



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών  
Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών

**ΔΙΕΛΑΣΗ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ:  
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

ΜΠΙΜΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

Στην οικογένεια μου

## *Ευχαριστίες*

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε και την σημαντικότετη παροχή βοήθειας τόσο μέσω του εργαστηρίου όσο και του έμπυχου δυναμικού του τομέα, χωρίς τα οποία θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να δώσω στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Σωτήρη Γεωργιόπουλο για την όλη υποστήριξη και συνεργασία που μου παρείχε, τις πολύτιμες εισηγήσεις του σε καίρια σημεία και την ευγενική παραχώρηση δεδομένων των πειραμάτων. Επίσης ευχαριστώ και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μανώλη Γκιθώνα για την παροχή τεχνικών συμβουλών που είχαν να κάνουν με το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία.

Τέλος ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς και τα αδέρφια μου, για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν τόσο κατά την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου όσο και για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου.

## ***Περιεχόμενα***

Ευχαριστίες	1
Περιεχόμενα	2
Εισαγωγή	5

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

#### **Γενικά Στοιχεία Περί Διέλασης/Διμεταλλικών Υλικών**

1.1 Ιστορική Αναδρομή	9
1.2 Κυριότεροι τρόποι διέλασης	9
1.3 Η ροή του μετάλλου στη διέλαση	12
1.4 Φάσεις της διέλασης	13
1.5 Διμεταλλικά υλικά	14
1.6 Εφαρμογές διμεταλλικών υλικών	15
1.7 Βιβλιογραφική διερεύνηση	17

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

#### **Πειραματικό μέρος**

2.1 Δοκίμια πειράματος	23
2.2 Διάταξη πειράματος	27

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

#### **Οπτική Παρατήρηση Δοκιμίων**

3.1 Εισαγωγή	33
3.2 Δοκίμια χωρίς πυθμένα	33
3.2.1 Επεξεργασία δοκιμίων	33
3.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	42
3.2.2.1 Δοκίμιο N° 6	42
3.2.2.2 Δοκίμιο N° 7	43
3.2.2.3 Δοκίμιο N° 8	44

3.2.2.4 Δοκίμιο N° 9	45
3.2.2.5 Δοκίμιο N° 10	46
3.2.3 Σχολιασμός	47
3.3 Δοκίμια με πυθμένα	48
3.3.1 Επεξεργασία δοκιμίων	48
3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	49
3.3.2.1 Δοκίμιο No 1	49
3.3.2.2 Δοκίμιο No 2	50
3.3.2.3 Δοκίμιο No 3	51
3.3.2.4 Δοκίμιο No 4	52
3.3.2.5 Δοκίμιο No 5	53
3.3.3 Σχολιασμός	54

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Αριθμητική Προσομοίωση**

4.1 Εισαγωγή	56
4.2 Λογική λειτουργίας των υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	58
4.3 Μοντελοποίηση διέλασης διμεταλλικών μιγμάτων	59
4.3.1 Στοιχεία της δισδιάστατης αξισυμμετρικής μοντελοποίησης	60
4.3.2 Στοιχεία της τρισδιάστατης μοντελοποίησης	62
4.4 Συμπεριφορά των υλικών στην μοντελοποίηση	67
4.5 Τελικές ρυθμίσεις μοντέλου	69

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Παρουσίαση/ Σύγκριση Αποτελεσμάτων της Αριθμητικής Προσομοίωσης**

5.1 Εισαγωγή	72
5.2 Αποτελέσματα δισδιάστατης μοντελοποίησης	75
5.2.1 Δοκίμιο N° 1	75
5.2.2 Δοκίμιο N° 2	77
5.2.3 Δοκίμιο N° 3	79

5.2.4 Δοκίμιο N° 4	81
5.2.5 Δοκίμιο N° 5	83
5.2.6 Δοκίμιο N° 6	85
5.2.7 Δοκίμιο N° 7	87
5.2.8 Δοκίμιο N° 8	89
5.2.9 Δοκίμιο N° 9	91
5.2.10 Δοκίμιο N° 10	93
5.3 Αποτελέσματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης	95
5.3.1 Δοκίμιο N° 5	95
5.3.2 Δοκίμιο N° 10	96

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **Συμπεράσματα-Συζήτηση**

6.1 Εισαγωγή	99
6.2 Συμπεράσματα - σχόλια	99
6.3 Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης	100
6.4 Προτάσεις	102

<b>Βιβλιογραφία</b>	103
---------------------	-----

## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την δημιουργία ενός μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης της διέλασης διμεταλλικών κυλινδρικών δοκιμίων, η οποία έχει εκτελεστεί και σε πειραματική διαδικασία. Γίνεται παρατήρηση στα αποτελέσματα τόσο του πειράματος όσο και της αριθμητικής προσομοίωσης και έπειτα γίνεται σύγκριση μεταξύ τους με συγκεκριμένο τρόπο. Στόχος είναι να κατανοηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η ροή των υλικών ούτως ώστε να βελτιστοποιηθούν οι παράμετροι που αφορούν την διαδικασία και έτσι να καταστεί δυνατή η παραγωγή ενός προϊόντος υψηλής ποιότητας. Συγκεκριμένα:

**Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** παρουσιάζεται αρχικά μια σύντομη ιστορική αναδρομή για την κατεργασία της διέλασης. Έπειτα γίνεται νύξη στις κυριότερες κατηγορίες μεθόδων διέλασης που υπάρχουν σήμερα με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα διμεταλλικά υλικά όπου δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, εξηγούνται τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των απλών μετάλλων και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής τους. Τέλος περιλαμβάνει και μια βιβλιογραφική διερεύνηση για έρευνες/μελέτες που έχουν γίνει με παρόμοιο ή και ίδιο θέμα με αυτό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

**Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας δέκα δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα καθώς και τα χαρακτηριστικά που αυτά φέρουν. Επιπλέον γίνεται μια ανάλυση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε όπου αναφέρονται τα κυριότερα μέρη και συνοδεύονται και αυτά με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

**Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** ουσιαστικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Αρχικά γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο επεξεργασίας των δέκα δοκιμίων, που υπεβλήθησαν στην κατεργασία της διέλασης, που αποσκοπούσε στην καλύτερη παρουσίαση της διεπιφάνειας του δοκιμίου. Έπειτα παρουσιάζονται φωτογραφίες από την παρατήρηση της διεπιφάνειας που έγινε είτε με στερεοσκόπιο είτε με μικροσκόπιο. Μεγέθυνση με τη βοήθεια του μικροσκοπίου έγιναν σε σημεία του δοκιμίου που, λόγω της διέλασης, παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται και ένας σύντομος σχολιασμός με βάση την παρατήρηση της διεπιφάνειας του κάθε δοκιμίου.

**Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην δισδιάστατη μοντελοποίηση της διέλασης που πραγματοποιήθηκε για κάθε δοκίμιο ενώ επιπλέον πραγματοποιήθηκε και τρισδιάστατη μοντελοποίηση για δύο δοκίμια. Περιγράφονται με αναλυτικό τρόπο όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την μοντελοποίηση του εμβόλου, της μήτρας και του δοκιμίου. Επίσης αναφέρονται όλες οι τιμές που δόθηκαν σε παραμέτρους που παίζουν μεγάλο ρόλο στο αποτέλεσμα που θα εξαχθεί από την ανάλυση της προσομοίωσης καθώς και επιπλέον επιλογές που έγιναν ή ενεργοποιήθηκαν στο πρόγραμμα με σκοπό να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα.

**Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** κύριο θέμα αποτελεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης. Επιπροσθέτως γίνεται σύγκριση τους με τα πειραματικά αποτελέσματα σε κάθε δοκίμιο τόσο οπτικά όσον αφορά την παραμόρφωση που υπέστησαν τα δοκίμια όσο και με μορφή διαγραμμάτων. Για κάθε δοκίμιο ακολουθεί σχολιασμός της σύγκρισης που γίνεται.

**Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων τόσο μέσα από τη μελέτη και διερεύνηση της μοντελοποίησης όσο και με βάση τα αποτελέσματα και τις συγκρίσεις που έγιναν στο Κεφάλαιο 5. Σημαντικό κομμάτι αυτού του κεφαλαίου είναι και η προσπάθεια να γίνει σαφές αν η μοντελοποίηση που αναπτύχθηκε προσομοιώνει επαρκώς την πειραματική διαδικασία.





**Κεφάλαιο 1**  
**Γενικά Στοιχεία**  
**Περί Διέλασης/**  
**Διμεταλλικών**  
**Υλικών**

---

## **1.1 Ιστορική Αναδρομή**

Η διέλαση αποτελεί μια μηχανουργική διαδικασία με την οποία το τεμάχιο συμπιέζεται από ένα έμβολο μέσα σε μεταλλικό θάλαμο. Στην άλλη άκρη του θαλάμου υπάρχει κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα και έτσι το τεμάχιο εξαναγκάζεται να εξέλθει από εκεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποκτήσει διαφορετική διάμετρο και μεγαλύτερο μήκος [1]. Η διεργασία μορφοποίησης μετάλλου έχει μακρά βιομηχανική ιστορία που χρονολογείται από το 1797. Τότε ο Joseph Bramah χρησιμοποίησε τις βασικές αρχές της διέλασης για να παραγάγει σωλήνες από μόλυβδο και από άλλα όλκιμα μέταλλα. Μέχρι το 1820 δεν σημειώθηκε κάποια πρόοδος όταν και ο Thomas Burr κατασκεύασε την πρώτη υδραυλική πρέσα. Στη συνέχεια ο Alexander Dick επέκτεινε την διαδικασία της διέλασης σε κράματα χαλκού και ορείχαλκου [2].

## **1.2 Κυριότεροι τρόποι διέλασης**

Για την διέλαση, το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιείται αποτελείται από:

- Το έμβολο
- Τον μεταλλικό θάλαμο
- Την μήτρα

Η διαδικασία μπορεί να γίνει με την προθέρμανση του τεμαχίου (μπιγέτας) πάνω από την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης (εν θερμώ). Η προθέρμανση βοηθά το φαινόμενο της εργοσκλήρυνσης. Επιπλέον διευκολύνει τη ροή της μπιγέτας μέσα από την μήτρα. Ωστόσο η διέλαση μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία δωματίου (εν ψυχρώ). Η δεύτερη περίπτωση προσφέρει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα στο προϊόν έναντι της πρώτης όπως:

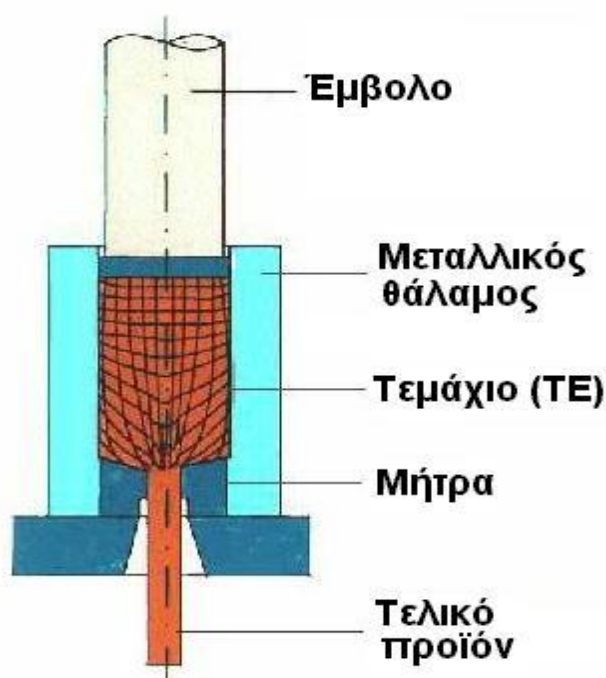
- ✓ Απουσία οξείδωσης
- ✓ Υψηλότερη αντοχή
- ✓ Μικρότερη τραχύτητα επιφάνειας [2]

Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή για την εκτέλεση της διέλασης είναι πρέσα, συνήθως υδραυλική και οριζόντια για τη θερμή διέλαση και κατακόρυφη για την ψυχρή διέλαση [1].

Αξίζει να αναφερθεί πως η διέλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους [3].

### I) Άμεση διέλαση (Direct extrusion)

- Είναι η κλασσική περίπτωση διέλασης.
- Η ροή του υλικού έχει την κατεύθυνση της κίνησης του εμβόλου.
- Το τεμάχιο «γλιστρά» στα τοιχώματα του μεταλλικού θαλάμου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αναπτύσσοντας ισχυρές δυνάμεις τριβής.

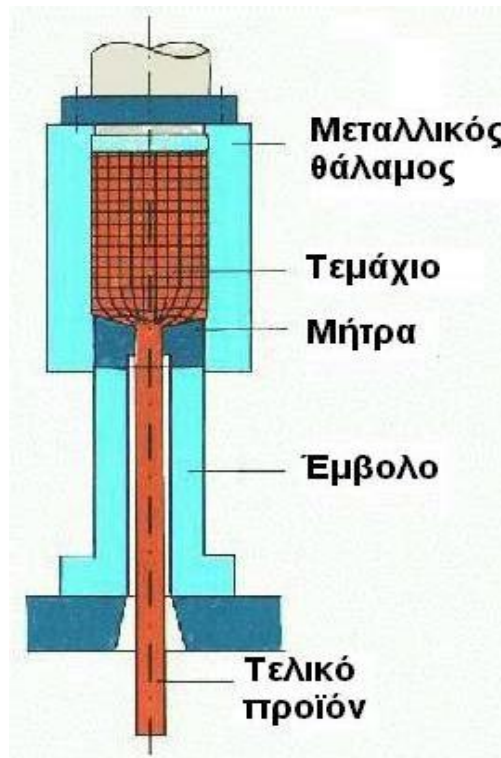


*Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της άμεσης διέλασης.*

### II) Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)

- Στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα.
- Με την κίνηση του εμβόλου η μήτρα κινείται ως προς το τεμάχιο, ενώ το τελευταίο παραμένει ακίνητο μέσα στο θάλαμο. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από κεντρική οπή στον άξονα του εμβόλου.
- Η ροή του υλικού έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου.

- Οι τριβές στη διεπιφάνεια ΤΕ/θαλάμου είναι αμελητέες.



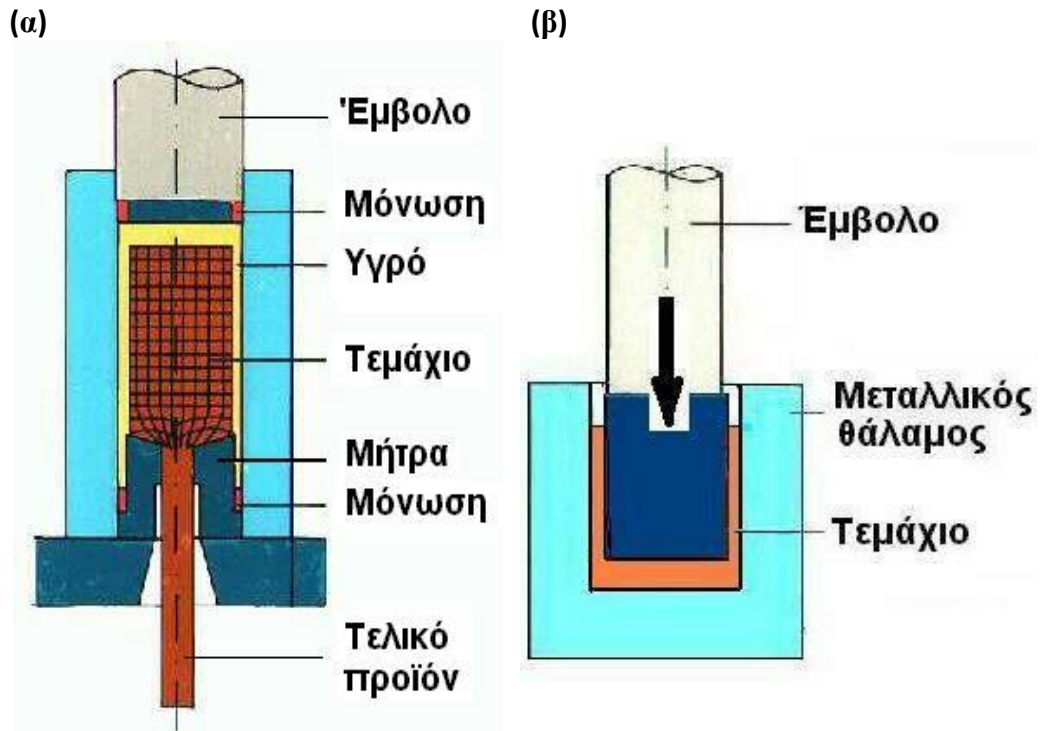
*Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση της έμμεσης διέλασης.*

### III) Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion)

- Ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στη μπιγέτα, η οποία και διελάσσεται.
- Δεν υπάρχει καθόλου τριβή του τεμαχίου με τα τοιχώματα του θαλάμου.
- Προσοχή πρέπει να δίνεται στη στεγανότητα της εγκατάστασης.

### IV) Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)

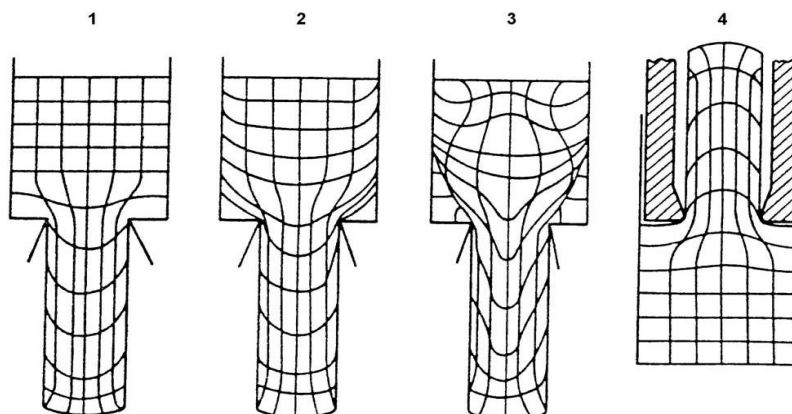
- Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλαση και εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου.
- Ο θάλαμος έχει αντικατασταθεί από αβαθή κοιλότητα και το υλικό αναγκάζεται να περιρρέει το περίγραμμα του εμβόλου.
- Εφαρμόζεται σε σχετικά μαλακά υλικά (Pb, Zn, Al, Cu) για την παραγωγή μικρού μήκους κυαθίων.



**Εικόνα 1.3:** Σχηματική αναπαράσταση (α) της υδροστατικής, (β) της κρουστικής διέλασης.

### 1.3 Η ροή του μετάλλου στη διέλαση

Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις της ροής του υλικού κατά τη διέλαση. Όπως παρατηρείται, με τη χρήση πλεγμάτων σε διαιρετές μπιγέτες, χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη νεκρών ζωνών στην έξοδο της μήτρας, των οποίων ευνοείται από τις μεγάλες τριβές [3].



**Εικόνα 1.4:** Ροή του υλικού κατά τη διέλαση.

- 1) Χαμηλή τριβή/πολύ καλή λίπανση στα τοιχώματα του θαλάμου.
- 2) Μεγαλύτερη τριβή/ανάπτυξη «νεκρής ζώνης» μετάλλου (DMZ) στην έξοδο της μήτρας.
- 3) Εντόνως μεγάλη τριβή/ανομοιογενής ροή μετάλλου.
- 4) Ροή υλικού στην έμμεση διέλαση (χαμηλή τριβή).

## **1.4 Φάσεις της διέλασης**

Διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις μιας άμεσης διέλασης μαζί με την επίδραση καθεμιάς στη διαμόρφωση του φορτίου κατεργασίας (Εικόνα 1.5):

### **1<sup>η</sup> Φάση: Αρχική ή μεταβατική φάση**

- Βαθμιαία πλήρωση του μεταλλικού θαλάμου με το κατεργαζόμενο υλικό τεμάχιο.
- Απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην έναρξη εμφάνισης του πρώτου τμήματος προϊόντος στην έξοδο της μήτρας.

### **2<sup>η</sup> Φάση: Ευσταθής φάση**

- Ομαλή διεξαγωγή της διέλασης με σταθερό ρυθμό.
- Ανάπτυξη νεκρής ζώνης (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας.
- Μείωση του μήκους της μπιγέτας μέσα στο θάλαμο με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβών.
- Βαθμιαία μείωση του φορτίου διέλασης, σε μικρότερο βαθμό στη θερμή διέλαση ή για μη κρατυνόμενα υλικά και σε μεγαλύτερο ρυθμό για την ψυχρή διέλαση κρατυνόμενων υλικών.

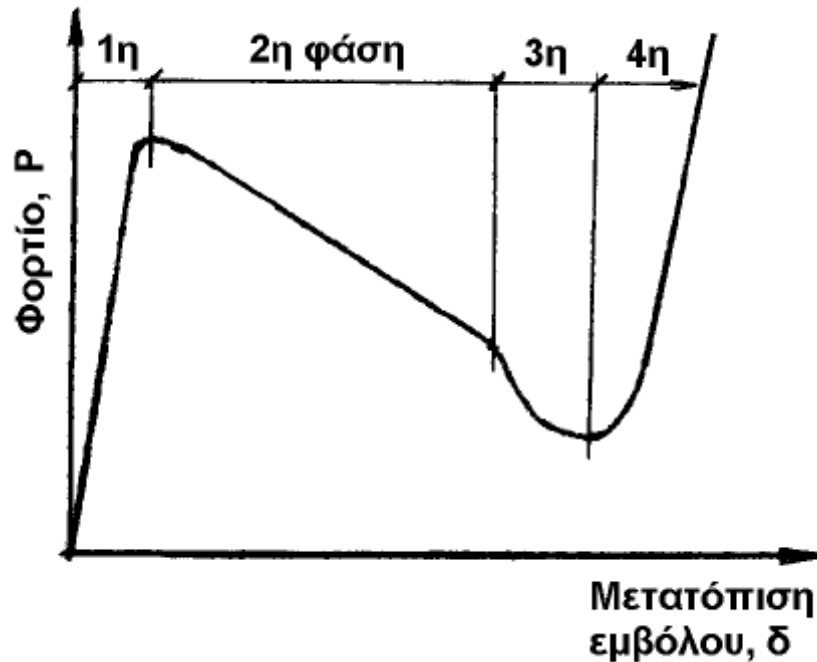
### **3<sup>η</sup> Φάση: Φάση αστάθειας**

- Όταν το μήκος της μπιγέτας μέσα στο μεταλλικό θάλαμο γίνει πολύ μικρό (το έμβολο πλησιάζει τη νεκρή ζώνη), παρατηρείται τριγμός στο εργαλείο διέλασης και θόρυβος.
- Το φαινόμενο συνοδεύεται με απότομη μείωση του φορτίου μέχρι μια ελάχιστη τιμή.

### **4<sup>η</sup> Φάση: Ανάπτυξη ελαττώματος**

- Περαιτέρω μείωση του μήκους της μπιγέτας οδηγεί σε απώλεια επαφής του κεντρικού τμήματος της μπιγέτας με την πιέζουσα επιφάνεια του εμβόλου, δημιουργείται κεντρική κοιλότητα στο τελικό προϊόν και το υπόλοιπο τμήμα της μπιγέτας παρασύρεται μέσα σ' αυτή την κοιλότητα.
- Το τμήμα του τελικού προϊόντος που φέρει τη σχηματιζόμενη κοιλότητα θεωρείται ελαττωματικό και αποκόπτεται.

- Κατά τη φάση αυτή σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου κατεργασίας και συνιστάται η διακοπή της κατεργασίας.



Εικόνα 1.5: Οι φάσεις της διέλασης.

### 1.5 Διμεταλλικά υλικά

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την χρήση διμεταλλικών υλικών. Σε πολλές και διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές παρατηρείται η ύπαρξη διμεταλλικών ράβδων, καλωδίων και σωλήνων. Η κατάλληλη επιλογή δύο διαφορετικών μετάλλων στο τελικό προϊόν επιτρέπει τον συνδυασμό των πλεονεκτημάτων που έχουν αυτά. Συγκεκριμένα το ένα απ' τα δύο μέταλλα που χρησιμοποιούνται προσφέρει αντοχή ενώ το άλλο συγκεκριμένες ιδιότητες όπως:

- Αντίσταση στην οξείδωση και τη διάβρωση
- Ειδικές ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες
- Απελευθέρωση άνθρακα ενός απ' τα δύο μέταλλα, παρουσία υψηλής θερμοκρασίας. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή του άλλου μετάλλου (carburization)[4].

Επιπλέον τα διμεταλλικά υλικά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των μονομεταλλικών. Επιγραμματικά αναφέρονται τα παρακάτω [1]:

- Ελαχιστοποίηση θερμικής διαστολής

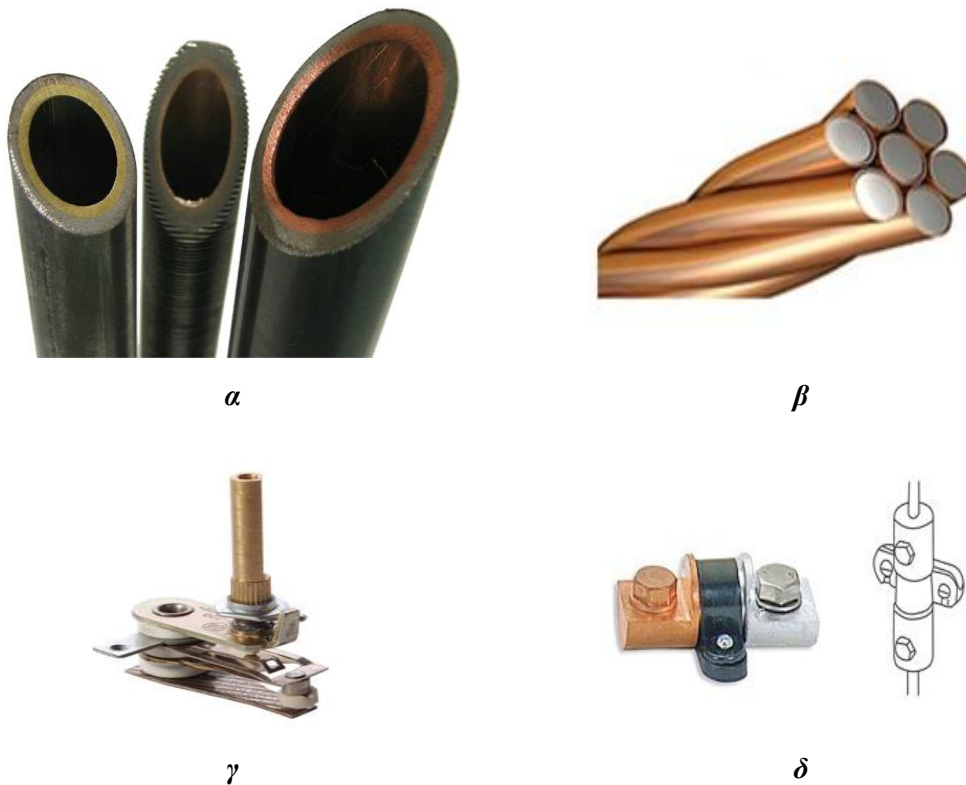


- Συνολική μείωση των τάσεων στην κατασκευή
- Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα (με συνέπεια την μειωμένη θερμοκρασία λειτουργίας του μετάλλου και άρα την μειωμένη διάβρωση)
- Λιγότερο συχνή συντήρηση και αυξημένη διάρκεια ζωής
- Αυξημένη αντοχή σε κόπωση
- Μειωμένο βάρος κατασκευής
- Περιορισμός της σπατάλης των ακριβών μετάλλων και κραμάτων
- Δυνατότητα συνεχούς παραγωγής
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση, οξείδωση ή φθορά, κατόπιν κατάλληλου συνδυασμού

### ***1.6 Εφαρμογές διμεταλλικών υλικών***

Οι εφαρμογές που βρίσκουν τα διμεταλλικά υλικά είναι πολλές τόσο στη καθημερινή ζωή όσο και στην βιομηχανία. Τα διμεταλλικά ελάσματα, όπως φύλλο τιτανίου – χάλυβα, βρίσκουν στον τομέα της αεροναυπηγικής και της διαστημικής αεροναυπηγικής. Το τιτάνιο καθώς και τα κράματα που έχουν ως βάση το τιτάνιο, χρησιμοποιούνται συνήθως στις σωλήνες μεταφοράς υγρών που προκαλούν οξείδωση, όπως το θαλασσινό νερό. Στον τομέα της ναυπηγικής χρησιμοποιούνται για τη θωράκιση του κύτους, όπου η αντοχή σε διάβρωση και σε φορτία είναι πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή υλικών. Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται σε πλήθος εξαρτημάτων, όπως ρυθμιστές και μετρητές τάσης, δείκτες στροφών, θερμαντήρες, αναπτήρες, εξάτμιση, πολλαπλοί έλεγχοι, διακόπτες, ψύξη, βαλβίδες θερμαντικών σωμάτων, φρένα. Στην καθημερινότητα τα συναντάμε σε πολλές οικιακές συσκευές, όπως ψυγεία, πλυντήρια ρούχων, ρυθμιστές τάσης, θερμοσίφωνες, λαμπτήρες φθορισμού, φούρνοι, κλιματιστικά μηχανήματα, κινητά τηλέφωνα [5]. Οι διμεταλλικοί σωλήνες βρίσκουν εξαιρετική εφαρμογή στην ηλεκτρική, χημική και πυρηνική βιομηχανία, όπου οι ιδιαίτερες συνθήκες απαιτούν διαφορετικές ιδιότητες στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια ενός σωλήνα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει εξαρτήματα που εμφανίζουν τόσο υψηλή αντοχή όσο και αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Άξια αναφοράς είναι η εφαρμογή των διμεταλλικών υλικών για την κατασκευή καλωδίων μεταφοράς ρεύματος. Το εξωτερικό μέρος αποτελείται από χαλκό καθώς το ρεύμα περνά επιφανειακά και ο

χαλκός εμφανίζει μικρή αντίσταση σ' αυτό ενώ στο εσωτερικό μέρος υπάρχει αλουμίνιο για αντοχή και καλές μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Μια ενδιαφέρουσα ακόμα εφαρμογή είναι στην μεταφορά πετρελαίου από πετρελαιοπηγές. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως και σε πολλές άλλες, απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως επίσης και υψηλή μηχανική αντοχή. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο συνδυασμός δύο μετάλλων αποδεικνύεται πιο συμφέρων οικονομικά, σε σχέση με ένα μεταλλικό σωλήνα κατασκευασμένο από κράμα ανθεκτικό σε διάβρωση [1].



**Εικόνα 1.7: Εφαρμογές διμεταλλικών υλικών.**

- α) Διμεταλλικοί σωλήνες [6].
- β) Διμεταλλικό καλώδιο.
- γ) Διμεταλλικός θερμοστάτης.
- δ) Διμεταλλική ένωση καλωδίων.

## **1.7 Βιβλιογραφική διερεύνηση**

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιασθούν σύντομες αναφορές σε ορισμένες μελέτες και επιστημονικά άρθρα τα οποία έχουν άμεση σχέση με το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σε επιστημονικό άρθρο των Yeong-Maw Hwang, Te-Fu Hwang [7] γίνεται διερεύνηση της πλαστικής παραμόρφωσης που σημειώνεται κατά την αξισυμμετρική διέλαση διμεταλλικών κυλινδρικών δοκιμίων με κωνική μήτρα.. Αυτό γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί με αριθμητική προσομοίωση καταγράφοντας το απαιτούμενο φορτίο διέλασης σε σχέση με το λόγο της διαφοράς αρχικής-τελικής διατομής προς τελική διατομή του δοκιμίου. Τα δύο μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι χαλκός και αλουμίνιο. Η ημιγωνία κωνικότητας είναι  $15^\circ$  ενώ για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές τριβής. Ο ένας αναφέρεται στην τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στο δοκίμιο και τη μήτρα και έχει τιμή 0,2 ενώ ο δεύτερος στη τριβή ανάμεσα στα δύο υλικά και έχει τιμή 0,9. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι πως όταν ο λόγος της διαφοράς αρχικής-τελικής διατομής προς τελική διατομή του δοκιμίου λαμβάνει τιμή μέχρι 0,5 τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα βρίσκονταν σε αντιστοιχία με καλή σύγκλιση. Μετά την τιμή 0,5 όμως σημειωνόταν μεγάλη απόκλιση καθώς η ροή μετάλλου που αποτελούσε τον εξωτερικό «φλοιό» του δοκιμίου (χαλκός) εμπόδιζε αυτήν του «πυρήνα» (αλουμίνιο).

Οι S. Berski, H. Dyja, G. Banaszek, M. Janik [8] σε εργασία τους κάνουν μια θεωρητική ανάλυση διέλασης διμεταλλικών κυλινδρικών δοκιμίων όπου η (κωνική) μήτρα μειώνεται σε δύο βήματα. Σε αυτή την ανάλυση η διακριτοποίηση έγινε με τριγωνικά στοιχεία αξισυμμετρικά και τα μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι αλουμίνιο στο εσωτερικό και χαλκός στο εξωτερικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως όταν η σύγκλιση της μήτρας γίνεται σε δύο βήματα υπάρχει μείωση των αξονικών τάσεων τόσο στην είσοδο καθώς και στη περιοχή που σημειώνεται αρχικά η παραμόρφωση. Επίσης έγινε διερεύνηση στην επιρροή που έχει ο λόγος της διαφοράς αρχικής-τελικής διατομής προς τελική διατομή του δοκιμίου οι δυνάμεις τριβής καθώς και το ύψος της μήτρας. Κατέληξαν τελικώς πως τα βέλτιστα αποτελέσματα

σημειώνονται όταν ο λόγος αυτός έχει τιμή 2. Επιπλέον η απόσταση που πρέπει να υπάρχει ανάμεσα στο τέλος του πρώτου βήματος και την αρχή του δεύτερου βήματος μείωσης της διατομής (reduction die land) είναι 0,3 mm.

Σε άλλη εκτεταμένη έρευνα των A. Khosravifard, R. Ebrahimi [9] καταβάλλεται προσπάθεια να διερευνηθούν ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την διεπιφάνεια και την ροή των δύο μετάλλων στην κατεργασία διέλασης διμεταλλικών κυλινδρικών δοκιμίων. Γίνεται προσπάθεια σύγκρισης αποτελεσμάτων ενός πειράματος και μιας αριθμητικής προσομοίωσης του πειράματος. Βαρύτητα σε αυτή τη σύγκριση δόθηκε στην ημιγωνία κωνικότητας της μήτρας, στο ποσοστό χαλκού/αλουμινίου που έχει το δοκίμιο καθώς και στον λόγο της διαφοράς αρχικής-τελικής διατομής προς τελική διατομή του δοκιμίου. Χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατη αξισυμμετρική ανάλυση ενώ τα δύο υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι αλουμίνιο στο εσωτερικό και χαλκός στο εξωτερικό μέρος του δοκιμίου. Ο συντελεστής τριβής που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση έχει τιμή 0,07 ενώ χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικά στοιχεία με τέσσερις κόμβους. Μέσα από αυτή την έρευνα διαπιστώθηκε πως η κατανομή των ακτινικών τάσεων είναι περισσότερο ομοιόμορφη σε διμεταλλικά δοκίμια αλουμινίου/χαλκού απ' ότι σε μονομεταλλικά αλουμινίου ή χαλκού. Επίσης η διαφορά των ταχυτήτων ροής μετάλλου ανάμεσα στα δύο υλικά, στην περιοχή της διεπιφάνειας, μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του υλικού που βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του δοκιμίου. Επιπλέον έτσι αυξάνεται η αντοχή σε διατμητικές τάσεις. Τέλος συμπεραίνεται πως όταν ο λόγος της διαφοράς αρχικής-τελικής διατομής προς τελική διατομή του δοκιμίου παίρνει τιμή 0,135 ή μεγαλύτερη αρχίζουν να δημιουργούνται διεπιφανειακοί «δεσμοί» ενώ όταν η ημιγωνία κωνικότητας της μήτρας παίρνει τιμή  $25^\circ$  παρατηρείται η μικρότερη διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων ροής των δύο μετάλλων άρα και αύξηση της αντοχής σε διατμητικές τάσεις.

Σε άλλο άρθρο των Kwang Seok Lee, Hyun-Joon Jun, Young-Seon Lee [10] χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά διμεταλλικά δοκίμια όπου ο πυρήνας αποτελείται από χαλκό και ο «μανδύας» από μέταλλο που έχει βάση το ζirkόνιο. Στόχος των συγγραφέων είναι να διερευνήσουν την επιρροή που έχουν οι συνθήκες διέλασης στις ιδιότητες της διεπιφάνειας καθώς και στις μηχανικές ιδιότητες του κατεργασμένου δοκιμίου. Αρχικά έγιναν πειράματα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες

(658,673,688 °K) και ταχύτητες εμβόλου ( $10^{-2}, 3 \cdot 10^{-2}, 10^{-1}$  mm/s) τα οποία στη συνέχεια προσομοιώθηκαν σε H/Y. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατη αξισυμμετρική ανάλυση με τετραγωνικά στοιχεία. Ανάμεσα στα δοκίμια και τη μήτρα χρησιμοποιήθηκε συντελεστής τριβής 0,3 ενώ ανάμεσα στα δύο μέταλλα 0,7. Τα αποτελέσματα ωστόσο δεν έβγαλαν κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα. Συγκεκριμένα όταν η διέλαση έγινε σε θερμοκρασία 673 °K και ταχύτητας εμβόλου  $3 \cdot 10^2$  mm/s, το προϊόν είχε τις καλύτερες ιδιότητες. Το συμπέρασμα αυτό εξήχθη με βάση τα αποτελέσματα που έδειξαν ομοιογένεια στη ροή των μετάλλων, απουσία χαρακτηριστικού ήχου που παρατηρείται συνήθως στη διέλαση, ύπαρξη ή μη διάχυτης ζώνης στη διεπιφάνεια, άμορφης φύσης προεξέχοντος υλικού από το μέταλλο - «μανδύα» και βελτιωμένης θλιπτικής παραμόρφωσης. Ωστόσο στο άλλο δοκίμιο (658 °K,  $10^{-2}$  mm/sec) παρουσιάστηκε ομαλή διεπιφάνεια με απουσία διάχυτης ζώνης, κάτι που μπορεί να αποφέρει καταστροφικό «κάταγμα» σε όλο το δοκίμιο. Επίσης στο τρίτο δοκίμιο (688 °K,  $10^{-1}$  mm/sec) που πραγματοποιήθηκε η διέλαση παρουσία ψυκτικού υγρού, παρουσιάζει διεπιφανειακή αποκόλληση. Επιπλέον επιβαρυντικό στοιχείο που βγαίνει από τα συμπεράσματα είναι η κρυσταλοποίηση του μετάλλου- «μανδύα» λόγω της υψηλής θερμοκρασίας παρουσία ψυκτικού υγρού, που αποφέρει απώλεια του ιξώδους του μετάλλου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η έρευνα των Irena Nowotynska, Andrzej Smykla [11] όπου μελετάται η επίδραση των γεωμετρικών στοιχείων της μήτρας στην πλαστική ροή μετάλλου των δύο υλικών σε διμεταλλικά κυλινδρικά δοκίμια. Το μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε ως πυρήνας είναι μαλακός μολυβδος ενώ στο εξωτερικό του δοκιμίου, σκληρός μολυβδος. Η προσπάθεια για εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται μέσα από πειράματα όπου χρησιμοποιούνται μήτρες με γωνία  $90^\circ$ ,  $95^\circ$ ,  $100^\circ$  και  $105^\circ$ . Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρήση κυρτών μητρών συγκεκριμένης γεωμετρίας με δεδομένη γεωμετρία των δύο υλικών που απαρτίζουν το υλικό, τείνουν να εξισώνουν τις σχετικές ταχύτητες ροής μετάλλων των δύο υλικών στην έξοδο της μήτρας. Αυτό άλλωστε δικαιολογεί και το γεγονός πως χρησιμοποιούνται για την κατεργασία της διέλασης. Επίσης το μικρότερο φορτίο διέλασης καθώς και οι μικρότερες παραμορφώσεις παρατηρούνται όταν η γωνία της μήτρας είναι  $95^\circ$  και  $100^\circ$ . Τέλος φαίνεται πως στις κυρτές μήτρες παρουσιάζεται μια αλλαγή της ροής μετάλλου σε σχέση με τις επίπεδες μήτρες. Το φαινόμενο κατά το οποίο υπάρχει μερική αναγκαστική ακτινική ροή (κυρίως του μετάλλου – «μανδύα») είναι

περισσότερο θεμιτή καθώς οι διεπιφανειακοί «δεσμοί» είναι καλύτεροι. Με αυτό τον τρόπο το τελικό προϊόν είναι καλύτερης ποιότητας.

Παρόμοιο είναι και το αντικείμενο έρευνας του Patrick Ulysse [12] όπου εξετάζεται η σχεδίαση της επίπεδης μήτρας διέλασης με στόχο την ισορροπία ροής του κατεργαζόμενου μετάλλου, χρησιμοποιώντας προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων και μεθόδων βελτιστοποίησης. Προσομοιώθηκαν λοιπόν δύο ειδών μήτρες με διαφορετικές διαστάσεις μεταξύ τους, θερμοκρασία δοκιμίου 400 °C και ταχύτητα εμβόλου 0,008964 m/s. Η ανάλυση ήταν δισδιάστατη και χρησιμοποιήθηκαν τετράπλευρα στοιχεία όπου κοντά στη περιοχή της μήτρας ήταν περισσότερα για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Επίσης κλασσικοί «διορθωτές» ροής του μετάλλου που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία, όπως bearings και rockets, χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση ώστε να επιτευχθεί μια ισορροπημένη ροή. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η γεωμετρία της μήτρας εξαρτάται και από παράγοντες που έχουν σχέση με την ίδια την διαδικασία όπως η ταχύτητα του εμβόλου αλλά και παράγοντες που έχουν να κάνουν με το προϊόν όπως το είδος των κραμάτων που χρησιμοποιούνται. Επίσης προτείνεται η βελτίωση της μοντελοποίησης κάνοντας διαδοχικό και όχι ταυτόχρονο σχεδιασμό των bearings και rockets. Κάτι τέτοιο υποστηρίζεται πως μειώνει τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάζονται ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση.

Τέλος οι S. Berski, H. Dyja, A. Maranda, J. Nowaczewski, G. Banaszek [13] σε άρθρο τους μελετούν την ποιότητα κυλινδρικών διμεταλλικών δοκιμίων μετά την διέλαση τους. Τα μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαλκός και αποτελεί το «περίβλημα» του δοκιμίου και αλουμίνιο που αποτελεί τον «πυρήνα» του δοκιμίου. Η ένωση αυτών των δύο υλικών για τις ανάγκες του πειράματος έγινε με εκρηκτική ένωση. Τα πειράματα συνοδεύτηκαν και από μοντελοποίηση τους σε H/Y όπου χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατη ανάλυση και τριγωνικά στοιχεία. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διάφορες ημιγωνίες κωνικότητας της μήτρας (15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° και λόγοι διέλασης (2, 3, 4, 8, 10) για δύο δοκίμια με διαφορετικές διαμέτρους (14.4, 22.2 mm). Στη συνέχεια δημιουργώντας γραφήματα με τα παραπάνω ως μεταβλητές προχωρούν σε σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα συμπεραίνεται πως αυξάνοντας το λόγο διέλασης το εξόγκωμα που προκύπτει από τον πυρήνα στο κάτω μέρος του δοκιμίου, αυξάνεται και αυτό. Επίσης

αυξάνοντας το λόγο διέλασης αυξάνεται η αντίσταση της ροής μετάλλου στη ζώνη παραμόρφωσης. Αυτό φανερώνει πως μειώνεται η ταχύτητα ροής του μετάλλου που αποτελεί τον «μανδύα» του δοκιμίου κάτι που επιφέρει την δημιουργία εξογκώματος στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Επίσης αυξάνοντας την ημιγωνία κωνικότητας εμφανίζεται πάλι το προαναφερθέν εξόγκωμα. Ωστόσο υπάρχει και παρουσία μεγαλύτερων δυνάμεων τριβής στα τοιχώματα της μήτρας και η συστολή της ζώνης παραμόρφωσης δεν είναι τόσο έντονη όσο με την αύξηση του λόγου διέλασης. Έτσι το εξόγκωμα στο κάτω μέρος του δοκιμίου δεν είναι τόσο έντονο.

# **Κεφάλαιο 2**

## **Πειραματικό**

### **Μέρος**

---



## 2.1 Δοκίμια πειράματος

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν δύο πεντάδες κυλινδρικών δοκιμίων, όπου η πρώτη αποτελούνταν με πυθμένα ενώ η δεύτερη χωρίς. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις των δοκιμίων.

	<i>Όνομασία δοκιμίου</i>	<i>Εσωτερική διάμετρος Cu (Διάμετρος Al)</i>	<i>Εξωτερική διάμετρος Cu</i>	<i>Ύψος</i>
<i>Με πυθμένα</i>	N° 1	22 mm	25 mm	42 mm
	N° 2	20 mm	25 mm	42 mm
	N° 3	17,7 mm	25 mm	42 mm
	N° 4	15 mm	25 mm	42 mm
	N° 5	12,5 mm	25 mm	42 mm
<i>Χωρίς πυθμένα</i>	N° 6	22 mm	25 mm	40 mm
	N° 7	20 mm	25 mm	40 mm
	N° 8	17,7 mm	25 mm	40 mm
	N° 9	15 mm	25 mm	40 mm
	N° 10	12,5 mm	25 mm	40 mm

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά δοκιμίων.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ηλεκτρολυτικός χαλκός εμπορίου (Cu 99,9%) καθώς και καθαρό αλουμίνιο. Η αρχική μορφή του χαλκού ήταν συμπαγείς ράβδοι από τους οποίους με κατάλληλη τόνρευση δημιουργήθηκαν οι εξωτερικοί δακτύλιοι των δοκιμίων.



Εικόνα 2.1: Συμπαγείς ράβδοι ηλεκτρολυτικού χαλκού (αριστερά) και εξωτερικοί δακτύλιοι (δεξιά).

Έπειτα στο εσωτερικό μέρος των κυλίνδρων προστέθηκε το καθαρό αλουμίνιο με χύτευση.



Εικόνα 2.2: Χύτευση αλουμινίου στο εσωτερικό του χαλκού.

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

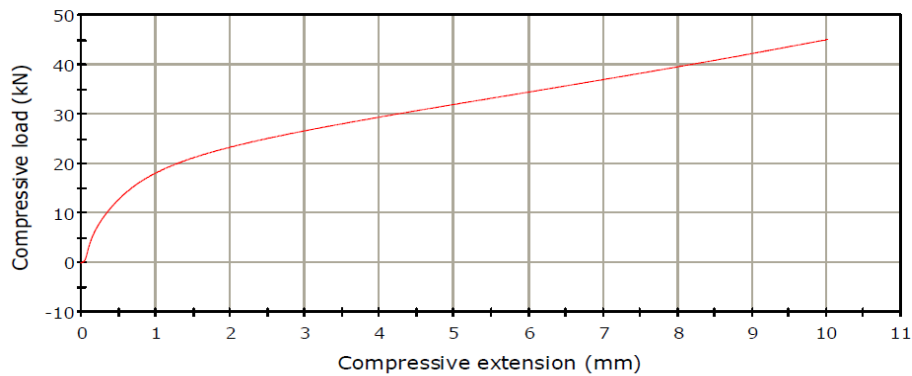
	<i>Αλουμίνιο</i>	<i>Χαλκός</i>
<i>Πυκνότητα</i>	$\rho = 0,0027 \text{ gr/mm}^3$	$\rho = 0,008913 \text{ gr/mm}^3$
<i>Μέτρο Ελαστικότητας</i>	$E=70000 \text{ MPa}$	$E=124000 \text{ MPa}$
<i>Λόγος Poisson</i>	$\nu=0,34$	$\nu=0,35$
<i>Τάση Διαρροής</i>	$266 \text{ MPa}$	$43.8 \text{ MPa}$

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιηθέντων μετάλλων.

Επιπλέον από δοκιμές θλίψης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για το αλουμίνιο και τον χαλκό προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές φορτίου-μετατόπισης που φαίνονται στις Εικόνες 2.3, 2.4.

Operator ID	ANTONIS KOUNTOURIS
Laboratory Name	MANUFACTURING TECHNOLOGY LAB
Company	SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING OF EMP
Temperature (deg C)	18.00
Humidity (%)	50.00
Rate 1	1.00000 mm/min
Number of specimens	3

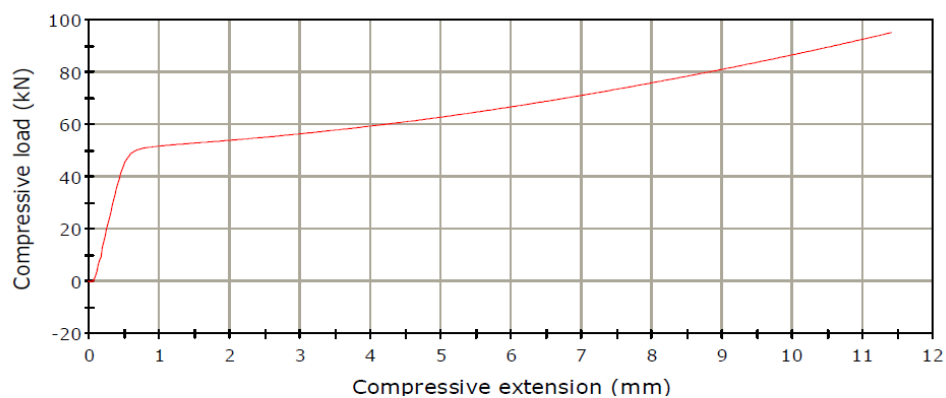
LOAD - DEFLECTION GRAPH



*Εικόνα 2.3: Πειραματική καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το αλουμίνιο.*

Operator ID	ANTONIS KOUNTOURIS
Laboratory Name	MANUFACTURING TECHNOLOGY LAB
Company	SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING OF EMP
Temperature (deg C)	18.00
Humidity (%)	50.00
Rate 1	12.00000 mm/min
Number of specimens	3

LOAD - DEFLECTION GRAPH



*Εικόνα 2.4: Πειραματική καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το χαλκό.*

Να σημειωθεί πως οι καμπύλες αυτές είναι διαθέσιμες και σε μορφή ζευγών τιμών, κάτι που θα χρησιμεύσει στην μοντελοποίηση της διέλασης (Κεφάλαιο 4).

Παρακάτω ακολουθούν οι τελικές πεντάδες δοκιμίων μετά την χύτευση:



Εικόνα 2.5: Δοκίμια χαλκού-αλουμινίου με πυθμένα.



Εικόνα 2.6: Δοκίμια χαλκού-αλουμινίου χωρίς πυθμένα.

## **2.2 Διάταξη πειράματος**

Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της διέλασης είναι η υδραυλική πρέσα SMG. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στην Γερμανία και έχει ονομαστικό φορτίο 100 tn. Είναι ορθού πλαισίου όπου το έμβολο έχει καθοδική πορεία με μέγιστη διαδρομή 600 mm. Το έμβολο συνδέεται με πλάκα, η οποία συνδεόμενη μέσω τεσσάρων πείρων με μια άλλη πλάκα στο κάτω μέρος, οδηγείται με ακρίβεια προς τα κάτω, εξασφαλίζοντας ευθύτητα στη κίνηση. Σε όλες τις δοκιμές δόθηκε σταθερή ταχύτητα πρόωσης 13 mm/min.



*Εικόνα 2.7: Η υδραυλική πρέσα που χρησιμοποιήθηκε.*

Παρακάτω δίνονται τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν το εργαλείο διέλασης.

### ***Τμήμα εισόδου***

Το τμήμα εισόδου αποτελείται από τον μεταλλικό θάλαμο, το δακτύλιο συγκράτησης και το καπάκι (Εικόνα 2.8).

Από τον μεταλλικό θάλαμο εισάγεται το δοκίμιο και περνά το έμβολο όπου ασκεί πίεση δοκίμιο. Έχει εσωτερική διάμετρο  $D_{in}= 25,00\text{mm}$ , εξωτερική  $D_{out}=45,00\text{mm}$ , ύψος:  $H=71,90\text{mm}$  και στο κάτω τμήμα έχει ειδική διαμόρφωση ώστε να προσαρμόζεται η μήτρα.

Ο δακτύλιος συγκράτησης συγκρατεί το μεταλλικό θάλαμο. Έχει ύψος:  $H=67,30\text{ mm}$ , εξωτερική διάμετρο  $D_{out}=90,00\text{mm}$  ενώ η εσωτερική είναι  $D_{in}= 45,00\text{mm}$  ώστε να εφαρμόζει ο μεταλλικός θάλαμος.

Το καπάκι εφαρμόζει στο πάνω μέρος του μεταλλικού θαλάμου. Είναι και αυτό κυλινδρικός δακτύλιος με διαστάσεις  $D_{in}= 25,00\text{mm}$ ,  $D_{out}=90,00\text{mm}$  και  $H=71,90\text{mm}$ . Από τη μεριά όπου εφαρμόζει με το μεταλλικό θάλαμο η διάμετρος είναι  $45\text{ mm}$ . Το καπάκι και ο δακτύλιος συγκράτησης του θαλάμου είναι κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβα, ενώ ο θάλαμος από χάλυβα CK 45.



Εικόνα 2.8: Τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν το τμήμα εισόδου του εργαλείου διέλασης.

### **Μήτρα**

Η μήτρα ουσιαστικά αποτελείται από το άνω και κάτω μέρος. Το άνω μέρος είναι κόλουρος κωνικός δακτύλιος με ημιγωνία κωνικότητας  $15^\circ$  ενώ το κάτω κυλινδρικός δακτύλιος. Ο κόλουρος κωνικός δακτύλιος έχει εσωτερική και εξωτερική διάμετρο  $D_{in}=25,00\text{mm}$  και  $D_{out}=30,20\text{mm}$  αντίστοιχα ενώ το ύψος είναι  $H=9,25\text{ mm}$ . Ο δε

κυλινδρικός δακτύλιος έχει εσωτερική διάμετρο  $d_{in}=20,00\text{mm}$ , εξωτερική  $d_{out}=39,90\text{ mm}$ . Το συνολικό ύψος και των δύο τμημάτων είναι  $24,7\text{ mm}$  (Εικόνα 2.9). Η μήτρα ουσιαστικά καθορίζει τη διάμετρο που θα έχουν τα δοκίμια μετά το πέρας της κατεργασίας. Το υλικό κατασκευής της είναι χάλυβας CK 45.



Εικόνα 2.9: Η μήτρα.

### **Έμβολο**

Πρόκειται για συμπαγή κύλινδρο όπου ασκεί πίεση στο δοκίμιο ώστε αυτό να διέλθει από τη μήτρα. Έχει διάμετρο  $25,00\text{mm}$  και ύψος  $H=80,00\text{mm}$ . Συνδέεται με την άνω πλάκα της πρέσας, εισέρχεται στο μεταλλικό θάλαμο και η διαδρομή που μπορεί να εκτελέσει φτάνει μέχρι το κωνικό τμήμα της μήτρας.



Εικόνα 2.10: Το έμβολο.

### ***Τμήμα εξόδου***

Αφορά κυλινδρικό δακτύλιο εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου  $D_{in}=21,00\text{mm}$ ,  $D_{out}=90,00\text{mm}$  αντίστοιχα και ύψους  $H=68,60\text{mm}$ . Το πάνω μέρος του έχει διάμετρο 40 mm ώστε να εφαρμόζει με τον κυλινδρικό δακτύλιο της μήτρας. Στην κάτω πλάκα της πρέσας τοποθετήθηκε ένας ξύλινος κυλινδρικός δακτύλιος με εσωτερική διάμετρο  $D_{in}=90,00\text{mm}$  για τη συγκράτηση του εργαλείου και ευθυγράμμιση του με το έμβολο. Το υλικό κατασκευής του είναι κοινός χάλυβας.



**Εικόνα 2.11: Το τμήμα εξόδου.**

### ***Λίπανση***

Όπως αντιλαμβάνεται κανείς οι δυνάμεις και οι τριβές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της διέλασης είναι πάρα πολύ μεγάλες. Αυτό όμως μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του τελικού προϊόντος. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι η λίπανση. Επιπλέον έτσι αποφεύγεται το «σφήνωμα» του κατεργάσιμου τεμαχίου στο εργαλείο, μειώνεται η φθορά σε αυτό καθώς επίσης βελτιώνεται η ποιότητα επιφάνειας του τελικού προϊόντος. Με γνώμονα τα παραπάνω πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων έγινε λίπανση των δοκιμίων, του μεταλλικού θαλάμου αλλά και της μήτρας. Το λιπαντικό που επιλέχθηκε είναι το Interflon food lube G100 το οποίο είναι ανθεκτικό σε υψηλές πιέσεις και περιέχει τεφλόν (Teflon).



Η ιδιότητα αυτού του λιπαντικού είναι να εισχωρεί στο εσωτερικό των μηχανημάτων και να δημιουργεί ένα φιλμ ανάμεσα στις επιφάνειες όπου εμφανίζονται δυνάμεις τριβής. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η διάρκεια ζωής των βασικών εξαρτημάτων. Θεωρητικά ο συντελεστής τριβής που επιτυγχάνεται είναι  $\mu=0.02-0.06$ .

### ***Μετρητικά όργανα***

Στο έμβολο της πρέσας έχει συνδεθεί δυναμόμετρο πιεζοκρυστάλλου, τύπου 9091 (SN81780) με ονοματικό φορτίο 1000kN και ευαισθησία 2.23pC/N ή 2.16pC/N. Για τα πειράματα που έγιναν επιλέχθηκε ευαισθησία 2.16pC/N 2.16pC/N λόγω του μεγέθους του φορτίου. Επιπλέον το έμβολο συνδέεται και με επαγωγικό μετατοπισιόμετρο (LVDT). Τόσο αυτό όσο και το δυναμόμετρο συνδέονται με ενισχυτή σήματος, ο οποίος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με Η/Υ μέσω μετρητικής κάρτα (ADC) όπου γίνεται η λήψη του σήματος. Στη συνέχεια το πρόγραμμα Lab View κάνει την αποκωδικοποίηση του σήματος και τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν.

# **Κεφάλαιο 3**

## **Οπτική**

### **Παρατήρηση**

### **Δοκιμίων**

---

### ***3.1 Εισαγωγή***

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η οπτική παρατήρηση με μικροσκόπιο και στερεοσκόπιο των δέκα δοκιμίων που υπεβλήθησαν στην κατεργασία της διέλασης. Έμφαση θα δοθεί στην περιοχή της διεπιφάνειας και θα γίνει μια προσεκτικότερη ανάλυση σε σημεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

### ***3.2 Δοκίμια χωρίς πυθμένα***

#### ***3.2.1 Επεξεργασία δοκιμίων***

##### ***Κοπή***

Για να καταστεί δυνατή η παρατήρηση της διεπιφάνειας θα πρέπει να γίνει κοπή των δοκιμίων. Αυτή επιλέχθηκε να γίνει κατά μήκος του άξονα συμμετρίας κάθε τεμαχίου. Η τομή πραγματοποιήθηκε με το κοπτικό εργαλείο Struers Discotom-2 που φαίνεται στην Εικόνα 3.1.

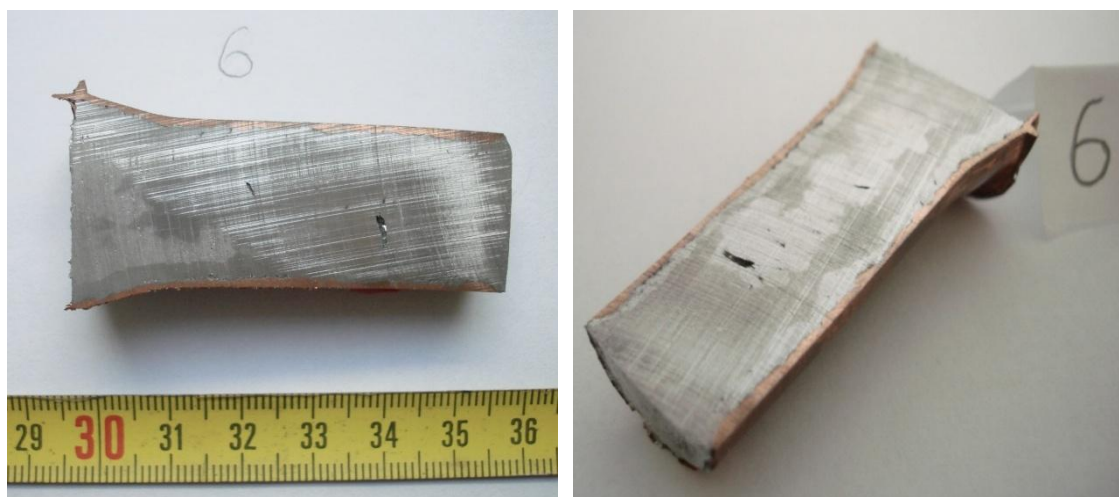


***Εικόνα 3.1 : Το κοπτικό εργαλείο με το οποίο πραγματοποιήθηκε η κοπή.***

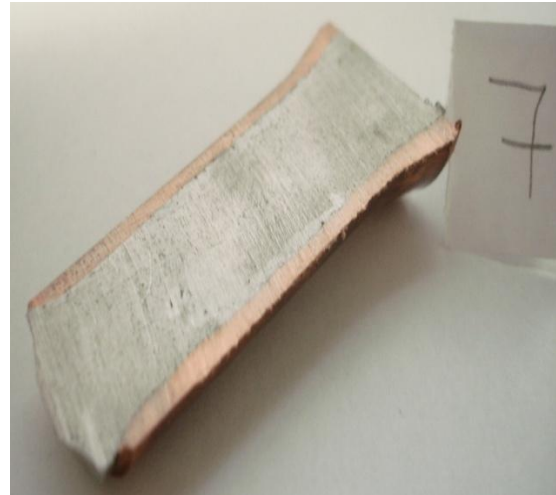
Μετά το πέρας της διαδικασίας το κάθε τεμάχιο χωρίστηκε σε 2 κομμάτια όπου το κάθε κομμάτι έχει τη μορφή που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



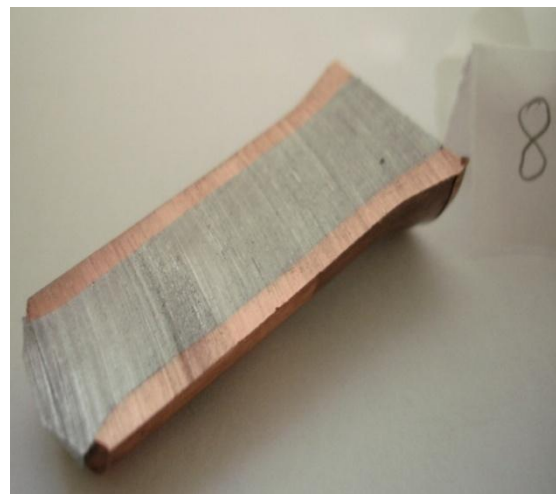
Εικόνα 3.2 : Το ένα από τα δύο μέρη του δοκιμίου μετά την κοπή με διάμετρο αλουμινίου 22 (N<sup>ο</sup> 6) , 20 (N<sup>ο</sup> 7), 17,7 (N<sup>ο</sup> 8), 15 (N<sup>ο</sup> 9) και 12,5 (N<sup>ο</sup> 10) mm.



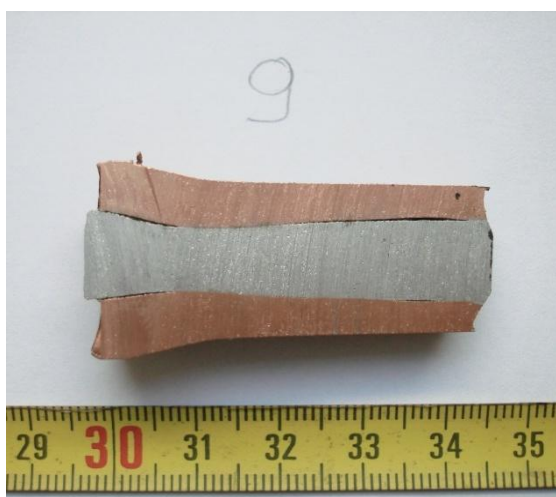
Εικόνα 3.3: Δοκίμιο με διάμετρο αλουμινίου 22 mm.



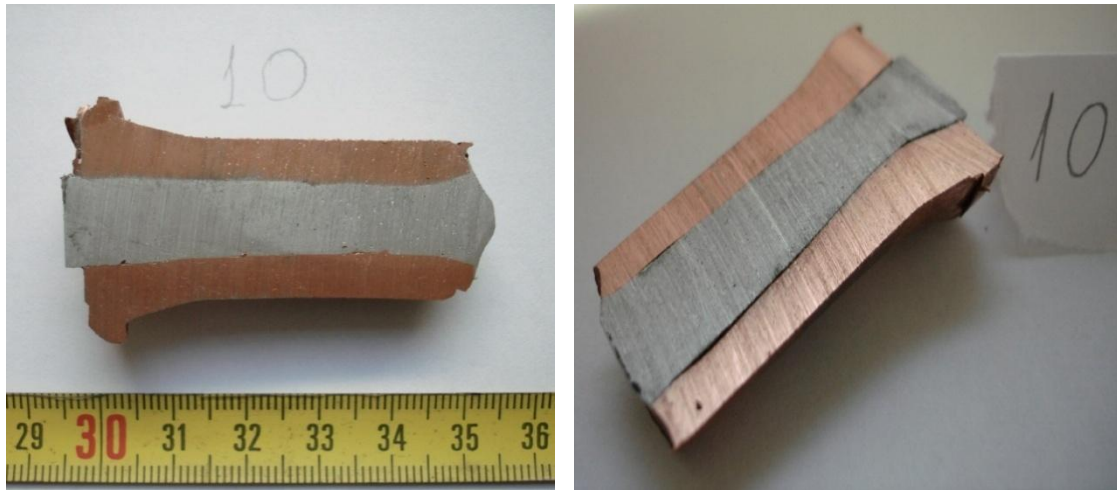
Εικόνα 3.4: Δοκίμιο με διάμετρο αλουμινίου 20 mm.



Εικόνα 3.5: Δοκίμιο με διάμετρο αλουμινίου 17.7 mm.



Εικόνα 3.6: Δοκίμιο με διάμετρο αλουμινίου 15 mm.



Εικόνα 3.7: Δοκίμιο με διάμετρο αλουμινίου 12,5 mm.

Η επιφάνειες που δημιουργήθηκαν είχαν μεγάλη τραχύτητα, απόβλητα (γρέζια), υγρά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κοπή ως ψυκτικό/λιπαντικό μέσο και άλλες ακαθαρσίες. Σε πρώτη φάση καθαρίστηκαν με αιθυλική αλκοόλη και έγιναν κάποιες παρατηρήσεις στο στερεοσκόπιο και το μικροσκόπιο.



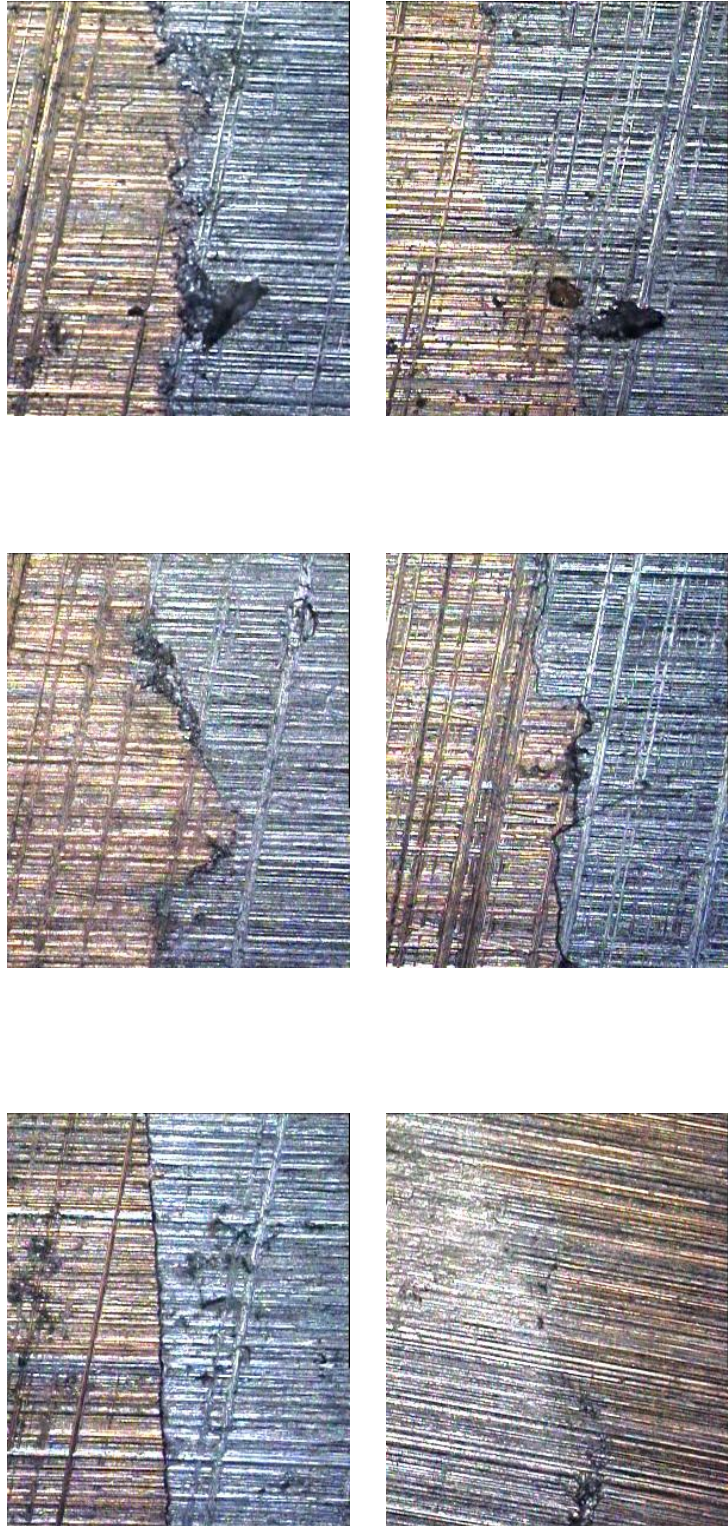
Εικόνα 3.8: Στερεοσκόπιο (πάνω), μικροσκόπιο συνδεδεμένο με Η/Υ και οθόνη τηλεόρασης (κάτω), που χρησιμοποιήθηκαν για την παρατήρηση των δοκιμίων.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα από φωτογραφίες που πάρθηκαν κατά την παρατήρηση της διεπιφάνειας του κάθε δοκιμίου (Εικόνα 3.9, 3.10). Αρχικά έγινε λήψη μιας αλληλουχίας φωτογραφιών με το στερεοσκόπιο Leica MZ6 κατά μήκος όλης της διεπιφάνειας. Έπειτα ενώθηκαν με τη βοήθεια Η/Υ ώστε να υπάρχει μια γενική άποψη προς διευκόλυνση της παρατήρησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της διαδικασίας φαίνεται στην **Στήλη Α** των παρακάτω εικόνων. Στη συνέχεια η διεπιφάνεια παρατηρήθηκε με το μικροσκόπιο Leica DMR. Έμφαση δόθηκε σε χαρακτηριστικά σημεία άξιου ενδιαφέροντος όπως ασυνέχειες, ρηγματώσεις, διεισδύσεις του ενός υλικού στο άλλο κ.ά. Εξάιρεση αποτέλεσε το επάνω μέρος του δοκιμίου με το χαρακτηριστικό κόλουρο κωνικό τμήμα. Η εστίαση του μικροσκοπίου ήταν 50 φορές μεγαλύτερη από την πραγματικότητα και κάποια από τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη **Στήλη Β**.

*A*



*B*



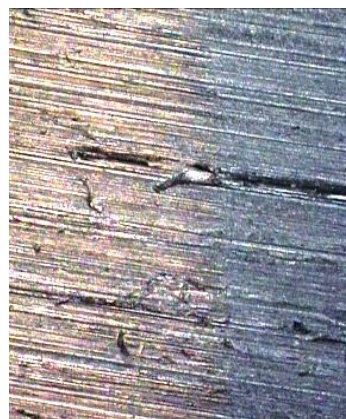
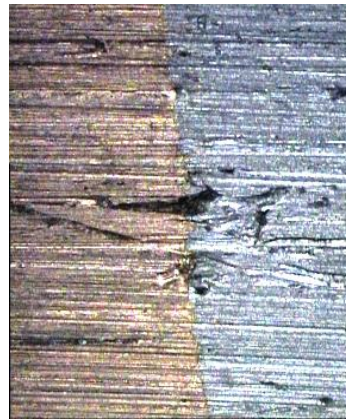
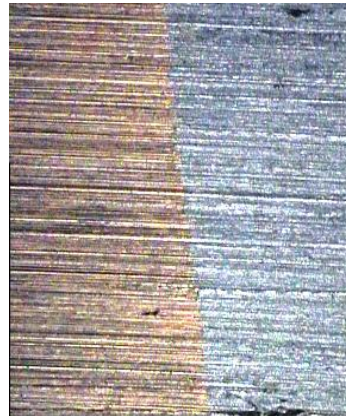
*Εικόνα 3.9: Δοκίμιο N° 7.*



*A*



*B*



*Εικόνα 3.10: Δοκίμιο Νº 8.*

Ωστόσο όπως φαίνεται και από τις εικόνες υπήρχαν δυσχέρειες στη παρατήρηση της διεπιφάνειας. Αιτία ήταν η μεγάλη τραχύτητα, η ακούσια μεταφορά το ενός μέταλλου στην περιοχή του άλλου από τον κοπτικό δίσκο, κάποια απόβλητα που εμπόδιζαν να υπάρξει μεγάλη ευκρίνεια, καθώς και ο περιορισμός μεγέθυνσης που υπήρχε λόγω των παραπάνω. Επιπλέον η επιφάνεια που δημιουργήθηκε δεν ήταν επίπεδη κάτι που δυσκόλευε στην παρατήρηση της διεπιφάνειας με το μικροσκόπιο. Έτσι ήταν αναγκαίο η επιφάνεια να λειανθεί ώστε να αρθούν τα ανωτέρω προαναφερθέντα προβλήματα.

### *Λείανση*

Η λείανση πραγματοποιήθηκε με το λειαντικό μηχάνημα Struers που φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Η λειτουργία του μηχανήματος είναι απλή. Στην κυκλική περιοχή που φαίνεται τοποθετείται ένα υαλόχαρτο. Στη συνέχεια σε αυτή τη περιοχή δίνεται σταθερή ταχύτητα μέσω ηλεκτροκινητήρα και η επιφάνεια που πρόκειται να λειανθεί εφαρμόζεται πάνω στο υαλόχαρτο. Επιπλέον υπάρχει και μια μικρή σταθερή παροχή νερού επάνω σε αυτό ώστε να μην «χαραχθεί» η, προς λείανση, επιφάνεια. Η διαδικασία απαρτιζόταν ουσιαστικά από τέσσερα στάδια όπου χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό υαλόχαρτο σε καθένα από αυτά. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιήθηκε χοντρό υαλόχαρτο (240, 500) για να δημιουργηθεί μια πλήρως επίπεδη επιφάνεια χωρίς ανωμαλίες, να απομακρυνθούν επικαθήμενα απόβλητα αλλά και να μειώσει την τραχύτητα. Σε κάθε επόμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκε λεπτότερο υαλόχαρτο (800,1200) από το προηγούμενο για την περαιτέρω μείωση της τραχύτητας και την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.



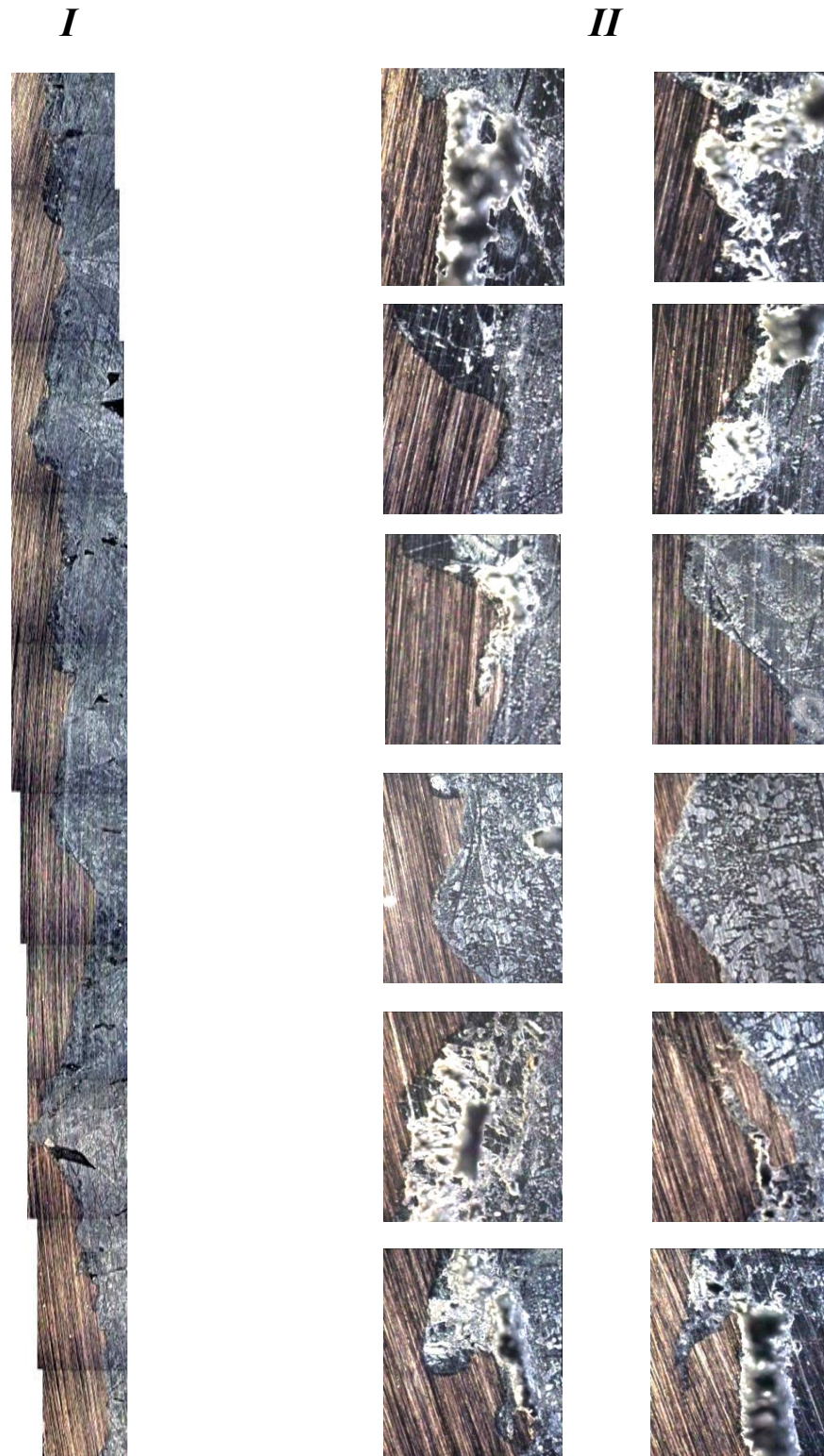
*Εικόνα 3.11: Το λειαντικό μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε.*

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία τη λείανσης, τα δοκίμια παρατηρήθηκαν ξανά στο μικροσκόπιο. Αυτή τη φορά έγινε λήψη μιας αλληλουχίας φωτογραφιών σε μια χαρακτηριστική περιοχή της διεπιφάνειας κάθε δοκιμίου με το μικροσκόπιο. Η μεγέθυνση ήταν πενήντα φορές μεγαλύτερη από την πραγματικότητα. Έπειτα με τη βοήθεια Η/Υ έγινε «συρραφή» των εικόνων αυτών που παρουσιάζονται στη **Στήλη I** παρακάτω. Στη συνέχεια έγινε εστίαση ξανά σε σημεία που έχριζαν προσοχής όπως έγινε πριν τη λείανση (**Στήλη II**). Η μεγέθυνση αυτή τη φορά ήταν διακόσιες φορές μεγαλύτερη από την πραγματικότητα.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως στα δοκίμια N<sup>ο</sup> 9 και N<sup>ο</sup> 10 κατά τη διάρκεια της λείανσης σημειώθηκε αποκόλληση του αλουμινίου από τον χαλκό. Έτσι θεωρήθηκε σκόπιμο να απεικονισθεί εκτός της διεπιφάνειας και η επιφάνεια του αλουμινίου που βρισκόταν σε επαφή με τον χαλκό. Αυτό έγινε μέσω του στερεοσκοπίου όπου ελήφθησαν διαδοχικές φωτογραφίες και έγινε μια σύνθεση αυτών. Το αποτέλεσμα φαίνεται στις Εικόνες 3.15 και 3.16 στη **Στήλη III**

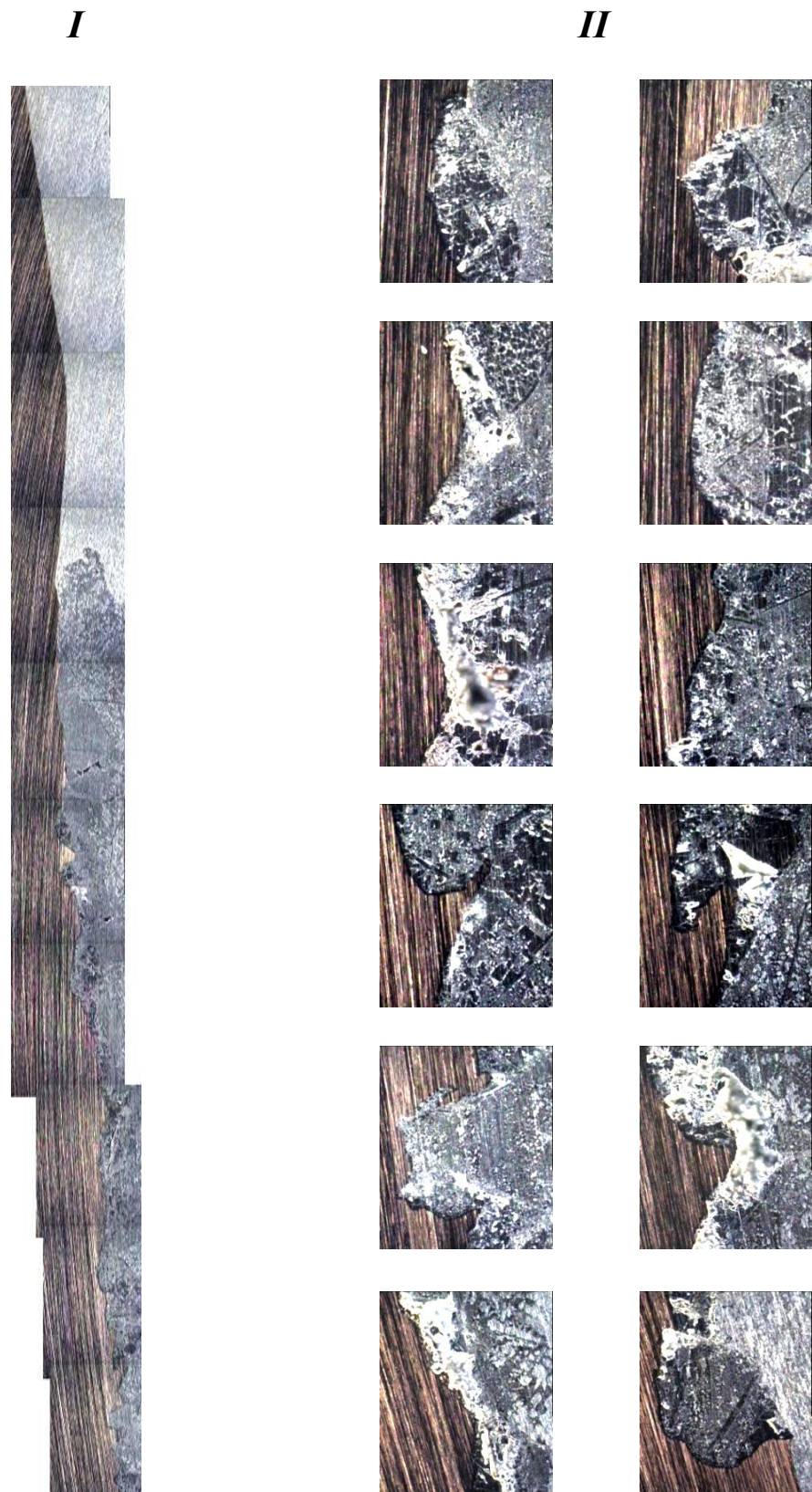
### 3.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

#### 3.2.2.1 Δοκίμιο N° 6



Εικόνα 3.12: Δοκίμιο N° 6.

### 3.2.2.2 Δοκίμιο Ν° 7



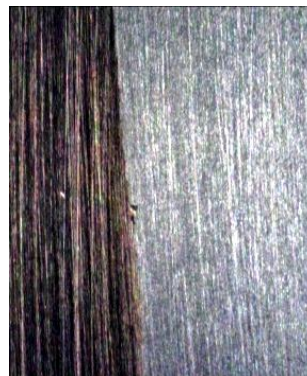
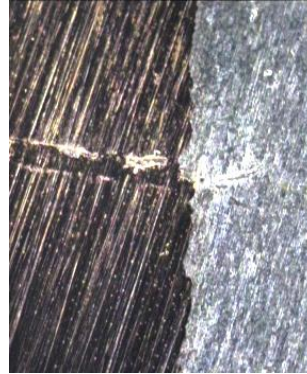
Εικόνα 3.13: Δοκίμιο Ν° 7.

### 3.2.2.3 Δοκίμιο Ν° 8

*I*



*II*



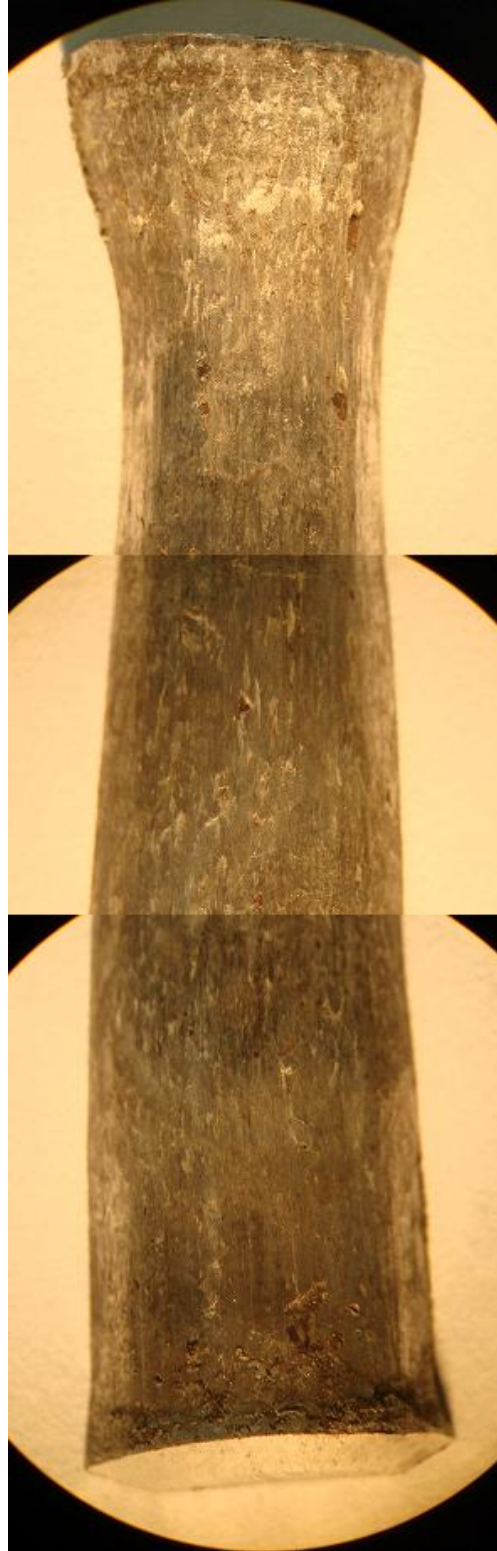
*Εικόνα 3.14: Δοκίμιο Ν° 8.*

### 3.2.2.4 Δοκίμιο N° 9

*I*



*III*



Εικόνα 3.15: Δοκίμιο N° 9.

### 3.2.2.5 Δοκίμιο N° 10

*I*



*III*



Εικόνα 3.16: Δοκίμιο N° 10.



### 3.2.3 Σχολιασμός

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 6 παρατηρούμε στην φωτογραφία της Στήλης I ότι η διεπιφάνεια παρουσιάζει μια μη ομαλή συνέχεια κατά μήκος του δοκιμίου. Αιτία αυτού είναι η ύπαρξη ζωνών όπου το αλουμίνιο έχει συμπίσει τον χαλκό αλλά και το αντίθετο. Στην φωτογραφίες της Στήλης II επιπλέον γίνεται αντιληπτό ότι εκτός της προαναφερθείσας συμπίσεως υπάρχει και εισχώρηση του χαλκού στο αλουμίνιο, διάκενα και ρηγματώσεις κυρίως του αλουμινίου αλλά και εισχώρηση του αλουμινίου στο χαλκό.

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 7 η διεπιφάνεια στην αρχή του επάνω μέρους του δοκιμίου έχει μια σταθερότητα. Χαρακτηριστική είναι η απουσία εισχωρήσεων ή ρηγματώσεων και η ομαλότητα της διεπιφάνειας. Στη συνέχεια όμως αυτή χάνεται και δίνει τη θέση της σε μια μη ομαλή συνέχεια όπως στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 6. Εκεί πάλι έχουμε την επανεμφάνιση εισχώρησης του ενός υλικού στο άλλο.

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 8 φαίνεται καθαρά πως η διεπιφάνεια είναι αρκετά σταθερή. Βέβαια με μια μεγαλύτερη μεγέθυνση, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες της Στήλης II, υπάρχει μια μικρή εισχώρηση του χαλκού στο αλουμίνιο. Αυτή όμως είναι σε μικρότερη κλίμακα σε σχέση με τα ευρήματα των δοκιμίων N<sup>ο</sup> 6 και N<sup>ο</sup> 7 καθώς συμβαίνει σε ένα πολύ μικρό μήκος της διεπιφάνειας.

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 9 είναι χαρακτηριστική η ύπαρξη «κενού» μεταξύ των δύο υλικών. Προφανώς αιτία αυτού είναι η αποκόλληση που σημειώθηκε μεταξύ του αλουμινίου και του χαλκού. Ωστόσο άξιο παρατήρησης είναι ότι η διεπιφάνεια παρουσιάζει και σε αυτό το δοκίμιο μια μεγάλη ομαλότητα και σταθερότητα με παντελής έλλειψη εισχωρήσεων. Σημαντική όμως είναι και η εικόνα που μας δίνεται από την επιφάνεια του αλουμινίου που ερχόταν σε επαφή με το χαλκό (Στήλη II). Είναι φανερό ότι δεν υπήρξε ποτέ κάποια εισχώρηση ή γενικά κάποια αλληλεπίδραση με τον χαλκό. Αυτό είναι προφανές από το πόσο ομαλή είναι η επιφάνεια του αλουμινίου.

Τέλος η εικόνα του δοκιμίου N<sup>ο</sup> 10 μοιάζει αρκετά με αυτήν του N<sup>ο</sup> 9. Η διεπιφάνεια παρουσιάζει και εδώ μια μεγάλη ομαλότητα. Μεγάλο ενδιαφέρον όμως εδώ παρουσιάζει η εικόνα στη Στήλη II που δείχνει την επιφάνεια του αλουμινίου που ερχόταν σε επαφή με τον χαλκό. Όπως φαίνεται καθαρά υπάρχουν ψήγματα χαλκού πάνω σε αυτή που σημαίνει πως υπήρξε εισχώρηση του ενός υλικού στο άλλο.

### 3.3 Δοκίμια με πυθμένα

#### 3.3.1 Επεξεργασία δοκιμίων

Τα διμεταλλικά δοκίμια με πυθμένα έχουν ήδη επεξεργαστεί και έχουν ήδη την τελική τους μορφή για οπτική παρατήρηση της διεπιφάνειας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: από τα δοκίμια πάρθηκε ένα μικρό κομμάτι με εγκάρσια τομή. Στη συνέχεια τα κομμάτια αυτά εγκιβωτίστηκαν και έπειτα λειάνθηκαν. Η λείανση όπως και στα δοκίμια χωρίς πυθμένα ξεκίνησε από χοντρά υαλόχαρτα (240, 500), συνεχίστηκε με λεπτότερα (800, 1200, 2400) και ολοκληρώθηκε όταν υπήρξε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα δοκίμια αυτά φαίνονται στην Εικόνα 3.17 και έχουν διαμέτρους αλουμινίου ανάλογες με αυτά των δοκιμίων χωρίς πυθμένα: 22 (N° 1), 20 (N° 2), 17,7 (N° 3), 15 (N° 4) και 12,5 mm (N° 5).



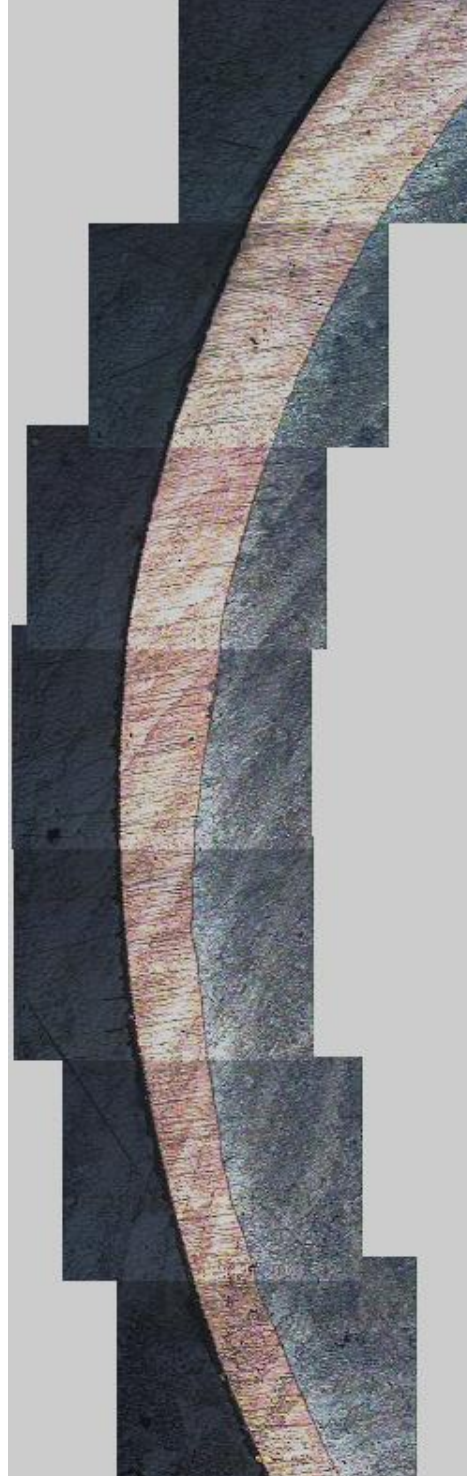
Εικόνα 3.17: Δοκίμια με πυθμένα μετά τον εγκιβωτισμό.

Καθώς είχε παρέλθει αρκετός χρόνος από τη στιγμή που τα δοκίμια είχαν λειανθεί, πριν τη παρατήρησή τους αποφασίστηκε να γίνει ξανά μια ελαφρά λείανση ώστε να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες. Έπειτα η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια όπως προηγουμένως: πάρθηκαν απανωτές λήψεις της κάθε διεπιφάνειας και στη συνέχεια έγινε η σύνθεση τους (**Γραμμή I**). Μεγέθυνση έγινε σε κάποια σημεία κάθε διεπιφάνειας που παρουσίαζαν ενδιαφέρον και παρουσιάζονται στις **Γραμμές II και III** όπου αυτές υπάρχουν. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα αποτελέσματα:

### *3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων*

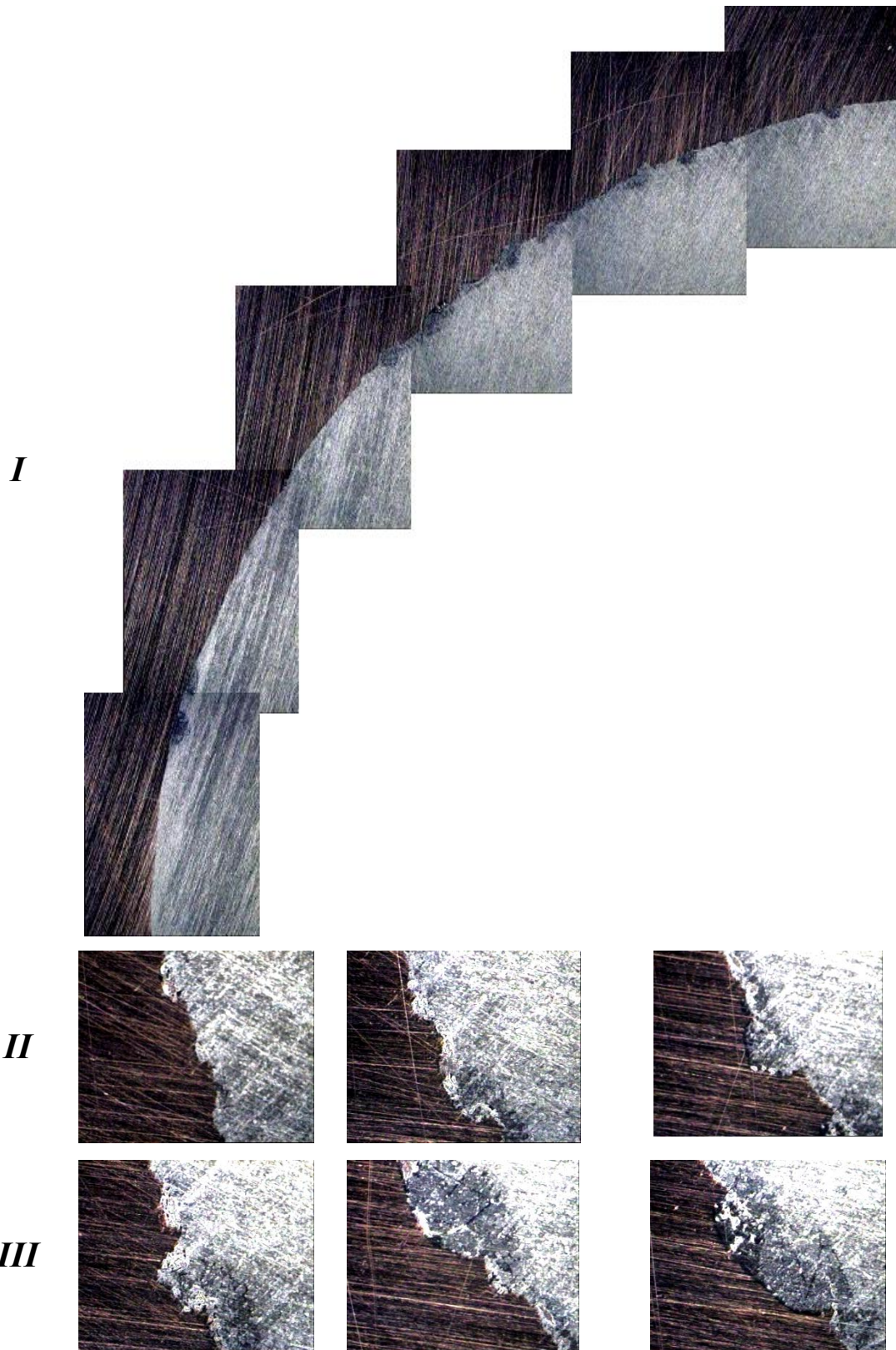
#### *3.3.2.1 Δοκίμιο Νο 1*

*I*



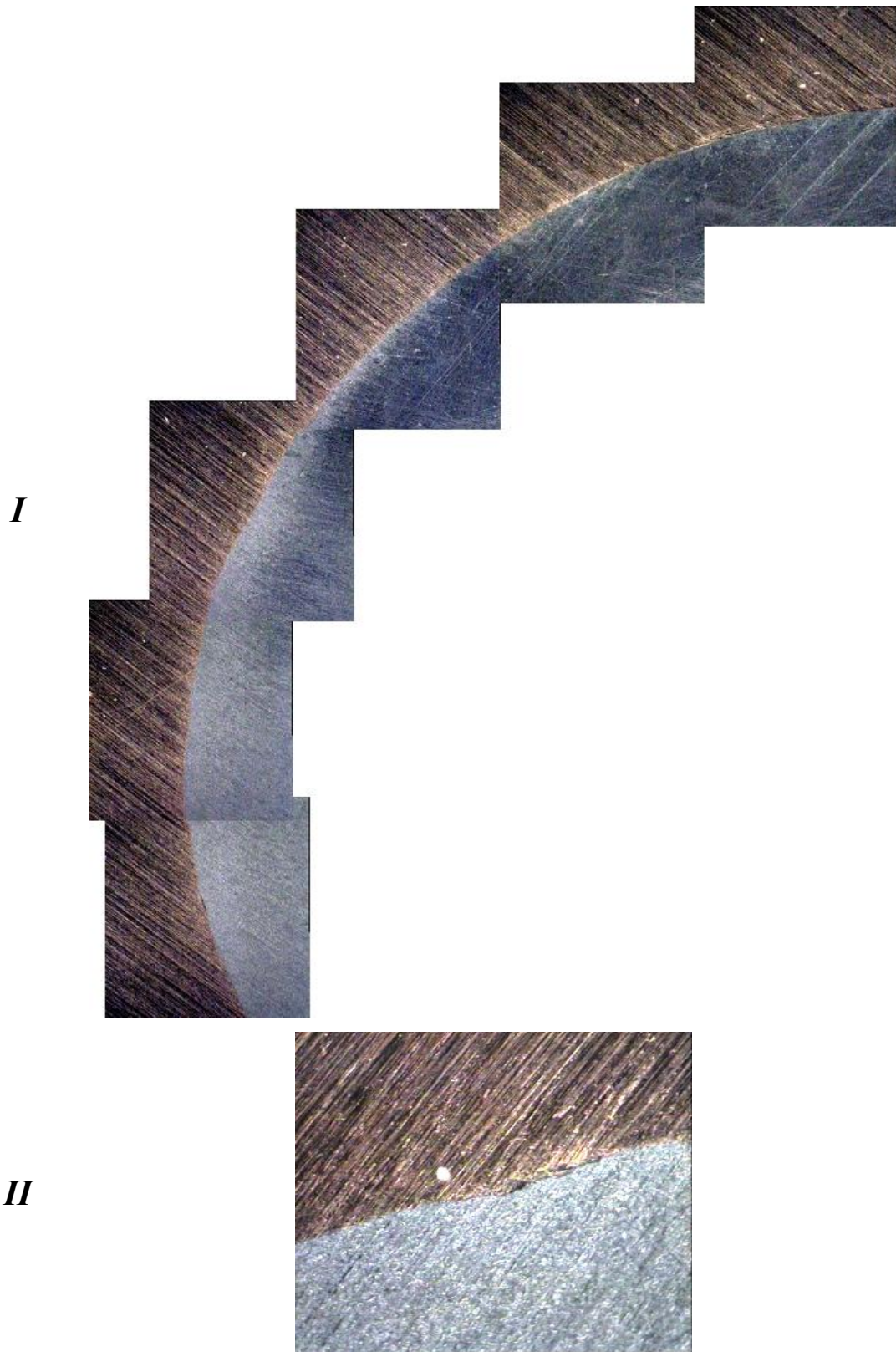
*Εικόνα 3.18: Δοκίμιο Ν<sup>ο</sup> 1.*

### 3.3.2.2 Δοκίμιο Νο 2



Εικόνα 3.19: Δοκίμιο Νο 2.

### 3.3.2.3 Δοκίμιο Νο 3



Εικόνα 3.20: Δοκίμιο Ν° 3.

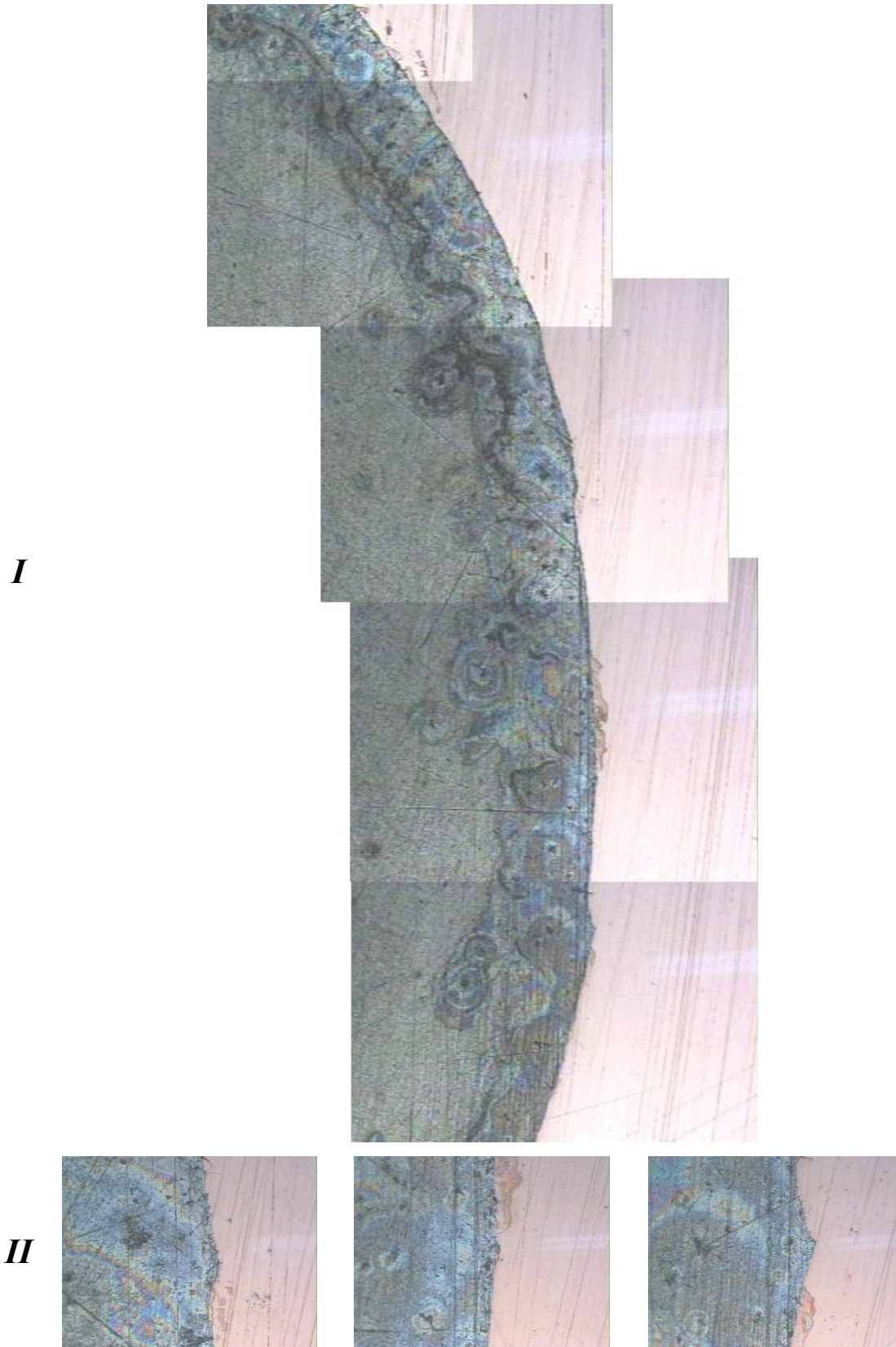
### 3.3.2.4 Δοκίμιο Νο 4



*I*

Εικόνα 3.21: Δοκίμιο Νο 4.

### 3.3.2.5 Δοκίμιο Νο 5



Εικόνα 3.22: Δοκίμιο Νο 5.

### **3.3.3 Σχολιασμός**

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 1 η διεπιφάνεια όπως φαίνεται είναι αρκετά σταθερή χωρίς ανομοιογένεια. Εξαιρέση αποτελούν κάποιες μικρές περιοχές όπου φαίνεται μια πολύ μικρή εισχώρηση του αλουμινίου στο χαλκό οι οποίες γίνονται αισθητές με εστίαση στο συγκεκριμένο σημείο. Αυτό φαίνεται και από τις φωτογραφίες στη Γραμμή II.

Στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 2 φαίνεται πως η διεπιφάνεια σε άλλα σημεία είναι ομαλή ενώ σε άλλα σημεία έχουμε εισχωρήσεις του αλουμινίου στο χαλκό. Τα παραπάνω απεικονίζονται καθαρά στις Γραμμές II και III όπου έχει γίνει εστίαση στα σημεία αυτά.

Το δοκίμιο N<sup>ο</sup> 3 παρουσιάζει μια πολύ σταθερή διεπιφάνεια και μόνο σε ένα σημείο υπάρχει μια μικρή εισχώρηση του χαλκού στο αλουμίνιο (Γραμμή II). Εκτός όμως από αυτό το σημείο δεν υπάρχει κάτι άλλο άξιο παρατήρησης.

Το δοκίμιο N<sup>ο</sup> 4 και αυτό έχει μια πολύ σταθερή και ομαλή διεπιφάνεια και εκτός της απεικόνισης της διεπιφάνειας δεν βρέθηκε κάποιο σημείο που να χρήζει εστίασης και παρατήρησης.

Τέλος στο δοκίμιο N<sup>ο</sup> 5 το μεγαλύτερο μέρος της διεπιφάνειας χαρακτηρίζεται από ομαλότητα και σταθερότητα. Ωστόσο υπάρχουν και εδώ περιοχές όπου το αλουμίνιο εισχωρεί στον χαλκό κάτι που φαίνεται ξεκάθαρα στις φωτογραφίες που υπάρχουν στη Γραμμή II.



# Κεφάλαιο 4

## Αριθμητική

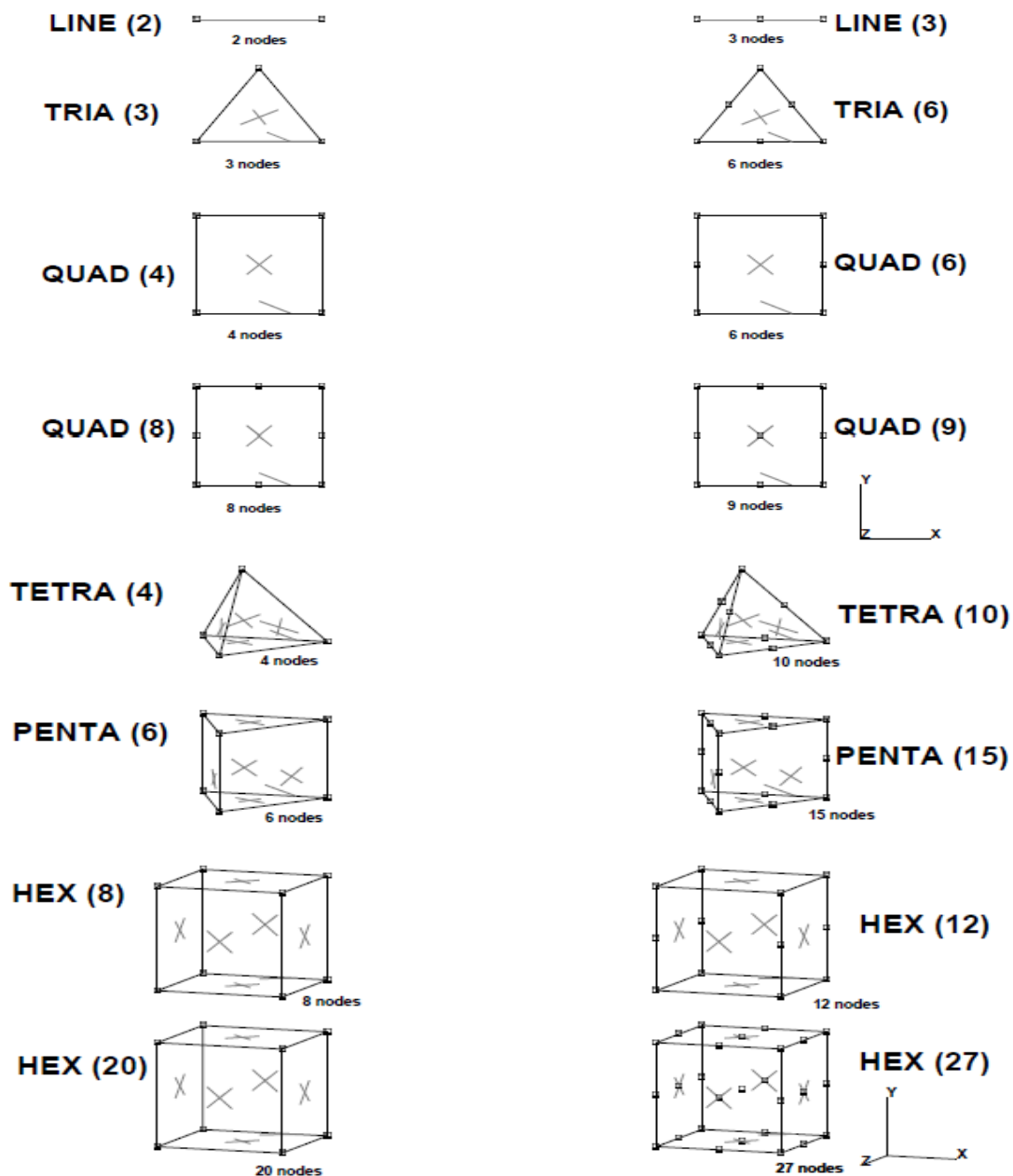
## Προσομοίωση

## 4.1 Εισαγωγή

Η διέλαση είναι μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες διαμόρφωσης. Έτσι με το πέρασμα του χρόνου υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για την μοντελοποίηση της, κυρίως από τις βιομηχανίες. Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της διέλασης, το απαιτούμενο φορτίο, οι δυνάμεις που ασκούνται και η ροή του μετάλλου εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ο λόγος αρχικής-τελικής διατομής (λόγος διέλασης), η τριβή που δημιουργείται στην διεπιφάνεια τοιχώματος-μετάλλου και οι ιδιότητες ροής του μετάλλου. Ειδικά οι δύο τελευταίοι παράγοντες είναι περίπλοκοι και δύσκολα μπορεί κανείς να αποκτήσει πρόσβαση σ' αυτές τις πληροφορίες. Έτσι συνήθως καθορίζονται, χρησιμοποιώντας πειραματικές τεχνικές. Οι αλληλεπιδράσεις που έχουν όμως οι παράμετροι μεταξύ τους καθιστούν δύσκολη την εύρεση ενός μαθηματικού μοντέλου που θα προβλέπει τα πραγματικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία της διέλασης. Έτσι για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκαν διάφορα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα. Ανάμεσα σ' αυτά οι πιο γνωστές αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος λόφου-τριβής (slab method), η μέθοδος άνω και κάτω ορίου (upper/lower bound method), η μέθοδος slip-line field/ visioelasticity ενώ πιο πρόσφατη είναι η (αριθμητική) **μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element method)** [14].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική διαδικασία όπου γενικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να λυθούν με έναν προσεγγιστικό τρόπο. Αν και η μέθοδος είναι προσεγγιστική, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα ενώ έχει εφαρμογή σε μεγάλη ποικιλία προβλημάτων. Τροχοπέδη βέβαια αποτελούσε η αυξημένη επεξεργαστική ισχύς που απαιτούνταν, κάτι που ξεπεράστηκε όμως με την πάροδο του χρόνου. Ο λόγος είναι η τεράστια ανάπτυξη των υπολογιστών με πανίσχυρους επεξεργαστές. Η βασική αρχή που διέπει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση του μέσου που μοντελοποιείται σε στοιχεία (elements), δημιουργώντας ένα συμπαγές πλέγμα. Τα στοιχεία αυτά ορίζονται από κομβικά σημεία ή κόμβους (nodes) που ορίζουν τόσο την γεωμετρία όσο και τους βαθμούς ελευθερίας του στοιχείου. Μπορεί να είναι μονοδιάστατα, διδιάστατα ή και τρισδιάστατα ενώ οι κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές, στις ακμές ή και στο κέντρο των εδρών του κάθε στοιχείου (Εικόνα 4.1). Σε κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη τους νόμους της μηχανικής (π.χ. ισορροπία δυνάμεων, ροπών, αρχή διατήρησης μάζας, ενέργειας) εκφρασμένοι με άγνωστη μεταβλητή την μετατόπιση του κόμβου,

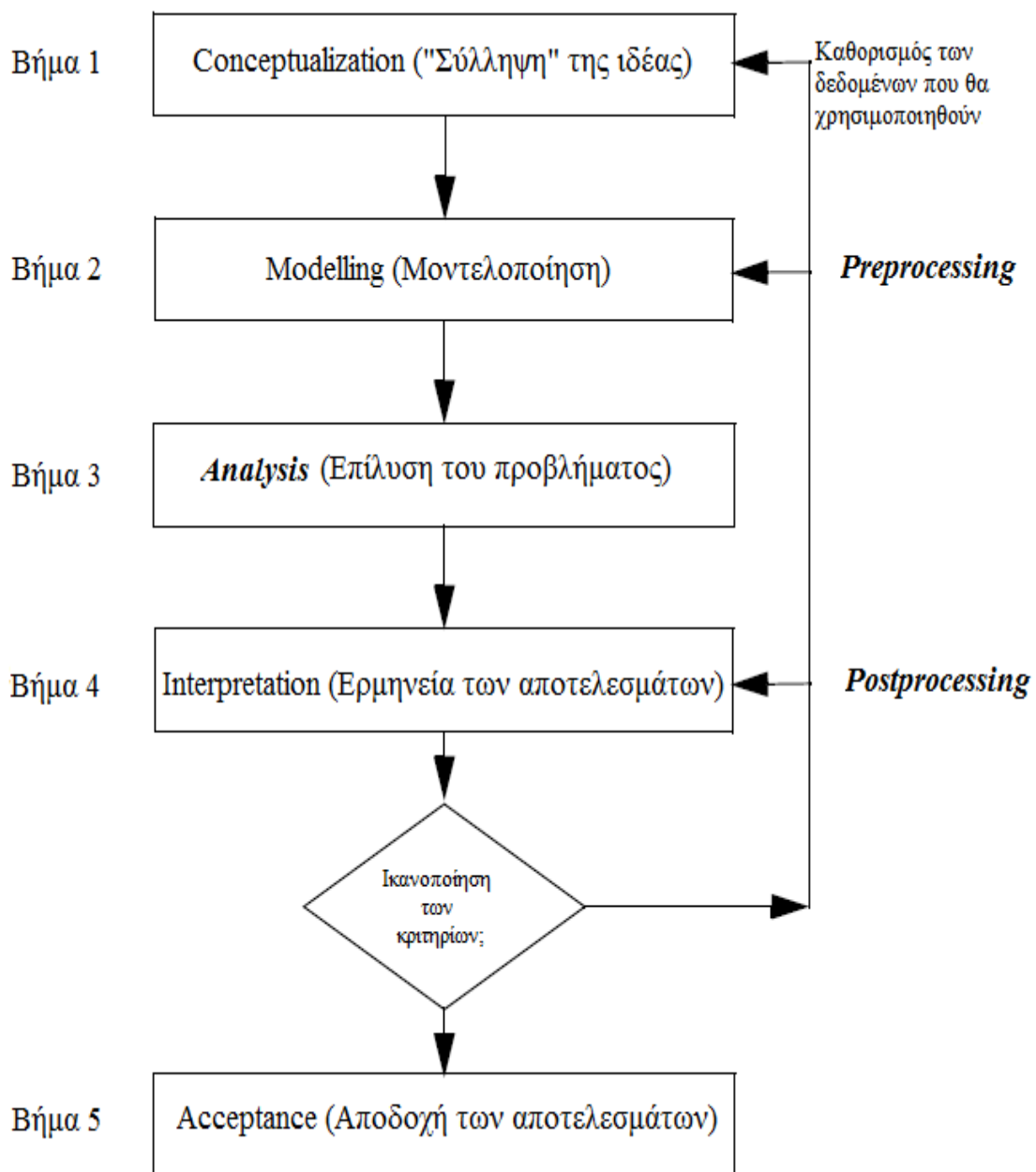
επιλύονται υπερστατικά συστήματα. Βέβαια αυτή η μέθοδος, όπως είναι φυσικό έχει σφάλμα αφού είναι προσεγγιστική. Το σφάλμα συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα του πλέγματος: όσα περισσότερα στοιχεία (άρα και κόμβοι) χρησιμοποιηθούν στην διακριτοποίηση τόσο μικρότερο θα είναι το σφάλμα. Ωστόσο μεγαλύτερος αριθμός κόμβων συνεπάγεται και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς. Έτσι επιλέγεται μια «μέση» λύση κατά την οποία επιλέγεται το πλέγμα να έχει μεγαλύτερη πύκνωση σε συγκεκριμένες περιοχές. Αυτές συνήθως είναι περιοχές που παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον ως προς το αποτέλεσμα που θα εξαχθεί.



*Εικόνα 4.1: Κατηγοριοποίηση στοιχείων με βάση τη διάσταση και τον αριθμό των κόμβων που τα ορίζουν[15].*

## 4.2 Λογική λειτουργίας των υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Όλα τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν μια συγκεκριμένη λογική για την επίλυση του προβλήματος. Αυτό ισχύει και για το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η λογική αυτή έχει ουσιαστικά πέντε βήματα και «σκιαγραφείται» συνοπτικά στην Εικόνα 4.2 [15].

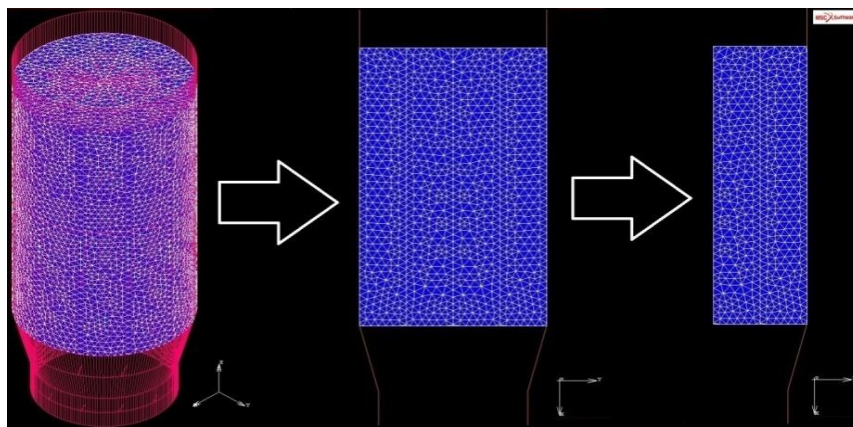


Εικόνα 4.2: Βήματα επίλυσης προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Τα βήματα ένα και δύο ανήκουν στο στάδιο της προεπεξεργασίας (preprocessing). Εκεί αφενός καθορίζεται τι θα περιλαμβάνει η μοντελοποίηση αφετέρου εισάγονται τα δεδομένα και «τακτοποιούνται» (π.χ. πίνακες, μητρωϊκά μεγέθη) κατάλληλα ώστε να αξιοποιηθούν στο επόμενο στάδιο. Το τρίτο βήμα (analysis) είναι ουσιαστικά το στάδιο της επίλυσης του προβλήματος. Εκεί γίνεται η επίλυση συστημάτων εξισώσεων που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Τα βήματα τέσσερα και πέντε απαρτίζουν το στάδιο της μετεπεξεργασίας (postprocessing). Σε αυτό το σημείο αφού έχει γίνει η επίλυση, αξιοποιούνται τα αποτελέσματα Αυτό γίνεται με διάφορους τρόπους όπως ο υπολογισμός παραγώγων μεγεθών (π.χ. πλαστικές παραμορφώσεις, τάσεις), η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ή η γραφική παράσταση αυτών. Μετά το στάδιο της μετεπεξεργασίας, υπάρχει περίπτωση τα αποτελέσματα να μην συνάδουν με τα αναμενόμενα. Σε μια τέτοια περίπτωση μπορεί να επαναληφθεί η διαδικασία επιστρέφοντας σε κάποιο από τα βήματα ένα, δύο ή τέσσερα.

#### **4.3 Μοντελοποίηση διέλασης διμεταλλικών μπιγетών**

Η μοντελοποίηση στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την άμεση, εν ψυχρώ διέλαση και πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό πρόγραμμα Marc Mentat 2010.1.0. Το μοντέλο απαρτίζεται από την μήτρα, το έμβολο και το δοκίμιο.. Η δισδιάστατη μοντελοποίηση είναι απ' τις πιο απλές και εύκολες που μπορούν να γίνουν. Ο λόγος είναι η απλή σχεδίαση και η μικρή επεξεργαστική ισχύς που χρειάζεται για την επίλυση σε σχέση με την τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Η μοντελοποίηση της διέλασης σε δύο διαστάσεις είναι εφικτή λόγω της συμμετρίας ως προς τον z άξονα ενώ λόγω της συμμετρίας και ως προς τον x και y άξονα επιλέγεται αρχικά να γίνει δισδιάστατη αξισυμμετρική μοντελοποίηση (Εικόνα 4.3).

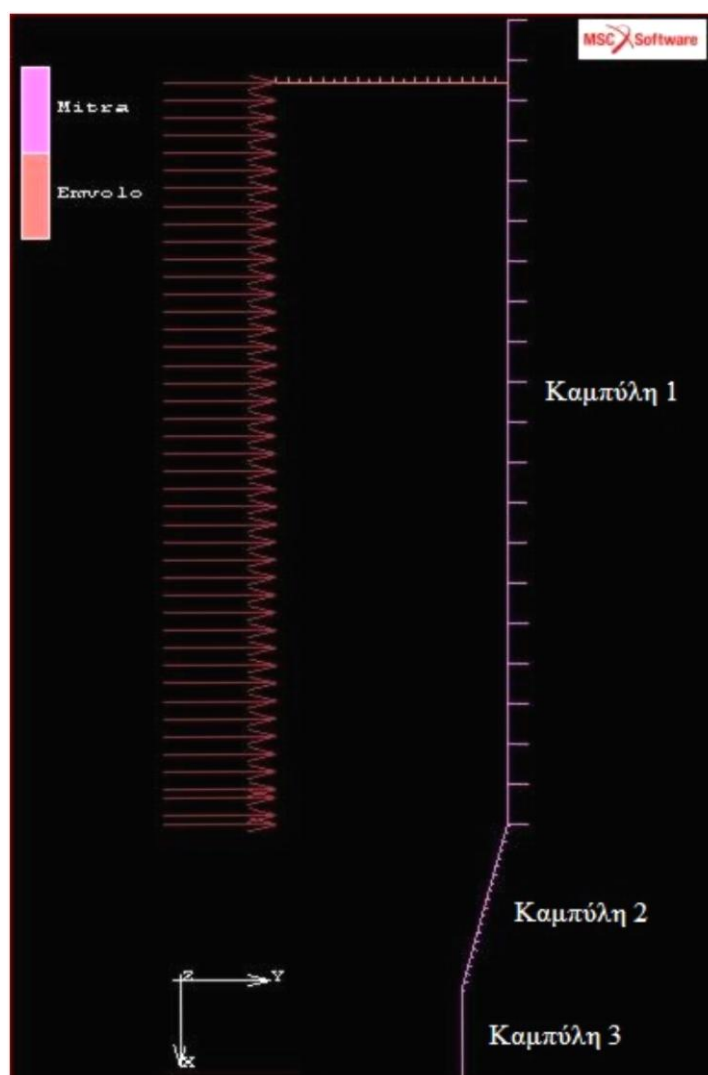


**Εικόνα 4.3:** Διαφορετικά είδη μοντελοποίησης της διέλασης: τρισδιάστατη (αριστερά), δισδιάστατη (κέντρο) και δισδιάστατη αξισυμμετρική (δεξιά).

### 4.3.1 Στοιχεία της δισδιάστατης αξισυμμετρικής μοντελοποίησης

- **Μήτρα - Έμβολο**

Η μήτρα αποτελείται από 3 καμπύλες (curves). Η πρώτη έχει ύψος 45 mm και είναι το τμήμα της μήτρας όπου εισάγεται η μπιγέτα. Η δεύτερη καμπύλη παρουσιάζει γωνία  $-15^\circ$  σε σχέση με την πρώτη και σταματά όταν η απόσταση της μήτρας από τον (νοητό) άξονα συμμετρίας είναι 20 mm. Ουσιαστικά αποτελεί το τμήμα όπου η μήτρα συγκλίνει. Η τρίτη καμπύλη έχει μήκος 5 mm και αποτελεί το τμήμα εξόδου του δοκιμίου. Το δε έμβολο αποτελείται από μία καμπύλη, έχει μήκος όσο η ακτίνα της μπιγέτας (12,5 mm) και εφάπτεται στο τοίχωμα της μήτρας. Τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα 4.4. Τα βέλη αν και αποτελούν συνοριακή συνθήκη (θα γίνει αναφορά παρακάτω), “δείχνουν” ουσιαστικά τον άξονα συμμετρίας.

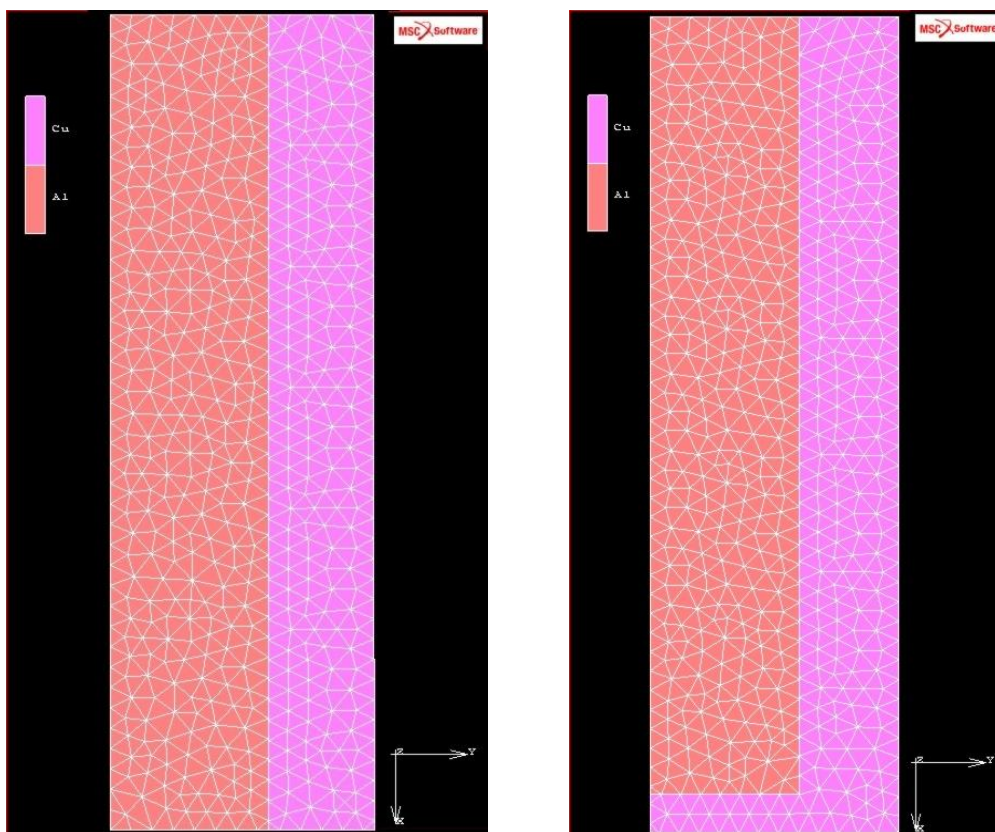


*Εικόνα 4.4: Μοντελοποίηση της μήτρας και του εμβόλου.*

Τόσο για τη μήτρα όσο και για το έμβολο γίνεται η παραδοχή ότι είναι απαραμόρφωτα (rigid). Έτσι στο μενού Contact/ Contact bodies ορίζεται και για τα δύο η επιλογή rigid. Επιπροσθέτως στο έμβολο δίνεται σταθερή ταχύτητα 13 mm/min ή 0,2166 mm/sec. Αυτό επιτυγχάνεται από την επιλογή Body control/ Velocity – parameters και ορίζοντας για τον άξονα x ταχύτητα 0,2166 mm/sec.

- **Δοκίμιο**

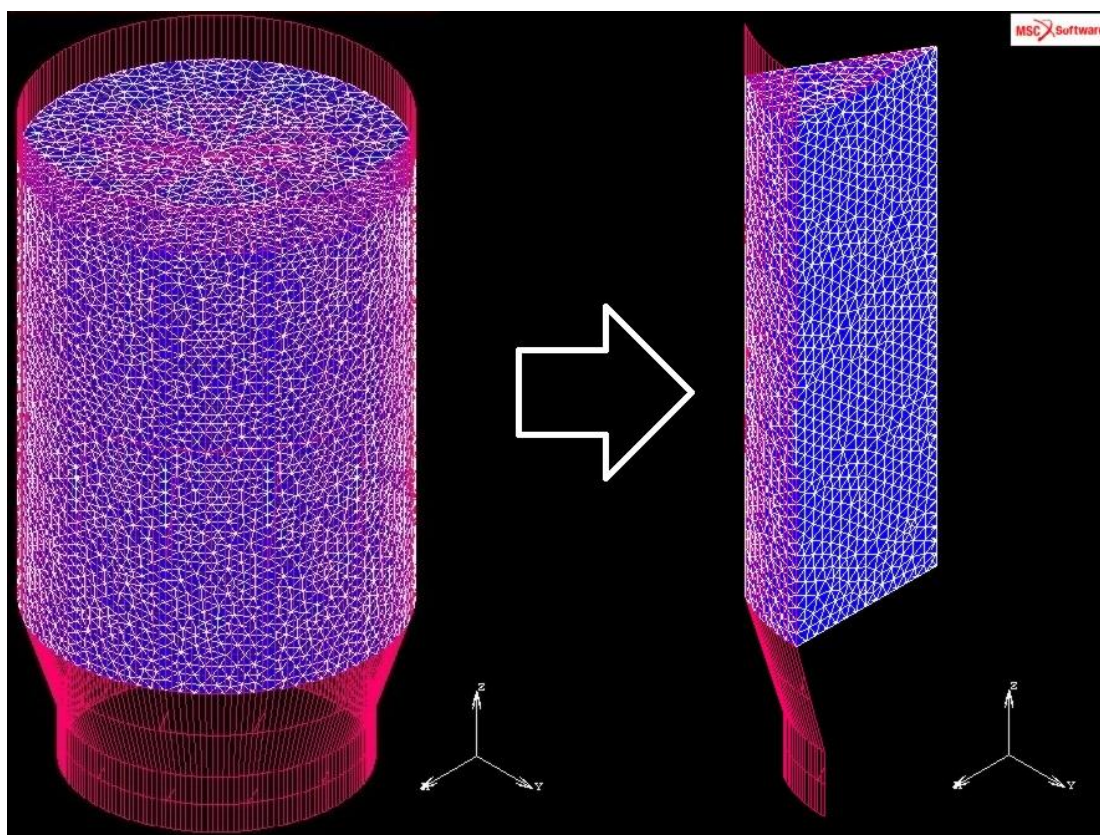
Το μήκος του δοκιμίου είναι 12.5 mm και το ύψος 40 mm και εφάπτεται στο έμβολο και στη μήτρα, στο σημείο ακριβώς πριν αρχίσει αυτή να συγκλίνει. Στην περίπτωση των δοκιμίων με πυθμένα, αυτός έχει σταθερό ύψος 2 mm. Οι διάμετροι του αλουμινίου και του χαλκού είναι ίδιες με αυτές που έχουν τα δοκίμια με τα οποία έγινε το πείραμα. Η διακριτοποίηση επιλέγεται να γίνει με τριγωνικά στοιχεία (elements) τα οποία έχουν κατά προσέγγιση μήκος ακμής (edge length) 1 mm. Για να οριστεί ο χώρος όπου θα δημιουργηθεί το πλέγμα, πρέπει να ορίσουμε την περίμετρο του. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την επιλογή polylines στο μενού mesh generator. Έπειτα επιτυγχάνεται η δημιουργία πλέγματος πηγαίνοντας στο μενού automesh/ 2-D planar meshing και διαλέγοντας την επιλογή Tri mesh (Delaunay).



**Εικόνα 4.5:** Διακριτοποίηση δοκιμίου χωρίς πυθμένα(αριστερά) και με πυθμένα (δεξιά).

### 4.3.2 Στοιχεία της τρισδιάστατης μοντελοποίησης

Εκτός της δισδιάστατης αξισυμμετρικής μοντελοποίησης έγινε και μια προσπάθεια τρισδιάστατης μοντελοποίησης που αφορά τα δοκίμια N° 5 και N° 10. Για την ακρίβεια μοντελοποιήθηκε ένας «γεννήτορας» του τρισδιάστατου μοντέλου γωνίας 30° μοιρών σε σχέση με τον άξονα z. Χαρακτηριστικό αυτής της μοντελοποίησης είναι η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα που παρουσιάζει σε σύγκριση με την δισδιάστατη αξισυμμετρική που περιγράφηκε προηγουμένως.



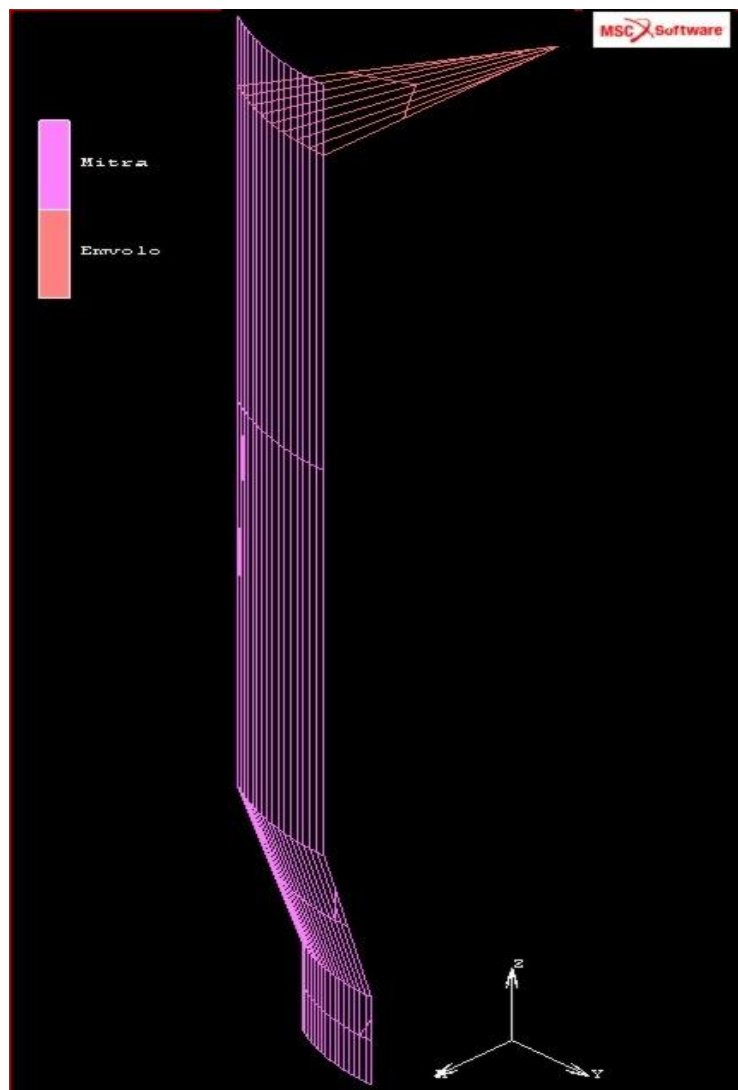
*Εικόνα 4.6: Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση που επιλέχθηκε για τα δοκίμια N° 5 και N° 10.*

- **Μήτρα - Έμβολο**

Για την δημιουργία της μήτρας αρχικά δημιουργήθηκαν τρία στερεά. Το πρώτο στερεό είναι κύλινδρος και είχε ύψος 44 mm και ακτίνα 12,5 mm και μέσω αυτού θα δημιουργηθεί το τμήμα της μήτρας όπου εισάγεται το δοκίμιο. Το δεύτερο στερεό είναι κώνος με ύψος 9,33 mm, ακτίνα κεφαλής 12.5 mm και ακτίνα βάσης 10 mm. Η δε κεφαλή του εφάπτεται με την βάση του κυλίνδρου που περιγράφηκε. Μέσω αυτού του κώνου θα δημιουργηθεί το συγκλίνων τμήμα της μήτρας. Το τρίτο στερεό είναι



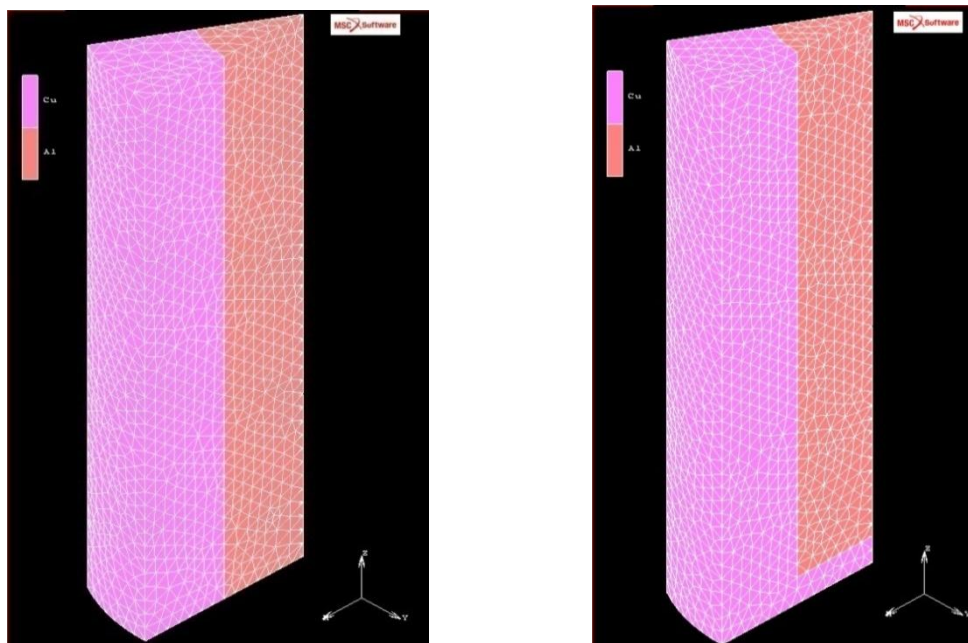
πάλι κύλινδρος με ύψος 5 mm και ακτίνα 10 mm, η κεφαλή του εφάπτεται της βάσης του κώνου και μέσω αυτού θα δημιουργηθεί το τμήμα εξόδου του δοκιμίου. Στη συνέχεια αυτά τα τρία στερεά ενώνονται μέσω της εντολής Unite ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο στερεό. Έπειτα δημιουργούνται δύο πρίσματα που έχουν κοινό άξονα συμμετρίας, αυτόν του στερεού και σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους  $30^\circ$ . Μετά γίνεται αφαίρεση μεταξύ του στερεού και των πρισμάτων, με τη λογική Boole. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή Subtract. Τέλος στο εναπομείναν στερεό, κρατείται μόνο η παράπλευρη επιφάνεια με την εντολή Solid faces to surfaces στο μενού Solids. Το δε έμβολο είναι και αυτό μια επίπεδη επιφάνεια, τμήμα κύκλου, όπου το κέντρο του βρίσκεται απάνω στον άξονα συμμετρίας του στερεού που δημιουργήθηκε και εφάπτεται στην επιφάνεια που δημιουργήθηκε όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.7.



*Εικόνα 4.7: Τρισδιάστατη μοντελοποίηση μήτρας και εμβόλου.*

- **Δοκίμιο**

Για τη δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος πρέπει πρώτα να κατασκευαστεί ένα επιφανειακό πλέγμα το οποίο ουσιαστικά μπορεί να καταλάβει το πρόγραμμα. Έτσι ο χώρος (όγκος) που ορίζει ουσιαστικά το επιφανειακό πλέγμα μπορεί στη συνέχεια να διακριτοποιηθεί. Αρχικά δημιουργούνται δύο ομόκεντροι κύλινδροι όπου ο εσωτερικός έχει ακτίνα ίση με την επιθυμητή κάθε φορά και ο εξωτερικός 12,5 mm. Το ύψος του εξωτερικού κυλίνδρου είναι 42 mm στη περίπτωση που το δοκίμιο έχει πυθμένα και 40 mm στη περίπτωση που δεν έχει. Ο εσωτερικός κύλινδρος έχει πάντα ύψος 40 mm και στη περίπτωση του δοκιμίου με πυθμένα η βάση του απέχει 2 mm από αυτόν του εξωτερικού. Έπειτα δημιουργούνται δύο πρίσματα ίδια με αυτά που περιγράφηκαν στη δημιουργία της μήτρας. Στη συνέχεια γίνεται αφαίρεση αυτών με τους δύο κυλίνδρους, με την εντολή Subtract, έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο στερεών. Γι αυτά τα στερεά δίνεται η εντολή, τις παράπλευρες επιφάνειες το πρόγραμμα να τις αντιληφθεί ως ξεχωριστές επιφάνειες (Solid faces to surfaces) και με βάση αυτές τις επιφάνειες δημιουργείται πρώτα το επιφανειακό πλέγμα. Αυτό αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία (triangle Delaunay) με μήκος ακμής περίπου 1 mm μέσω της εντολής Surface meshing στο μενού automesh. Τέλος με βάση το επιφανειακό πλέγμα δημιουργείται το χωρικό πλέγμα μέσω της εντολής Solid meshing/automesh.



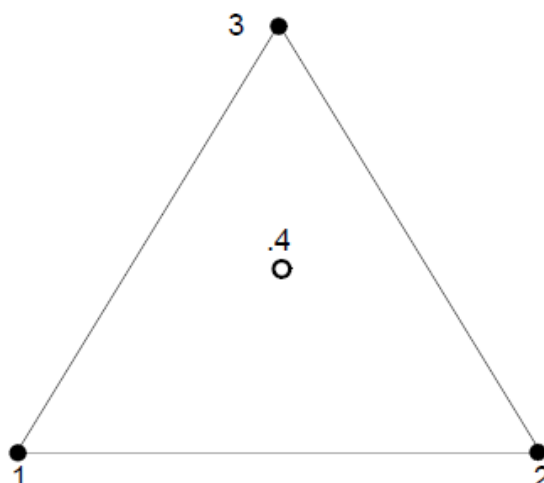
***Εικόνα 4.8:*** Τρισδιάστατη μοντελοποίηση δοκιμίου χωρίς πυθμένα (αριστερά), με πυθμένα (δεξιά).

- **Λοιπά στοιχεία**

✓ Και για τις δύο μοντελοποιήσεις η επαφή μεταξύ δοκιμίου και μήτρας ορίζεται με την επιλογή touching, στο μενού Contact/ Contact Tables. Αυτό σημαίνει πως μεταξύ τους υπάρχει απλή επαφή και ορίζεται συντελεστής τριβής 0,5. Η επαφή μεταξύ αλουμινίου και χαλκού ορίζεται με την επιλογή glue. Έτσι τα δύο υλικά στην αρχή είναι ενωμένα. Επιπροσθέτως ενεργοποιείται η επιλογή Glue separation – breaking με την οποία βάσει κάποιου κριτηρίου η ένωση αυτή μεταξύ των δύο υλικών σπάει. Το κριτήριο αυτό είναι το εξής:  $\left(\frac{\sigma_n}{S_n}\right)^m + \left(\frac{\sigma_t}{S_t}\right)^n > 1$ , όπου  $n=m=2$ ,  $\sigma_n$  και  $\sigma_t$  είναι η ορθή και διατμητική τάση που ασκείται κάθε στιγμή αντίστοιχα.  $S_n$ ,  $S_t$  είναι τα όρια αντοχής του δοκιμίου στις ορθές και διατμητικές τάσεις αντίστοιχα [16]. Ως τιμή του  $S_n$  ορίστηκε η μέση τιμή των ορίων διαρροής των δύο υλικών ως μια γρήγορη προσέγγιση. Η τιμή του  $S_t$  προκύπτει από τον συντελεστή  $S_n$  ως εξής:  $S_t = \frac{S_n}{\sqrt{3}}$ . Η τιμή που δόθηκε λοιπόν για τον συντελεστή  $S_n$  είναι 169,5 MPa ενώ για τον συντελεστή  $S_t$  67.8 MPa. Να σημειωθεί όσον αφορά τα όρια διαρροής που χρησιμοποιήθηκαν, έκτος από αυτά που ήταν διαθέσιμα από τη δοκιμή θλίψης (βλέπε Κεφάλαιο 2) έγινε και μια μικρή αναζήτηση στο διαδίκτυο. Έτσι επιλέχθηκαν αυτά που προσέγγιζαν περισσότερο τη πραγματικότητα (295,2 MPa για το χαλκό, 43.8 MPa για το αλουμίνιο). Επίσης ζητείται και ένας συντελεστής τριβής για την τριβή που θα υπάρχει μεταξύ των δύο υλικών εφόσον αποκολληθούν, όπου ορίστηκε 0,7.

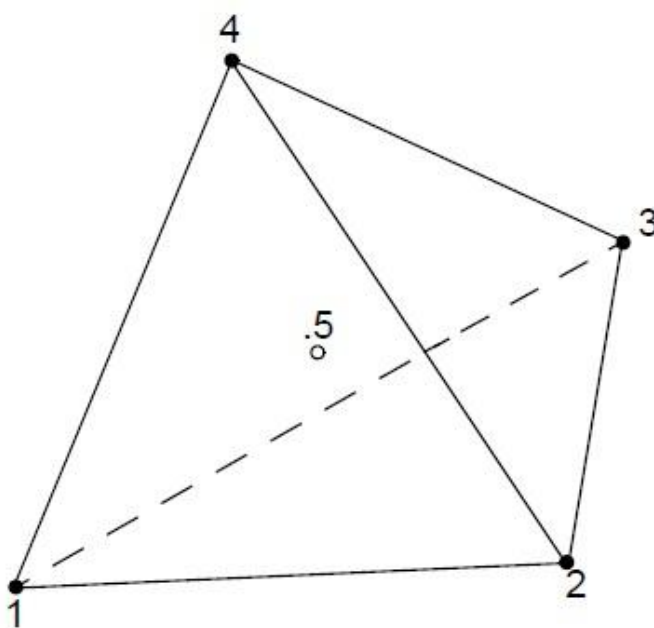
✓ Στην δισδιάστατη μοντελοποίηση ορίζεται συνοριακή συνθήκη με την οποία δεσμεύεται η μετακίνηση κατά τον άξονα y, των κόμβων που βρίσκονται επάνω στον άξονα συμμετρίας. Στο μοντέλο αυτή η συνθήκη φαίνονται ως βέλη κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει από την κεντρική επιλογή Boundary conditions, να ενεργοποιήσουμε την επιλογή Fixed displacement/ Displacement Y και να επιλέξουμε τους συγκεκριμένους κόμβους για τους οποίους θα ισχύει αυτή η συνθήκη.

✓ Επίσης για την δισδιάστατη μοντελοποίηση τα στοιχεία είναι τριγωνικά με τέσσερις κόμβους το καθένα. Συγκεκριμένα οι τρεις κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές του στοιχείου ενώ ο τέταρτος βρίσκεται στο κέντρο του στοιχείου. Τα στοιχεία αυτά (type 156) χρησιμοποιούνται για διακριτοποίηση υλικών που παρουσιάζουν ασυμπίεστη συμπεριφορά και γενικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση (πλαστική), φαινόμενα ερπυσμού κτλ [17].



Εικόνα 4.9: Τριγωνικό (δισδιάστατο) στοιχείο με τέσσερις κόμβους [17].

- ✓ Στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση για τον ίδιο λόγο με τον παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία σε σχήμα πυραμίδας με τριγωνική βάση (type 157) [17]. Έχουν τέσσερις κόμβους σε κάθε κορυφή της πυραμίδας και έναν στο κέντρο της.



Εικόνα 4.10: Τριγωνικό (τρειςδιάστατο) στοιχείο με πέντε κόμβους [17].

- ✓ Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση επίσης ενεργοποιείται η επιλογή στο πρόγραμμα Cyclic Symmetry. Έτσι αντιλαμβάνεται την ύπαρξη συμμετρίας με γεννήτορα το μοντέλο που σχεδιάστηκε.

#### **4.4 Συμπεριφορά των υλικών στην μοντελοποίηση**

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την σωστή μοντελοποίηση είναι η συμπεριφορά των υλικών ούτως ώστε να υπάρξουν και σωστά αποτελέσματα. Παρακάτω δίνονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών:

##### **Αλουμίνιο:**

Πυκνότητα:  $2700 \text{ kg/ m}^3$

Μέτρο ελαστικότητας:  $7 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: 0,3

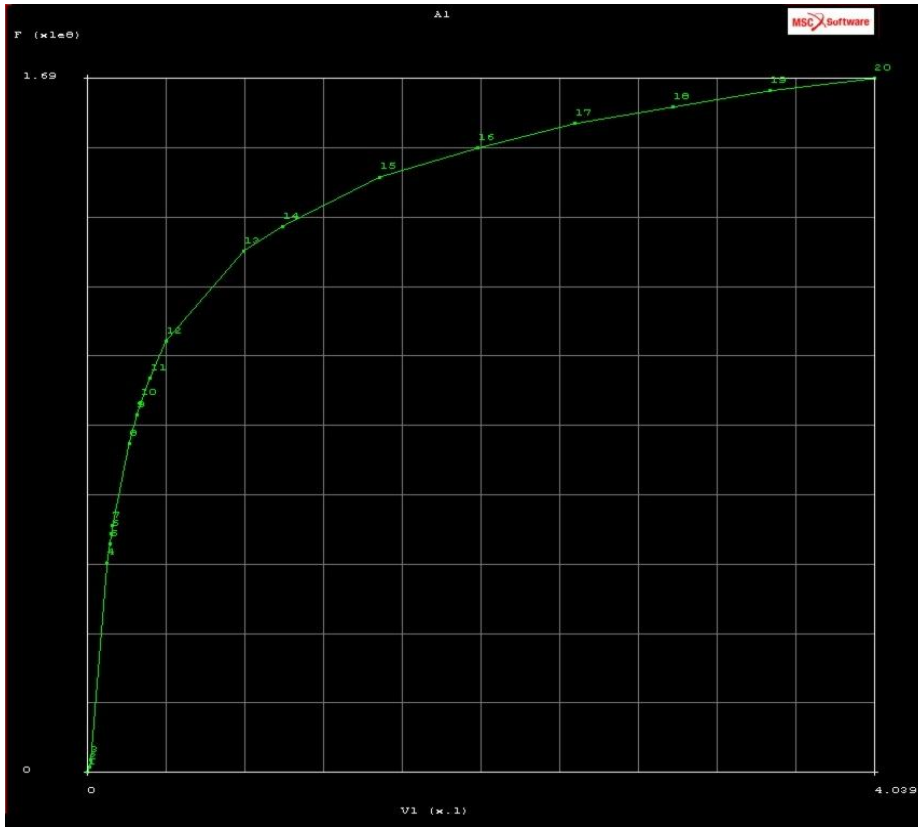
##### **Χαλκός:**

Πυκνότητα:  $8913 \text{ kg/ m}^3$

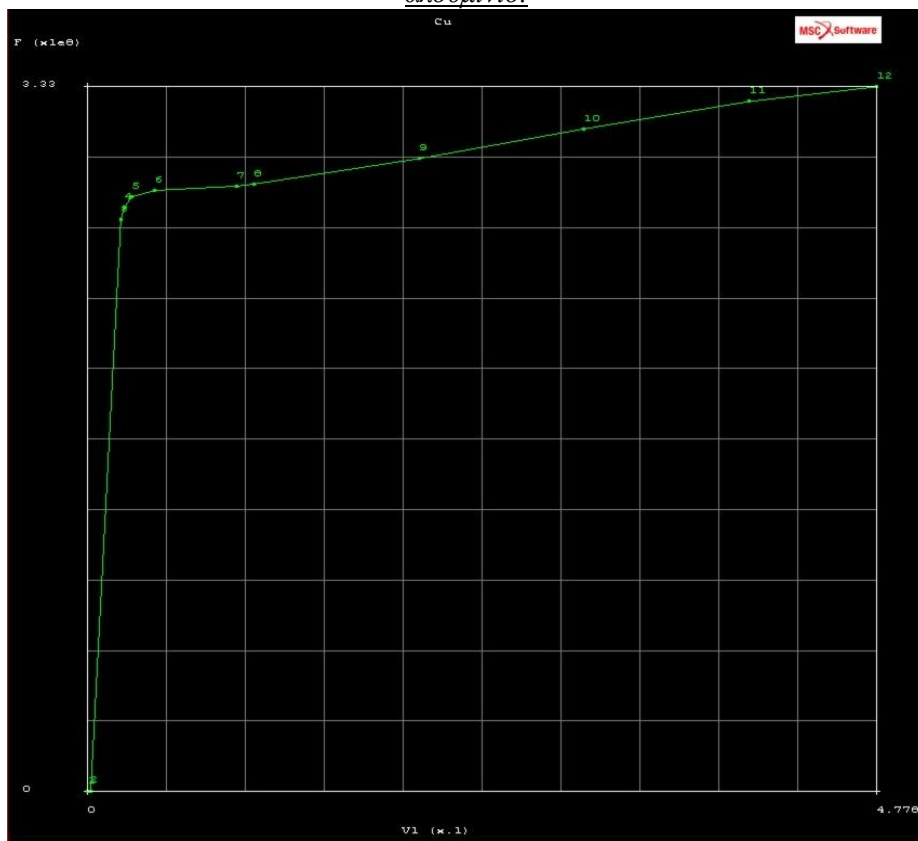
Μέτρο ελαστικότητας:  $1,24 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Λόγος Poisson: 0,3

Η μήτρα και το έμβολο θεωρήθηκαν απαραμόρφωτα, όπως προαναφέρθηκε, και έτσι δεν χρειάστηκε να δοθούν κάποιες ιδιότητες γι' αυτά. Επιπλέον το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να αντιληφθεί με ακρίβεια τη συμπεριφορά των υλικών ορίζοντας διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για καθένα από αυτά. Τα διαγράμματα ουσιαστικά σχηματίζονται δίνοντας ζεύγη τιμών και έτσι ορίζονται ουσιαστικά τα όρια διαρροής του κάθε υλικού. Οι απαιτούμενες τιμές αντλήθηκαν από πειραματικές διαδικασίες (βλέπε Κεφάλαιο 2). Στο πρόγραμμα αρχικά δημιουργούνται οι πίνακες με την επιλογή Tables όπου ο άξονας x αφορά την παραμόρφωση και ο άξονας y την τάση. Έπειτα στο μενού και την επιλογή Material properties εισάγονται για το κάθε υλικό οι παραπάνω μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον επιλέγεται η συμπεριφορά των υλικών να είναι ελαστοπλαστική – ισοτροπική και μέσα από την επιλογή Plasticity εισάγεται για καθένα υλικό το διάγραμμα διαρροής που δημιουργήθηκε.



*Εικόνα 4.11: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που εισήχθηκε στο πρόγραμμα για το αλουμίνιο.*



*Εικόνα 4.12: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που εισήχθηκε στο πρόγραμμα για το χαλκό.*

Επιπλέον θέλοντας να βελτιωθεί η συμπεριφορά του μοντέλου ενεργοποιείται η επιλογή Constant dilatation για δισδιάστατο αξισυμμετρικό (axisymmetric solid) πλέγμα από την επιλογή Geometric properties του βασικού μενού [15].

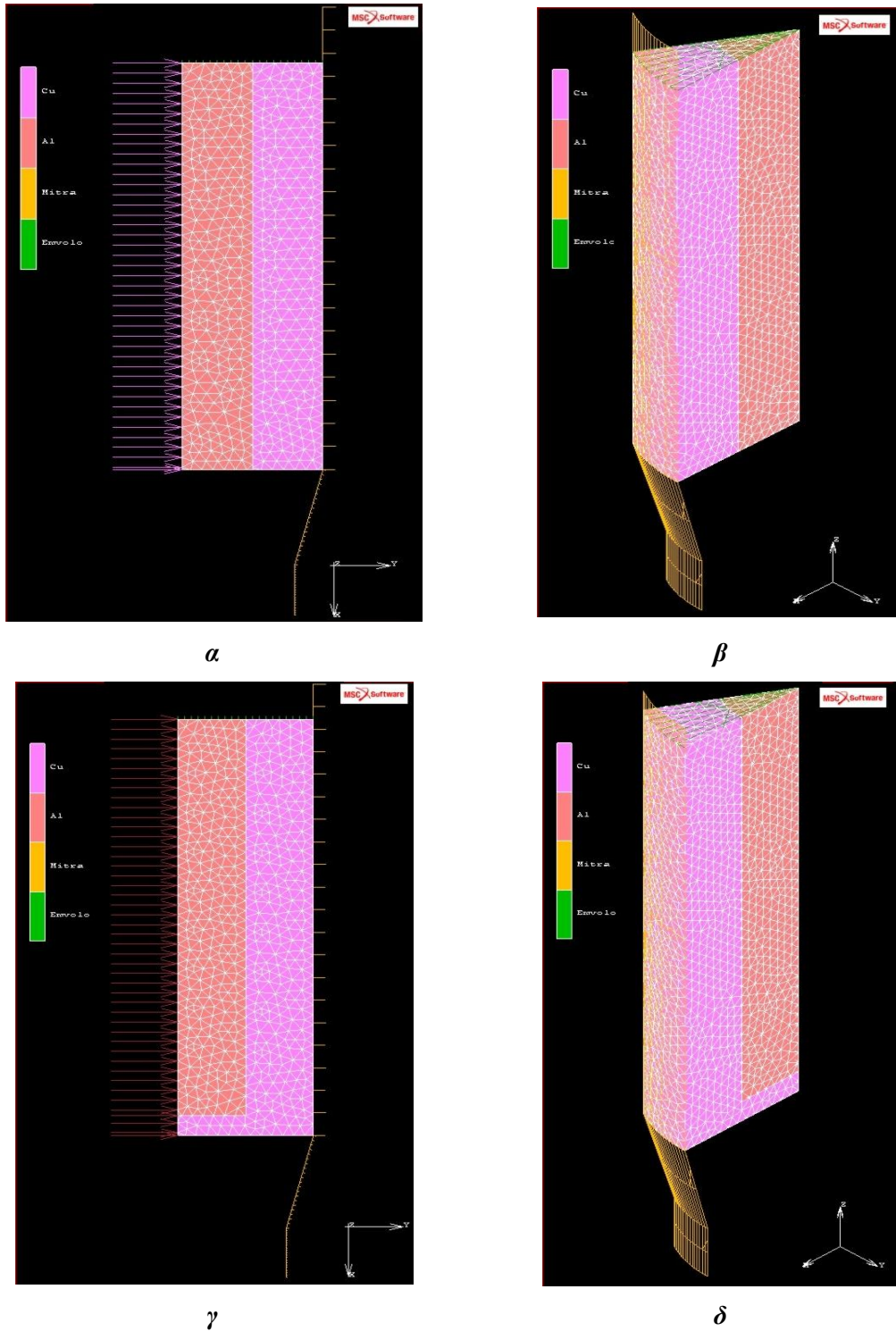
#### 4.5 Τελικές ρυθμίσεις μοντέλου

Αφού σχεδιαστεί το μοντέλο με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω πρέπει να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις ώστε να αρχίσει η ανάλυση και επίλυση του μοντέλου. Αρχικά ενεργοποιείται η επιλογή loadcase/structural και εκεί εισάγεται η επιλογή ctable1 στη ρύθμιση contact. Ουσιαστικά εισάγονται οι επιλογές που κάναμε κατά τη δημιουργία του μοντέλου, όσον αφορά το είδος της επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της μήτρας αλλά και των δύο υλικών μεταξύ τους. Επιλέγεται επίσης ο χρόνος για τον οποίο επιλύεται το μοντέλο να είναι 185 sec για τα δοκίμια χωρίς πυθμένα και 193 sec για τα δοκίμια με πυθμένα. Ο λόγος της επιλογής αυτών των αριθμών σχετίζεται με την ταχύτητα του εμβόλου και την διαδρομή που πρέπει να διανύσει αυτό μέχρι το σημείο που η μήτρα συγκλίνει. Έτσι έχοντας ως δεδομένο ότι τα δοκίμια έχουν ύψος 40 mm με πυθμένα και 42 mm χωρίς πυθμένα, καθώς και ότι η ταχύτητα του εμβόλου είναι σταθερή και ίση με 0,2166 mm/sec γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί:  $40 \text{ mm} / 0,2166 \text{ mm/sec} \approx 185 \text{ sec}$  και  $42 \text{ mm} / 0,2166 \text{ mm/sec} \approx 193 \text{ sec}$ . Επιπλέον γίνεται η επιλογή οι χρόνοι αυτοί να μοιραστούν σε 185 βήματα για τα δοκίμια χωρίς πυθμένα και 193 βήματα με πυθμένα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε βήμα αντιστοιχεί σε κάθε δευτερόλεπτο του χρόνου που χρειάζεται (θεωρητικά), ώστε με την συγκεκριμένη ταχύτητα του εμβόλου, να ολοκληρωθεί η διαδικασία.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω, στην επιλογή Jobs επιλέγεται το μοντέλο τριβής που θα χρησιμοποιηθεί στη ρύθμιση Contact control. Στη δική μας περίπτωση επιλέγεται τριβή διάτμησης (Shear bilinear displacement). Ο λόγος είναι ότι για την μοντελοποίηση κατεργασιών όπως η διέλαση χρησιμοποιείται τριβή διάτμησης [18],[15]. Επιπροσθέτως ενεργοποιείται η επιλογή Large strain στο μενού Analysis options ώστε να βελτιωθεί και με αυτή τη ρύθμιση η συμπεριφορά του μοντέλου. Τέλος δίνεται ότι η ανάλυση είναι διδιάστατη αξισυμμετρική επιλέγοντας στην ρύθμιση Analysis dimension, την επιλογή Axisymmetric.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται δεν έχει συγκεκριμένες μονάδες για τα μεγέθη που ορίζονται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν μονάδες σχετικές με τις μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την

εισαγωγή των δεδομένων. Σ' αυτήν την μοντελοποίηση η μονάδα μέτρησης της μάζας ήταν σε κιλά (kg), του μήκους σε μέτρα (m), του όγκου σε κυβικά μέτρα ( $m^3$ ), της δύναμης σε Νιούτον (N) και της πίεσης σε Πασκάλ ( $1Pa = 1 N/m^2$ ). Επομένως αντίστοιχες μονάδες θα έχουν και τα αποτελέσματα.



***Εικόνα 4.13: Το τελικό αποτέλεσμα των μοντελοποιήσεων δισδιάστατα ( $\alpha, \gamma$ ) και τρισδιάστατα ( $\beta, \delta$ ).***



**Κεφάλαιο 5**  
**Παρουσίαση/**  
**Σύγκριση**  
**Αποτελεσμάτων**  
**της Αριθμητικής**  
**Προσομοίωσης**

---

## 5.1 Εισαγωγή

Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα δεδομένα στο πρόγραμμα όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο τότε δίνεται η εντολή στο πρόγραμμα να ξεκινήσει την επίλυση του μοντέλου. Η διάρκεια της επίλυσης διαρκεί από τριάντα έως σαράντα λεπτά για την δισδιάστατη ανάλυση και δύομιση έως τρεις ώρες για την τρισδιάστατη. Πραγματοποιήθηκαν δε σε Η/Υ με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής: Intel Pentium IV 1,6 GHz

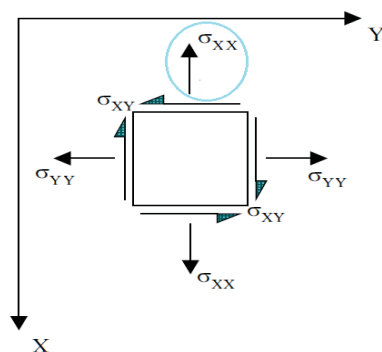
Μνήμη: 2 GB Ram

Λειτουργικό σύστημα: Windows XP Professional + SP3

Τα δεδομένα από την επίλυση του μοντέλου αποθηκεύονται σ' ένα αρχείο με κατάληξη .t16 το οποίο μετά πρέπει να ανοιχθεί από το μενού Results. Έτσι στη συνέχεια μπορεί να γίνει η αξιοποίηση των δεδομένων και να εξαχθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια. Ζητούμενο σε αυτό το σημείο είναι ο τρόπος παρουσίασης αυτών ώστε να βγουν όσο το δυνατόν περισσότερα συμπεράσματα μέσα από αυτά. Έτσι σκόπιμη κρίθηκε σε πρώτη φάση η παρουσίαση του κάθε δοκιμίου μετά την διέλαση, όταν και ολοκληρώθηκε το πείραμα. Επίσης σημαντική είναι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε δύο στιγμιότυπα. Το πρώτο στιγμιότυπο αντιστοιχεί στη στιγμή όπου το έμβολο έχει μόλις ακουμπήσει στο δοκίμιο ενώ το δεύτερο στιγμιότυπο στο τέλος όπου η κίνηση του εμβόλου έχει σταματήσει και η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί. Στη συγκεκριμένη μορφή παρουσίασης δόθηκε η εντολή Symmetry ως προς τον άξονα y για όλο το πλέγμα. Στόχος αυτού η καλύτερη οπτική παρουσίαση καθώς θα είναι εμφανές όλο το δοκίμιο. Τέλος αναγκαία είναι και η παρουσίαση, με τη μορφή διαγράμματος, της δύναμης που δέχθηκαν οι κόμβοι που ήταν σε επαφή με το έμβολο σε συνάρτηση με την διαδρομή που διένυσε αυτό. Μεγαλύτερη σημασία σε αυτό το είδος της παρουσίασης προσδίδει η δυνατότητα σύγκρισης τους με τα πειραματικά δεδομένα .

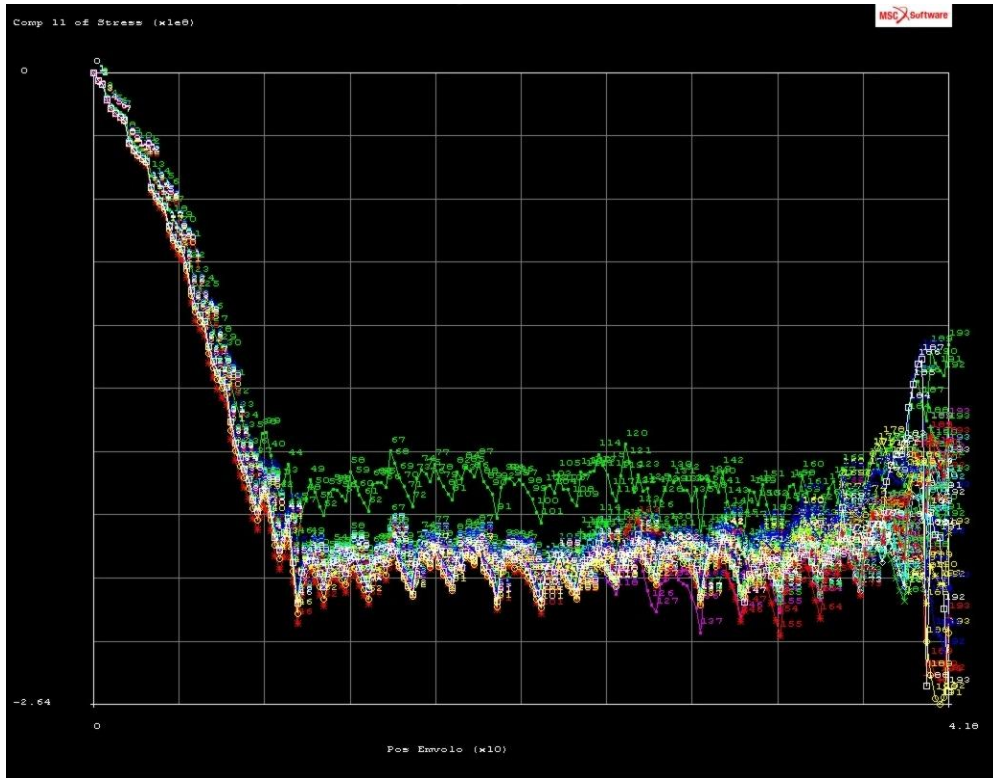
Βέβαια το πρόγραμμα μπορούσε να αναπαραγάγει διαγράμματα με την τάση και όχι τη δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο σε συνάρτηση με την διαδρομή του εμβόλου. Η τάση αυτή είναι η  $\sigma_{11}$  (ή  $\sigma_{xx}$ ) για τη δισδιάστατη ανάλυση καθώς το επίπεδο όπου έγινε η μοντελοποίηση είναι το  $xy$  και η τάση είναι ορθή στην διεύθυνση του άξονα  $x$  (Εικόνα 5.1). Μάλιστα έχει την ίδια κατεύθυνση με τον άξονα  $x$ , ως αποτέλεσμα της τάσης που ασκείται από το έμβολο και ως εκ τούτου η τιμή της θα είναι αρνητική. Με ανάλογη λογική στη τρισδιάστατη ανάλυση η ζητούμενη τάση είναι η  $\sigma_{33}$  (ή  $\sigma_{zz}$ )



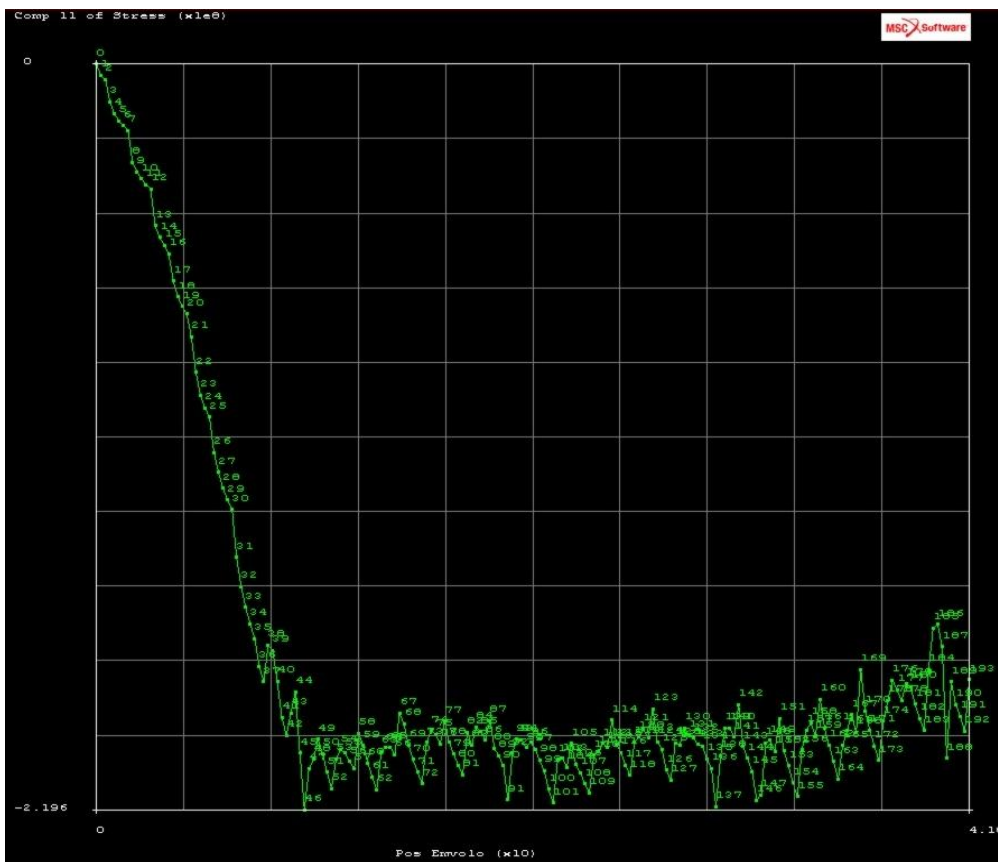
**Εικόνα 5.1: Ορθές και διατμητικές τάσεις στο επίπεδο  $xy$  [15].**

Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε για κάθε δοκίμιο ένα διάγραμμα για όλους τους ενδιαφερόμενους κόμβους (που περιγράφηκαν παραπάνω) όπου ο άξονας  $x$  παρουσιάζει τη θέση του εμβόλου (Pos Embolo) και ο άξονας  $y$  την τάση  $\sigma_{11}$  (Comp 11 of Stress) (Διάγραμμα 5.1). Για το έμβολο η θέση  $x=0$  αντιστοιχεί όταν αυτό απλώς ακουμπά το δοκίμιο. Έπειτα δημιουργήθηκε καινούριο διάγραμμα με τους ίδιους άξονες όπου στο κάθε βήμα η τάση ισούται με τη μέση τιμή των τάσεων των κόμβων (Διάγραμμα 5.2). Στη συνέχεια το διάγραμμα αυτό εξήχθη από το πρόγραμμα ως ζεύγη τιμών, πάρθηκε η απόλυτη τιμή των τάσεων και πολλαπλασιάστηκαν αυτές, σε κάθε βήμα, με το εμβαδόν του εμβόλου. Έτσι προέκυπταν τελικώς τα ζητούμενα διαγράμματα. Η δε διατομή του εμβόλου είναι κυλινδρική με διάμετρο 25 mm. Καθώς όμως τα αποτελέσματα είναι σε  $N/m^2$  (βλέπε Κεφάλαιο 3), η διάμετρος ( $d$ ) μετατρέπεται σε μέτρα ( $m$ ) και επομένως το εμβαδόν είναι:

$$E = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 0,025^2}{4} \approx 4,9 * 10^{-4} m$$



Διάγραμμα 5.1: Τάση – μετατόπιση εμβόλου για όλους τους ενδιαφερόμενους κόμβους.



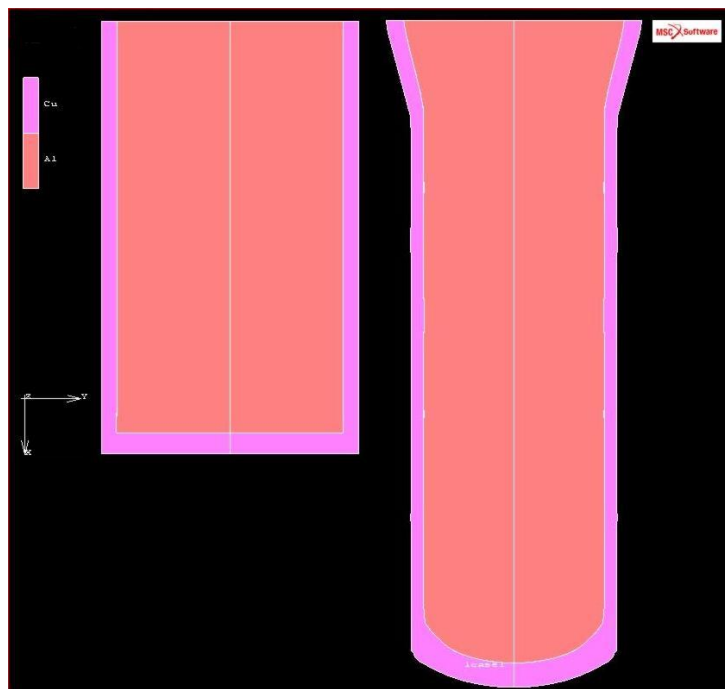
Διάγραμμα 5.2: Μέση τιμή τάσεων – μετατόπισης εμβόλου.

## 5.2 Αποτελέσματα δισδιάστατης μοντελοποίησης

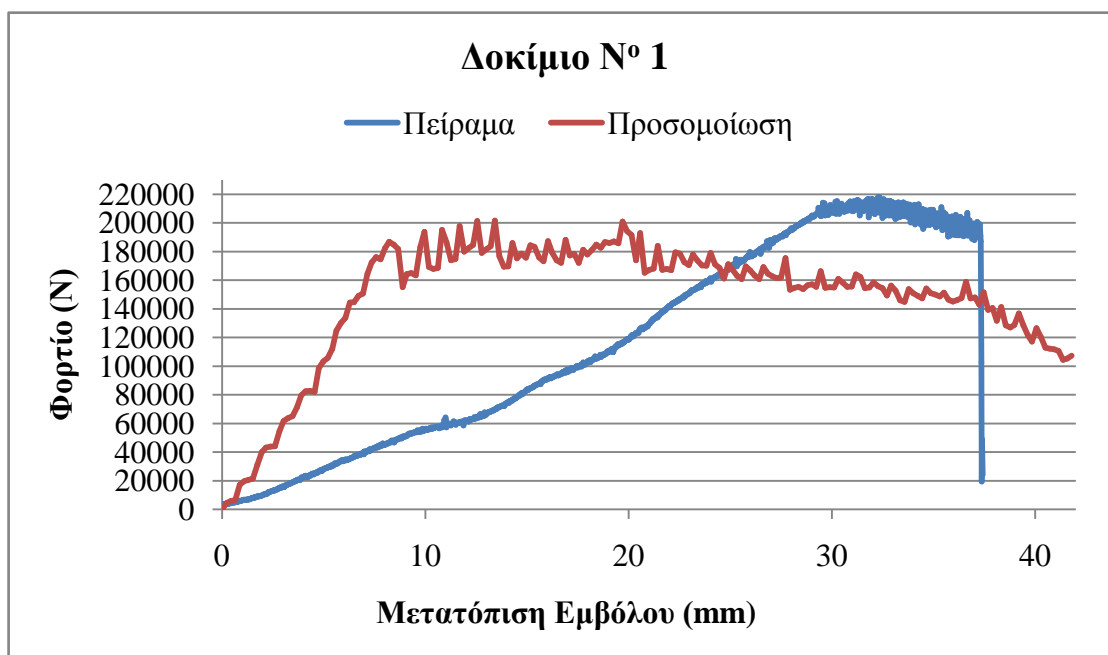
### 5.2.1 Δοκίμιο N° 1



*Εικόνα 5.2: Δοκίμιο N° 1 μετά τη διέλαση.*



*Εικόνα 5.3: Προσομοίωση διέλασης Δοκιμίου N° 1 τη στιγμή  $t=0$  sec (αριστερά) και  $t=193$  sec (δεξιά).*



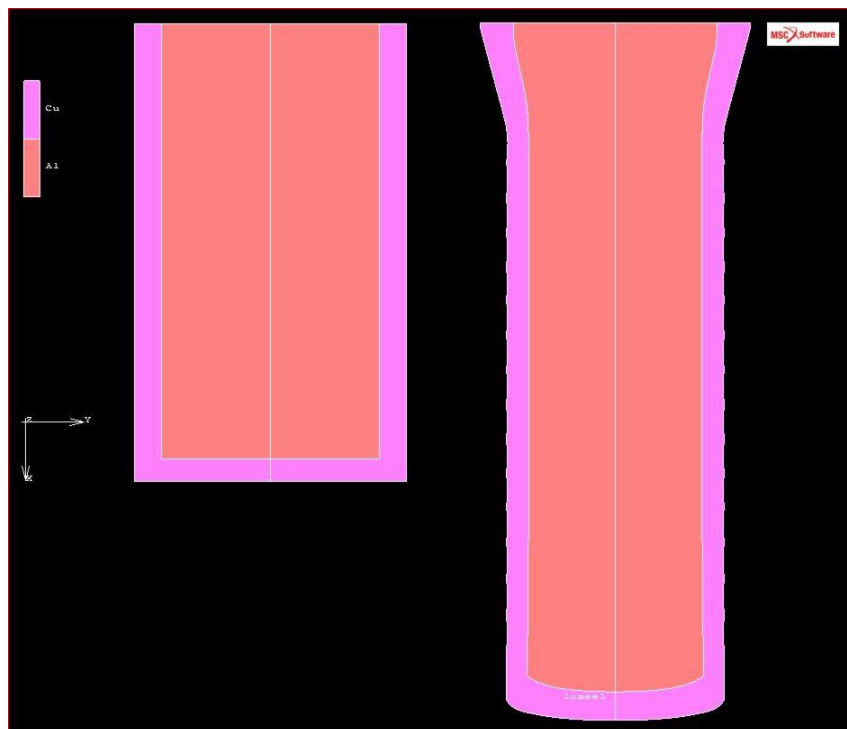
Διάγραμμα 5.3: Ασκούμενο Φορτίο για το Δοκίμιο Νο 1.

Συγκρίνοντας την Εικόνα 5.2 και το στιγμιότυπο  $t=193$  sec της Εικόνας 5.3 βλέπουμε την ομοιότητα που παρουσιάζουν και τα δύο στην περιοχή του πυθμένα αφού και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζει μια παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στο ότι το αλουμίνιο επιμηκύνθηκε λόγω της διέλασης και άσκησε αρκετή πίεση στον πυθμένα ώστε να δημιουργηθεί αυτό το χαρακτηριστικό εξόγκωμα που φαίνεται. Όσον αφορά το διάγραμμα που προέκυψε σύμφωνα με την μοντελοποίηση το μέγιστο φορτίο (~ 200 kN) ασκείται όταν το έμβολο κινείται ανάμεσα στις θέσεις  $x=10$  mm και  $x=20$  mm. Στο πείραμα το φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια είναι συνεχώς αυξανόμενο με μικρό ρυθμό. Όταν το έμβολο φτάσει στη θέση  $x=30$  mm το φορτίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του, έπειτα μέχρι την θέση  $x=37$  mm βαίνει μειούμενο με μικρό όμως πάλι ρυθμό όπου και το πείραμα τελειώνει. Αν και οι μορφές των δύο διαγραμμάτων δεν ταιριάζουν, το μέγιστο φορτίο που καταγράφεται στη προσομοίωση είναι αρκετά κοντά σε αυτό του πειράματος έχοντας σφάλμα της τάξης του 5%.

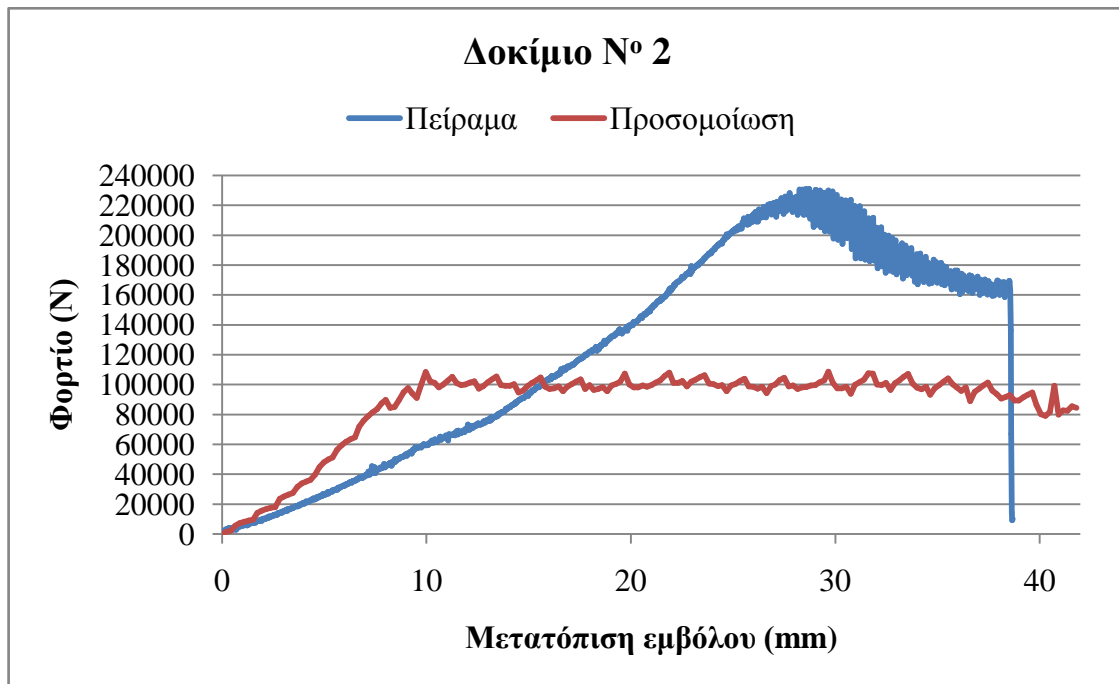
### 5.2.2 Δοκίμιο N° 2



*Εικόνα 5.4: Δοκίμιο N° 2 μετά τη διάλυση.*



*Εικόνα 5.5: Προσομοίωση διάλυσης Δοκιμίου N° 2 τη στιγμή  $t=0$  sec (αριστερά) και  $t=193$  sec (δεξιά).*



Διάγραμμα 5.4: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Νο 2.

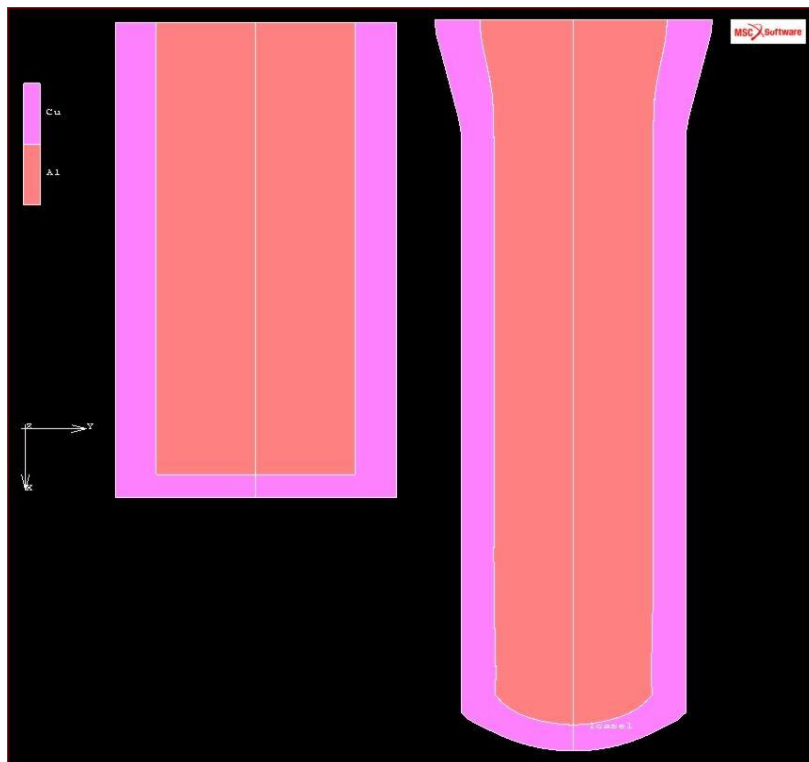
Για το δοκίμιο Νο 2 το στιγμιότυπο  $t=193$  sec της Εικόνας 5.5 και εδώ παρουσιάζει ομοιότητες με την Εικόνα 5.4. Ωστόσο φαίνεται πως το εξόγκωμα που δημιουργείται στην προσομοίωση, στην περιοχή του πυθμένα, δεν είναι τόσο έντονο όσο στο πείραμα. Στο Διάγραμμα 5.4 φαίνεται καθαρά πως υπάρχει απόκλιση μεταξύ της προσομοίωσης και του πειράματος. Στην προσομοίωση το φορτίο αυξάνεται με μικρό ρυθμό από την αρχή και όταν το έμβολο φτάσει στη θέση  $x=10$  mm το φορτίο φτάνει στη μέγιστη τιμή του μέχρι το πέρας της διαδικασίας. Η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι περίπου στα 107 kN. Στο πείραμα το φορτίο και εκεί αυξάνεται με μικρό και σταθερό ρυθμό. Αυτό όμως συνεχίζεται όταν το έμβολο βρίσκεται και στη θέση  $x=29$  mm όπου και καταγράφεται το μέγιστο φορτίο (~220 kN). Το σφάλμα λοιπόν όσον αφορά τα μέγιστα φορτία είναι της τάξης του 51,3% και είναι ιδιαίτερα υψηλό



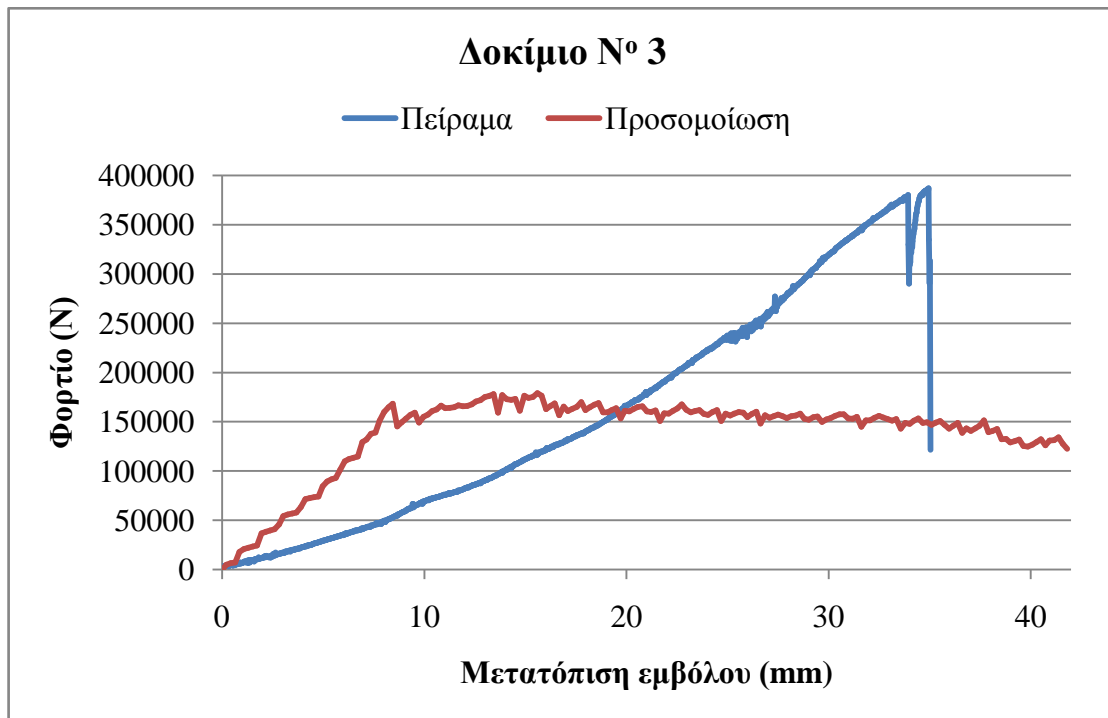
### 5.2.3 Δοκίμιο N° 3



Εικόνα 5.6: Δοκίμιο N° 3 μετά την διάλυση.



Εικόνα 5.7: Προσομοίωση διάλυσης Δοκίμιου N° 3 τη στιγμή  $t=0$  sec(αριστερά) και  $t=193$  sec(δεξιά).



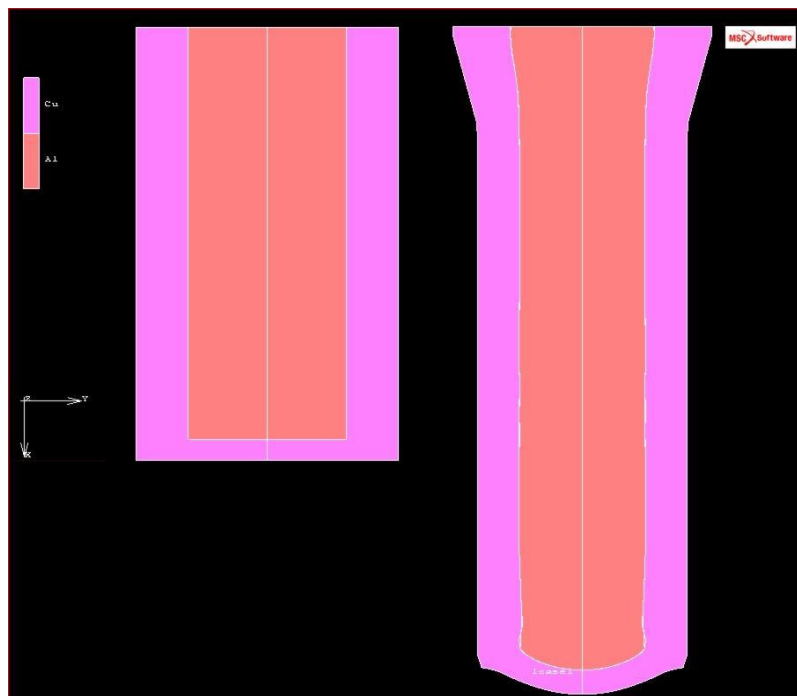
Διάγραμμα 5.5: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Ν° 3.

Για το Δοκίμιο Ν° 3 η εικόνα που παρουσιάζει μετά την διέλαση (Εικόνα 5.6) παρουσιάζει ενδιαφέρον στο άνω τμήμα του (κεφαλή). Παρατηρείται πως υλικό χαλκού, λεπτού πάχους, εξέρχει προς τα άνω όπου και το δοκίμιο ερχόταν σε επαφή με το έμβολο. Πιθανή αιτία είναι η διαφυγή χαλκού στο διάκενο που υπάρχει ανάμεσα στη μήτρα και το έμβολο. Στην Εικόνα 5.7 και για το στιγμιότυπο  $t=193$  sec το μοντελοποιημένο δοκίμιο έχει παραμορφωμένο πυθμένα όπως το Δοκίμιο Ν° 3 αν και στη δεύτερη περίπτωση η παραμόρφωση είναι πολύ πιο έντονη στο κέντρο. Στο δε Διάγραμμα 5.5 το μέγιστο φορτίο στη προσομοίωση (~178 kN) παρουσιάζει και εδώ έντονη απόκλιση από το πειραματικό όπου είναι 375 kN. Το σφάλμα είναι 52.5% και είναι ιδιαίτερα υψηλό. Αυτή η μεγάλη απόκλιση στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να σχετίζεται με την εικόνα του δοκιμίου μετά την διέλαση. Η διαφυγή χαλκού που πιθανώς να συνέβη είχε ως συνέπεια την ανάπτυξη μεγάλων τριβών και συνεπώς μεγάλων δυνάμεων. Ενίσχυση αυτού του σεναρίου αποτελεί πως το διάγραμμα που προέκυψε από το πείραμα είναι συνεχώς αυξανόμενο σε αντίθεση με τα προηγούμενα.

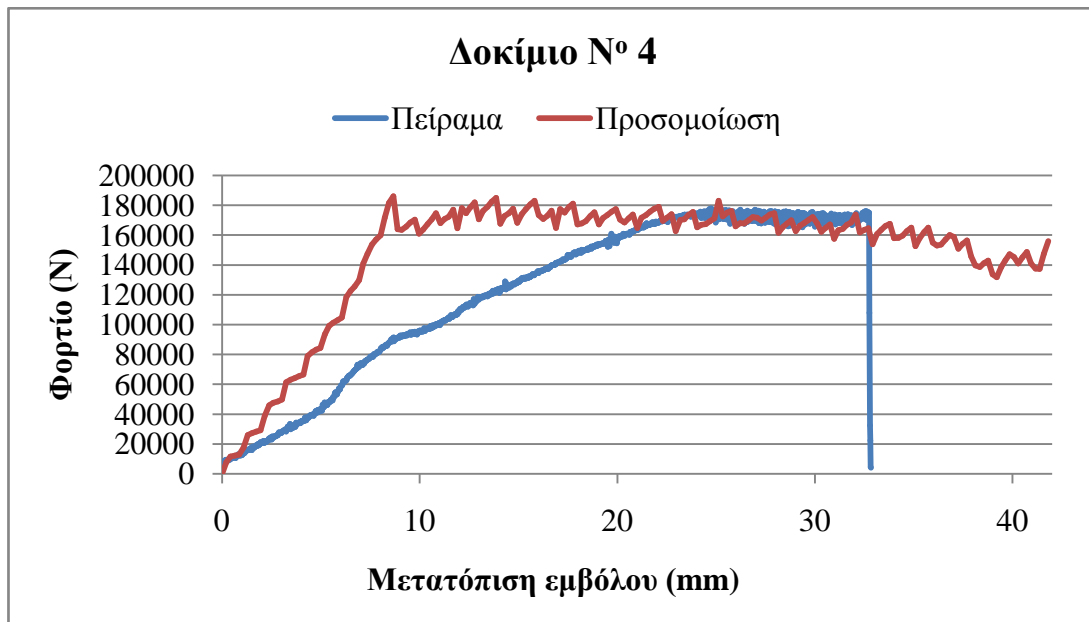
### 5.2.4 Δοκίμιο N<sup>ο</sup> 4



Εικόνα 5.8: Δοκίμιο N<sup>ο</sup> 4 μετά την διέλαση.



Εικόνα 5.9: Προσομοίωση διέλασης Δοκιμίου N<sup>ο</sup> 4 τη στιγμή  $t=0$  sec (αριστερά) και  $t=193$  sec (δεξιά).



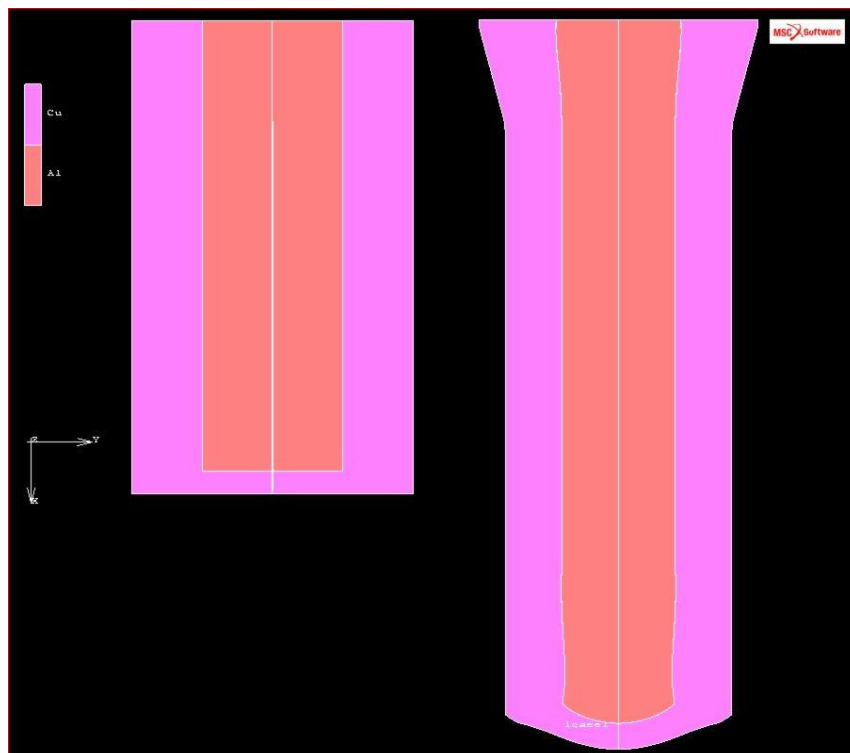
*Διάγραμμα 5.6: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Νο 4*

Το στιγμιότυπο  $t=193$  sec της Εικόνας 5.9 και εδώ παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με το δοκίμιο Νο 4 (Εικόνα 5.8) μετά την διέλαση. Στο δε Διάγραμμα 5.6 παρατηρείται ότι η κλίση της καμπύλης πειράματος και προσομοίωσης διαφέρει όταν το έμβολο κινείται ανάμεσα στις θέσεις  $x=0$  mm και  $x=20$  mm. Στη συνέχεια όμως παρουσιάζεται μεγάλη σύγκλιση η οποία και διατηρείται μέχρι το τέλος. Το σφάλμα που προκύπτει ως προς τα μέγιστα φορτία, 185 kN για την προσομοίωση και 175 kN για το πείραμα, είναι 5,8%.

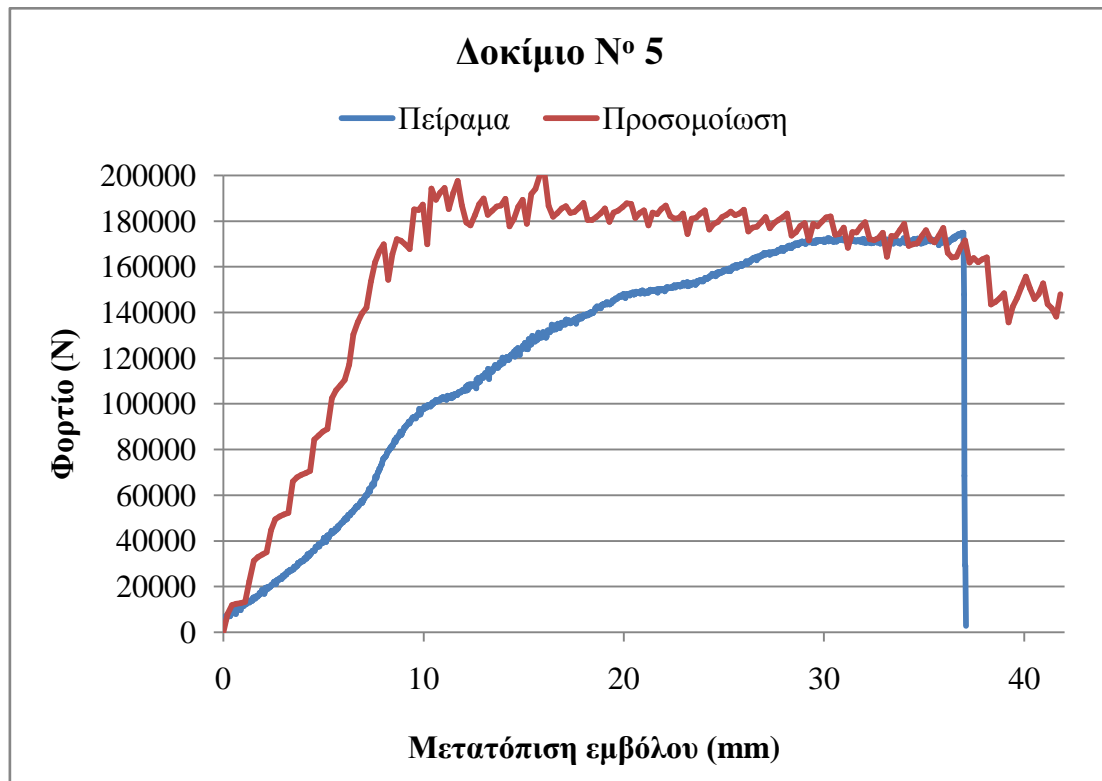
### 5.2.5 Δοκίμιο N° 5



Εικόνα 5.10: Δοκίμιο N° 5 μετά την διέλαση.



Εικόνα 5.11: Προσομοίωση διέλασης Δοκίμιου N° 5 τη στιγμή  $t=0 \text{ sec}$  (αριστερά) και  $t=193 \text{ sec}$  (δεξιά).



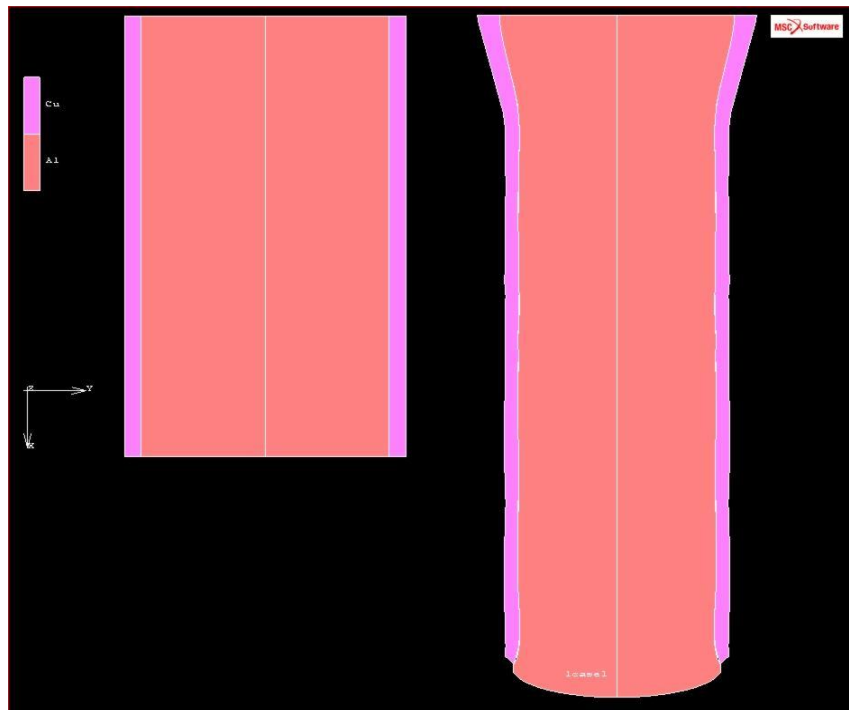
Διάγραμμα 5.7: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Νο 5.

Στην Εικόνα 5.11 ομοιότητες παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και του δοκιμίου μετά την κατεργασία της διέλασης (Εικόνα 5.10). Στο Διάγραμμα 5.7 τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ανάλυσης και εκεί είναι ικανοποιητικά. Το μέγιστο φορτίο που σημειώνεται είναι 200 kN έχοντας σφάλμα 13% σε σχέση με αυτό του πειράματος (176 kN). Βέβαια όταν το έμβολο βρίσκεται ανάμεσα στις θέσεις  $x=30$  mm και  $x=35$  mm τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ανάλυσης και του πειράματος ουσιαστικά ταυτίζονται.

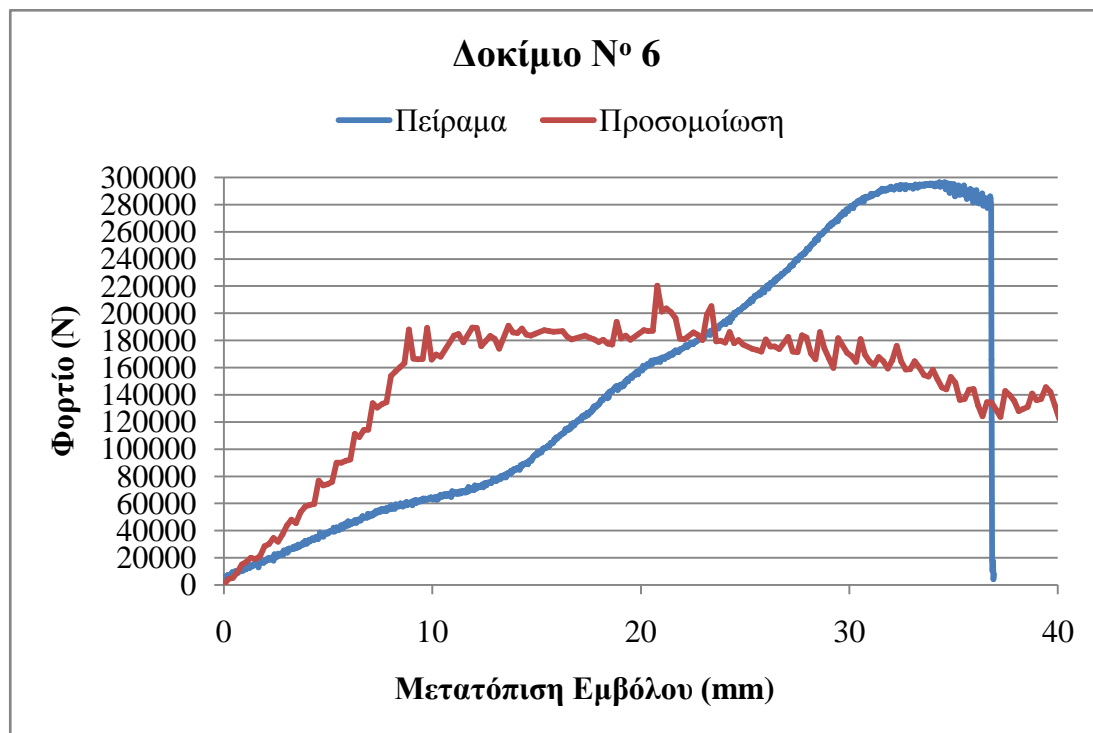
### 5.2.6 Δοκίμιο N° 6



*Εικόνα 5.12: Δοκίμιο N° 6 μετά την διάλυση.*



*Εικόνα 5.13: Προσομοίωση διάλυσης Δοκίμιου N° 6 τη στιγμή  $t=0 \text{ sec}$  (αριστερά) και  $t=185 \text{ sec}$  (δεξιά).*



*Διάγραμμα 5.8: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Νο 6.*

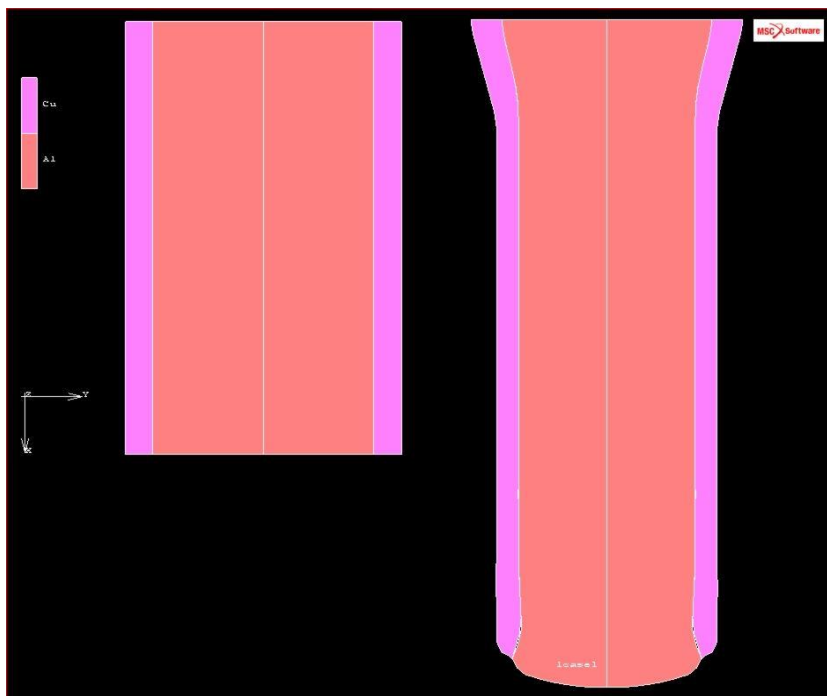
Για το Δοκίμιο Νο 6 άξιο παρατήρησης είναι η περιοχή της κεφαλής στην Εικόνα 5.12. Υλικό χαλκού προεξέχει προς τα πάνω κάτι που δεν ήταν αναμενόμενο. Αιτία αυτού είναι η εισχώρηση χαλκού στο διάκενο που υπάρχει ανάμεσα στη μήτρα και το έμβολο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγάλη αύξηση δυνάμεων τριβής που για να της υπερβεί το έμβολο ασκεί πολύ μεγαλύτερη δύναμη από την αναμενόμενη. Ενίσχυση αυτού του σεναρίου αποτελεί και το γεγονός πως η καμπύλη φορτίου κατά το πείραμα είναι συνεχώς αυξανόμενη. Αναφορά πρέπει επίσης να γίνει στο ότι κατά την προσομοίωση το αλουμίνιο έχει δημιουργήσει προεξοχή στο πυθμένα (Εικόνα 5.13). Στο Διάγραμμα 5.8 που αφορά το ίδιο δοκίμιο το μεγαλύτερο φορτίο κατά την προσομοίωση είναι 220 kN ενώ του πειράματος 290 kN. Το σφάλμα λοιπόν ως προς τα μέγιστα φορτία είναι 24,1%. Γενικά όπως φαίνεται δεν υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτά του πειράματος κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις προηγούμενες παρατηρήσεις.



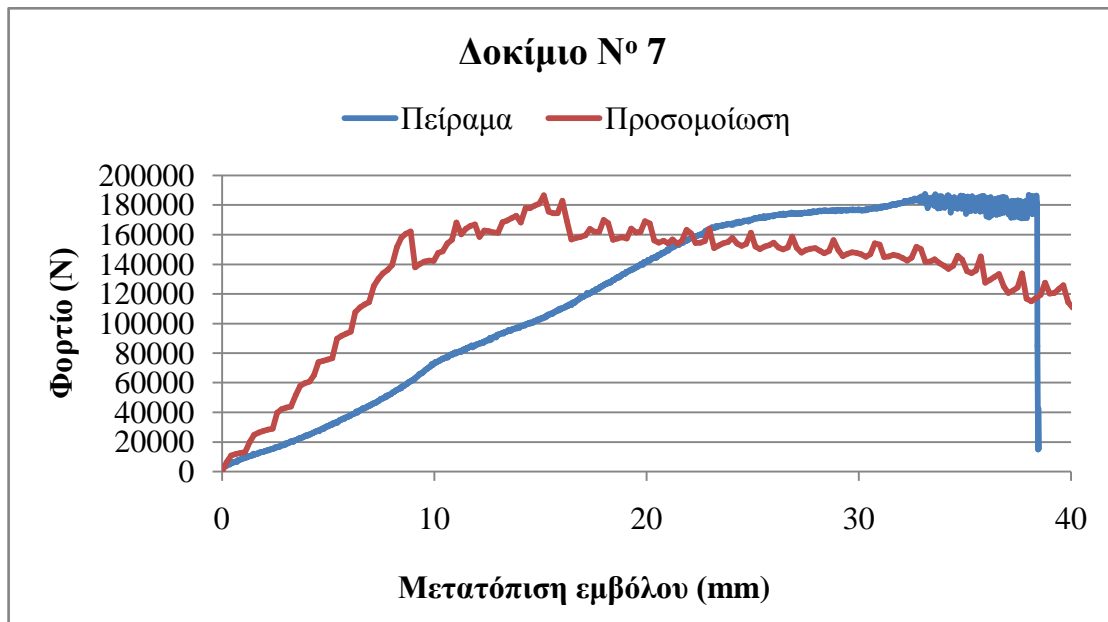
### 5.2.7 Δοκίμιο N° 7



*Εικόνα 5.14: Δοκίμιο N° 7 μετά την διέλαση.*



*Εικόνα 5.15: Προσομοίωση διέλασης Δοκιμίου N° 7 τη στιγμή  $t=0 \text{ sec}$  (αριστερά) και  $t=185 \text{ sec}$  (δεξιά).*



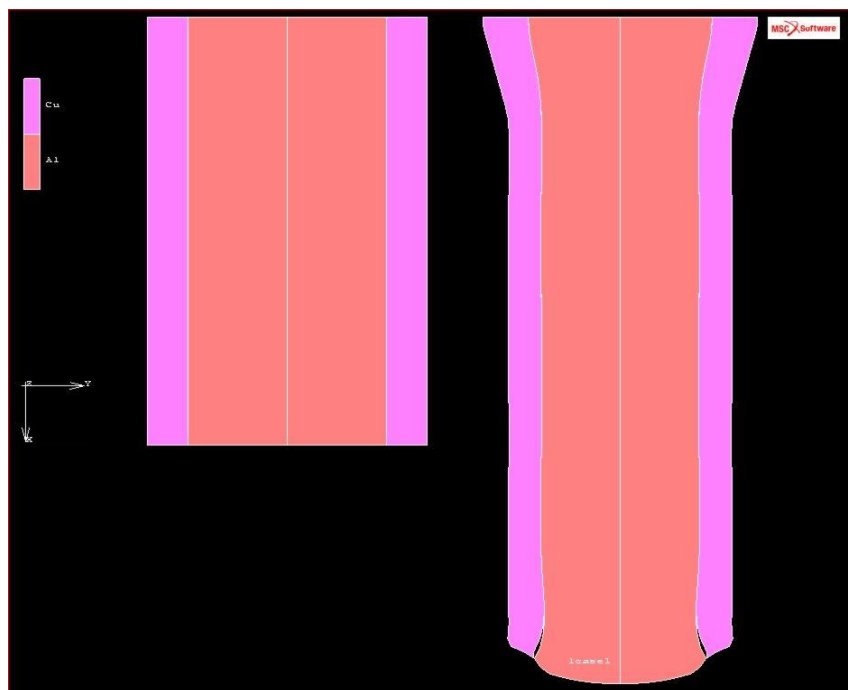
Διάγραμμα 5.9: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο N° 7.

Και για το Δοκίμιο N° 7 συγκρίνοντας τις Εικόνες 5.14 και 5.15 τη στιγμή  $t=193$  sec παρατηρούμε πως το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά σε σχέση με αυτό της πραγματικότητας. Επιπλέον στοιχείο για αυτή τη παρατήρηση είναι η περιοχή του πυθμένα όπου και στις δύο περιπτώσεις το αλουμίνιο έχει παρουσιάσει εξόγκωμα. Όσον αφορά το Διάγραμμα 5.9, ταύτιση ουσιαστικά προκύπτει ως προς τα μέγιστα φορτία όπου στη προσομοίωση είναι 186 kN και στο πείραμα 185 kN. Βέβαια κατά την προσομοίωση το μέγιστο φορτίο σημειώνεται όταν το έμβολο βρίσκεται στη θέση  $x=17$  mm ενώ στο πείραμα στη θέση  $x=38$  mm.

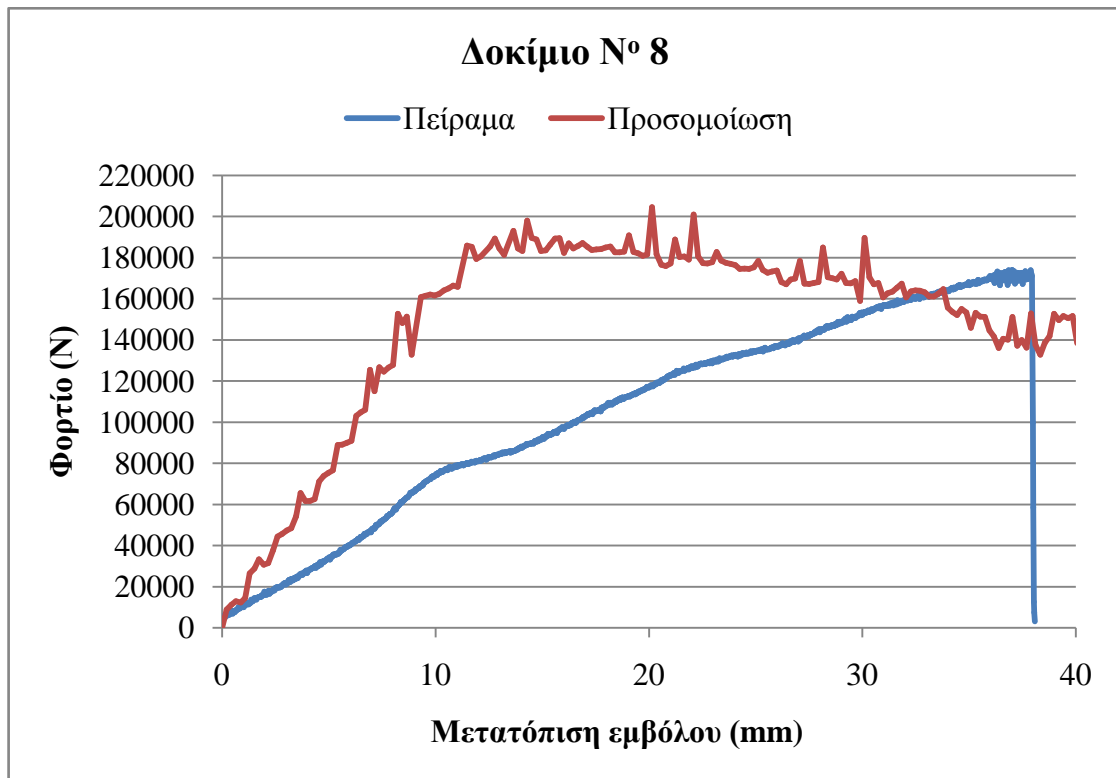
### 5.2.8 Δοκίμιο N° 8



*Εικόνα 5.16: Δοκίμιο N° 8 μετά την διέλαση.*



*Εικόνα 5.17: Προσομοίωση διέλασης Δοκίμιου N° 8 τη στιγμή  $t=0$  sec (αριστερά) και  $t=185$  sec (δεξιά).*



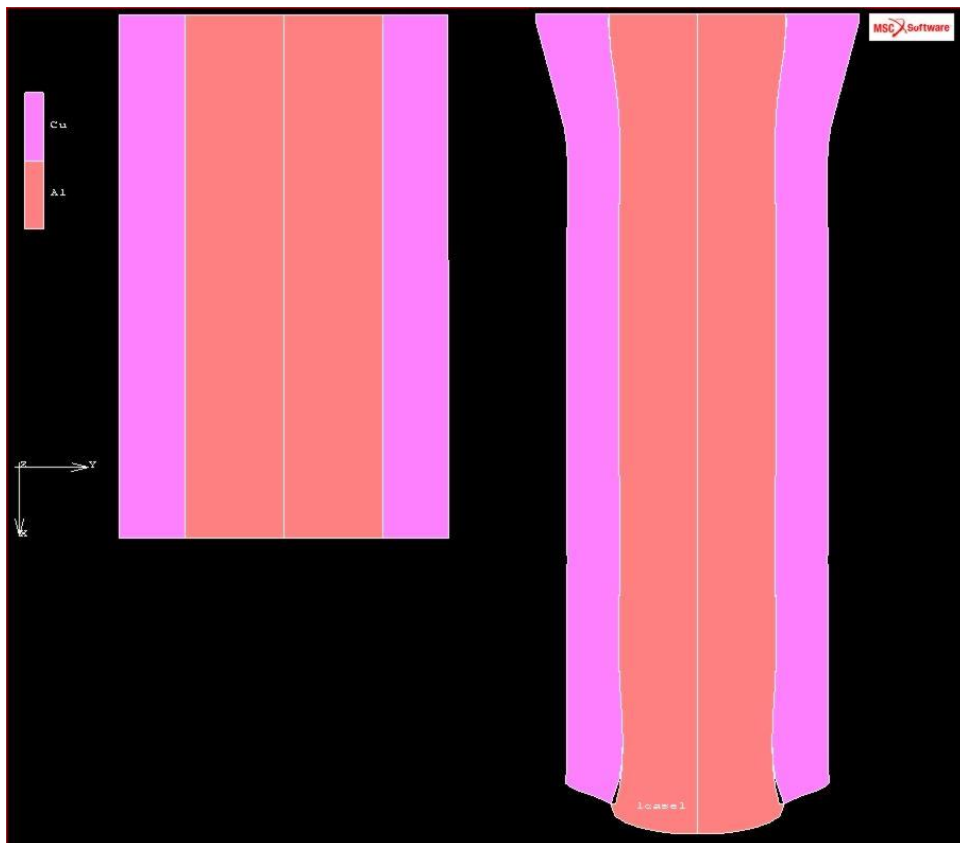
Διάγραμμα 5.10: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Ν° 8.

Στις Εικόνες 5.16 και 5.17 τη στιγμή  $t=193$  sec παρατηρούμε και σε αυτήν τη περίπτωση ομοιότητες τόσο στο τελικό σχήμα του δοκιμίου όσο και στον πυθμένα όπου το αλουμίνιο δημιούργησε προεξοχή. Σημαντική παρατήρηση όμως αποτελεί ότι στην προσομοίωση παρατηρείται αποκόλληση των δύο υλικών στη περιοχή του πυθμένα. Στο Διάγραμμα 5.10 το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε κατά την προσομοίωση ήταν της τάξεως των 200 kN ενώ της προσομοίωσης 175 kN. Το σφάλμα λοιπόν ως προς τα μέγιστα φορτία είναι 12,5%. Αξίζει να αναφερθεί πως στη καμπύλη προσομοίωσης και όταν το έμβολο βρίσκεται στις θέσεις  $x=20$  mm και  $x=30$  mm, παρουσιάζονται κάποιες τιμές με μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Πιθανή εξήγηση αυτού είναι πως κατά την προσομοίωση σε κάποια σημεία δεν σημειώνεται η επιθυμητή σύγκλιση. Σε αυτή τη περίπτωση το πρόγραμμα πηγαίνει ξανά στο προηγούμενο βήμα όπου είχε γίνει σύγκλιση και προσπαθεί ξανά εκ νέου, κάτι που στο πρόγραμμα αναφέρεται ως cut-back. Σε μια τέτοια περίπτωση είναι πιθανόν η τιμή όπου τελικά θα δοθεί ως λύση να διαφέρει με τις υπόλοιπες.

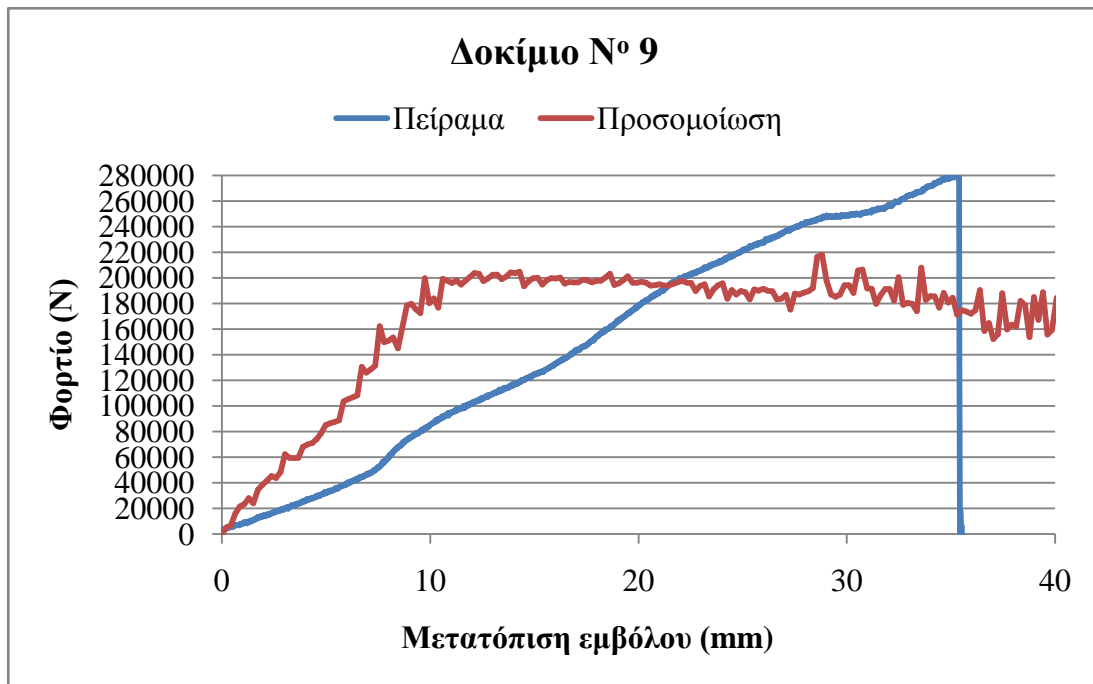
### 5.2.9 Δοκίμιο N° 9



*Εικόνα 5.18 : Δοκίμιο N° 9 μετά την διέλαση.*



*Εικόνα 5.19: Προσομοίωση διέλασης Δοκιμίου N° 9 τη στιγμή  $t=0$  sec (αριστερά) και  $t=185$  sec (δεξιά).*



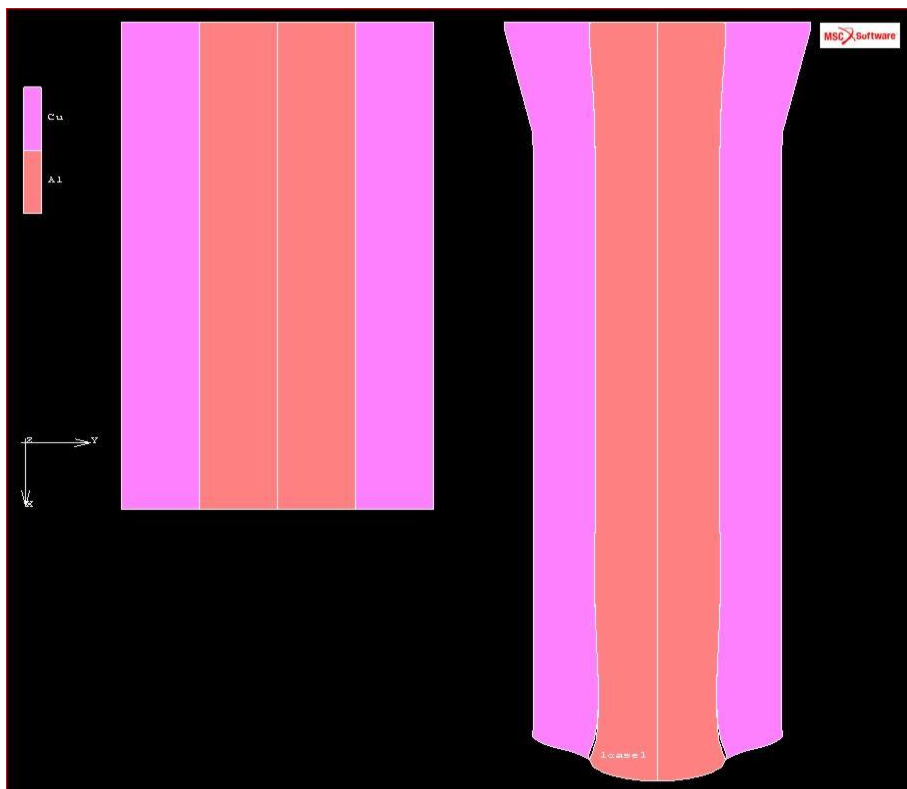
*Διάγραμμα 5.11: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο Νο 9.*

Για το Δοκίμιο Νο 9 και την Εικόνα 5.18 παρατηρούμε πως λεπτό υλικό από χαλκό έχει ανυψωθεί περιμετρικά του δοκιμίου. Πιθανώς είναι ο χαλκός που εισχώρησε στο κενό ανάμεσα στη μήτρα και το έμβολο, όπως συνέβη και σε προηγούμενες περιπτώσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάπτυξη μεγάλων δυνάμεων κατά το πείραμα. Για την Εικόνα 5.19 που αφορά την προσομοίωση φαίνεται πως εδώ το αλουμίνιο έχει δημιουργήσει προεξοχή στη περιοχή του πυθμένα. Επίσης αποκόλληση έχει σημειωθεί, στην ίδια περιοχή, μεταξύ των δύο υλικών. Το Διάγραμμα 5.11 δείχνει πως το φορτίο που σημειώθηκε κατά το πείραμα είναι υψηλό καθώς επίσης είναι συνεχώς αυξανόμενο, κάτι που ενισχύει την υπόθεση που έγινε παραπάνω. Το μέγιστο φορτίο που σημειώθηκε είναι 280 kN ενώ στην προσομοίωση 220 kN οπότε το σφάλμα μεταξύ τους είναι 21,4%. Και εδώ φαίνεται πως στη περίπτωση της προσομοίωσης υπάρχουν τιμές πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις γειτονικές, γεγονός που αποδίδεται στο cut-back του προγράμματος (βλέπε Δοκίμιο Νο 9).

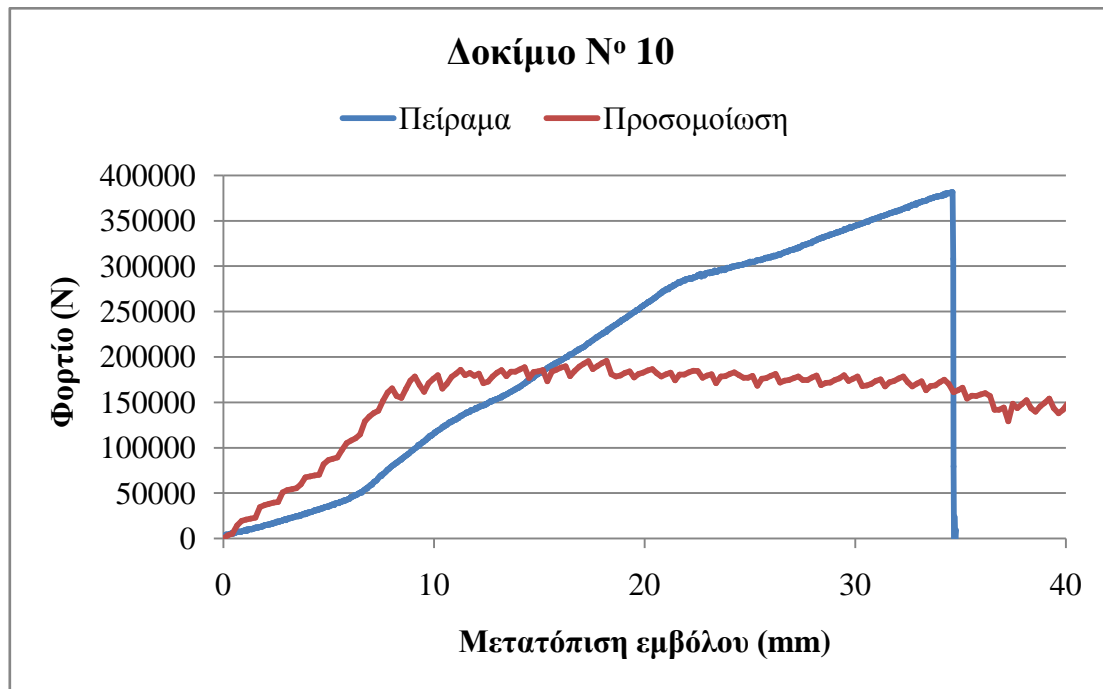
### 5.2.10 Δοκίμιο N° 10



*Εικόνα 5.20: Δοκίμιο N° 9 μετά την διέλαση.*



*Εικόνα 5.21: Προσομοίωση διέλασης Δοκιμίου N° 10 τη στιγμή  $t=0$  sec(αριστερά) και  $t=185$  sec(δεξιά).*



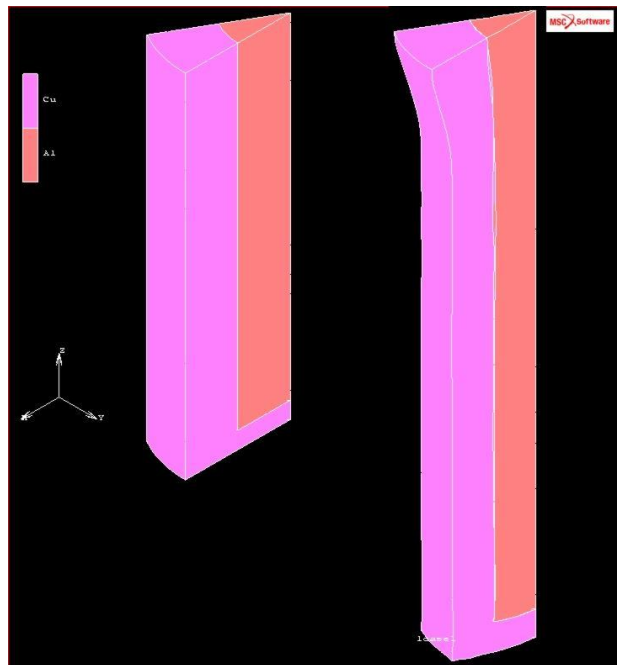
Διάγραμμα 5.12: Ασκούμενο φορτίο για το Δοκίμιο N° 10.

Τέλος για την Εικόνα 5.20 και το Δοκίμιο N° 10 είναι φανερό πως η περιοχή της κεφαλής είναι έντονα παραμορφωμένη. Υλικό από χαλκό έχει ανυψωθεί περιμετρικά της κεφαλής, όπως σε προηγούμενες περιπτώσεις, στοιχείο που φανερώνει πως το φορτίο που καταγράφηκε στο πείραμα θα είναι ιδιαίτερα υψηλό. Επίσης φαίνεται πως στη περιοχή του πυθμένα έχει δημιουργηθεί εξόγκωμα από το αλουμίνιο. Στην Εικόνα 5.21 το δοκίμιο παρουσιάζει και αυτό προεξοχή στον πυθμένα από υλικό αλουμινίου ενώ στην ίδια περιοχή έχει σημειωθεί αποκόλληση των δύο υλικών. Στο δε Διάγραμμα 5.12 είναι προφανές πως όντως το φορτίο που καταγράφηκε στο πείραμα είναι συνεχώς αυξανόμενο και ιδιαίτερα υψηλό (380 kN). Στη καμπύλη φορτίου που καταγράφηκε κατά την προσομοίωση έχουμε μέγιστο φορτίο 195 kN, οπότε το σφάλμα που σημειώθηκε ως προς τα μέγιστα φορτία είναι 48,6%.

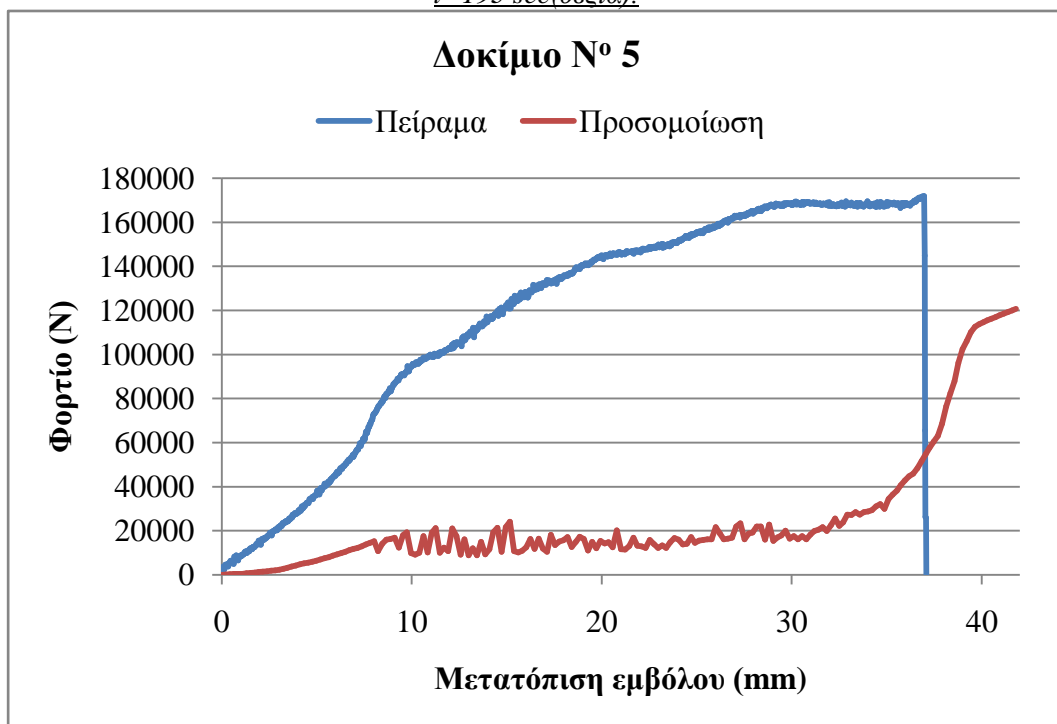


### 5.3 Αποτελέσματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης

#### 5.3.1 Δοκίμιο Ν<sup>ο</sup> 5

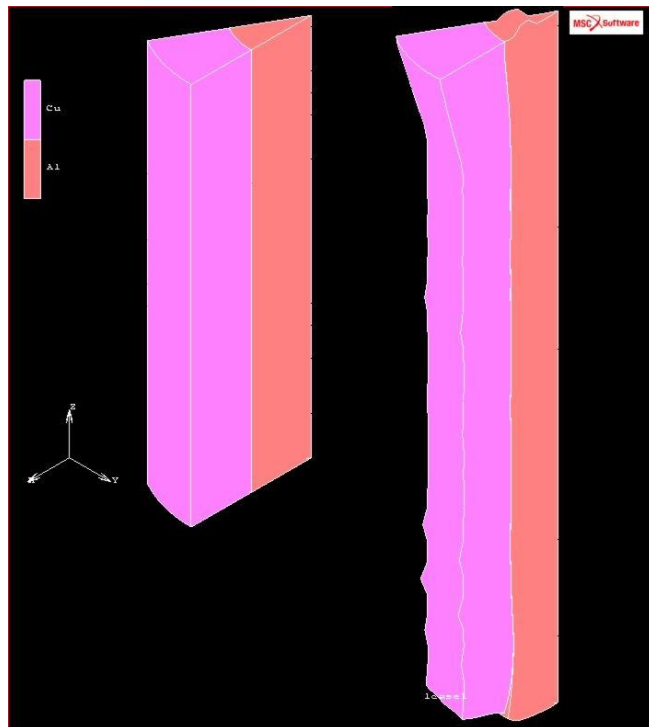


*Εικόνα 5.22: Προσομοίωση διάελασης Δοκίμιου Ν<sup>ο</sup> 5 τη στιγμή  $t=0$  sec(αριστερά) και  $t=193$  sec(δεξιά).*

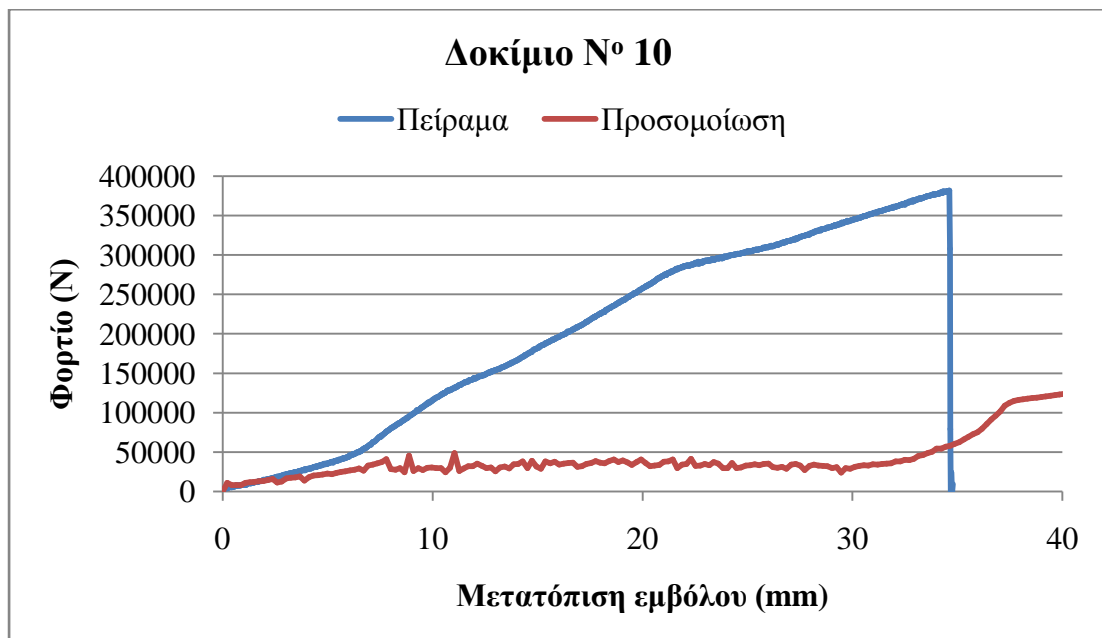


*Διάγραμμα 5.13: Ασκούμενο φορτίο στο Δοκίμιο Ν<sup>ο</sup> 5.*

### 5.3.2 Δοκίμιο N° 10



*Εικόνα 5.23: Προσομοίωση διέλασης Δοκίμιου N° 10 τη στιγμή  $t=0$  sec(αριστερά) και  $t=193$  sec(δεξιά)*



*Διάγραμμα 5.14: Ασκούμενο φορτίο στο Δοκίμιο N° 10.*

Όπως φαίνεται στην προσπάθεια που έγινε για τρισδιάστατη μοντελοποίηση και προσομοίωση διέλασης δύο δοκιμίων, τα αποτελέσματα δεν είναι το ίδιο καλά. Για το Δοκίμιο N<sup>ο</sup> 5 τα αποτελέσματα προσομοίωσης της παραμόρφωσης του είναι ικανοποιητικά αφού φέρουν πολλές ομοιότητες με αυτά της δισδιάστατης μοντελοποίησης. Ωστόσο στο Διάγραμμα 5.13 είναι πασιφανές πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν έχουν καμία σχέση με αυτά του πειράματος. Ανάλογα είναι και τα σχόλια για το Δοκίμιο N<sup>ο</sup> 10. Στην Εικόνα 5.23 φαίνεται πως η προσομοίωση της παραμόρφωσης του δοκιμίου είναι αρκετά ικανοποιητική. Βέβαια παρουσιάζονται κάποια σημεία όπου τα δύο υλικά έχουν κάποιες εξοχές που δεν συνάδουν με την γενικότερη εικόνα του δοκιμίου. Πρόκειται για συγκεκριμένους κόμβους του πλέγματος που για κάποιο λόγο δεν υπάκουσαν στους περιορισμούς που ετέθησαν. Όμως, όπως και στο Δοκίμιο N<sup>ο</sup> 5, έτσι και εδώ το διάγραμμα που προέκυψε (Διάγραμμα 5.14) δεν φέρει σε κανένα σημείο ομοιότητες με τα αποτελέσματα του πειράματος.

# **Κεφάλαιο 6**

## **Συμπεράσματα- Συζήτηση**

---

## 6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα και τις μοντελοποιήσεις και έγινε σύγκριση μεταξύ αυτών. Έτσι στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τα αποτελέσματα και επικεντρώνονται κυρίως στην αριθμητική προσομοίωση που έγινε. Επίσης δίνεται το πεδίο να γίνουν σχόλια όσον αφορά τη μοντελοποίηση που έγινε, κατά πόσο αυτή προσεγγίζει την πραγματικότητα καθώς και να γίνουν προτάσεις για βελτιώσεις.

## 6.2 Συμπεράσματα – σχόλια

- Μέσα από την μελέτη και διερεύνηση της μοντελοποίησης, προέκυψε πως ο ορισμός των χαρακτηριστικών επαφής μεταξύ των δύο υλικών αλλά και του διμεταλλικού δοκιμίου με την μήτρα, είναι κεφαλαιώδους σημασίας για τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.
- Τα δύο υλικά, όταν το δοκίμιο δεν έχει πυθμένα, ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο κατά την αξονική διεύθυνση του κυλίνδρου καθ' όλη τη διάρκεια της διέλασης.
- Ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στο δοκίμιο και τη μήτρα ορίστηκε 0,5 και ανάμεσα στα δύο υλικά 0,7. Ωστόσο ο πρώτος θεωρείται ιδιαίτερα υψηλός σε σχέση με την πραγματικότητα καθώς στο πείραμα ο συντελεστής τριβής ήταν θεωρητικά κατά πολύ μικρότερος (βλέπε Κεφάλαιο 2) . Όμως προέκυψε με αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή πραγματοποιώντας συνεχείς δοκιμές με διαφορετικούς συντελεστές τριβής, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσέγγισαν ικανοποιητικά αυτά του πειράματος (reverse engineering). Άλλωστε και σε κάποια επιστημονικά άρθρα [10],[13] ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στη μήτρα και το δοκίμιο ήταν 0,2 ή 0,3 και ανάμεσα στα δύο μέταλλα 0,7 , τιμές πολύ κοντά με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν.
- Μεταβολή του συντελεστή τριβής τόσο ανάμεσα στα δύο υλικά όσο και ανάμεσα στο δοκίμιο και τη μήτρα, επιφέρει μεγάλες μεταβολές στα αποτελέσματα του φορτίου που δέχεται το δοκίμιο από το έμβολο.
- Σημαντικός επίσης παράγοντας για τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης είναι κατά πόσο οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που εισάγονται, προσεγγίζουν την πραγματικότητα.

- Μεγαλύτερη έρευνα χρειάζεται στο τι τιμές πρέπει να οριστούν στα όρια αντοχής του δοκιμίου σε ορθές και διατμητικές τάσεις, που αφορά το κριτήριο αποκόλλησης.
- Ένα μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρει η αριθμητική προσομοίωση είναι πως γίνεται υπολογισμός όχι μόνο ενός αλλά πολλών παράγωγων μεγεθών (π.χ ορθές, διατμητικές τάσεις κ.α.)
- Η αριθμητική προσομοίωση της διέλασης «ρίχνει φως» στα ενδιάμεσα στάδια, στις τάσεις που αναπτύσσονται εκεί καθώς και την συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Είναι κάτι που μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο καθώς στο πείραμα εικόνα υπάρχει μόνο μετά το τέλος της διέλασης.
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έστω και αν παρουσιάζουν αποκλίσεις από αυτά του πειράματος, κατατοπίζουν στην τάξη μεγέθους των δυνάμεων που αναπτύσσονται κάτι που είναι σημαντικό.

### **6.3 Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης**

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε με τρεις τρόπους. Αρχικά έγινε οπτική σύγκριση των δοκιμίων μετά τη διέλαση σε σχέση με την τελική παραμόρφωση του πλέγματος. Βέβαια δεν υπήρχε η δυνατότητα παρακολούθησης των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της διέλασης παρά μόνο στο τέλος. Με βάση αυτό το κριτήριο οι εικόνες των δοκιμίων του πειράματος και της αριθμητικής προσομοίωσης φέρουν πολλές ομοιότητες και ως εκ τούτου η μοντελοποίηση της παραμόρφωσης των δοκιμίων κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

Ένα άλλο κριτήριο είναι η σύγκριση των μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν. Για τα δοκίμια N° 3, N° 6, N° 9 και N° 10 που αποκλίνουν σημαντικά υπάρχουν ενδείξεις, από τις φωτογραφίες των δοκιμίων μετά τη διέλαση, που δείχνουν ότι στο πείραμα υπήρξαν αστοχίες με αποτέλεσμα να καταγραφούν ιδιαίτερα ψηλά φορτία. Για το δε δοκίμιο N° 2 η απόκλιση είναι μεγάλη ενώ στο πείραμα δεν φαίνεται να υπήρξαν αστοχίες. Ο λόγος που τα αποτελέσματα είχαν τόσες μεγάλες διαφορές δεν μπόρεσε να γίνει γνωστός. Για τα υπόλοιπα όμως δοκίμια τα μέγιστα φορτία που καταγράφηκαν κατά την προσομοίωση ήταν πολύ κοντά στη πραγματικότητα.

Το τρίτο κριτήριο είναι ουσιαστικά η μορφή της καμπύλης στα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης ανάμεσα σε αυτά του πειράματος και της προσομοίωσης. Σε όλα τα διαγράμματα η καμπύλες πειράματος-προσομοίωσης έχουν διαφορές μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα κατά την προσομοίωση το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται όταν το έμβολο έχει διανύσει 10 mm και στη συνέχεια ή παραμένει πρακτικά σταθερό ή μειώνεται με πολύ μικρό όμως ρυθμό. Κατά το πείραμα το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται όταν το έμβολο περνά τη θέση  $x=35$  mm. Η διαφορά αυτές μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως το πώς αντιλαμβάνεται την τριβή το πρόγραμμα ανάμεσα στο δοκίμιο και τη μήτρα. Μπορεί να επιλέχθηκε το μοντέλο τριβή διάτμησης όμως το να γίνει προσομοίωση της τριβής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο και για να προσεγγισθεί με ακρίβεια συνήθως χρησιμοποιούνται υπορουτίνες από κώδικα Fortran. Επίσης αν και έγινε προσπάθεια οι μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών να προσεγγίσουν τη πραγματικότητα, σίγουρα θα υπάρχουν διαφορές κάτι που επηρεάζει και τα αποτελέσματα. Βεβαίως θα πρέπει να επίσης να ληφθεί υπ' όψιν πως στα δοκίμια του πειράματος το αλουμίνιο προστέθηκε με χύτευση κάτι που στις μοντελοποιήσεις, το πρόγραμμα είναι αδύνατο να αντιληφθεί και επομένως να το προσομοιώσει. Αυτό μπορεί να είναι ένας επιπρόσθετος λόγος απόκλισης των αποτελεσμάτων του πειράματος με την προσομοίωση

Βέβαια αναφορά θα πρέπει να γίνει στο γεγονός πως αν δεν υπάρχουν ανάλογες εργαστηριακές μετρήσεις δεν μπορεί να γίνει ικανοποιητικός και σωστός έλεγχος της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Επιπλέον όπως παρατηρήθηκε στην εκτέλεση κάποιων πειραμάτων παρατηρήθηκαν αστοχίες με συνέπεια η εγκυρότητα της σύγκρισης που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια να αμφισβητείται. Επίσης περιορισμό αποτελεί και ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των δύο υλικών ώστε ο χρόνος επίλυσης να παραμείνει μικρός. Έτσι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν προφανώς στερούνται μεγάλης ακρίβειας. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να αποφασιστεί ποια σημεία παρουσιάζουν μεγάλη σημασία οπότε και να γίνει μοντελοποίηση με μεγάλη ακρίβεια και ποια όχι οπότε και να γίνουν απλουστευτικές παραδοχές. Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας η διακριτοποίηση κρίθηκε επαρκής συμπεριλαμβανομένου και του διαθέσιμου χρόνου που υπήρχε για την εκπόνηση της. Ωστόσο αν η μοντελοποίηση γίνει στα πλαίσια μιας έρευνας η διακριτοποίηση θα πρέπει σαφώς να είναι μεγαλύτερη αλλά και ανάλογη του διαθέσιμου χρονικού ορίζοντα.

Γενικό πάντως συμπέρασμα είναι πως για να γίνει σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης θα πρέπει να γίνει σύγκριση όχι μόνο στο φορτίο διέλασης και την

οπτική παρατήρηση, όπως έγινε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, αλλά και σε άλλους παράγοντες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία που έχει διερευνηθεί πάνω σε αυτό το θέμα [7],[8],[9],[10],[11],[12],[13]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ροή μετάλλου που παρουσιάζεται στα δύο υλικά των δοκιμίων.. Ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέψουμε πως η μορφή και η τάξη μεγέθους των πειραματικών καμπυλών που προέκυψαν φέρουν πολλές ομοιότητες με άρθρο που διερευνούσε παρόμοιο θέμα [10]. Εν κατακλείδι λοιπόν μπορούμε να αναφέρουμε πως οι μοντελοποιήσεις που έγιναν στη παρούσα διπλωματική εργασία ήταν ικανοποιητικές για μια πρώτη προσέγγιση της κατεργασίας διέλασης διμεταλλικών υλικών. Ωστόσο υπάρχουν αρκετά περιθώρια βελτίωσης ώστε τα αποτελέσματα να προσεγγίσουν επαρκώς την πραγματικότητα.

#### **6.4 Προτάσεις**

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δυνατότητες που έχουν αναπτυχθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται κατανοητό πως μπορεί να γίνει μοντελοποίηση και αριθμητική προσομοίωση και σε άλλες περιπτώσεις. Έτσι λοιπόν με αφορμή την διέλαση διμεταλλικών δοκιμίων που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η ανάπτυξη/βελτίωση μοντέλων όπως:

- Διέλαση σωλήνων με πορώδες υλικό στο εσωτερικό τους
- Διέλαση διμεταλλικών δοκιμίων με υλικά εκτός του χαλκού και του αλουμινίου
- Διέλαση πολυστρωματικών δοκιμίων.



## ***Βιβλιογραφία***

- [1] Μπέη Μαργαρίτα, Πειραματική και Αριθμητική Προσομοίωση της Κατεργασίας Διέλασης Διμεταλλικών Σωλήνων, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2008
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Extrusion>
- [3] <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26065/mathimata/06-dielasi.pdf>
- [4] Wojciech Z. Misiolek, Vinod K. Sikka, Physical and Numerical Analysis of Extrusion Process for Production of Bimetallic Tubes, Final Technical Report, 2006
- [5] <http://www.beca-engineering.com/Bimetallic.html>
- [6] Γκούτζιος Γεώργιος. Αριθμητική Προσομοίωση Της Ψυχρής Έλασης Διμεταλλικού Ελάσματος Al-Cu Με Τη Μέθοδο Των Πεπερασμένων Στοιχείων, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2009
- [7]: Yeong-Maw Hwang, Te-Fu Hwang, An investigation into the plastic deformation behavior within a conical die during composite rod extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 2000
- [8] S. Berski, H. Dyja, G. Banaszek, M. Janik, Theoretical analysis of bimetallic rods extrusion process in double reduction die, Journal of Materials Processing Technology, 2004
- [9] A. Khosravifard, R. Ebrahimi, Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal, Materials and Design, 2010
- [10] Kwang Seok Lee, Hyun-Joon Jun, Young-Seon Lee, Fabrication of bimetallic rods consist of a Zr-based bulk metallic glass and a crystalline copper by co-extrusion, Intermetallics, 2010
- [11] Irena Nowotynska, Andrzej Smykla, Influence of die geometric parameters on plastic flow of layer composites during extrusion process, Journal of materials processing technology, 2009

[12] Patrick Ulysse, Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods, International Journal of Mechanical Sciences, 2002

[13] S. Berski, H. Dyja, A. Maranda, J. Nowaczewski, G. Banaszek, Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process, Journal of Materials Processing Technology, 2006

[14] N.R. Chitkara, A. Aleem, Extrusion of axi-symmetric tubes from hollow and solid circular billets: a generalised slab method of analysis and some experiments, International Journal of Mechanical Sciences, 2000

[15] Marc® 2010.1.0 User's Guide

[16] [http://www.mscsoftware.co.jp/products/marc/pdf/marc\\_2008r1\\_doc\\_release.pdf](http://www.mscsoftware.co.jp/products/marc/pdf/marc_2008r1_doc_release.pdf)

[17] Marc® 2010.1.0 Volume B: Element Library

[18] <http://www.scribd.com/doc/22843945/Bulk-Forming>