελετάμε.



Εικόνα 8.33: Δοκίμιο με 8 περιοχές ιδιοτήτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η περιοχή των ιδιοτήτων που μελετήσαμε, δηλαδή η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας, η τιμή της Σκληρότητας καθώς και η τιμή του Ορίου Διαρροής για την κάθε περιοχή που εξετάσαμε. Οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και της Σκληρότητας αντλούνται από τα διαγράμματα των μετρήσεων της νανοδιείσδυσης.

**Πίνακας 8.13: Περιοχές, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής**

8 περιοχές			
περιοχές	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)
1	71,7	105	315
2	64,43	75	225
3	70	83.33	250
4	70,68	82	246
5	73,43	80	240
6	70	105	315
7	67,8	80	240
8	71,71	80	240

#### **8.3.1.2.4 Υπολογιστικό Πείραμα 4 στην Πλαστική περιοχή**

Κατά την τέταρτη προσομοίωση στην πλαστική περιοχή χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις της νανοδιείσδυσης εικοσιένα τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και εικοσιένα τιμές του Ορίου Διαρροής με σκοπό την δημιουργία εικοσιένα ζωνών που περιλαμβάνονταν στις εξής ζώνες συγκόλλησης: το Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 6082, η ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 5083, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές ιδιοτήτων που μελετήσαμε, ο χαρακτηρισμός της κάθε περιοχής ανάλογα με την ζώνη ανάδευσης που τις περιλαμβάνει καθώς και η διάσταση της κάθε περιοχής.

**Πίνακας 8.14: περιοχές ιδιοτήτων - συγκόλλησης και διαστάσεις.**

Δοκίμιο με 21 περιοχές		
περιοχές	ζώνες συγκόλλησης	Διαστάσεις περιοχών (mm)
1	Μέταλλο Βάσης AA6082	25
2	Μέταλλο Βάσης AA6082 τα πρώτα 4mm	5
3	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	10
4	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	1
5	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	2
6	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	2
7	Θερμομηχανικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	1
8	Ζώνη ανάδευσης AA6082	1
9	Ζώνη ανάδευσης AA6082	1
10	Ζώνη ανάδευσης AA6082	2
11	Ζώνη ανάδευσης AA5083	1
12	Ζώνη ανάδευσης AA5083	1
13	Ζώνη ανάδευσης AA5083	1
14	Ζώνη ανάδευσης AA5083	1
15	Θερμομηχανικά Επηρασμένη Ζώνη AA6082	1
16	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA5083	2
17	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA5083	2
18	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA5083	1
19	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA5083	5
20	Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη AA5083 τα πρώτα 2 mm, τα υπόλοιπα 2 mm Μέταλλο Βάσης AA5083	4
21	Μέταλλο Βάσης AA5083	31

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζονται οι διάφορες περιοχές του δοκιμίου που μελετάμε.



**Εικόνα 8.34: Δοκίμιο με 21 περιοχές ιδιοτήτων**

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η περιοχή των ιδιοτήτων που μελετήσαμε, δηλαδή η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας, η τιμή της Σκληρότητας καθώς και η τιμή του Ορίου Διαρροής για την κάθε περιοχή που εξετάσαμε. Οι

τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και της Σκληρότητας αντλούνται από τα διαγράμματα των μετρήσεων της νανοδιείσδυσης.

**Πίνακας 8.15: Περιοχές, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής**

21 περιοχές				
περιοχές	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)	
1	63,19	99,33	298	
2	60,27	91,66	275	
3	60,37	74	222	
4	62,51	72,66	218	
5	65,5	75	225	
6	68,32	75	225	
7	69,51	76,33	229	
8	67,08	81,66	245	
9	71,48	77	231	
10	72,33	78,66	236	
11	72,33	82	246	
12	74,69	83	249	
13	73,84	85	255	
14	71,59	81	243	
15	69,72	75	225	
16	68,14	77,33	232	
17	67,49	75	225	
18	67,48	76	228	
19	69,9	77,66	233	
20	70,86	76,66	230	
21	71,7	77,66	233	

### 8.3.1.2.5 Αξιοποίηση των δεδομένων

Όλα τα παραπάνω δεδομένα είναι η πληροφορία που εισάγεται στο λογισμικό του ANSYS προκειμένου να προσεγγίσουμε το σημείο θραύσης καθώς και να αποδείξουμε την σπουδαιότητα της αξιοποίησης των μετρήσεων της νανοδιείσδυσης.

Ακολουθεί εικόνα από το πραγματικό πείραμα εφελκυσμού, όπου είναι ορατό το σημείο θραύσης.



Εικόνα: Δοκίμιο από συγκολλημένα κράματα αλουμινίου που έχει αστοχήσει σε δοκιμή εφελκυσμού

Παρατηρώντας την εικόνα και γνωρίζοντας από την μεταλλογραφική ανάλυση την διαμόρφωση των ζωνών που δημιουργούνται κατά την διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, η αστοχία του υλικού εμφανίζεται στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082. Το παραπάνω φαινόμενο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού το Μέτρο Ελαστικότητας και η τιμή της Σκληρότητας (που οδηγεί στον υπολογισμό του Ορίου Διαρροής) του AA 6082 είναι υψηλότερες σε σχέση με αυτές του AA5083, άρα αναμενόταν να είναι και υψηλότερες οι τιμές αυτές και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), όμως με την θερμοκρασιακή διαταραχή του υλικού καταστρέφονται τα κατακρυσμίσματα ( $\beta''$ ) στη ζώνη αυτή με αποτέλεσμα να έχουμε πτώση των τιμών του Μέρους Ελαστικότητας και της Σκληρότητας. Το συγκεκριμένο θέμα για να αναπτυχθεί επαρκώς απαιτεί εκτενές κείμενο που δεν αποτελεί στόχο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας.

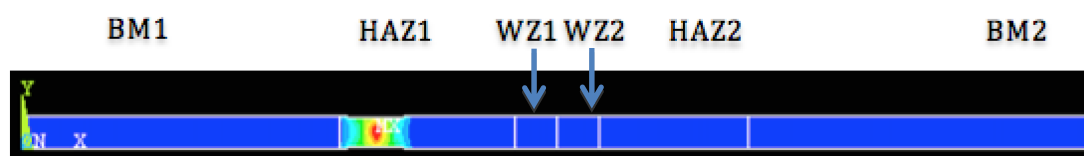
Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από το υπολογιστικό πείραμα εφελκυσμού στο ANSYS στην πλαστική περιοχή για τον Μέσο Όρο των τιμών του Μέρους Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής όπου δεν έχουν συμπεριληφθεί οι διάφορες ζώνες συγκόλλησης που δημιουργούνται.



Εικόνα 8.35: εκτέλεση πειράματος εφελκυσμού συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου στο Ansys όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη τις διαφορετικές ζώνες που δημιουργούνται με την διαδικασία της συγκόλλησης FSW.

Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση των τάσεων είναι στα άκρα του «δοκιμίου» και όχι στο κέντρο όπως είναι αναμενόμενο σε ένα πείραμα εφελκυσμού το παραπάνω φαινόμενο εξηγείται διότι η γεωμετρία του «δοκιμίου» δεν στενεύει στο κέντρο δηλαδή δεν έχει την μορφή dog bone με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των τάσεων να εμφανίζεται στα άκρα.

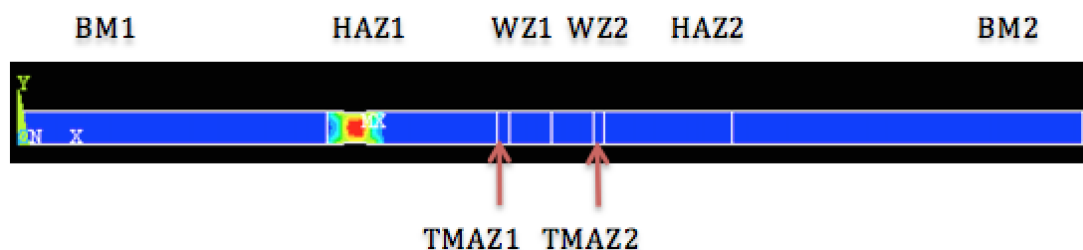
Ακολουθεί εικόνα από το υπολογιστικό πείραμα εφελκυσμού στο ANSYS στην πλαστική περιοχή για έξι περιοχές δηλαδή αξιοποίηση έξι τιμών από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης για το Μέτρο Ελαστικότητας και έξι τιμές για το Όριο Διαρροής στις εξής ζώνες συγκόλλησης: Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, την ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 6082, την ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.



Εικόνα 8.36: εκτέλεση πειράματος εφελκυσμού συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου στο Ansys όπου λαμβάνουμε υπόψη τις διαφορετικές ιδιότητες (Μέτρο Ελαστικότητας και όριο διαρροής) για τις ζώνες των μετάλλων βάσης BM1 & BM2, των θερμικά επηρεασμένων ζωνών HAZ1 & HAZ2, των ζωνών συγκόλλησης WZ1 & WZ2

Ακολουθεί εικόνα από το υπολογιστικό πείραμα εφελκυσμού στο ANSYS στην πλαστική περιοχή για οκτώ περιοχές δηλαδή αξιοποίηση οκτώ τιμών από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης για το Μέτρο Ελαστικότητας και οκτώ τιμές για το Όριο Διαρροής στις εξής ζώνες συγκόλλησης: Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, την ζώνη ανάδευσης

για το κράμα AA 6082, την ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 5083, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.



Εικόνα 8.37: εκτέλεση πειράματος εφελκυσμού συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου στο Ansys όπου λαμβάνουμε υπόψη τις διαφορετικές ιδιότητες (Μέτρο Ελαστικότητας και όριο διαρροής) για τις ζώνες των μετάλλων βάσης BM1 & BM2, των θερμικά επηρεασμένων ζωνών HAZ1 & HAZ2, των θερμομηχανικά επηρεασμένων ζωνών TMAZ1 & TMAZ2 των ζωνών συγκόλλησης WZ1 & WZ2.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται εικόνα από το υπολογιστικό πείραμα εφελκυσμού στο ANSYS στην πλαστική περιοχή για εικοσιένα περιοχές δηλαδή αξιοποίηση εικοσιένα τιμών από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης για το Μέτρο Ελαστικότητας και εικοσιένα τιμές για το Όριο Διαρροής στις εξής ζώνες συγκόλλησης: Μέταλλο Βάσης για το κράμα AA 6082, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 6082, την ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 6082, την ζώνη ανάδευσης για το κράμα AA 5083, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του κράματος AA 5083, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη για το κράμα AA 5083 και το μέταλλο βάσης για το κράμα AA 5083.

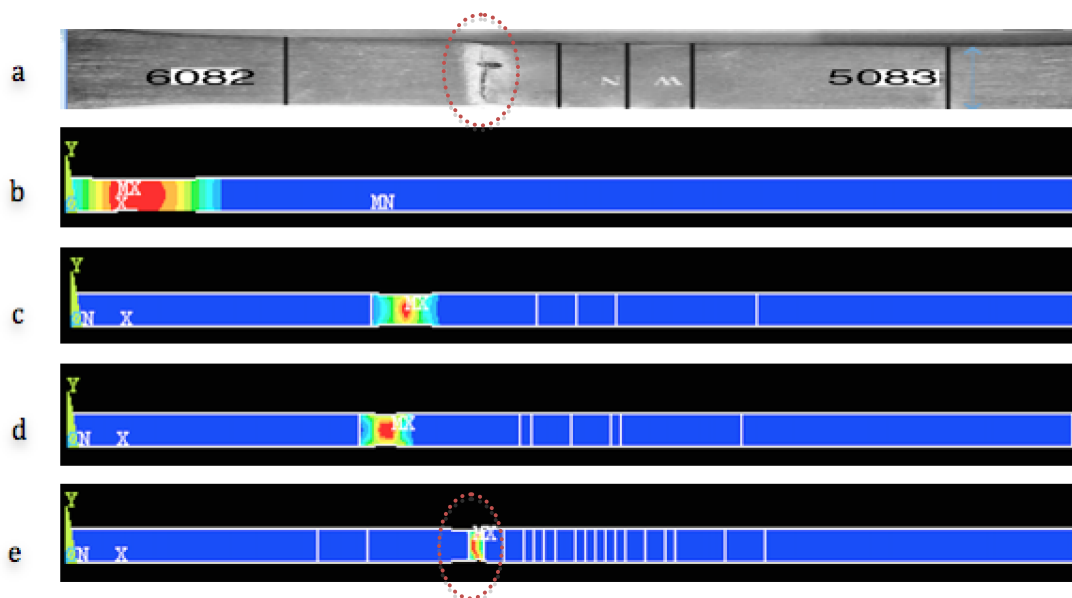


Εικόνα 8.39: εκτέλεση πειράματος εφελκυσμού συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου στο Ansys όπου λαμβάνουμε υπόψη τις διαφορετικές ιδιότητες (Μέτρο Ελαστικότητας και όριο διαρροής) για 21 περιοχές οι οποίες περιλαμβάνουν τις ζώνες των μετάλλων βάσης BM1 & BM2, των θερμικά επηρεασμένων ζωνών HAZ1 & HAZ2, των θερμομηχανικά επηρεασμένων ζωνών TMAZ1 & TMAZ2 των ζωνών συγκόλλησης WZ1 & WZ2.

Οι τιμές που εισάγονται στο λογισμικό του ANSYS για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι αυτές που αναφέρονται στους πίνακες 8.9 -8.15της παραγράφου 8.3.1.2

### 8.3.1.2.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Στις εικόνες που ακολουθούν γίνεται πλέον κατανοητό ότι όσο περισσότερες τιμές εισάγουμε στο λογισμικό ANSYS τόσο προσεγγίζεται το σημείο της αστοχίας. Όπου και τελικά στην εικόνα e το σημείο θραύσης όπως αυτό αποτυπώνεται στην επίλυση του προβλήματος στο λογισμικό του ANSYS ταυτίζεται με το σημείο θραύσης του πραγματικού πειράματος εφελκυσμού.



Εικόνα 8.40: Σύγκριση σημείου αστοχίας στο πραγματικό πείραμα εφελκυσμού και στο λογισμικό του Ansys.

Εικόνα a: αστοχία στο πραγματικό πείραμα εφελκυσμού.

Εικόνα b: αστοχία στο λογισμικό του Ansys για την μέση τιμή των Μέτρων Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής, τιμές που έχουν ληφθεί από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης.

Εικόνα c: αστοχία στο λογισμικό του Ansys για έξι τιμές των Μέτρων Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής, τιμές που έχουν ληφθεί από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης

Εικόνα d: αστοχία στο λογισμικό του Ansys για οκτώ τιμές των Μέτρων Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής τιμές, που έχουν ληφθεί από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης

Εικόνα e: αστοχία στο λογισμικό του Ansys για είκοσι μια τιμές των Μέτρων Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής τιμές, που έχουν ληφθεί από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης



Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η ροή της προσομοίωσης για την εξέταση της πλαστικής περιοχής για το μοντέλο της εικόνας ε με τα εξής χαρακτηριστικά:

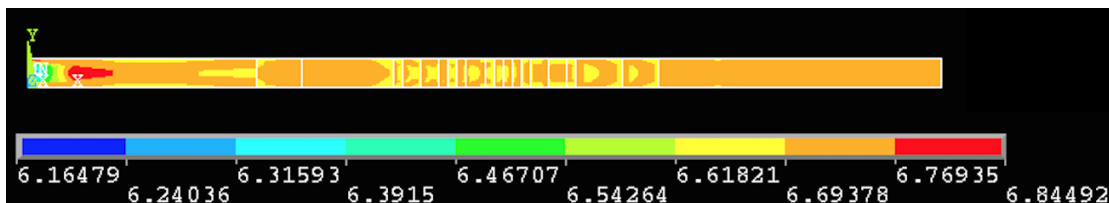
- Element type Plane 82
- 21 περιοχές
- Διακριτοποίηση ίση με 15

Οι εικόνες που ακολουθούν μας παρουσιάζουν την εξέταση της πλαστικής περιοχής σε συνάρτηση της τάσης Von Mises με το βήμα (step) της επίλυσης, όπως έχει αναφερθεί το βήμα εξαρτάται από την επιμήκυνση του δοκιμίου και υπολογίζεται από τον τύπο  $A=A_0+0,01 \text{ mm}$ , όπου  $A_0 = 0,01$ .



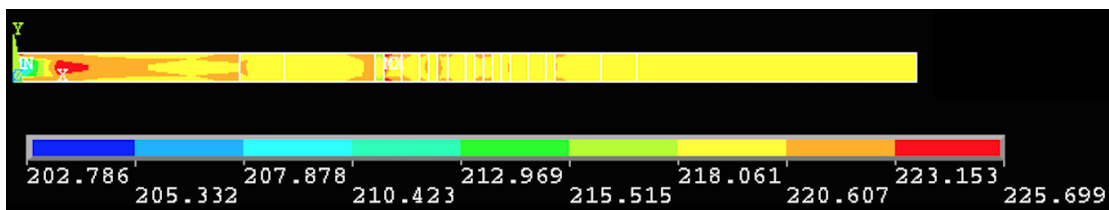
Εικόνα 8.41: Τάση Von Mises, step 1

$\varepsilon=0,0001$   
 $\varepsilon=0,0001$



Εικόνα 8.42: Τάση Von Mises, step 2

$\varepsilon=0,0002$



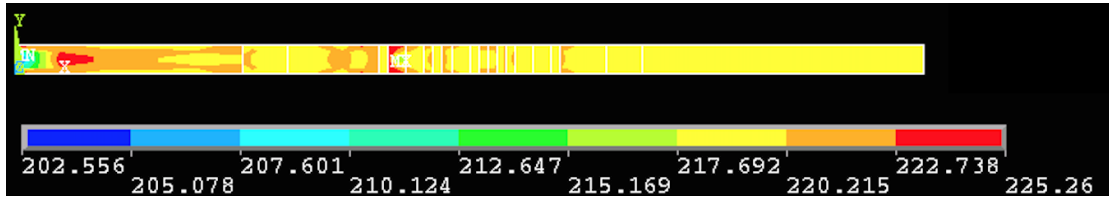
Εικόνα 8.43: Τάση Von Mises, step 34

$\varepsilon=0,0034$



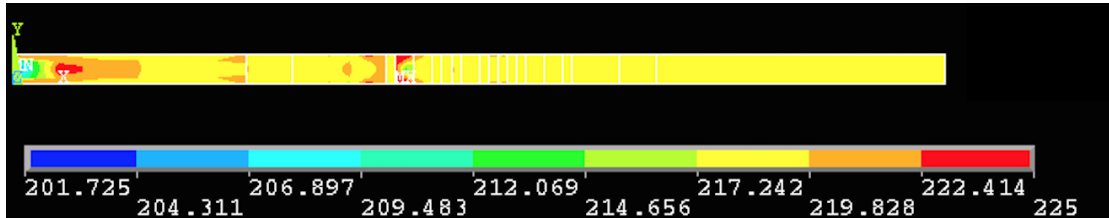
Εικόνα 8.43: Τάση Von Mises, step 34,1

$\varepsilon=0,00341$



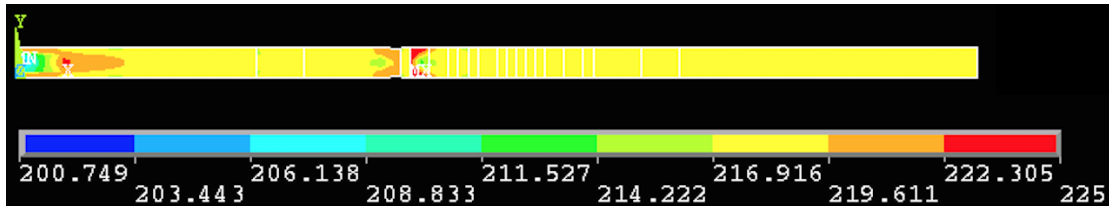
$\varepsilon=0,0035$

Εικόνα 8.44: Τάση Von Mises, step 35



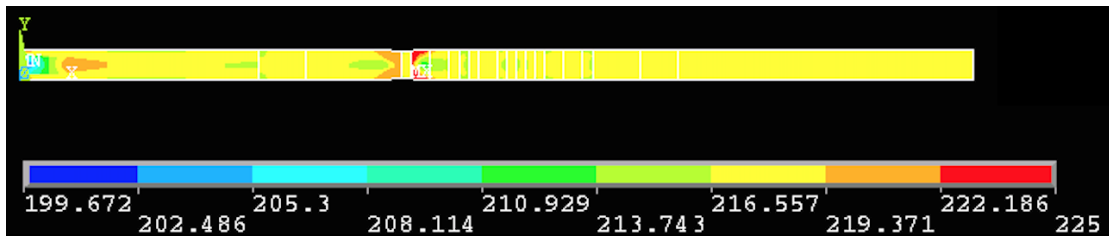
$\varepsilon=0,0036$

Εικόνα 8.45: Τάση Von Mises, step 36



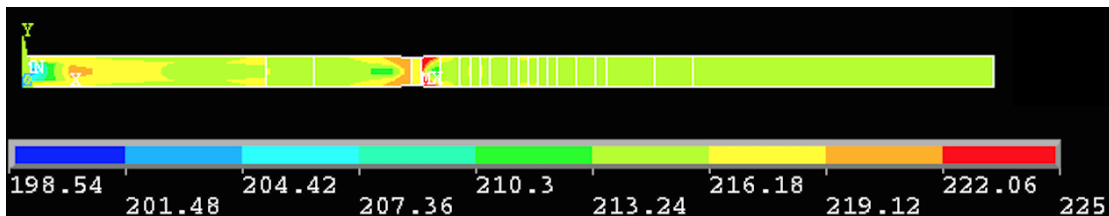
$\varepsilon=0,0037$

Εικόνα 8.46: Τάση Von Mises, step 37



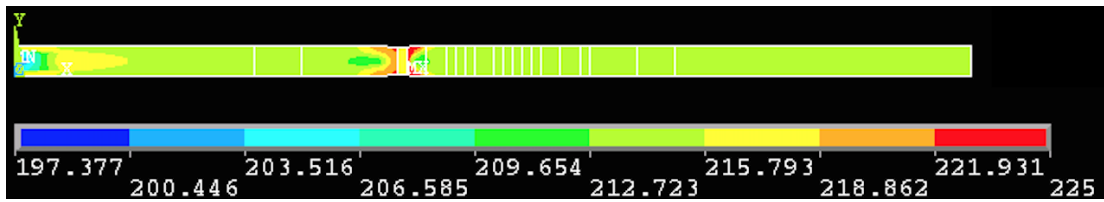
$\varepsilon=0,00375$

Εικόνα 8.47: Τάση Von Mises, step 37,5



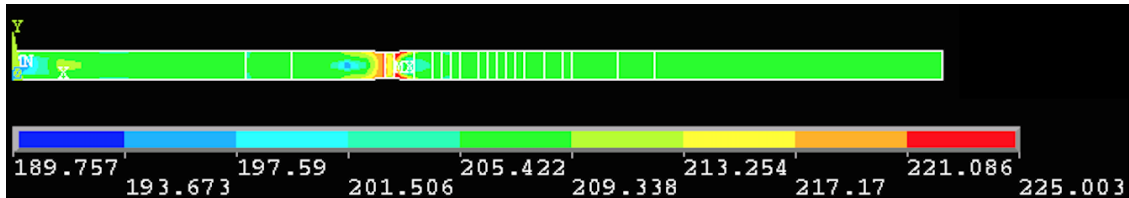
$\varepsilon=0,0038$

Εικόνα 8.41: Τάση Von Mises, step 38



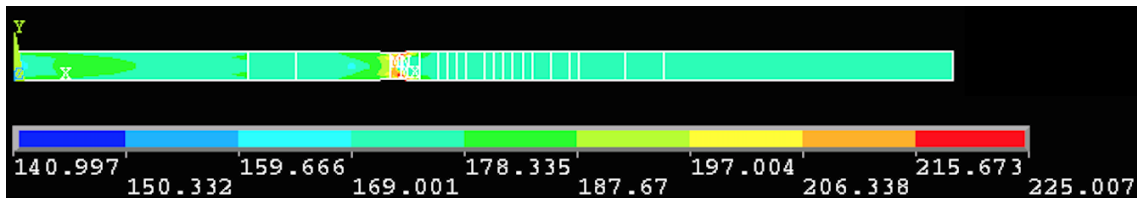
$\epsilon=0,004$

Εικόνα 8.48: Τάση Von Mises, step 40



$\epsilon=0,0045$

Εικόνα 8.49: Τάση Von Mises, step 45



$\epsilon=0,0045$

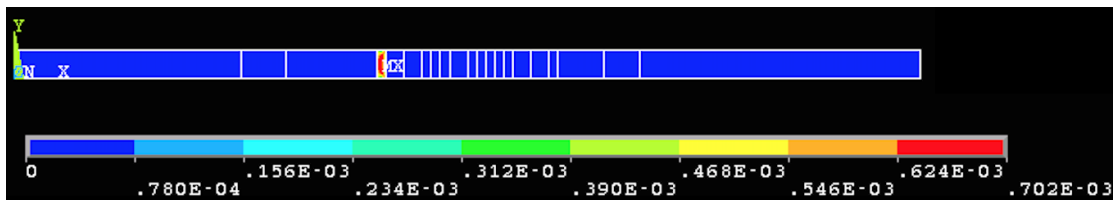
Εικόνα 8.50: Τάση Von Mises, step 49

Οι εικόνες που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν την Von Mises παραμόρφωση.



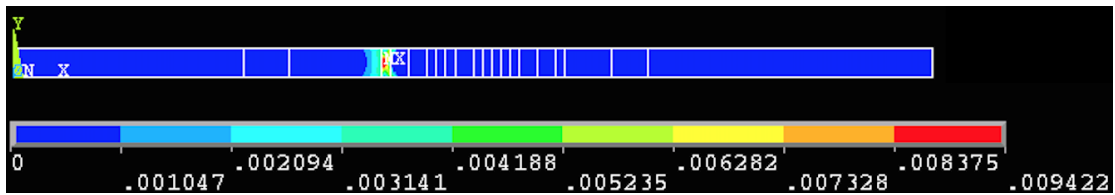
$\epsilon=0,0001$

Εικόνα 8.51: Παραμόρφωση Von Mises, step 1



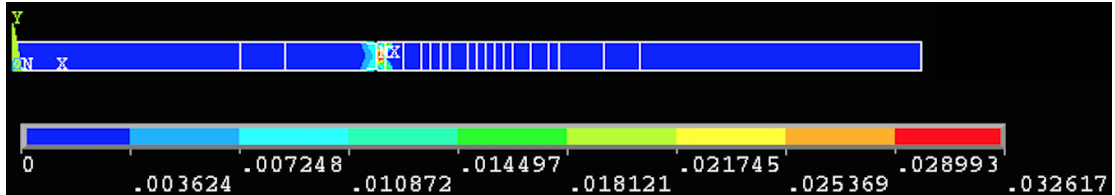
$\epsilon=0,0034$

Εικόνα 8.52: Παραμόρφωση Von Mises, step 34



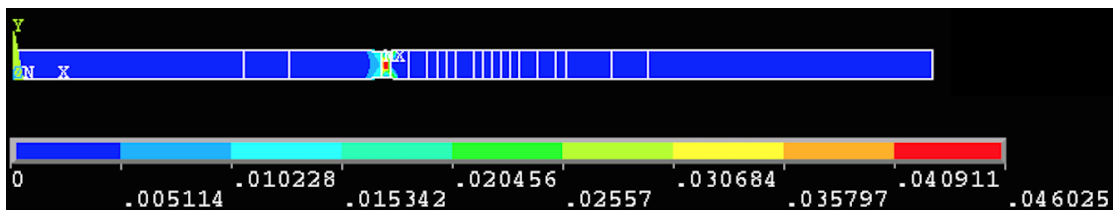
$\varepsilon=0,0035$

Εικόνα 8.53: Παραμόρφωση Von Mises, step 35



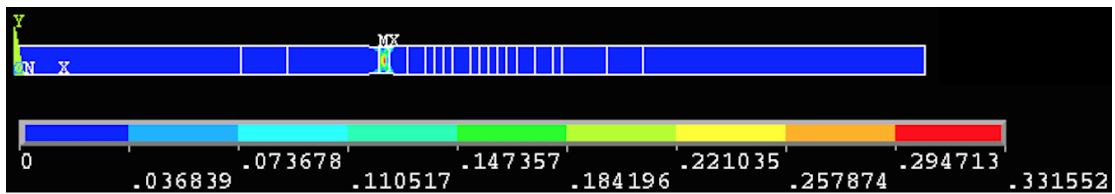
$\varepsilon=0,0037$

Εικόνα 8.54: Παραμόρφωση Von Mises, step 37



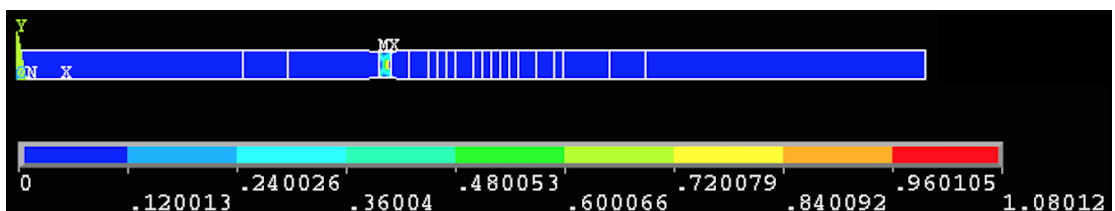
$\varepsilon=0,0038$

Εικόνα 8.55: Παραμόρφωση Von Mises, step 38



$\varepsilon=0,0048$

Εικόνα 8.56: Παραμόρφωση Von Mises, step 48



$\varepsilon=0,0060$

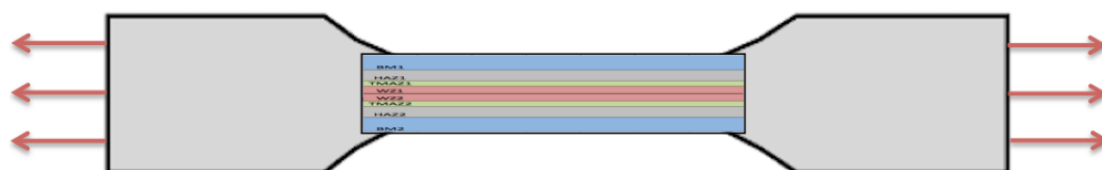
Εικόνα 8.57: Παραμόρφωση Von Mises, step 60

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία και η μοντελοποίηση αφορά συγκόλληση που έχει πραγματοποιηθεί κάθετα στα εφαρμοζόμενα φορτία εφελκυσμού.

### 8.3.2 Προσομοίωση διαμήκους συγκόλλησης.

Στη συνέχεια του υπολογιστικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού για συγκόλληση παράλληλη στα φορτία εφελκυσμού για συγκολλημένα κράματα της σειράς 6082 και 5083 με την μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής υπό ανάδευση. Για την συγκεκριμένη προσομοίωση δεν έχουμε τα αντίστοιχα πειράματα εφελκυσμού όπως είχαμε στην περίπτωση της συγκόλλησης με κάθετη διεύθυνση στα φορτία της εφελκυστικής δύναμης.

Μια ακόμα παρατήρηση για την προσομοίωση που ακολουθεί είναι ότι για λογούς γεωμετρίας θεωρούμε ότι ο πύρος της συγκόλλησης δημιουργεί ζώνες συγκόλλησης μικρότερου μήκους, κατά  $\frac{1}{4}$ , αλλά με τις ίδιες ιδιότητες όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται σχηματική αναπαράσταση των ζωνών και της διεύθυνσης συγκόλλησης καθώς και η διεύθυνση των φορτίων εφελκυσμού.

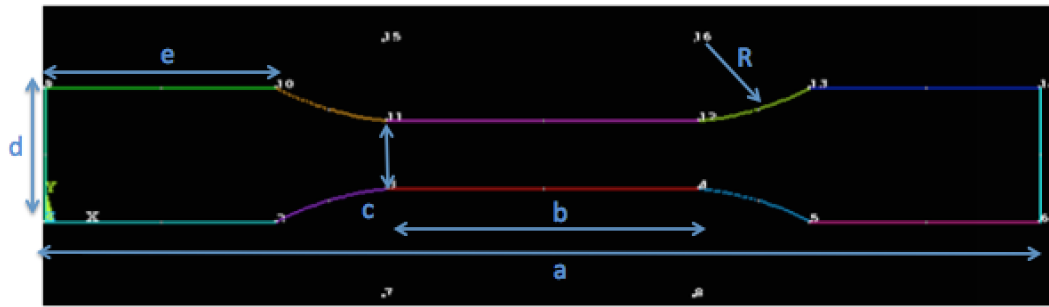


Εικόνα 8.58: Σχηματική αναπαράσταση των ζωνών συγκόλλησης και η διεύθυνση της διαμήκους συγκόλλησης και των φορτίων εφελκυσμού

Όπως και στην περίπτωση της εγκάρσιας συγκόλλησης εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για την ελαστική και την πλαστική περιοχή. Όπου τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης που έδιναν την καλύτερη προσέγγιση του πειραματικού Μέτρου Ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στην πλαστική περιοχή.

#### 8.3.2.1 Προσομοίωση στην ελαστική περιοχή

Κατά την προσομοίωση της διαμήκους συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο γεωμετρίας dog bone (Εικόνα 8.59).



Διαστάσεις Dog Bone  
 Σύμφωνα με πρότυπο εφελκυσμού ASTM  
 a=160mm  
 b=50mm  
 c=15mm  
 d=30mm  
 e=37mm  
 R=22,4mm

Εικόνα 8.59: Προσομοίωση dog bone

Το δοκίμιο χωρίζεται σε οκτώ περιοχές δηλαδή το μέταλλο βάσης AA5083, τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA5083, τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του 5083, τη ζώνη ανάδευσης του 5083 και ακολουθούν η ζώνη ανάδευσης του AA6082, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082 και το μέταλλο βάσης του AA6082. Οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας που εισάγονται στο λογισμικό του ANSYS προέρχονται – όπως και στην περίπτωση της εγκάρσιας συγκόλλησης– από τις μετρήσεις της ναναδιείσδυσης. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η γεωμετρία του δοκιμίου όπου εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις της ελαστικής και πλαστικής περιοχής.



Εικόνα 8.60: Προσομοίωση δοκιμίου διαμήκουσ συγκόλλησης για οκτώ ζώνες.

Σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι που εξετάσαμε ήταν το είδος των πεπερασμένων στοιχείων, element type 42 και element type 82 που

δημιουργούν στοιχεία με τέσσερις και οκτώ κόμβους αντίστοιχα. Μια ακόμα παράμετρος που εξετάστηκε είναι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που καθορίζεται από την διακριτοποίηση του δοκιμίου, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για διακριτοποίηση ίση με 5 και 10. Καθοριστικό ρόλο στην προσέγγιση του Μέτρου Ελαστικότητας παίζει η εισαγωγή του στοιχειώδους πάχους που ισούται με το 10% της διάστασης του y άξονα. Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται οι τιμές από την δύναμη της αντίδρασης και το ολικό Μέτρο Ελαστικότητας του δοκιμίου για επιμήκυνση του δοκιμίου ίση με 0,4 mm.

**Πίνακας 8.16: Αριθμός πειράματος, Διακριτοποίηση, πάχος, δύναμη F, Μέτρο Ελαστικότητας E.**

Αριθμός Πειράματος	Element type	Διακριτοποίηση (meshing)	Πάχος t mm	Δύναμη F (kN)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
1	42	5	1.5	Δεν Συγκλίνει	Δεν Συγκλίνει
2	42	10	3	Δεν Συγκλίνει	Δεν Συγκλίνει
3	82	5	0	0,538 10 <sup>4</sup>	23,91
4	82	5	1.5	0,799 10 <sup>4</sup>	35,47
5	82	5	3	0,1598 10 <sup>5</sup>	70,95
6	82	10	0	0,695 10 <sup>4</sup>	30,88
7	82	10	1.5	0,104 10 <sup>5</sup>	47,17
8	82	10	3	0,209 10 <sup>5</sup>	92,8

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι η 5<sup>η</sup> προσομοίωση προσεγγίζει άριστα το πειραματικό Μέτρο Ελαστικότητας. Έτσι λοιπόν, με τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης αυτής εξετάζουμε την πλαστική περιοχή.

### **8.3.2.2 Προσομοίωση πλαστικής περιοχής**

Όπως και στην περίπτωση της εγκάρσιας συγκόλλησης εκτελέστηκαν τέσσερις σειρές πειραμάτων, σε κάθε προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες τοπικές μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα στα πειράματα της **πρώτης** προσομοίωσης εξετάστηκε η συμπεριφορά του δοκιμίου στην

περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας για τα δυο κράματα αλουμινίου αλλά δεν συμπεριλαμβάνονται οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής για την ζώνη συγκόλλησης αλλά ούτε και για τις υπόλοιπες ζώνες που δημιουργούνται. Στη **δεύτερη** προσομοίωση συμπεριλαμβάνονται τα κράματα 5083 και 6082 και οι ζώνες συγκόλλησης. Ακολουθεί η **τρίτη** και **τέταρτη** προσομοίωση που συμπεριλαμβάνουν τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες και τις θερμομηχανικά επηρεασμένες ζώνες αντίστοιχα.

### 8.3.2.2.1 Πείραμα 1<sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία προσομοιωμένου δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο στην διεύθυνση του y άξονα χωρίζεται δύο τμήματα, από κάτω προς τα πάνω, αυτό του AA5083 και αυτό του AA6082.



Εικόνα 8.61: Δοκίμιο με δυο περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων

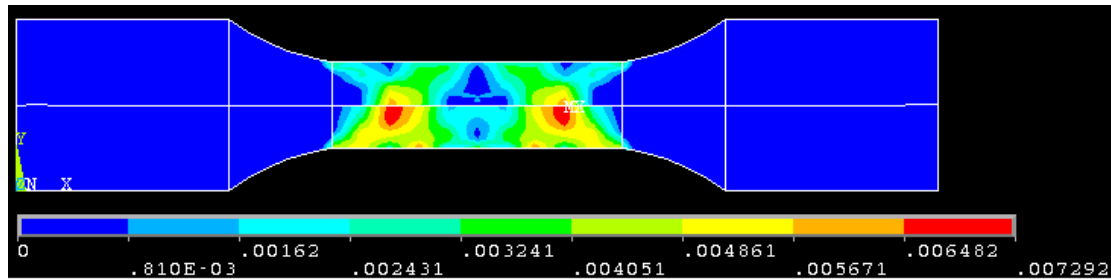
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές του δοκιμίου που προσομοιώθηκαν με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τις τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής.

Πίνακας 8.17: Διαστάσεις περιοχών, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής.

Περιοχές	Διαστάσεις (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (Mpa)	Όριο Διαρροής
AA6082	7.5	71.7	105	315
AA5083	7,5	71.7	80	240



Με την επιβολή των εφελκυστικών φορτίων παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει την πρώτη διαρροή σε δυο σημεία συμμετρικά ως προς το κέντρο του μετάλλου βάσης AA5083 (Εικόνα 8.62)



Εικόνα 8.62: Δοκίμιο με δυο περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με κριτήριο Von Mises στην παραμόρφωση.

### 8.3.2.2.2 Πείραμα 2<sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία προσομοιωμένου δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο στην διεύθυνση του y άξονα χωρίζεται τέσσερα τμήματα, από κάτω προς τα πάνω, αυτό του AA5083, της ζώνης ανάδευσης AA5083, την ζώνη ανάδευσης του AA6082 και το μέταλλο βάσης του AA6082.



Εικόνα 8.63: Δοκίμιο με τέσσερις περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων

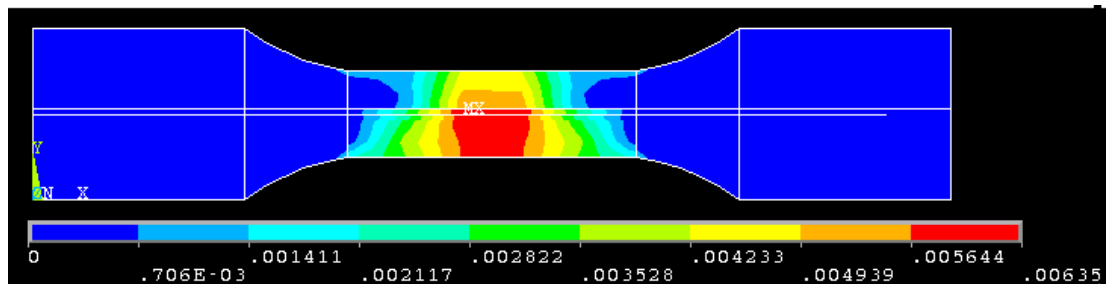
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές του δοκιμίου που προσομοιώθηκαν με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τις τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής.

Πίνακας 8.17: Διαστάσεις περιοχών, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής.

Περιοχές	Διατάσεις	Μέτρο	Σκληρότητα	Όριο
----------	-----------	-------	------------	------

	(mm)	Ελαστικότητα (GPa)	(MPa)	Διαρροής (Mpa)
AA6082	6,5	71,7	105	315
Ζώνη Ανάδευσης AA6082	1	73,43	80	240
Ζώνη Ανάδευσης AA5083	1	70,68	82	246
AA5083	6,5	71,7	80	240

Με την επιβολή των εφελκυστικών φορτίων παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει την πρώτη διαρροή στο κέντρο του μετάλλου βάσης AA5083 (Εικόνα 8.64)



Εικόνα 8.64: Δοκίμιο με τέσσερις περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με κριτήριο Von Mises στην παραμόρφωση.

### 8.3.2.2.3 Πείραμα 3<sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία προσομοιωμένου δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο στην διεύθυνση του y άξονα χωρίζεται έξι τμήματα, από κάτω προς τα πάνω, το μέταλλο βάσης AA5083, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA5083, τη ζώνη ανάδευσης του AA5083, ακολουθούν η ζώνη ανάδευσης του AA6082, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082 και το μέταλλο βάσης του AA6082.



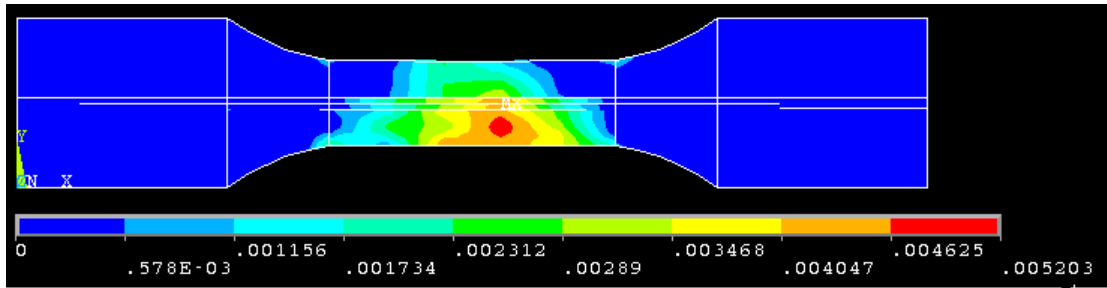
Εικόνα 8.65: Δοκίμιο με έξι περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές του δοκιμίου που προσομοιώθηκαν με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τις τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής.

Πίνακας 8.17: Διαστάσεις περιοχών, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής.

Περιοχές	Διατάσεις (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (Mpa)
AA6082	6,25	71,7	105	315
Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	0,25	69,51	76,33	229
Ζώνη Ανάδευσης AA6082	1	67,08	81,66	245
Ζώνη Ανάδευσης AA5083	1	72,33	82	246
Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA5083	0,25	69,72	75	225
AA5083	6,25	71,7	80	240

Με την επιβολή των εφελκυστικών φορτίων παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει την πρώτη διαρροή στο κέντρο προς την δεξιά πλευρά του δοκιμίου στο μέταλλο βάσης του AA5083 (Εικόνα 8.66)



Εικόνα 8.66: Δοκίμιο με έξι περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με με παραμόρφωση Von Mises.

#### 8.3.2.2.4 Πείραμα 4<sup>ο</sup> στην πλαστική περιοχή

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία προσομοιωμένου δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο στην διεύθυνση του y άξονα χωρίζεται οκτώ τμήματα, από κάτω προς τα πάνω, το μέταλλο βάσης AA5083, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA5083, την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA5083, τη ζώνη ανάδευσης του AA5083 ακολουθούν η ζώνη ανάδευσης του AA6082, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082 και το μέταλλο βάσης του AA6082.



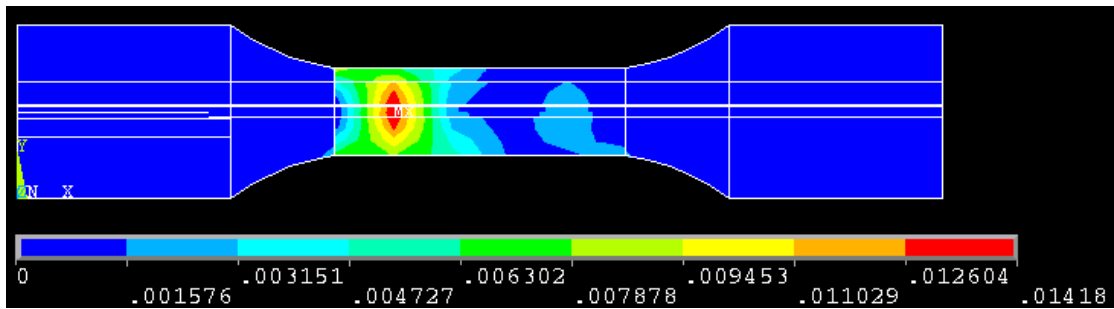
Εικόνα 8.67: Δοκίμιο με οκτώ περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές του δοκιμίου που προσομοιώθηκαν με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τις τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας και του ορίου διαρροής

Πίνακας 8.17: Διαστάσεις περιοχών, Μέτρο Ελαστικότητας, Σκληρότητα, Όριο Διαρροής.

Περιοχές	Διατάσεις (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Σκληρότητα (MPa)	Όριο Διαρροής (Mpa)
AA6082	0,75	71,7	105	315
Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	4	62,51	72,66	218
Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA6082	0,25	69,51	76,33	229
Ζώνη Ανάδευσης AA6082	1	67,08	81,66	245
Ζώνη Ανάδευσης AA5083	1	72,33	82	246
Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη AA5083	0,25	69,72	75	225
Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AA5083	3	69,9	77,66	233
AA5083	1,75	71,7	80	240

Με την επιβολή των εφελκυστικών φορτίων παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει την πρώτη διαρροή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082 στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου.

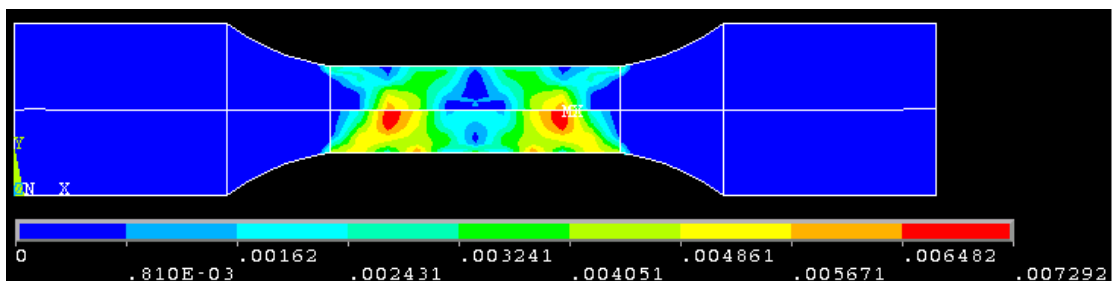


Εικόνα 8.68: Δοκίμιο με οκτώ περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με κριτήριο Von Mises στην παραμόρφωση.

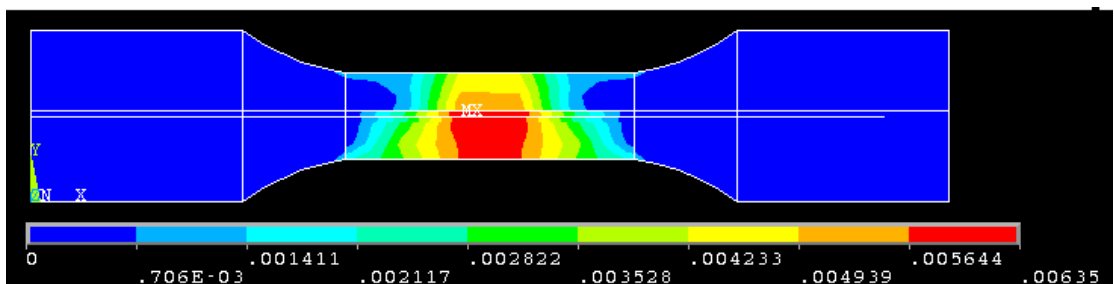
### 8.3.2.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της πλαστικής συμπεριφοράς των συγκολλημένων δοκιμίων με παράλληλη διεύθυνση συγκόλλησης σε σχέση με τα φορτία εφελκυσμού.

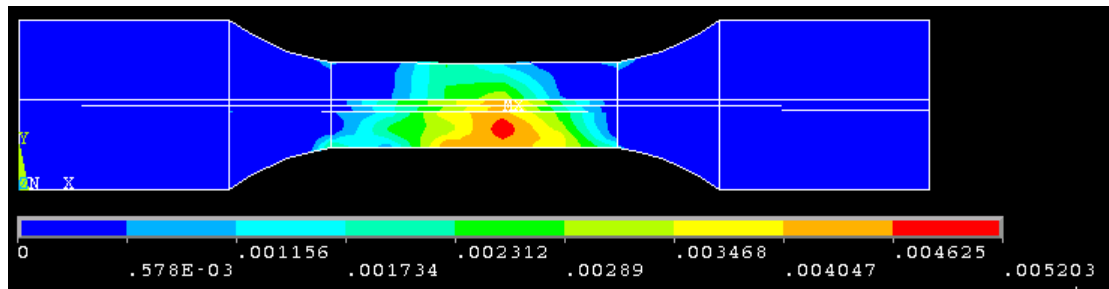
Στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται κατανοητό ότι η αξιοποίηση των τοπικών μηχανικών ιδιοτήτων που δημιουργούνται κατά την συγκόλληση με FSW, οδηγεί σε διαφορετικά σημεία αστοχίας κατά την προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού.



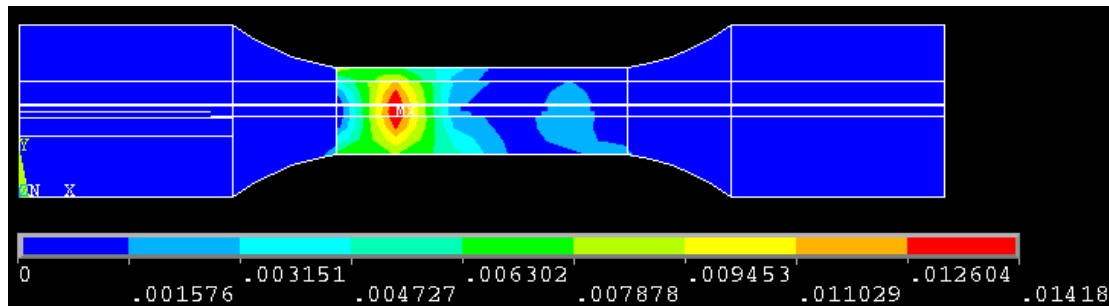
Εικόνα 8.69: a



Εικόνα 8.69: b



Εικόνα 8.69: c



Εικόνα 8.69: d

Εικόνα 8.69: Σύγκριση προσομοιώσεων για την έναρξη της διαρροής σε συγκολλημένα δοκίμια με διαφορετικές περιοχές συγκόλλησης.

Εικόνα 8.69 a: Δοκίμιο με δυο περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με παραμόρφωση Von Mises.

Εικόνα 8.69 b: Δοκίμιο με τέσσερις περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με παραμόρφωση Von Mises.

Εικόνα 8.69 c: Δοκίμιο με έξι περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με παραμόρφωση Von Mises.

Εικόνα 8.69 d: Δοκίμιο με οκτώ περιοχές μηχανικών ιδιοτήτων πρώτη διαρροή με παραμόρφωση Von Mises.

### 8.3.2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την διαμήκη συγκόλληση

Οι Guangyong Sun , Fengxiang Xu , Guangyao Li , Xiaodong Huang, Qing Li εξέτασαν συγκόλληση παράλληλη στα φορτία της εφελκυστικής δύναμης και δημιούργησαν το αντίστοιχο μοντέλο. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται το δοκίμιο χωρισμένο στις αντίστοιχες ζώνες και εισαγωγή δεδομένων από την νανοδιείσδυση.

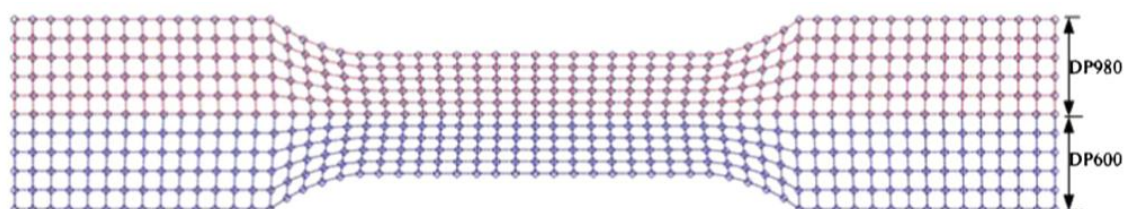
Στην εικόνα 8.70 παρουσιάζεται το συγκολλημένο δοκίμιο πριν την δοκιμή του εφελκυσμού.



(a)

Εικόνα 8.70: συγκολλημένο δοκίμιο πριν την δοκιμή του εφελκυσμού.

Στην εικόνα 8.71 παρουσιάζεται η δημιουργία του μοντέλου με τον μέσο όρο των τιμών του μέτρου ελαστικότητας και του ορίου διαρροής από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης για τα δυο συγκολλημένα κράματα.

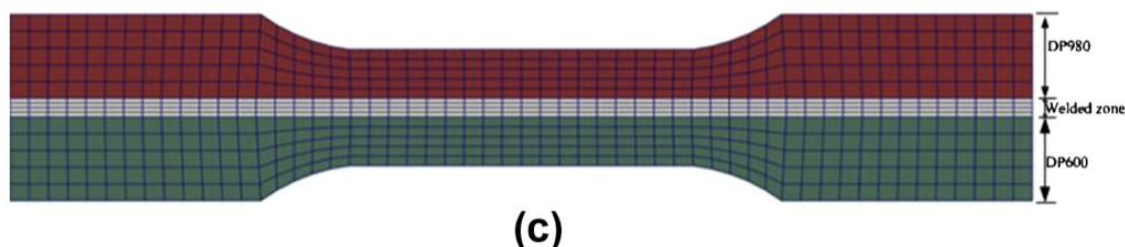


(b)

Εικόνα 8.71: μοντέλου με τον μέσο όρο των τιμών του μέτρου ελαστικότητας και του ορίου διαρροής από την δοκιμή της νανοδιείσδυσης για τα δυο συγκολλημένα κράματα.

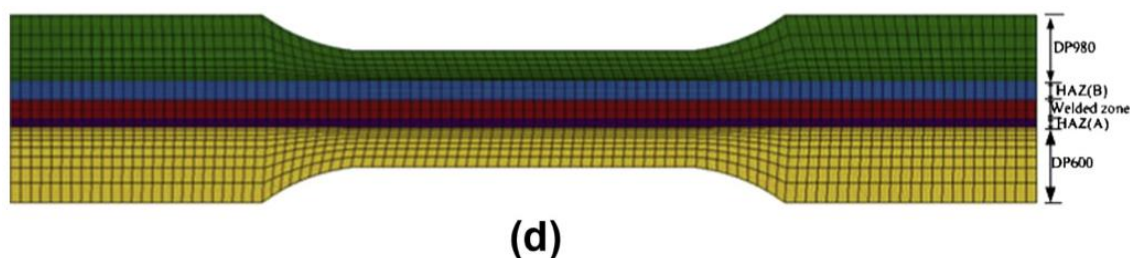


Στην εικόνα 8.72 παρουσιάζεται το μοντέλο με την εισαγωγή των τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και Ορίου Διαρροής για τα δυο συγκολλημένα κράματα καθώς και για τις ζώνες συγκόλλησης



Εικόνα 8.72: μοντέλο με την εισαγωγή των τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και Ορίου Διαρροής για τα δυο συγκολλημένα κράματα καθώς και για τις ζώνες συγκόλλησης

Στην εικόνα 8.73 παρουσιάζεται το μοντέλο με την εισαγωγή των τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και Ορίου Διαρροής για τα δυο συγκολλημένα κράματα, τις ζώνες συγκόλλησης καθώς και για τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 8.73: μοντέλο με την εισαγωγή των τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και Ορίου Διαρροής για τα δυο συγκολλημένα κράματα, τις ζώνες συγκόλλησης καθώς και για τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

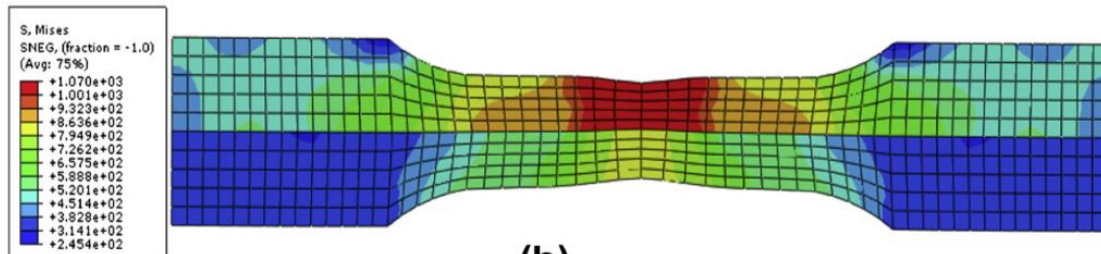
### Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης στην πλαστική περιοχή.

Παρατηρούμε ότι όσο περισσότερες τιμές χρησιμοποιούνται από την δοκιμή της νονοδιδεισδυσής και όσο πιο συγκεκριμένος διαχωρισμός των περιοχών στην δημιουργία του μοντέλου πραγματοποιείται τόσο καλύτερα προσεγγίζεται το σημείο της αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 8.74 a παρατηρούμε ότι η θέση της αστοχίας στην πραγματική δοκιμή εφελκυσμού βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου. Στις εικόνες 8.74 b, 8,74 c, όπου απεικονίζουν τη θέση αστοχίας για τα μοντέλα με τον Μέσο Όρο των τιμών του

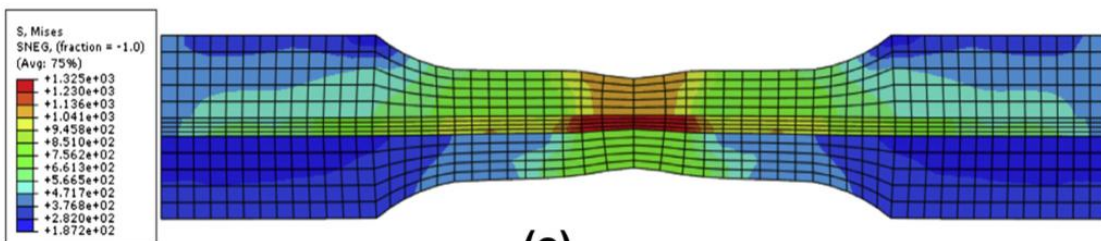
Μέτρου Ελαστικότητας και του Ορίου Διαρροής για τα δυο συγκολλημένα κράματα καθώς και των τιμών για τα δύο κράματα και για την ζώνη συγκόλλησης χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η θέση αστοχίας βρίσκεται στο κέντρο του «δοκιμίου», για αυτές της δυο περιπτώσεις. Ενώ, στην εικόνα 8.74 d, παρουσιάζεται το μοντέλο στο οποίο έχουν εισαχθεί τιμές για το Μέτρο Ελαστικότητας και το Όριο Διαρροής για τα δύο κράματα, για τις ζώνες συγκόλλησης καθώς και για τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, είναι ορατό πως το σημείο αστοχίας βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου και ταυτίζεται με το σημείο αστοχίας του πραγματικού πειράματος εφελκυσμού.



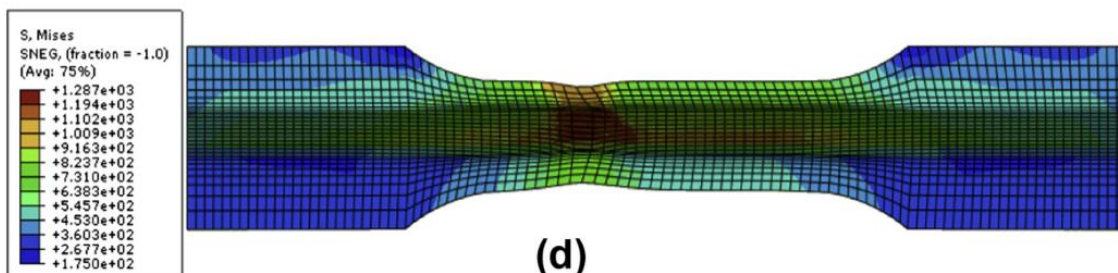
(a)



(b)



(c)



(d)

Εικόνα 8.74: Σύγκριση θέσης αστοχίας των προσομοιωμένων δοκιμών με διαφορετικές τοπικές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το δοκίμιο από το πείραμα εφελκυσμού.

Εικόνα 8.74 a: Θέση αστοχίας στο δοκίμιο εφελκυσμού.

Εικόνα 8.74 b: Θέση αστοχίας στο μοντέλο στο οποίο έχουν εισαχθεί τιμές για το Μέτρο Ελαστικότητας και το Όριο Διαρροής για τα δύο κράματα.

Εικόνα 8.74 c: Θέση αστοχίας στο μοντέλο στο οποίο έχουν εισαχθεί τιμές για το Μέτρο Ελαστικότητας και το Όριο Διαρροής για τα δύο κράματα και για τις ζώνες συγκόλλησης

Εικόνα 8.74 d: Θέση αστοχίας στο μοντέλο στο οποίο έχουν εισαχθεί τιμές για το Μέτρο Ελαστικότητας και το Όριο Διαρροής για τα δύο κράματα, για τις ζώνες συγκόλλησης καθώς και για τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι κατά την εκτέλεση του πειράματος εφελκυσμού παρατηρούμε τη θέση αστοχίας στο δοκίμιο χωρίς όμως να δύναται να προσδιορίσαμε ποια ζώνη συγκόλλησης καταρρέει. Ενώ από το μοντέλο ο

προσδιορισμός αυτός είναι εφικτός αφού φαίνεται ότι η ζώνη που αστοχεί είναι αυτή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του κράματος DP980.

Το παραπάνω φαινόμενο δεν μας είχε προβληματίσει στην εγκάρσια συγκόλληση, δεδομένου του γεγονότος ότι η θέση αστοχίας ταυτίζεται με την ζώνη συγκόλλησης που κατέρρευε. Με βάση το παραπάνω γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα και η σπουδαιότητα της δημιουργίας τέτοιων μοντέλων. Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται συνοπτικά η προαναφερθείς παρατηρήσεις.

**Πίνακας 8.18: Περιοχές αστοχίας για την εγκάρσια και τη διαμήκη συγκόλληση στο ANSYS και στο εργαστήριο**

	Εγκάρσια Συγκόλληση	
	Εφελκυσμός στο ANSYS	Εφελκυσμός στο εργαστήριο
Περιοχή αστοχίας	HAZ 1	HAZ 1
	Διαμήκης Συγκόλληση	
	Εφελκυσμός στο ANSYS	Εφελκυσμός στο εργαστήριο
Περιοχή αστοχίας	HAZ 1	Άγνωστο

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 8ου Κεφαλαίου**

1. Arriaga, A., et al. "Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS." *Polymer testing* 26.3 (2007): 284-305.
2. Simar, Aude, et al. "Microstructure, local and global mechanical properties of friction stir welds in aluminium alloy 6005A-T6." *Materials Science and Engineering: A* 486.1 (2008): 85-95.
3. Charitidis, C. A., & Dragatogiannis, D. A. (2013). Finite element analysis, stress-strain distribution and size effects rise during nanoindentation of welded aluminum alloy. *International Journal of Structural Integrity*, 4(1), 78-90.
4. ANSYS tutorial
5. Sun, G., Xu, F., Li, G., Huang, X., & Li, Q. (2014). Determination of mechanical properties of the weld line by combining micro-indentation with inverse modeling. *Computational Materials Science*, 85, 347-362.
6. Li, G., Xu, F., Sun, G., & Li, Q. (2014). Identification of mechanical properties of the weld line by combining 3D digital image correlation with inverse modeling procedure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-13.

# 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## 9. Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα - Μελλοντική έρευνα

### 9.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η επίδραση των νανοσωματιδίων TiC στις μηχανικές ιδιότητες της ζώνης συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου AA5083-H111 και AA6082-T6. Η συγκόλληση των δύο κραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Συγκόλλησης υπό Τριβή με Ανάδευση (FSW – Friction Stir Welding) και η εξαγωγή των μηχανικών τους ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε με πειράματα μικροσκληρομέτρησης και νανοσκληρομέτρησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκολλημένων κραμάτων μέσω πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση του λογισμικού ANSYS, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις αυτή της **εγκάρσιας** και αυτή της **διαμήκης** συγκόλλησης, όπου και στις δυο εξετάστηκε η **ελαστική** και η **πλαστική** συμπεριφορά του δοκιμίου.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού μπορούμε να εστιάσουμε στα εξής:

1. Για την επιτυχή προσέγγιση του Μέτρου Ελαστικότητας και του σημείου αστοχίας κατά την εφελκυστική φόρτιση, σημαντικό ρόλο κατέχει η **διαμερισματοποίηση** του δοκιμίου σε περισσότερες περιοχές από αυτές των τυπικών ζωνών που δημιουργούνται κατά την συγκόλληση. Διότι έτσι αξιοποιούνται οι τοπικές μηχανικές ιδιότητες από τις μετρήσεις της νανοδιείσδυσης και της μικροσκληρομέτρησης και δεν βασιζόμαστε στον Μέσο Όρο των τιμών αυτών για τις οκτώ τιμές που χρειάζονται για να καλύψουν τις ζώνες συγκόλλησης που δημιουργούνται. Μοντέλα με

οκτώ περιοχές που εξετάστηκαν δεν προσέγγισαν το Μέτρο Ελαστικότητας ούτε το σημείο αστοχίας, ενώ μοντέλα με εικοσιένα περιοχές προσέγγισαν άριστα το πειραματικό Μέτρο Ελαστικότητας αλλά και το σημείο αστοχίας σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.

2. Επίσης, ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που εισάγονται στο μοντέλο του δοκιμίου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για την προσέγγιση του Μέρου Ελαστικότητας κατά την προσομοίωση της ελαστικής περιοχής. Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων ελέγχεται κατά την **διακριτοποίηση** του δοκιμίου. Από την παρούσα μελέτη συμπεραίνεται πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων τόσο καλύτερα προσεγγίζεται το Μέτρο Ελαστικότητας. Μετά από ένα σημείο δεν παίζει κάποιο ρόλο η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων.
3. Εκτός από τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων για την προσέγγιση του Μέρου Ελαστικότητας και του σημείου αστοχίας, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η γεωμετρία τους. Η **γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων** αναφέρεται στον αν τα στοιχεία θα έχουν τριγωνικό ή τετραγωνικό σχήμα καθώς και από πόσους κόμβους αποτελούνται. Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν διάφορες γεωμετρίες αλλά αυτή που έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα στην προσέγγιση ήταν στοιχεία τετραγωνικής γεωμετρίας με οκτώ κόμβους.
4. Καθοριστικό ρόλο στην προσέγγιση του Μέρου Ελαστικότητας διαδραματίζει η εισαγωγή στο μοντέλο η έννοια του **στοιχειώδους πάχους** παρότι εξετάζουμε το πρόβλημα στις δυο διαστάσεις. Το παραπάνω είναι μια επιλογή που παρέχεται στο λογισμικό του ANSYS κατά την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού.



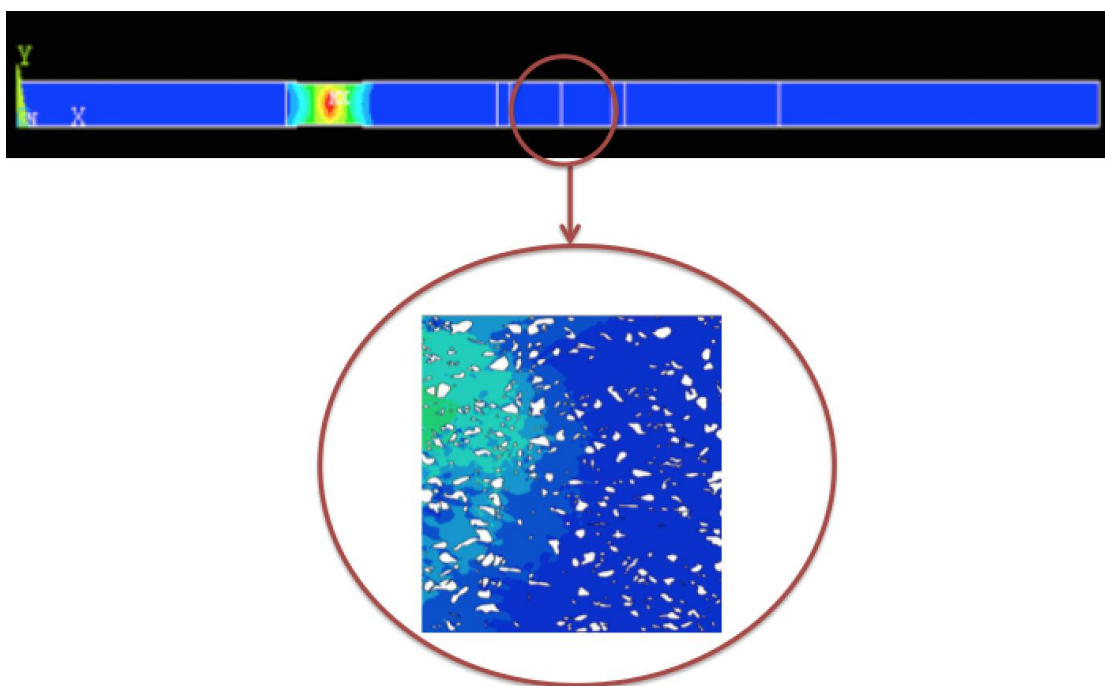
5. Μια ακόμα αξιοσημείωτη παρατήρηση αφορά τον τρόπο **επιβολής των εφελκυστικών φορτίων**. Πιο συγκεκριμένα τα φορτία κατά την προσομοίωση πρέπει να αυξάνονται γραμμικά και ομαλά χωρίς απότομη έναρξη εφελκυστικής τάσης ώστε να προσομοιώνεται κατά το βέλτιστο βαθμό η πειραματική διαδικασία της δοκιμής του εφελκυσμού.
6. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα καταλήγουμε στις βέλτιστες συνθήκες, οι οποίες είναι:
- Διαμερισματοποίηση: δημιουργία εικοσιένα περιοχών
  - Διακριτοποίηση (meshing): 15
  - Γεωμετρία – είδος πεπερασμένων στοιχείων: element type plane 82
  - Στοιχειώδες πάχος: 10% της διάστασης του y άξονα
  - Ομαλή και γραμμική επιβολή εφελκυστικών φορτίων
7. Σκόπιμο κρίνεται να αναφερθεί ότι κατά την μελέτη της προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού με την διεύθυνση της συγκόλλησης παράλληλη στα φορτία εφελκυσμού, **δύναται να βρεθεί η ζώνη της συγκόλλησης που αστοχεί πρώτη ενώ στην πειραματική δοκιμή εφελκυσμού αυτό κρίνεται ως αδύνατο**, δεδομένου ότι το μόνο που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η θέση του σημείου αστοχίας κατά την διεύθυνση του άξονα y, χωρίς όμως να προσδιορίζεται από ποιά ζώνη γίνεται η έναρξη της ρωγμής.
8. Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την μελέτη αυτή είναι ότι κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί αξιοποίηση των πειραματικών δεδομένων που έχουμε, για συγκολλημένα δοκίμια με την μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής υπό ανάδευση σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, για την διαμόρφωση και διαστασιολόγηση των ζωνών που προκύπτουν από τη συγκόλληση. Με σκοπό, την δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης με τα οποία θα

προκύπτουν οι ιδανικές διαστάσεις των ζωνών συγκόλλησης ώστε να δημιουργούνται δοκίμια με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες.

## 9.2 Μελλοντική Έρευνα

Με την ολοκλήρωση της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες στην προσομοίωση συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου με την συγκόλληση διατριβής υπό ανάδευση.

1. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μελέτη και προσομοίωση της παρουσίας των σωματιδίων ενίσχυσης στη ζώνη συγκόλλησης, εικόνα 9.1.



Εικόνα 9.1: Προσομοίωση εισαγωγής σωματιδίων στη ζώνη συγκόλλησης

2. Ενδιαφέρον θέμα για μελλοντική έρευνα κρίνεται το ζήτημα της διάδοσης ρωγμής σε συγκολλημένα κράματα αλουμινίου με FSW στις διάφορες ζώνες συγκόλλησης, δηλαδή με ποιον τρόπο διαδίδεται η ρωγή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, με ποιόν στη θερμομηχανικά επηρεασμένη

ζώνη και με ποιόν στη ζώνη ανάδευσης. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εισαγωγή ρωγμών στις διάφορες ζώνες στο λογισμικό ANSYS.

3. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο των συμπερασμάτων θα μπορούσε να γίνει μια συλλογή των πειραματικών αποτελεσμάτων από συγκολλημένα δοκίμια με FSW τόσο για τις μηχανικές τους ιδιότητες και της συνθήκες που εφαρμόστηκαν κατά τη συγκόλληση όσο και των διαστάσεων των ζωνών συγκόλλησης (που προκύπτουν έπειτα από μεταλλογραφική επεξεργασία) με σκοπό την δημιουργία μοντέλων που θα προτείνουν τα βέλτιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων συγκολλημένων δοκιμίων άρα και των συνθηκών της συγκόλλησης υπό ανάδευση και τριβή.
4. Μελέτη της ροής του υλικού και μοντελοποίηση της διάδοσης της θερμότητας στο υλικό κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης με τριβή υπό ανάδευση.
5. Βελτιστοποίηση της μεθόδου FSW και εξαγωγή συμπερασμάτων με χρήση διαφόρων στατιστικών μοντέλων όπως είναι η μέθοδος Taguchi, Design of Experiments (DOE) και Response Surface Methodology.

## **ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

### **Ατομικά Στοιχεία**

Όνοματεπώνυμο: Σπυρίδων Ν. Σκιαδάς  
Έτος και τόπος γέννησης: 21/10/1988, Αθήνα  
Διεύθυνση κατοικίας: Θ. Αβέρωφ 10, Μελίσσια, Αττική  
Ηλεκτρονική διεύθυνση: spyros\_skiadas@hotmail.com

### **Σπουδές**

2012 - 2014 Αποφοίτησα απ

”, επιβλέπων καθηγητής Κ. Χαριτίδης. Παρουσίαση στο industrial workshop, στα πλαίσια του προγράμματος safejoint, που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

2006 - 2012 Αποφοίτησα από την Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με βαθμό “Λίαν Καλώς” 7,50. Διπλωματική εργασία με τίτλο “Ανάπτυξη Επικάλυσης Κυβικής Ζιρκονίας για Κατασκευή Κυψέλης Καυσίμου Στερεού Ηλεκτρολύτη”, επιβλέπων καθηγητής Δ. Πάνιας.

2003 - 2006 Αποφοίτησα από το Αρσάκειο - Τοσίτσειο Λύκειο Εκάλης.

### **Επαγγελματική εμπειρία**

6/2010 - 7/2010 Πρακτική άσκηση, στα πλαίσια των σπουδών μου, στις μεταλλουργικές εγκαταστάσεις της ΛΑΡΚΟ, στο τμήμα των μεταλλακτών, με σκοπό τη δημιουργία υπολογιστικού - στατιστικού μοντέλου για τον υπολογισμό της ποσότητας ασβέστη που απαιτείται να προστεθεί στον μεταλλάκτη για την αποθείωση του παραγόμενου σιδηρονικελίου.

### **Διδακτική Εμπειρία**

2/2013 - σήμερα Εκπαιδευτής στο ΙΕΚ Αμαρουσίου στα μαθήματα: “Μικροβιολογία”, “Περιβάλλον”, “Αναλυτική Χημεία Ι”, “Κανόνες Καλής Λειτουργίας και Παραγωγής, G.M.P.” της ειδικότητας Τεχνικός φαρμάκων - καλλυντικών και παρεμφερών προϊόντων.

### **Ξένες Γλώσσες**

Αγγλική γλώσσα σε πολύ καλό επίπεδο (Examination for the Certificate of Competency in English of Michigan University).

Γαλλική γλώσσα (αρχάριος - βασικές γνώσεις)

### **Γνώσεις Η/Υ**

Άριστος χειρισμός ηλεκτρονικών υπολογιστών (πιστοποίηση ECDL).

Γνώση AUTO-CAD, Matlab, ANSYS.

### **Στρατιωτική Θητεία**

2011 - 2012 Εκπλήρωση στρατιωτικών υποχρεώσεων στη Μονάδα της Προεδρικής Φρουράς ως Εύζωνας στο Μνημείο του Άγνωστου Στρατιώτη.

