



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διέλαση με την μέθοδο P.I.T σκόνης αλουμινίου. Πειραματική και
αριθμητική προσομοίωση**

P.I.T extrusion of aluminum powders. Physical and numerical modeling

ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΙΝΑΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη διέλασης σωλήνα συμπαγούς χαλκού με την μέθοδο P.I.T "Powder in Tube" σκόνης αλουμινίου. Σκοπός είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα συσσωμάτωσης των δύο υλικών μέσω πειραματικής διαδικασίας καθώς και η μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων. Τέλος, ακολουθεί ανάπτυξη αριθμητικής προσομοίωσης της κατεργασίας με τον κώδικα LS-Dyna καθώς και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα,

Στο **1^ο** κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της κατεργασίας της διέλασης. Στη συνέχεια, γίνεται μία αναφορά στη μέθοδο P.I.T και σε εφαρμογές της. Τέλος, γίνεται αναφορά στη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας καθώς και σε τρόπους παρασκευής αλλά και σε εφαρμογές των πορώδων μεταλλικών υλικών.

Στο **2^ο** κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και ανάλυση της επιφάνειας διαρροής για κοκκώδη υλικά. Επίσης, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο **3^ο** κεφάλαιο παρουσιάζεται ο εξοπλισμός του εργαστηρίου και περιγράφονται τα χρησιμοποιούμενα κοκκώδη υλικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εκτέλεση των πειραμάτων και εξάγονται συμπεράσματα.

Στο **4^ο** κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκε το πορώδες και η σκληρότητα του αλουμινίου καθώς επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και εξάγονται συμπεράσματα.

Στο **5^ο** κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο της κονιομεταλλουργίας, της διέλασης και της διέλασης με τη μέθοδο P.I.T τα οποία έχουν προσομοιωθεί με το πακέτο FEM LS-Dyna. Στη συνέχεια συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και γίνεται η σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών προσομοιώσεων. Τέλος, αναφέρονται ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις και συμπεράσματα.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the solid copper tube extrusion by the P.I.T "Powder in Tube" method of aluminum powders. The aim is to explore the possibility of aggregation of the two materials through experimental procedure as well as the study of the physical properties. Finally, what follows is the development of numerical simulations of machining with LS-Dyna code and comparison with experimental results.

Specifically,

In the **1st** chapter, a reference is made to the features of the extrusion process. Also, reference is made to the P.I.T method and its applications. Finally, reference is made to the powder metallurgy method, production methods and applications of porous metal materials.

In the **2nd** chapter a description and analysis of the yield surface for granular materials are made. Also, a brief description of the finite element method is made.

In the **3rd** chapter the lab equipment is presented and the used granular materials are described. Then, the execution of the experiments is presented and conclusions are extracted.

In the **4th** chapter, the way is analyzed, in which the porosity and hardness of aluminum is determined. In addition, the results of the analysis and conclusions are presented.

In the **5th** chapter the model of powder metallurgy, extrusion and P.I.T by extrusion are described which are simulated with the FEM LS-Dyna package. Then, the results are summarized and the comparison between the experimental results and the results of the numerical simulations is made. Finally, some useful observations and conclusions are mentioned.

In the end, the literature used for the completion of the diploma thesis is given.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Κωστάζο Πρωτεσίλαο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, τις συμβουλές του κατά την αριθμητική προσομοίωση και για την προθυμία του να με βοηθήσει σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα σ' αυτήν την εργασία. Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω τον κ. Σερέτη Γεώργιο για την βοήθεια του στην μεταλλογραφική ανάλυση. Τέλος, δε θα μπορούσα παραλείψω τον Νικόλαο Μελισσά και Κωνσταντίνο Κερασιώτη για τη βοήθειά τους στην πειραματική διαδικασία.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Διέλαση - γενικά.....	1
1.2 Η ροή του μετάλλου στη διέλαση.....	2
1.3 Φάσεις της διέλασης.....	3
1.3 Μέθοδος Powder In Tube (P.I.T).....	4
1.4 Κονιομεταλλουργία.....	5
1.5 Πορώδη μεταλλικά υλικά - Εφαρμογές - Τρόποι παρασκευής.....	6
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο	12
2.1 Επιφάνεια διαρροής για κοκκώδη υλικά.....	12
2.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων - Κώδικας LS - DYNA.....	14
Κεφάλαιο 3. Πειραματική διαδικασία	15
3.1 Σκοπός	15
3.2 Πειραματική διάταξη κονιομεταλλουργίας	15
3.3 Χρησιμοποιούμενα κοκκώδη υλικά	17
3.4 Πειραματική διάταξη διέλασης.....	19
3.5 Πειράματα προσδιορισμού ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών	24
3.6 Πειράματα διέλασης σε κύπελλα χωρίς πορώδες στο εσωτερικό τους.....	32
3.7 Πειράματα διέλασης σε κύπελλα με σκόνη αλουμινίου στο εσωτερικό τους	36
3.8 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα	57
Κεφάλαιο 4. Μεταλλογραφική ανάλυση	58
4.1 Εισαγωγή	58
4.2 Υπολογισμός πορώδους.....	58
4.3 Υπολογισμός σκληρότητας.....	58
4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης.....	60
4.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα	86
Κεφάλαιο 5. Αριθμητική προσομοίωση και αποτελέσματα.....	87
5.1 Εισαγωγή	87
5.2 Περιγραφή μοντέλου κονιομεταλλουργίας.....	87
5.2.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου	87
5.2.2 Υλικά μοντέλου.....	90
5.2.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές	93
5.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης	94
5.3 Περιγραφή μοντέλου διέλασης	99

5.3.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου	99
5.3.2 Υλικά μοντέλου.....	102
5.3.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές	103
5.3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης	104
5.4 Περιγραφή μοντέλου διέλασης P.I.T	108
5.4.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου	108
5.4.2 Υλικά μοντέλου.....	111
5.4.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές	111
5.4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης	112
5.4.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα	140
Βιβλιογραφία	141
Ευρετήριο εικόνων.....	142
Ευρετήριο διαγραμμάτων.....	146
Ευρετήριο πινάκων	150

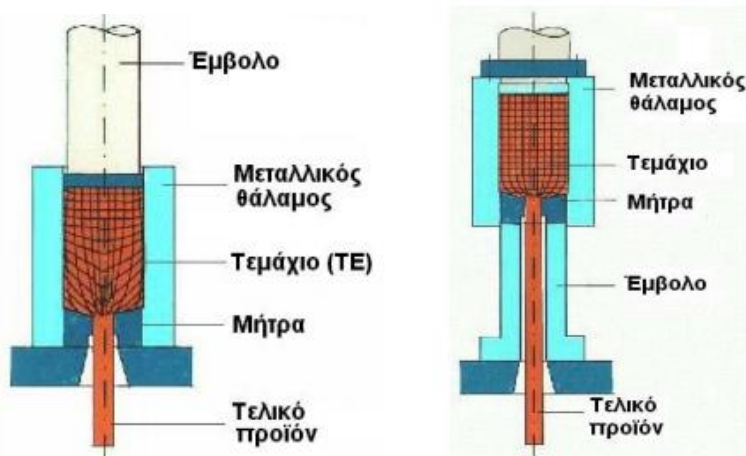
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Διέλαση - γενικά

Οι κατεργασίες των διαμορφώσεων αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της τεχνολογίας των κατεργασιών των υλικών. Στις κατεργασίες αυτές μεταβάλλεται η γεωμετρική μορφή του υλικού, βελτιώνεται η αντοχή και μπορούν να αποδοθούν πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές με ικανοποιητική ποιότητα επιφάνειας και σχετικά μικρές ανοχές. Σκοπός των διαμορφώσεων είναι η πρόσδοση μίας διαφορετικής γεωμετρικής μορφής στα αντικείμενα με την επιβολή εξωτερικών δυνάμεων, η οποία θα πρέπει να παραμείνει και με τη λήξη της επιβολής των εξωτερικών δυνάμεων. Η διαμόρφωση γίνεται στην περιοχή μεταξύ του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσεως. Τα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό όριο διαρροής και από μεγάλη επιμήκυνση διαμορφώνονται πολύ καλά και παρουσιάζουν μικρές δυνάμεις επανατάξεως.

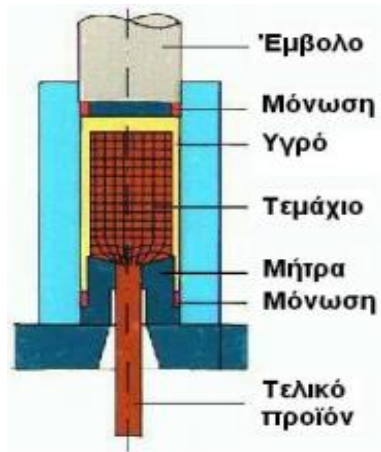
Η διέλαση αποτελεί μία από τις βασικότερες κατεργασίες διαμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια της διέλασης το υλικό συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου και αναγκάζεται να περάσει παραμορφούμενο πλαστικά μέσα από μία κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα για να σχηματίσει ένα προϊόν μειωμένης διατομής. Ανάλογα με τη διάταξη του μηχανισμού διέλασης και με τις επιτελούμενες κινήσεις από τα στοιχεία του, η κατεργασία διακρίνεται σε :

- Άμεση διέλαση (Direct extrusion) στην οποία το έμβολο κινείται ως προς τη μήτρα.
- Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion) στην οποία η μήτρα κινείται ως προς το έμβολο.
- Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion) η οποία χαρακτηρίζεται από την πλήρωση του θαλάμου με υγρό το οποίο μεταφέρει την πίεση διαμόρφωσης στο τεμάχιο.
- Κρουστική διέλαση (Impact extrusion) η οποία είναι στην ουσία έμμεση διέλαση με βασικό χαρακτηριστικό τις μεγάλες ταχύτητες κίνησης του εμβόλου.

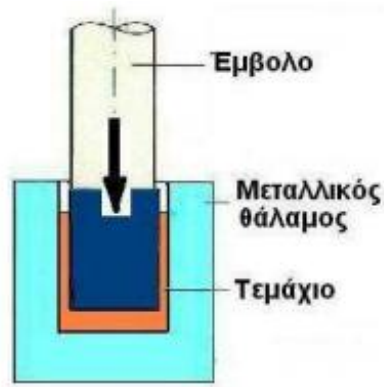


α) Ευθεία διέλαση

β) Έμμεση διέλαση



γ) Υδροστατική διέλαση



δ) Κρουστική διέλαση

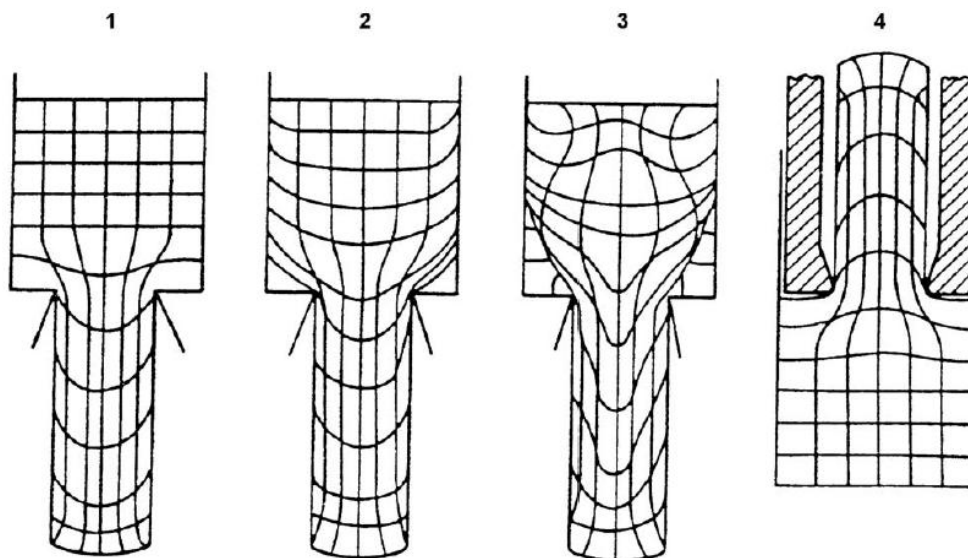
Εικόνα 1.1 : Σχηματική αναπαράσταση ευθείας (α), έμμεσης (β), υδροστατικής (γ), κρουστικής (δ) διέλασης

Επιπλέον θα πρέπει να σημειώσουμε ότι για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας της διέλασης είναι απαραίτητο να έχουν προσδιοριστεί ορισμένες βασικές παράμετροι όπως η ροή του υλικού, το εφαρμοζόμενο κριτήριο διαρροής, το απαιτούμενο φορτίο κατεργασίας, οι συνθήκες τριβής, το αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο και οι πραγματοποιούμενες παραμορφώσεις.

1.2 Η ροή του μετάλλου στη διέλαση

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις της ροής του υλικού κατά τη διέλαση.

Όπως παρατηρείται με τη χρήση πλεγμάτων σε διαιρετές μιγνέτες, χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη νεκρών ζωνών στην έξοδο, η εμφάνιση των οποίων ευνοείται από τις μεγάλες τριβές.



Εικόνα 1.2 : 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)

1.3 Φάσεις της διέλασης

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

Φάση 1: Αρχική ή μεταβατική φάση

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

Φάση 2: 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.

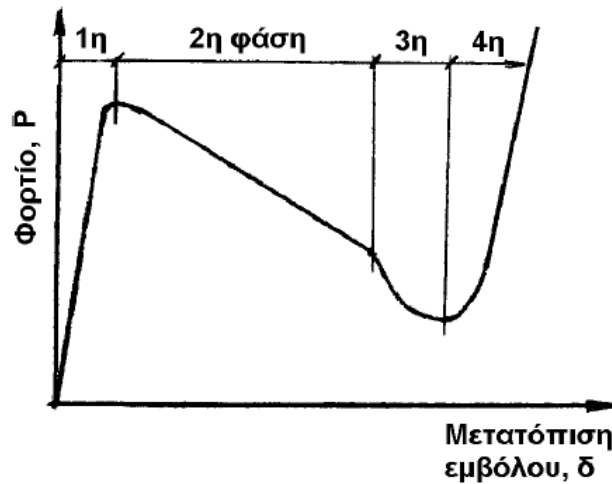
Φάση 3: Φάση αστάθειας

- 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.

Φάση 4: 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 1.3 : Φάσεις διέλασης

1.3 Μέθοδος Powder In Tube (P.I.T)

Η τεχνική αυτή, ανήκει στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά την διαμόρφωση των υλικών. Συγκεκριμένα, σωλήνας από μεταλλικό υλικό πληρούται με σκόνη, νιφάδες ή αφρό οποιουδήποτε υλικού μας αφορά (μεταλλικό ή κεραμικό) και ακολουθεί μείωση της διατομής του με μηχανικές κατεργασίες έλασης ή διέλασης. Πριν την κατεργασία είναι πιθανό να έχει προηγηθεί συμπίεση του υλικού μέσα στον σωλήνα, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη γεωμετρία στο τελικό προϊόν και για να μειώσουμε την απώλεια σκόνης. Το τελικό προϊόν συνήθως είναι πάλι σωλήνας (δοκίμιο κυλινδρικής διατομής), αν και οι μορφές ενδέχεται να ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή.

Η χρήση της μεθόδου PIT είναι απαραίτητη όταν θέλουμε να κατεργαστούμε μεγάλη ποσότητα σκόνης που μορφοποιείται δύσκολα, είτε λόγω υψηλού σημείου χύτευσης, είτε λόγω υψηλής σκληρότητας και ψαθυρότητας. Το τελικό προϊόν που θα πάρουμε ενδέχεται να είναι όλος ο σωλήνας με την σκόνη μέσα ή μόνο το εσωτερικό, οπότε και ο σωλήνας πρέπει να αφαιρεθεί. Συνήθως η μέθοδος PIT γίνεται όταν θέλουμε ενιαίο τον σωλήνα στο τέλος. Τα μέταλλα που συνήθως χρησιμοποιούνται για τον σωλήνα είναι ο μόλυβδος, ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο άργυρος και ο χάλυβας. Ο σωλήνας πρέπει να έχει σχετικά χοντρό τοίχωμα (άνω του 1mm), ώστε να αντέξει τις πιέσεις της κατεργασίας, αφού η συμπίεση της σκόνης στο εσωτερικό είναι συνήθως δύσκολη.

Το είδος της κατεργασίας (έλαση ή διέλαση), επιλέγεται βάσει του χρόνου, της ακρίβειας και των υλικών μας. Η έλαση είναι πιο άμεση και απλή εφόσον το στήσιμο της διάταξης γίνεται γρήγορα, χωρίς να είναι αναγκαία η κατασκευή μητρών. Παράλληλα με την έλαση είναι δυνατό να επιτύχουμε πιο γρήγορη μείωση της διατομής του σωλήνα, με λιγότερα πάσα. Όμως η διέλαση από την άλλη μεριά, δίνει συνήθως μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα.

Η μέθοδος PIT, βρίσκει χρήση συνήθως σε ηλεκτρικές και μηχανικές εφαρμογές.

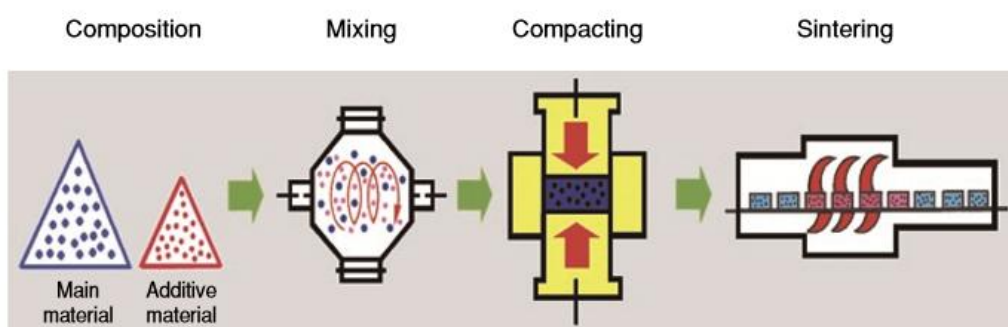
- Σήμερα στην βιομηχανία με αυτή την μέθοδο παράγονται μεγάλες ποσότητες υπεραγωγίμου σύρματος, το οποίο αποτελείται από μεταλλικό σωλήνα χαλκού ή αργύρου, ενώ το εσωτερικό είναι συνήθως από τον υπεραγωγό BSCCO.
- Παραγωγή ηλεκτρικών αγωγών από υπεραγωγικά υλικά όπως με MgB_2 και Nb_3Sn .
- Ακόμα η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή πολυπύρηνων συρμάτων (με κάποιον πυρήνα να είναι σε μορφή σκόνης) ή ακόμα και για υπερανθεκτικά και ελαφριά στηρίγματα σωληνοειδούς μορφής.

1.4 Κονιομεταλλουργία

Η κονιομεταλλουργία θεωρείται μία από τις παλαιότερες και μία από τις πλέον σύγχρονες μεθοδολογίες για την κατασκευή αντικειμένων. Στους προϊστορικούς χρόνους, οι τεχνικές της κονιομεταλλουργίας χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μετάλλων με υψηλά σημεία τήξης. Από τα πρώτα μέταλλα που παρήχθησαν σε μορφή σκόνης ήταν ο σπογγώδης σίδηρος από αναγωγή οξειδίων με άνθρακα. Αντικείμενα κονιομεταλλουργίας συναντώνται σε μηχανήματα συνήθους χρήσης όπως πλυντήρια, ψυγεία, air conditioning, ποδήλατα, αυτοκίνητα (περισσότερα από 50 τεμάχια), υδραυλικά, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, φωτοτυπικά κλπ. Όμως το ίδιο ευρεία είναι και η εφαρμογή τους σε μηχανές και τουρμπίνες αεροπλάνων. Γενικότερα για την παρασκευή αντικειμένων με κονιομεταλλουργία (P/M: Powder Metallurgy) εφαρμόζονται οι ακόλουθες διαδικασίες:

- Παραγωγή κόνεων
- Συμπύεση
- Πυροσυσσωμάτωση (Sintering)

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται όλα τα στάδια για την κατασκευή ενός συμπιεστού αντικειμένου.



Εικόνα 1.4 : Στάδια παραγωγής προϊόντος κονιομεταλλουργίας

Οι κόνεις των μετάλλων που απαιτούνται για εφαρμογές στην κονιομεταλλουργία παράγονται με τεχνικές που μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κύριες μεθοδολογίες :

- Φυσικές
- Χημικές

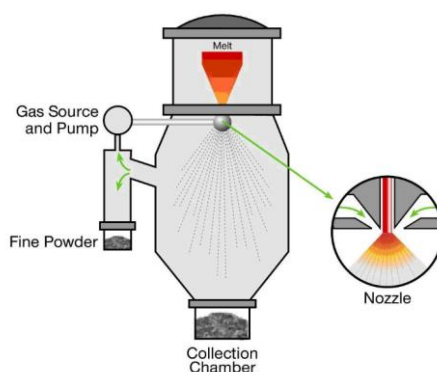
1.5 Πορώδη μεταλλικά υλικά - Εφαρμογές - Τρόποι παρασκευής

Τρόποι παρασκευής κόνινων

Παρακάτω παρουσιάζονται δυο από τις κυριότερες μεθόδους παραγωγής κόνινων.

- **Ατομοποίηση (atomisation)**

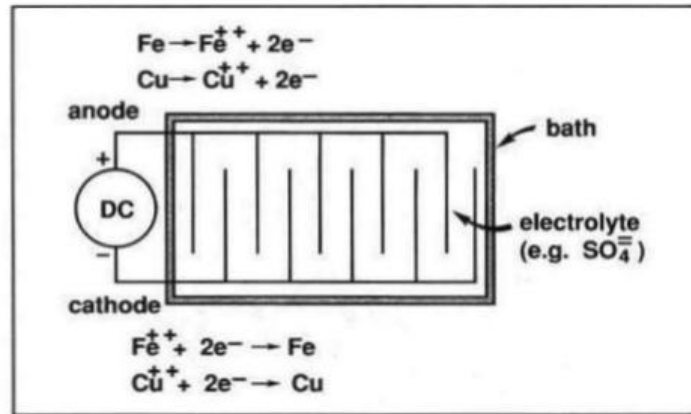
Η ατομοποίηση είναι η πιο κοινή μέθοδος κατά την οποία παράγεται κόνιν με στερεοποίηση σταγόνων που δημιουργούνται από τετηγμένο μέταλλο. Για τον σχηματισμό των σταγόνων χρησιμοποιείται νερό , αέρια όπως αργό ήλιο, σε κενό ή μη και η επιλογή εξαρτάται από το σχήμα, την κοκκομετρία που απαιτείται και τη φύση του μετάλλου. Η παραγόμενη κόνιν αποτελείται συνήθως από σφαιρικά σωματίδια μεγέθους έως και 500 μm.



Εικόνα 1.5 : Παραγωγή κόνινων με ατομοποίηση

- **Ηλεκτρόλυση**

Η ηλεκτρόλυση είναι μια ακόμη μέθοδος με την οποία παράγεται κόνιν. Όπου, υπό την άσκηση ηλεκτρικού συνεχούς ρεύματος και με την ύπαρξη του ηλεκτρολύτη το μέταλλο εναποτίθεται στην κάθοδο σε μορφή σκόνης ή νιφάδων. Με αυτή τη μέθοδο παράγονται κόνεις Fe, Ni, Cu. Χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η υψηλή καθαρότητα (>99%) και η αύξηση της συμπίεσότητας.



Εικόνα 1.6 : Παραγωγή κόνεων με ηλεκτρόλυση

Τρόποι παρασκευής πορώδων υλικών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής προϊόντων κονιομεταλλουργίας.

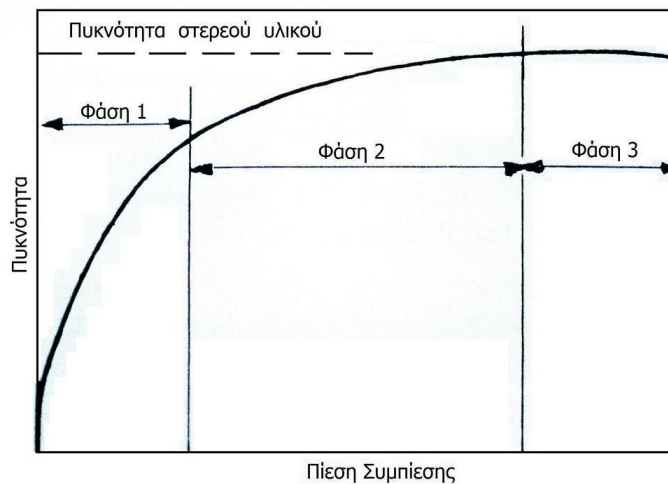
➤ Συμπίεση κόνεων μετάλλων

Είναι μία πολύ βασική διεργασία καθόσον θα πρέπει κατά την διάρκειά της να δοθεί το κατάλληλο ποσοστό και ο τύπος του πορώδους σε συνάρτηση με την ανάλογη αντοχή σε πίεση (green strength) ώστε να ακολουθήσει ένα επιτυχημένο στάδιο πυροσυσσωμάτωσης. Υπάρχουν πολλοί τρόποι συμπίεσης:

1. Θερμοϊσοστατική πίεση (hot isostatic pressing) : Επιτυγχάνεται ακρίβεια των διαστάσεων, επιφανειακό φινίρισμα, πολύπλοκα σχήματα και ταχύτεροι ρυθμοί.
2. Ψυχρή ισοστατική συμπίεση (cold isostatic pressing) : Η κόνις συμπιέζεται σε μήτρα από ελαστικό υλικό, δεν είναι απαραίτητη η χρήση λιπαντικών, δεν ενδείκνυται για περίπλοκα σχήματα και μικρή ακρίβεια στις διαστάσεις.
3. Με υπερηχητική δόνηση : Ενδείκνυται για λεπτομήκη αντικείμενα και καλή κατανομή πυκνότητας.
4. Με εκρηκτική ύλη : Κυλινδρικό δοχείο περιβάλλεται από κατάλληλο είδος και ποσότητα εκρηκτικής ύλης. Οικονομική μέθοδος για μεγάλες ποσότητες και μικρές απαιτήσεις. Γενικά υπάρχει άνιση κατανομή φορτίου στις προσόψεις των αντικειμένων.

Η συμπίεση μπορεί να γίνει σχεδόν με όλες της κατεργασίες μορφοποίησης (έλαση, σφυρηλάτηση, διέλαση) και πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις, που κάθε μια χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερο μηχανισμό :

- Μεταβατική φάση (διακίνηση, ανακατάταξη και σύμπλεξη των κόκκων της σκόνης (transitional restacking).
- Πλαστική παραμόρφωση των κόκκων (plastic deformation).
- Ψυχρή κατεργασία με ή χωρίς μοριακή θραύση (cold working with or w/o particle fragmentation).



Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα πυκνότητας συμπίεσματος - πίεσης συμπίεσης και απεικόνιση φάσεων κονιομεταλλουργίας

Αναλυτικά

- 1η Φάση

Στη μεταβατική φάση η συνένωση της σκόνης είναι το αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των κόκκων μεταξύ τους και της ανακατάταξής τους. Η κίνηση των κόκκων απόφαινόμενα εσωτερικής τριβής μεταξύ των μορίων. Η μεταβατική φάση τελειώνει όταν η επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση (φορτίο εργαλειομηχανής) αποκτήσει μία τιμή ώστε οι τάσεις που αναπτύσσονται από τον σχηματισμό στερεών δεσμών μεταξύ των μορίων και η εσωτερική τριβή επιβραδύνουν τη σχετική κίνηση των κόκκων και προκαλούν τη γεωμετρική τους σύμπλεξη.

- 2η Φάση

Ανάλογα με το είδος της σκόνης που συμπιέζεται, την μεταβατική φάση ακολουθεί μια φάση συμπίεσης κατά την οποία οι κόκκοι παραμορφώνονται πλαστικά, συμφύονται και η επιφάνεια επαφής αυξάνει. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο κενός χώρος και επομένως επιτυγχάνεται η μείωση του πορώδους. Η μεταφορά μάζας διευκολύνεται από γραμμικές ατέλειες (διαταραχές) στην μάζα του υλικού, οι οποίες οφείλονται είτε στην πλαστική του παραμόρφωση, είτε συνοδεύουν την ενδοκρυσταλλική διάχυση. Έτσι παρατηρείται πρώτα κλείσιμο και ύστερα στρογγύλευση των πόρων κατά την αύξηση της πυκνότητας του συμπίεσματος.

- 3η Φάση

Το τρίτο και τελικό στάδιο της συμπίεσης συνήθως αποδίδεται σε ψυχρή κατεργασία των κόκκων ή μοριακή φθορά. Σε ορισμένες περιπτώσεις και οι δύο αυτοί μηχανισμοί επηρεάζουν τη συμπίεση.

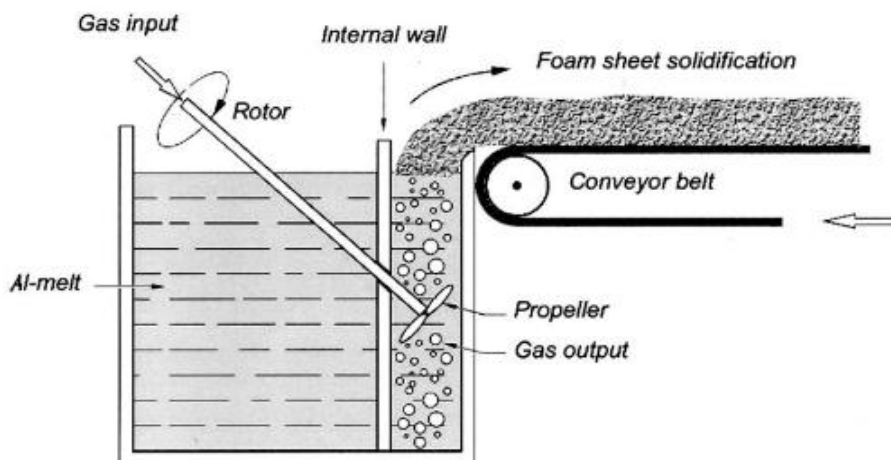
➤ Πυροσυσσωμάτωση (sintering)

Πυροσυσσωμάτωση του συμπιέσματος είναι η δομική διασύνδεση κόνων μετάλλων ή κεραμικών ή ακόμα και ενός συμπιεστού αντικειμένου η οποία επέρχεται κατά την έψηση τους. Είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο το οποίο καταλήγει σε δομικές μεταβολές μάζας κόνεως με σκοπό την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η μείωση του πορώδους συνδέεται άμεσα με την διαδικασία. Συνήθως η θερμοκρασία κατά την οποία γίνεται το sintering είναι 0.5-0.8 της χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης των συστατικών του μίγματος των κόνων. Η έψηση διαρκεί από 20min έως μερικές ώρες. Κατά την πυροσυσσωμάτωση έχουμε εξάλειψη των εξωτερικών επιφανειών των κόκκων και το όλο σύστημα οδηγείται σε μείωση της ελεύθερης ενέργειας του. Επικρατεί το φαινόμενο της διάχυσης με μείωση του αριθμού και του μεγέθους των πόρων. Ξεκινώντας από σκόνης με διάμετρο 1μm στο τέλος το προϊόν είναι δυνατόν να φθάσει τα 10-100μm. Γενικότερα οι ακόλουθες μεταβολές γίνονται σ' ένα συμπιεστό αντικείμενο από κόνειες όταν αυτό τοποθετηθεί προς συσσωμάτωση:

- τα σωματίδια αρχίζουν να ενώνονται αυξάνοντας την αντοχή του αντικειμένου σε θλίψη καθώς και την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- όσο αυξάνεται ο χρόνος, αυξάνεται και η αντοχή (το ίδιο γίνεται και με την αύξηση της θερμοκρασίας)
- η αύξηση της αντοχής σε θλίψη ακολουθείται και από μείωση σε ποσοστό πορώδους

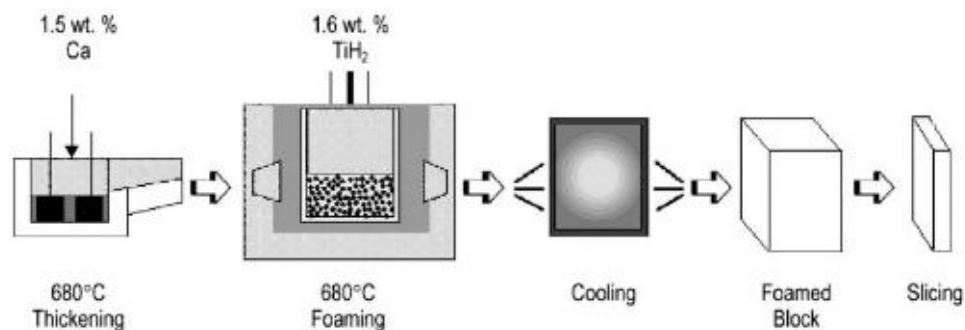
➤ Τήξη μετάλλου και δημιουργία πόρων

A) Πρόκειται για μια μέθοδο όπου οι πόροι δημιουργούνται από αέριο (αέρας, άζωτο, αργό) που εισάγεται στο τηγμένο μέταλλο όπου υπάρχουν προπέλες οι οποίες αναδεύουν το μίγμα τήγατος αερίου. Ο αφρός αυτός ανέρχεται στην επιφάνεια από όπου συλλέγεται με μια τροχαλία ή με κάποιον άλλο τρόπο.



Εικόνα 1.8: Παραγωγή πορώδους υλικού από έγχυση αερίου στο τήγμα μετάλλου

B) Πρόκειται για μια μέθοδο όπου οι πόροι δημιουργούνται μέσα στο τηγμένο υλικό. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, εισάγεται ασβέστιο στο τήγμα με σκοπό την σκλήρυνση των σωματιδίων. Ακολούθως, εισάγεται TiH_2 όπου απελευθερώνει αέριο υδρογόνο το οποίο προκαλεί φυσαλίδες στο τήγμα. Αμέσως μετά την ψύξη και τη στερεοποίηση παράγεται το αφρώδες μέταλλο.



Εικόνα 1.9 : Παραγωγή πορώδους υλικού με απελευθέρωση H_2 από το ίδιο το τήγμα μετάλλου

Εφαρμογές

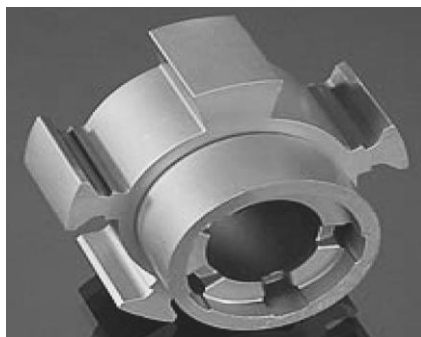
Τα πορώδη μεταλλικά υλικά παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιστημονική και τεχνολογική εξέλιξη και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς χάρη στις ιδιότητες που έχουν, όπως :

- χαμηλή πυκνότητα
- μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο
- καλή απορρόφηση ενέργειας
- μεγάλη μηχανική αντοχή και στιβαρότητα

Λόγω των ιδιοτήτων αυτών βρίσκουν εφαρμογή στους ακόλουθους τομείς :

- Δομικά μέρη σε επίγεια και εναέρια μέσα

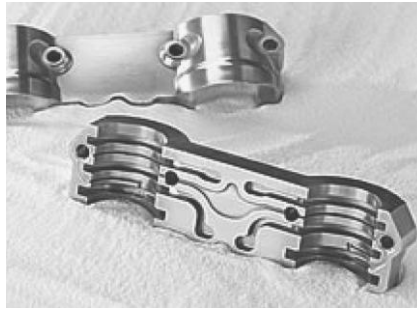
Χάρη στην υψηλή μηχανική αντοχή, στην χαμηλή τους πυκνότητα αλλά και στην καλή απορρόφηση ενέργειας πολλά δομικά μέρη κατασκευάζονται από πορώδη υλικά.



Εικόνα 1.10 : Βαλβίδα μεταβλητού χρονισμού πορώδους σιδήρου



Εικόνα 1.11 : Ελικοειδή γρανάζια πορώδους σιδήρου



Εικόνα 1.12 : Έδρανα ολίσθησης στροφαλοφόρου πορώδους αλουμινίου



Εικόνα 1.13 : Έδρανα ολίσθησης πορώδους χαλκού

- Φίλτρα

Χάρη στην υψηλή μηχανική αντοχή και στην αντίσταση σε θερμικά και μηχανικά σοκ πολλά φίλτρα κατασκευάζονται από πορώδη μέταλλα και κυρίως από μπρούτζο.

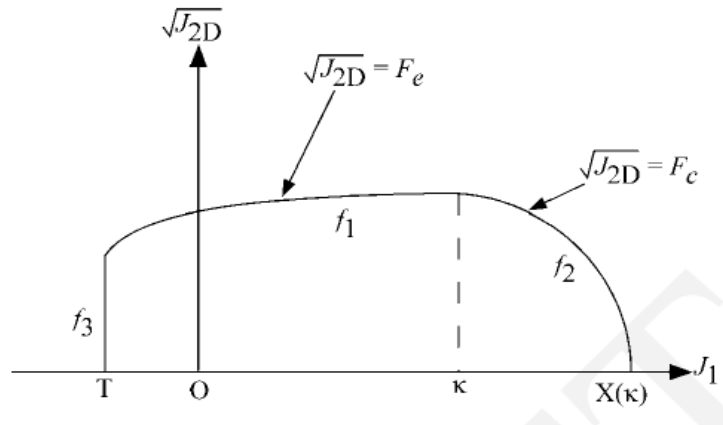


Εικόνα 1.14 : Φίλτρα

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Επιφάνεια διαρροής για κοκκώδη υλικά

Το τροποποιημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο *Drucker-Prager* είναι ένα πολύ-επιφανειακό ελαστοπλαστικό μοντέλο, που περιγράφει τη συμπύκνωση, κράτυνση και διασωματική τριβή. Χρησιμοποιείται στην μοντελοποίηση κόνεων στατικής συμπίεσης μεταλλικών και κεραμικών κόνεων, καρβίδια, ζιρκόνια υπεραγωγούς και φαρμακευτικά υλικά. Η επιφάνεια διαρροής αποτελείται από τρεις καμπύλες, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 2.1 : Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Drucker - Prager

Η επιφάνεια failure envelope f_1 , περιγράφεται από την εξίσωση

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - \min(F_e(J_1), T_{mises})$$

Όπου η F_e και η T_{mises} δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$F_e(J_1) = a - \gamma e^{-\beta J_1} + \theta J_1$$

$$T_{mises} = |X(\kappa_n) - L(\kappa_n)|$$

Η επιφάνεια cap f_2 , περιγράφεται από την εξίσωση

$$f_2 = \sqrt{J_{2D}} - F_c(J_1, \kappa)$$

Όπου η F_c δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$F_c(J_1, \kappa) = \frac{1}{R} \sqrt{[X(\kappa) - L(\kappa)]^2 - [J_1 - L(\kappa)]^2}$$

Όπου,

- R : η αναλογία του πρωτεύοντος προς τον δευτερεύοντα άξονα του τετάρτου της έλλειψης, που καθορίζει τη μορφή της επιφάνειας cap

- $X(\kappa)$: η τομή της επιφάνειας car με τον άξονα J_1

$$X(\kappa) = \kappa + RF_e(\kappa)$$

- κ : η παράμετρος σκλήρυνσης όπου συσχετίζεται με την πλαστική αλλαγή όγκου
- $L(\kappa)$ ορίζεται ως ακολούθως :

$$L(\kappa) = \begin{cases} \kappa, & \kappa > 0 \\ 0, & \kappa \leq 0 \end{cases}$$

Η πλαστική παραμόρφωση όγκου δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$\varepsilon_{vp} = \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$$

$$\varepsilon_{vp} = W(1 - e^{-D(X(\kappa) - X_0)})$$

Όπου,

- ρ : πυκνότητα στο τρέχων συμπιεσμένο κομμάτι
- ρ_0 : αρχική πυκνότητα

Γεωμετρικά, η παράμετρος κ παρουσιάζεται στο προηγούμενο σχήμα ως η J_1 - συνιστώσα της τομής της επιφάνειας car με την επιφάνεια failure.

Η επιφάνεια tension cut-off, που δίνεται από την εξίσωση

$$f_3 = T - J_1$$

όπου T , η παράμετρος υλικού που διευκρινίζει τη μέγιστη υδροστατική πίεση που μπορεί να αντέξει το υλικό.

Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης της πλαστικής συμπίεσης. Η ογκομετρική συμπεριφορά είναι ελαστική μέχρι η τάση να φτάσει την επιφάνεια car και μετά η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση (συμπίεση) αναπτύσσεται βάσει της εξίσωσης κράτυνσης.

Το τροποποιημένο μοντέλο car περιέχει ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, που πρέπει να προσδιοριστούν, για να περιγραφεί το εκάστοτε υλικό όπου βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Οι παράμετροι α , β , γ , ϑ προσδιορίζονται από τριαξονικές πειραματικές δοκιμές ισοστατικής συμπίεσης. Οι παράμετροι W και D προσδιορίζουν την εξίσωση κράτυνσης. Η τιμή του W αντιπροσωπεύει το ποσοστό των διακένων στην ασυμπιεστη κόνη και του D ελέγχει την κλίση της αρχικής καμπύλης φόρτισης κατά την μονοαξονική υδροστατική συμπίεση

2.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων - Κώδικας LS - DYNA

Γενικά η διαδικασία κατάστρωσης και επίλυσης ενός προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια Η/Υ σε σύστημα CAE (Computer Aided Engineering), περιέχει τα ακόλουθα 3 στάδια :

- **Προεπεξεργασία**

Η προεπεξεργασία αναλαμβάνει να ετοιμάσει τα δεδομένα για την επίλυση. Δηλαδή, θα ετοιμάσει κάποια μητρικά μεγέθη τα οποία η διαδικασία της επίλυσης θα τα χρησιμοποιήσει για να επιλύσει το πρόβλημα. Ο προεπεξεργαστής μπορεί να αντλήσει δεδομένα από ένα αρχείο δεδομένων ή μπορεί να καταστρώσει το πρόβλημα κατά την εκτέλεση, συνήθως με την βοήθεια κάποιου γραφικού περιβάλλοντος ή με την βοήθεια γραμμών εντολών. Ο προεπεξεργαστής, δηλαδή, ετοιμάζει τις δομές των δεδομένων όπως τις χρειάζεται ο επεξεργαστής για να κάνει την επίλυση.

Για να είναι πλήρες το μοντέλο θα πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- Ορίζεται πλήρως η γεωμετρία, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις
- Διακρίτοποιείται η κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία και δηλώνονται οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων
- Δηλώνεται το υλικό, ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται το μοντέλο, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες,
- Ορίζονται οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός του άλλου, αλλά και κυρίως για να μελετηθούν τα φαινόμενα (τάσεις, τριβές κλπ) από τις επαφές αυτές.
- Προσδιορίζονται οι αρχικές οριακές συνθήκες (π.χ. αρχική ταχύτητα).

- **Επίλυση**

Η επίλυση αναφέρεται στη διαδικασία που περιγράφει η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των προβλημάτων. Αν για παράδειγμα πρόκειται για προβλήματα γραμμικής συμπεριφοράς, τότε η επίλυση είναι η κατάστρωση των πινάκων $[K]$, $[u]$ και $[F]$ από τα δεδομένα κόμβων-στοιχείων- φορτίσεων-δεσμεύσεων, και η επίλυση του συστήματος εξισώσεων. Η διαδικασία του υπολογισμού των παραγώγων μεγεθών (π.χ. τάσεις), μπορεί να ανήκει στην διαδικασία της επίλυσης αλλά και της μετεπεξεργασίας, για την οποία θα γίνει αναφορά στη συνέχεια. Οι ρουτίνες που περιέχονται στο στάδιο της επίλυσης κάνουν γενικά απλές πράξεις πινάκων, όπως πολλαπλασιασμούς, αντιστροφές, κλπ. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην διαδικασία της επίλυσης παρουσιάζεται στην κατάστρωση του πίνακα $[K]$ καθώς και στην επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

- **Μετεπεξεργασία**

Αφού γίνει η επίλυση, ακολουθεί η μετεπεξεργασία που στην ουσία είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Αρχικά γίνονται υπολογισμοί παραγώγων μεγεθών. Έπειτα το πρόγραμμα μπορεί να εξαγάγει τα αποτελέσματα είτε στην οθόνη, είτε σε αρχείο, είτε να αναλάβει την γραφική έξοδο των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 3. Πειραματική διαδικασία

3.1 Σκοπός

Σκοπός των ακόλουθων πειραμάτων είναι αφενός, ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων συμπαγών και κοκκώδων υλικών και αφετέρου, η μελέτη της κατεργασίας της διέλασης σε κυλινδρικά δοκίμια και σε δοκίμια με σκόνη αλουμινίου στο εσωτερικό τους.

3.2 Πειραματική διάταξη κονιομεταλλουργίας

➤ Υδραυλική πρέσα

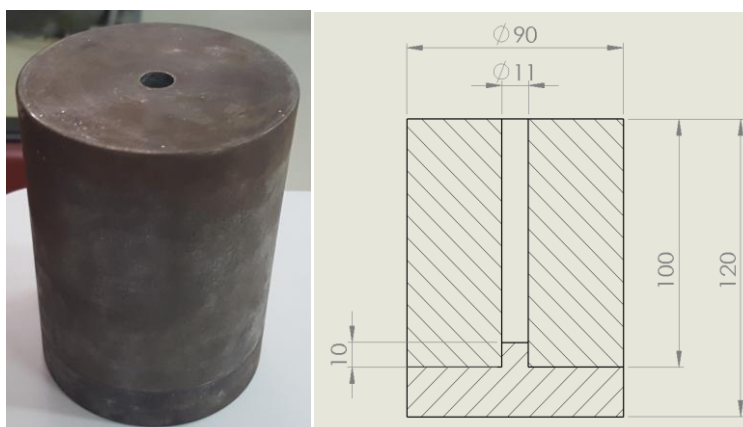
Τα πειράματα της κονιομεταλλουργίας και της διέλασης διεξήχθησαν στην υδραυλική πρέσα *Instron 4482* μέγιστου φορτίου 100 kN.



Εικόνα 3.1 : Υδραυλική Πρέσα Instron 4482

➤ Μήτρα

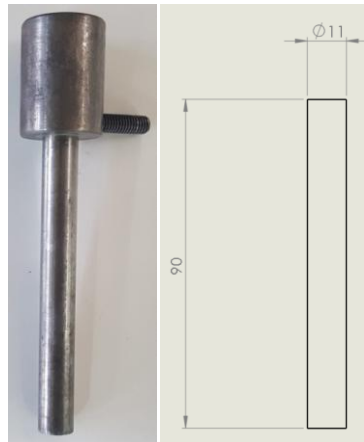
Παρακάτω παρουσιάζεται η μήτρα που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων κονιομεταλλουργίας. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα CK 45.



Εικόνα 3.2 : Μήτρα κονιομεταλλουργίας

➤ Έμβολο

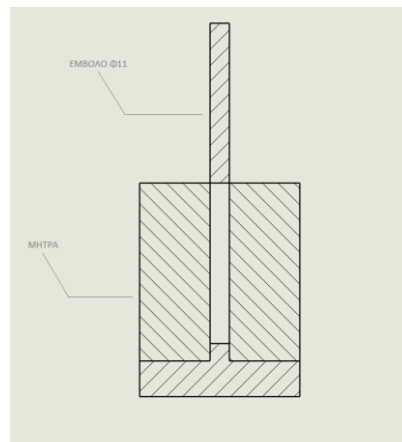
Παρακάτω παρουσιάζεται το έμβολο το οποίο εισέρχεται στην μήτρα και συμπιέζει τη σκόνη. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα.



Εικόνα 3.3 : Έμβολο κονιομεταλλουργίας

➤ Συνολική διάταξη κονιομεταλλουργίας

Παρακάτω παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη κονιομεταλλουργίας.

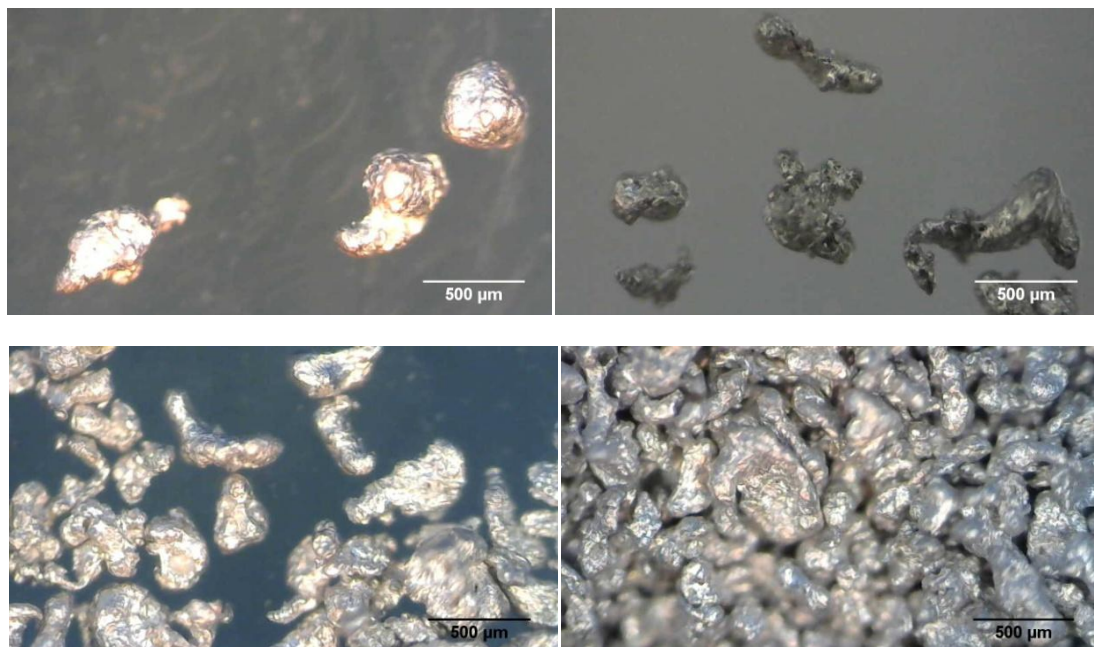


Εικόνα 3.4 : Διάταξη κονιομεταλλουργίας

3.3 Χρησιμοποιούμενα κοκκώδη υλικά

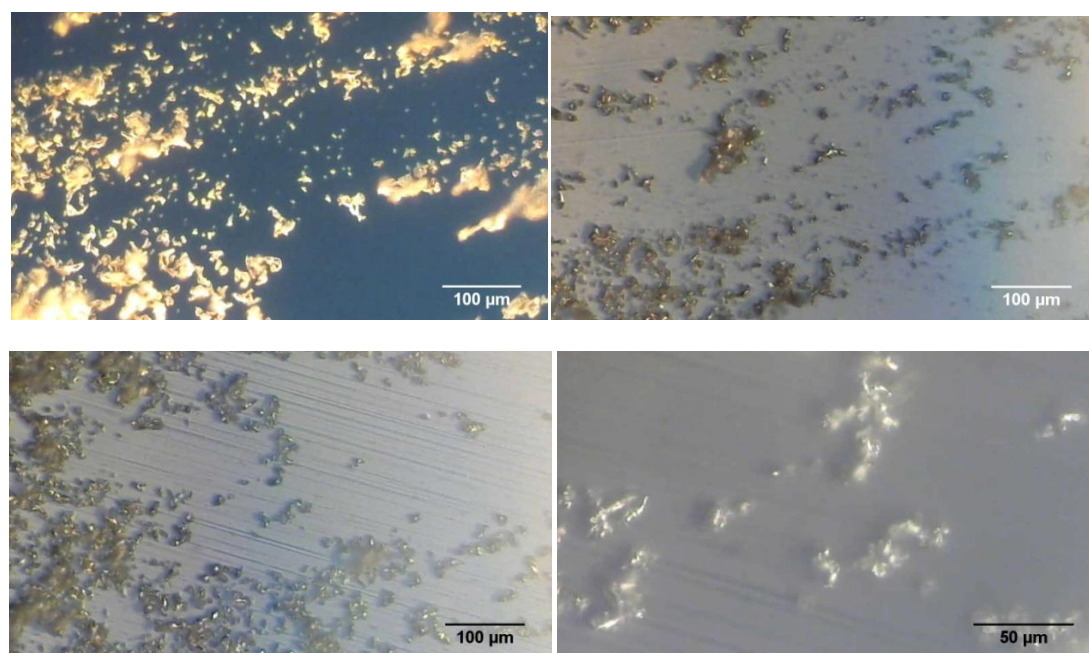
Παρακάτω παρουσιάζονται τα κοκκώδη υλικά αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

- **AL 99.8 POWDER [-40+325 MESH]**



Εικόνα 3.5 : Σκόνη αλουμινίου 40+325 mesh

- **AL 99.5 POWDER [-325 MESH] APS 7-15 MICRON**



Εικόνα 3.6 : Σκόνη αλουμινίου 325 mesh

Οι αριθμοί δίπλα από την λέξη 'MESH' (πλέγμα) υποδηλώνουν την διάμετρο των κόκκων της σκόνης. Με βάση τον ακόλουθο πίνακα καταλαβαίνουμε ότι η διάμετρος των κόκκων της σκόνης **AL 99.8 POWDER [-40+325 MESH]** κυμαίνεται στο εύρος **44** έως **400 μm** . Ομοίως, για την σκόνη **AL 99.5 POWDER [-325 MESH] APS 7-15 MICRON** καταλαβαίνουμε ότι η διάμετρος των κόκκων θα είναι κάτω από **44 μm** και συγκεκριμένα θα κυμαίνεται στο εύρος **7** έως **15 μm** .

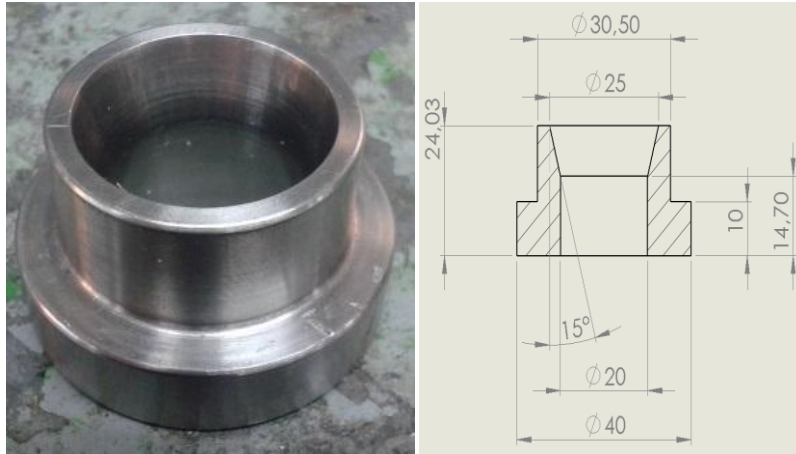
U.S. MESH	INCHES	MICRONS	MILLIMETERS
3	0.265	6730	6.73
4	0.187	4760	4.76
5	0.157	4000	4
6	0.132	3360	3.36
7	0.111	2830	2.83
8	0.0937	2380	2.38
10	0.0787	2000	2
12	0.0661	1680	1.68
14	0.0555	1410	1.41
16	0.0469	1190	1.19
18	0.0394	1000	1
20	0.0331	841	0.841
25	0.028	707	0.707
30	0.0232	595	0.595
35	0.0197	500	0.5
40	0.0165	400	0.4
45	0.0138	354	0.354
50	0.0117	297	0.297
60	0.0098	250	0.25
70	0.0083	210	0.21
80	0.007	177	0.177
100	0.0059	149	0.149
120	0.0049	125	0.125
140	0.0041	105	0.105
170	0.0035	88	0.088
200	0.0029	74	0.074
230	0.0024	63	0.063
270	0.0021	53	0.053
325	0.0017	44	0.044
400	0.0015	37	0.037

Εικόνα 3.7 : Πίνακας διαστάσεων σκόνης

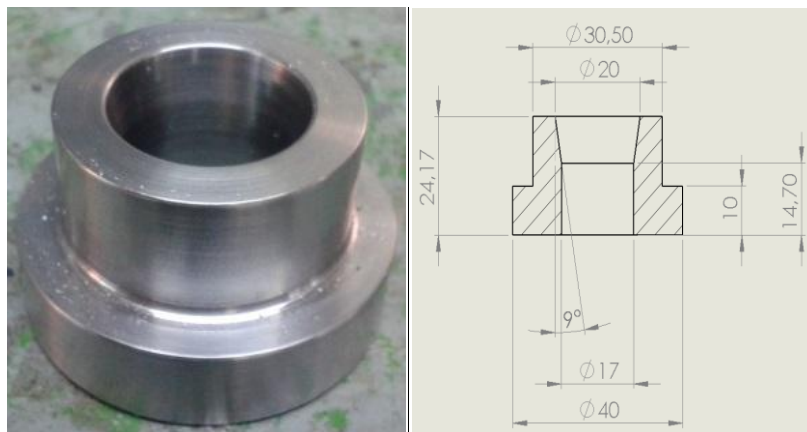
3.4 Πειραματική διάταξη διέλασης

➤ Μήτρες

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων διέλασης. Είναι κατασκευασμένες από χάλυβα CK 45.



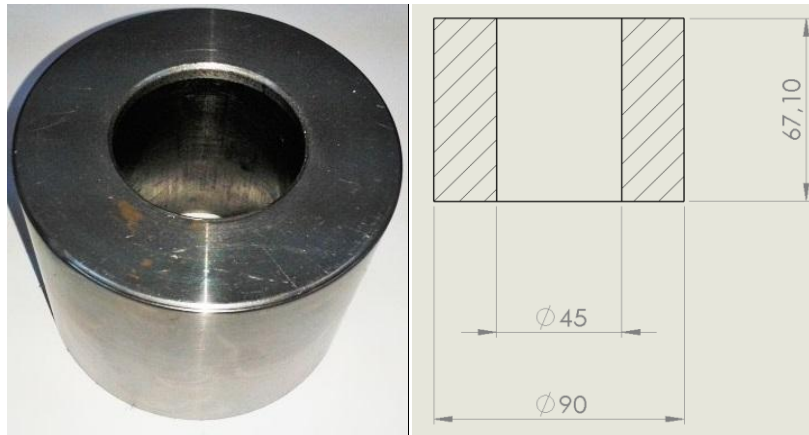
Εικόνα 3.8 : Μήτρα διέλασης 1^{ου} πάσου



Εικόνα 3.9 : Μήτρα διέλασης 2^{ου} πάσου

➤ Εξωτερικός δακτύλιος

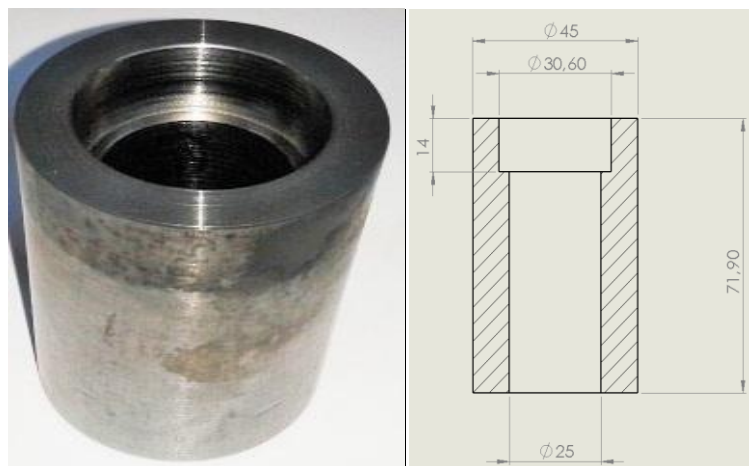
Παρακάτω παρουσιάζεται ο εξωτερικός δακτύλιος ο οποίος λειτουργεί ως συγκρατητής της μήτρας και του εσωτερικού δακτυλίου. Είναι κατασκευασμένος από εργαλειοχάλυβα.



Εικόνα 3.10 : Εξωτερικός δακτύλιος

➤ Εσωτερικός δακτύλιος

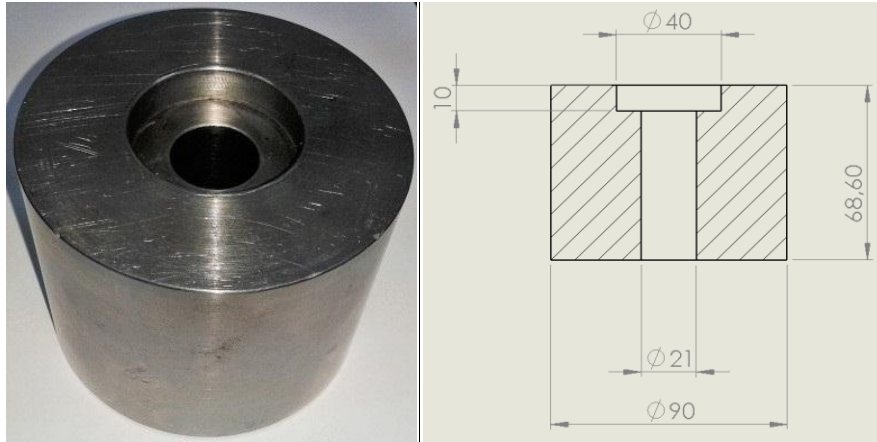
Παρακάτω παρουσιάζεται ο εσωτερικός δακτύλιος στον οποίο τοποθετούνται τα δοκίμια διαμέτρου 25 mm . Είναι κατασκευασμένος από χάλυβα CK 45.



Εικόνα 3.11 : Εσωτερικός δακτύλιος

➤ Δακτύλιος εξόδου

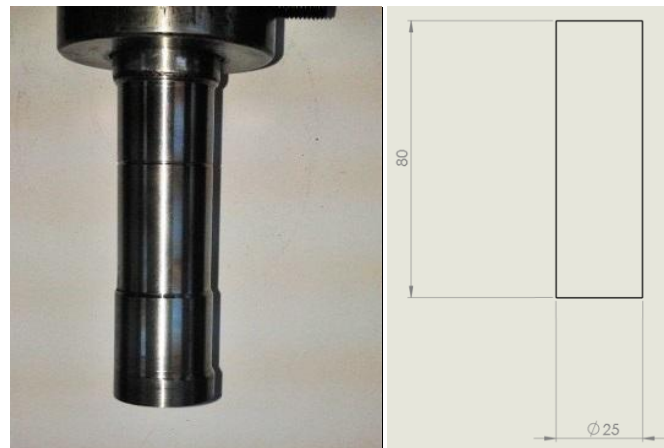
Παρακάτω παρουσιάζεται ο δακτύλιος εξόδου ο οποίος λειτουργεί ως συγκρατητής της μήτρας και από τον οποίο εξέρχεται το δοκίμιο. Είναι κατασκευασμένος από κοινό χάλυβα.



Εικόνα 3.12 : Τμήμα εξόδου μήτρας διέλασης

➤ Έμβολο $\Phi 25$

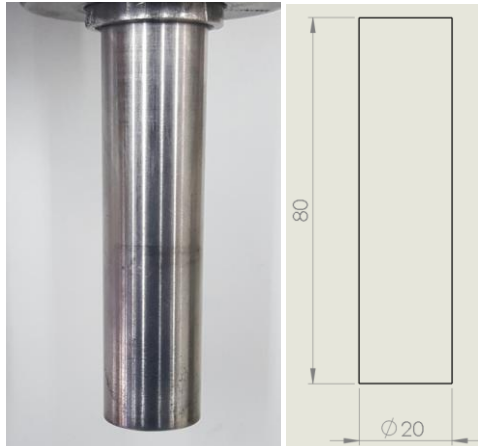
Παρακάτω παρουσιάζεται το έμβολο το οποίο εισέρχεται στον εσωτερικό δακτύλιο και συμπιέζει το δοκίμιο. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα.



Εικόνα 3.13 : Έμβολο διέλασης $\Phi 25$

➤ Έμβολο Φ 20

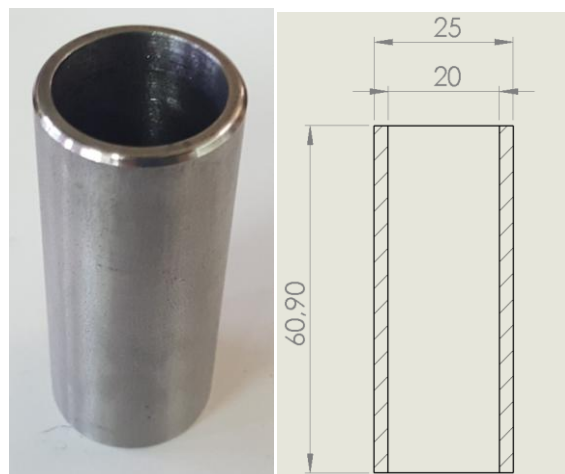
Παρακάτω παρουσιάζεται το έμβολο το οποίο εισέρχεται στο χιτώνιο και συμπιέζει το δοκίμιο εξωτερικής διαμέτρου 20 mm. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα.



Εικόνα 3.14 : Έμβολο διέλασης Φ 20

➤ Χιτώνιο

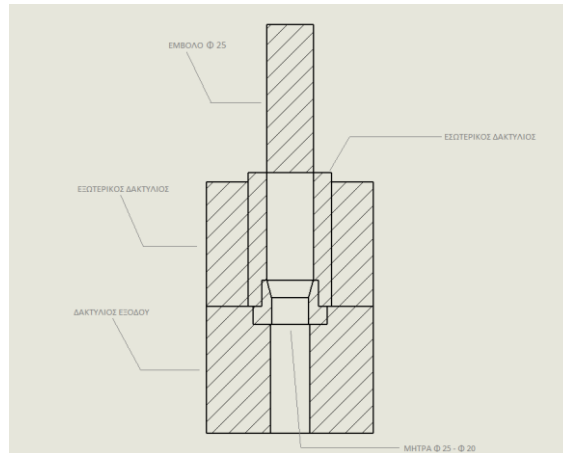
Παρακάτω παρουσιάζεται το χιτώνιο το οποίο εισέρχεται στον εσωτερικό δακτύλιο για την διέλαση δοκιμίων εξωτερικής διαμέτρου 20 mm. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα.



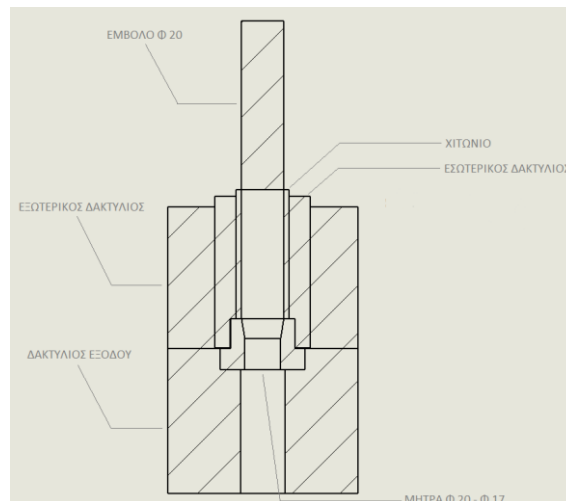
Εικόνα 3.15 : Χιτώνιο

➤ Συνολική διάταξη διέλασης

Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη διέλασης δοκιμών από 25 mm σε 20 mm και από 20 mm σε 17 mm.



Εικόνα 3.16 : Διάταξη διέλασης 1^{ου} πάσου



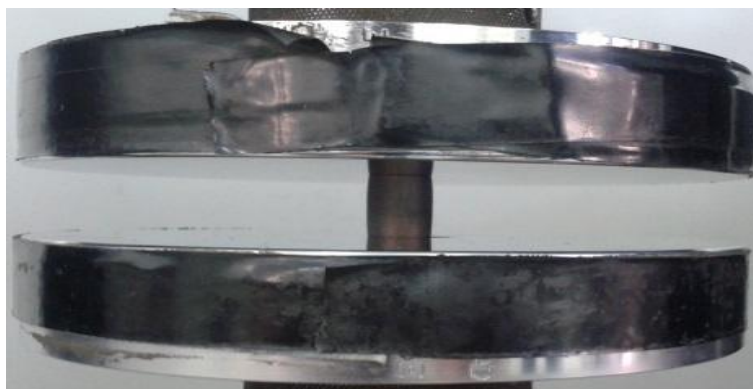
Εικόνα 3.17 : Διάταξη διέλασης 2^{ου} πάσου

3.5 Πειράματα προσδιορισμού ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών

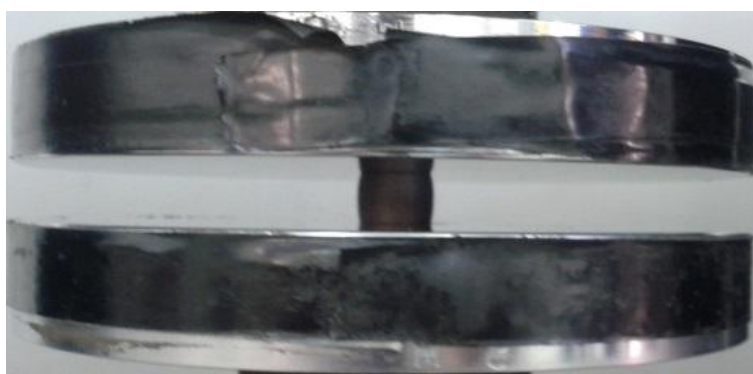
Πείραμα : Θλίψη συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου χαλκού

Πραγματοποιήθηκε αξονική συμπίεση ενός κυλινδρικού δοκιμίου χαλκού μήκους $l = 24.0 \text{ mm}$ και διαμέτρου $d = 12.0 \text{ mm}$ με ταχύτητα συμπίεσης $u = 5.0 \text{ mm}/\text{min}$

Δεδομένου ότι $l/d = 2.0 < 3.0$ αναμένεται μετά την συμπίεση το δοκίμιο να αποκτήσει βαρελοειδές σχήμα. Ακολουθούν στιγμιότυπα από την αξονική συμπίεση του δοκιμίου.



Εικόνα 3.18 : Στιγμιότυπο από την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 50 kN

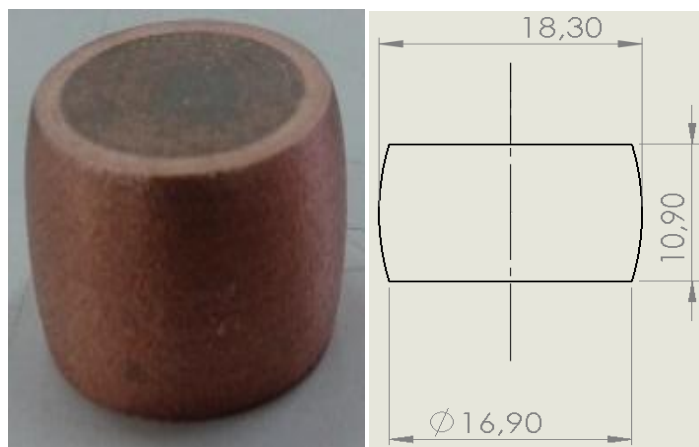


Εικόνα 3.19 : Στιγμιότυπο από την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 70 kN



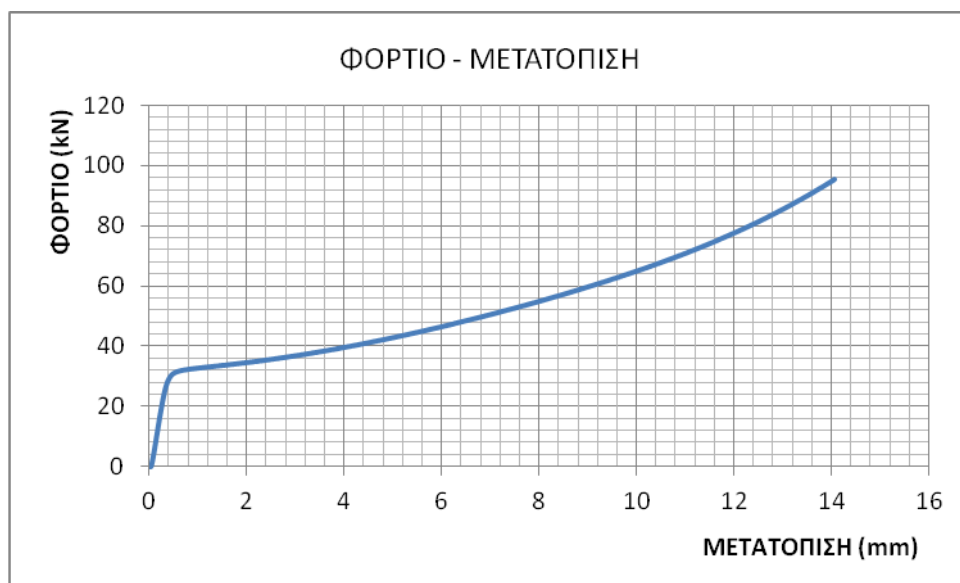
Εικόνα 3.20 : Στιγμιότυπο από την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 90 kN

Όπως αναμένονταν το δοκίμιο απέκτησε βαρελοειδές σχήμα με τις ακόλουθες τελικές διαστάσεις.



Εικόνα 3.21 : Δοκίμιο Cu μετά την αξονική θλίψη

Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την θλίψη του τεμαχίου.



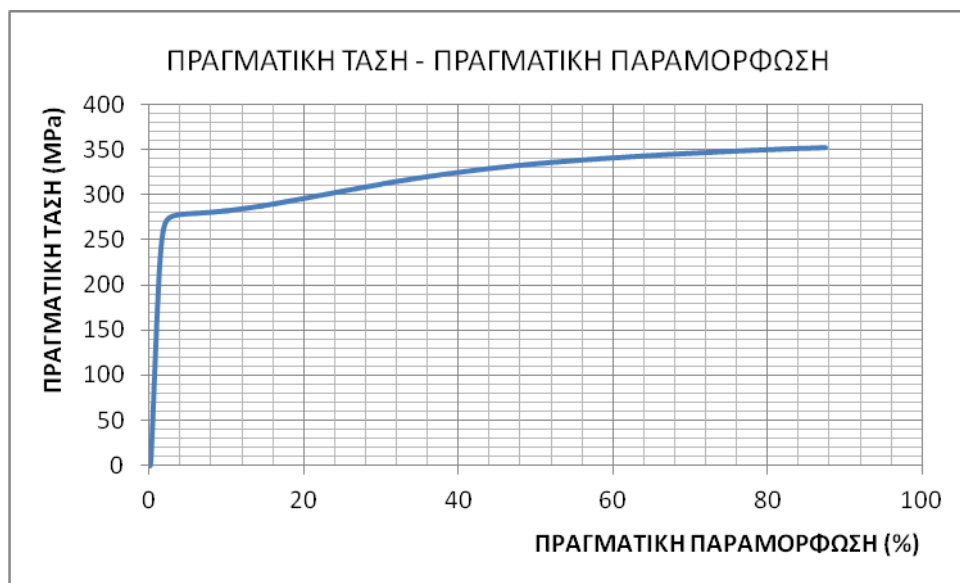
Διάγραμμα 3.1 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από την θλίψη του δοκιμίου Cu

Από την εφαρμογή των ακόλουθων σχέσεων λαμβάνεται το διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης του δοκιμίου.

$$s = \sigma \cdot (1 + e), \quad e = \frac{\Delta l}{l}, \quad \sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{4 F}{\pi d^2}$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l - \Delta l}{l} \right)$$

Όπου σ : ονομαστική τάση , e : ονομαστική παραμόρφωση , Δl : μετατόπιση , l : αρχικό μήκος , F : φορτίο , s : πραγματική τάση , ϵ : πραγματική παραμόρφωση



Διάγραμμα 3.2 : Διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης

Από το διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης προσδιορίζεται το όριο διαρροής του συμπαγούς χαλκού.

Έτσι έχουμε,

- Όριο διαρροής : $\sigma_y = 260 \text{ MPa}$

Οι λοιπές μηχανικές ιδιότητες του υλικού λαμβάνονται από την βιβλιογραφία :

Έτσι έχουμε,

- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 115 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.35$
- Πυκνότητα : $\rho = 8.9 \text{ gr/cm}^3$

Πείραμα : Συμπύεση σκόνης αλουμινίου (40+325 mesh 99.8 % pure)

Ζυγίστηκε ποσότητα σκόνης μάζας $m = 0.984 \text{ gr}$ και τοποθετήθηκε σε μήτρα διαμέτρου $d = 11.0 \text{ mm}$. Μετρήθηκε το αρχικό ύψος της σκόνης και βρέθηκε ίσο με $h_0 = 8.0 \text{ mm}$.

Πραγματοποιήθηκε συμπύεση σκόνης με ταχύτητα συμπύεσης $u = 1.0 \text{ mm}/\text{min}$

Από την ακόλουθη σχέση υπολογίζεται η αρχική πυκνότητα της σκόνης :

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

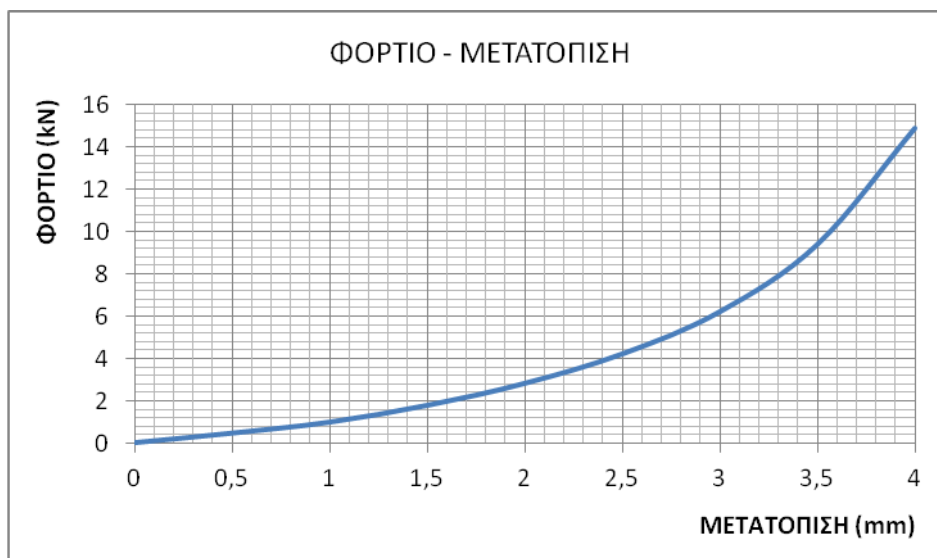
Όπου $V_0 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h_0$

Έτσι προκύπτει, $\rho_0 = 1.29 \text{ gr}/\text{cm}^3$



Εικόνα 3.22 : Προϊόν κονιομεταλλουργίας απο την συμπύεση της σκόνης Al 40+325

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατα την συμπύεση της σκόνης **Al 40+325**



Διάγραμμα 3.3 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την συμπύεση της σκόνης Al 40+325

Με την χρήση του ανωτέρω πειραματικού διαγράμματος και με την εφαρμογή των ακόλουθων σχέσεων θα κατασκευάζεται το διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου (ε_{vp}) - πρώτης αναλλοίωτης (J_1).

Ο όγκος του θαλάμου της μήτρας δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$V = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h$$

όπου d : διάμετρος του θαλάμου, h : εκάστοτε ύψος συμπίεσματος ($h = h_0 - h_{\varepsilon\mu\beta}$).

Η πλαστική παραμόρφωση όγκου δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\varepsilon_{vp} = \ln \left(\frac{V_0}{V} \right)$$

Η πίεση συμπίεσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

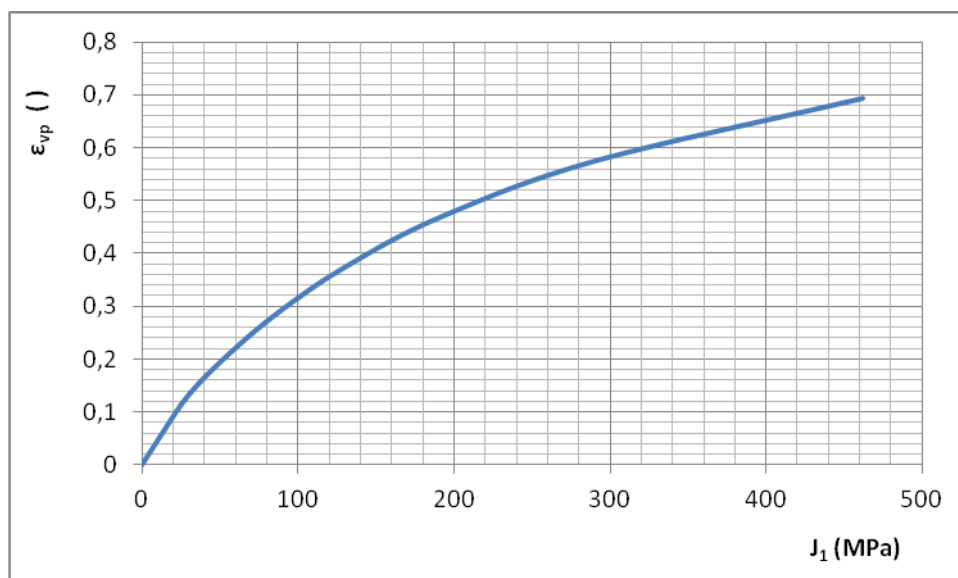
$$P = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

όπου d : διάμετρος του θαλάμου, F : φορτίο συμπίεσης

Η πρώτη αναλλοίωτη δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$J_1 = 3 P$$

Ακολουθεί το διάγραμμα (ε_{vp}) - (J_1)



Διάγραμμα 3.4 : Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου - πρώτης αναλλοίωτης

Η πλαστική παραμόρφωση όγκου δίνεται επίσης από την ακόλουθη σχέση :

$$\varepsilon_{vp} = W \cdot [1 - e^{-D \cdot J_1}]$$

Επομένως, θα γίνει προσαρμογή μιας καμπύλης της ανωτέρω μορφής στην πειραματική προσδιορίζοντας τους συντελεστές **W** και **D**.

Με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται οι συντελεστές **W** και **D**.

Από την προσαρμογή οι συντελεστές βρέθηκαν ίσοι με :

$$W = 0.736$$

$$D = 0.0056 \text{ MPa}^{-1}$$

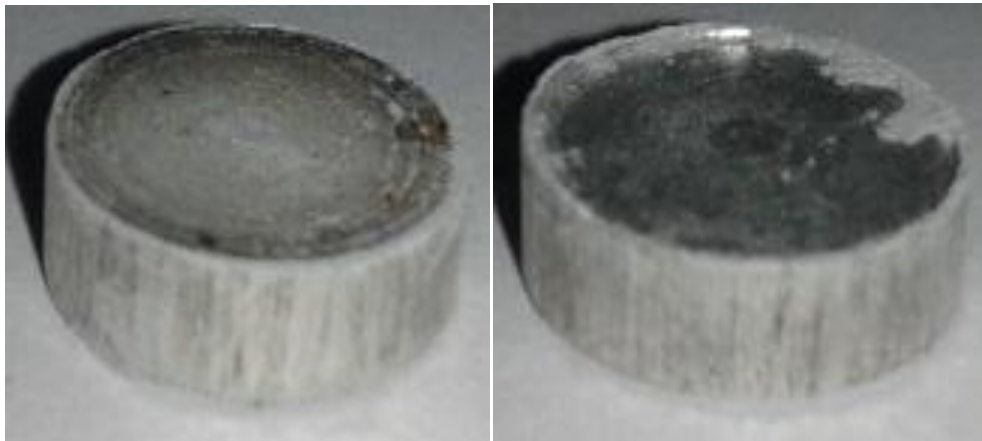
Πείραμα : Συμπύεση σκόνης αλουμινίου (325 mesh 99.5 % pure)

Ζυγίστηκε ποσότητα σκόνης μάζας $m = 0.789 \text{ gr}$ και τοποθετήθηκε σε μήτρα διαμέτρου $d = 11.0 \text{ mm}$. Μετρήθηκε το αρχικό ύψος της σκόνης και βρέθηκε ίσο με $h_0 = 6.0 \text{ mm}$.

Πραγματοποιήθηκε συμπύεση σκόνης με ταχύτητα συμπύεσης $u = 1.0 \text{ mm}/\text{min}$

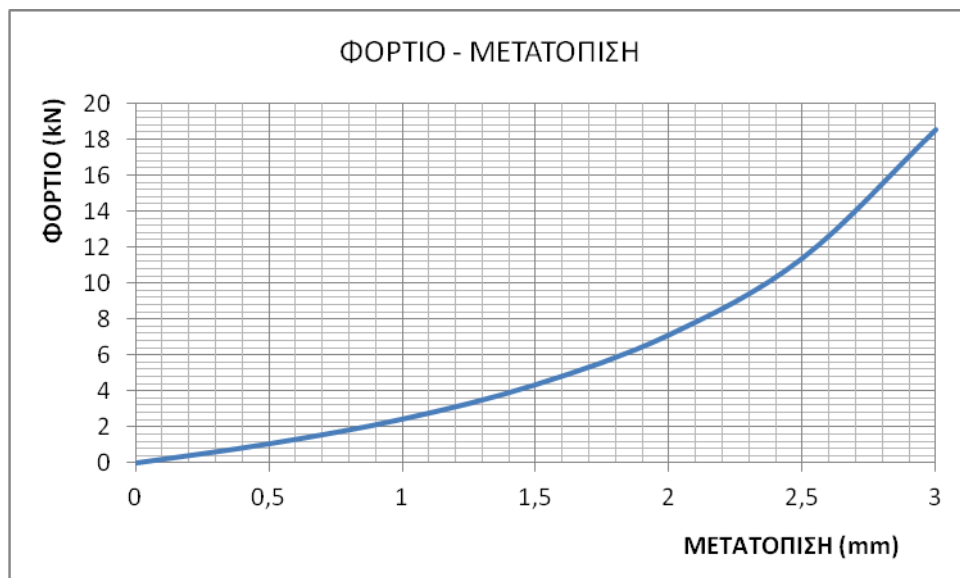
Ομοίως υπολογίζεται η αρχική πυκνότητα της σκόνης :

$$\rho_0 = 1.38 \text{ gr}/\text{cm}^3$$



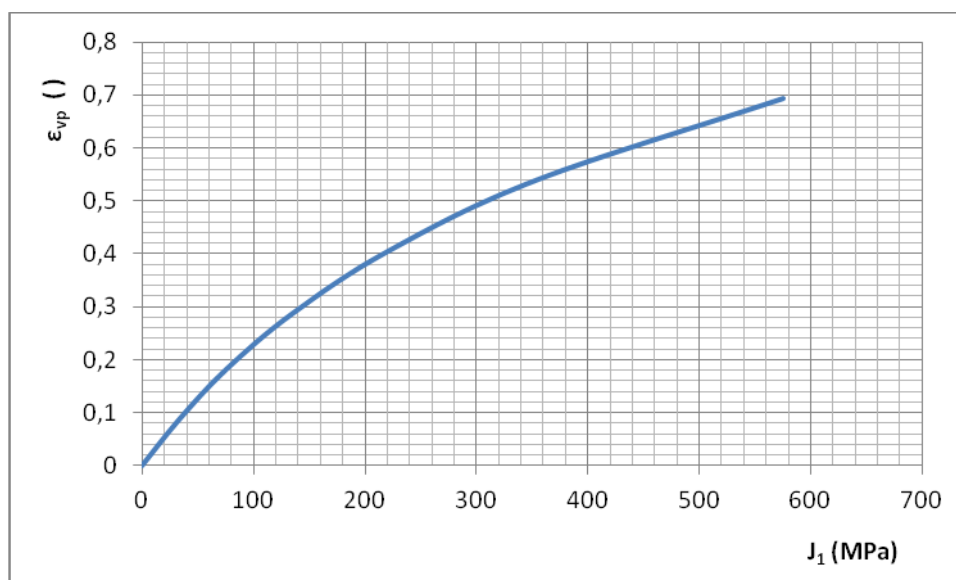
Εικόνα 3.23 : Προϊόν κωνιομεταλλουργίας απο την συμπύεση της σκόνης Al 325

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατα την συμπύεση της σκόνης **Al 325**



Διάγραμμα 3.5 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την συμπύεση της σκόνης Al 325

Ομοίως, με την χρήση του ανωτέρω πειραματικού διαγράμματος και με την εφαρμογή των ανωτέρων σχέσεων θα κατασκευάζεται το διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου (ϵ_{vp}) - πρώτης αναλλοίωτης (J_1).



Διάγραμμα 3.6 : Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου - πρώτης αναλλοίωτης

Αντιστοίχως, θα γίνει προσαρμογή μιας καμπύλης της προαναφερθείσας μορφής στην πειραματική προσδιορίζοντας τους συντελεστές W και D .

Ομοίως, με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται οι συντελεστές W και D .

Από την προσαρμογή οι συντελεστές βρέθηκαν ίσοι με :

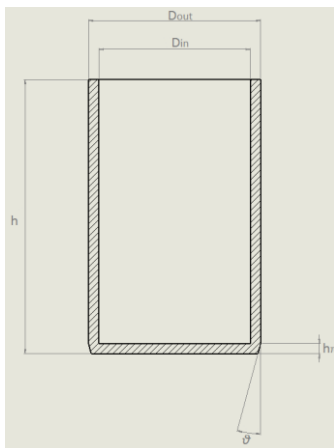
$$W = 0.825$$

$$D = 0.0031 \text{ MPa}^{-1}$$

3.6 Πειράματα διέλασης σε κύπελλα χωρίς πορώδες στο εσωτερικό τους

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλο πάχους 1.5 mm χωρίς πορώδες υλικό στο εσωτερικό του

Πραγματοποιήθηκε η κατεργασία της διέλασης σε κύπελλο από χαλκό με τις ακόλουθες αρχικές διαστάσεις.



Εικόνα 3.24 : Διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm

ΔΟΚΙΜΙΟ	Dout (mm)	Din (mm)	h (mm)	hπ (mm)	ϑ (μοίρες)
γ	25.0	21.9	38.7	1.6	15

Πίνακας 3.1 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm

- Δοκίμιο γ

Μετά τη διέλαση το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 41.3\text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+6.7 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.03\text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 16.6\text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 1.72\text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+11.0 %**)

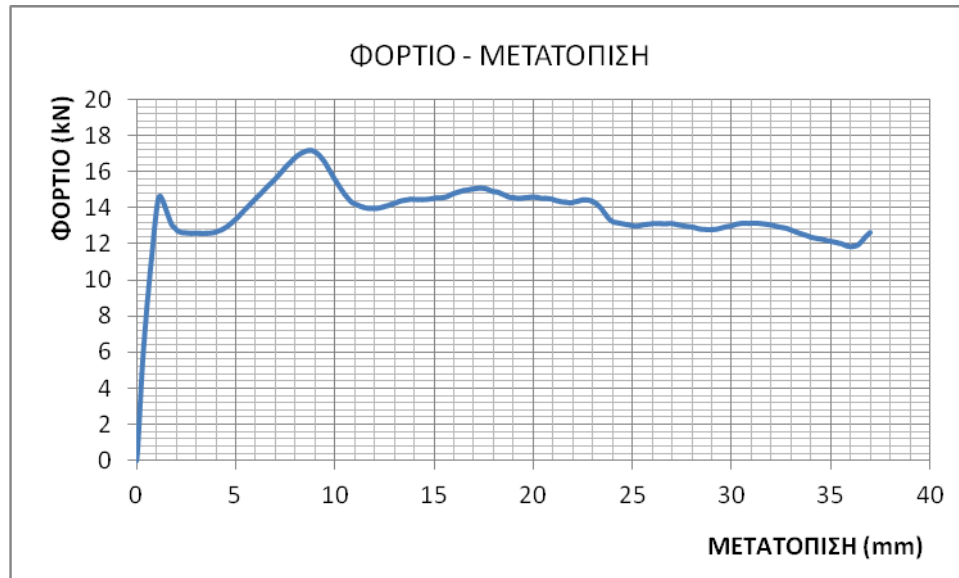


Εικόνα 3.25 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm μετά τη διέλαση

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται μια κοιλότητα στον πυθμένα βάθους **8.0 mm**.

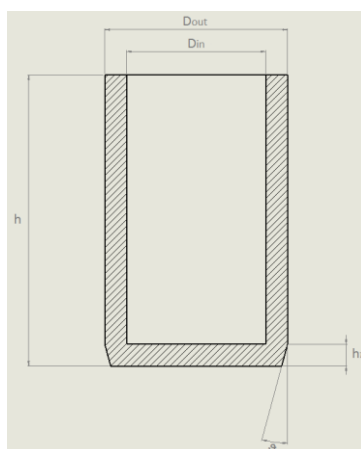
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.7 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από την διέλαση του Δοκιμίου γ

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλα πάχους 3.0 mm χωρίς πορώδες υλικό στο εσωτερικό τους

Πραγματοποιήθηκε η κατεργασία της διέλασης σε δυο κύπελλα από χαλκό με τις ακόλουθες αρχικές διαστάσεις.



Εικόνα 3.26 : Διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm

ΔΟΚΙΜΙΟ	Dout (mm)	Din (mm)	h (mm)	hp (mm)	ϑ (μοίρες)
β	25.0	18.6	40.1	3.0	15

Πίνακας 3.2 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm

• Δοκίμιο β

Μετά τη διέλαση το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 48.6\text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+21.2 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.1\text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.2\text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 3.45\text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+7.8 %**)

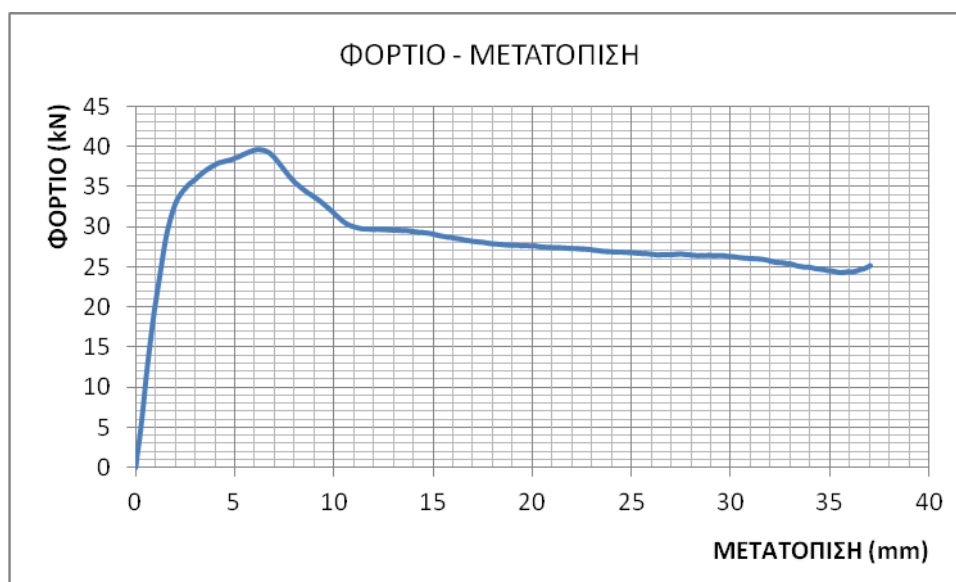


Εικόνα 3.27 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 3.0 mm μετά τη διέλαση

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **4.0 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.8 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από την διέλαση του Δοκιμίου β

3.7 Πειράματα διέλασης σε κύπελλα με σκόνη αλουμινίου στο εσωτερικό τους

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλα πάχους 1.5 mm με σκόνη αλουμινίου (Al 40+325) στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 3.28 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm με σκόνη Al 40+325

Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμίων ονομαστικού πάχους 1.5 mm παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Dout (mm)	Din (mm)	h (mm)	hπ (mm)	θ (μοίρες)
1	24.8	22.1	39.2	1.2	15
2	24.8	22.2	38.8	1.4	15

Πίνακας 3.3 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων 1 και 2

- Δοκίμιο 1

1ο πάσο

Μετά το πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 46.9\text{mm}$ (Αύξηση κατά **+19.6 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2\text{mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 17.3\text{mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 1.45\text{mm}$ (Αύξηση κατά **+7.4 %**)

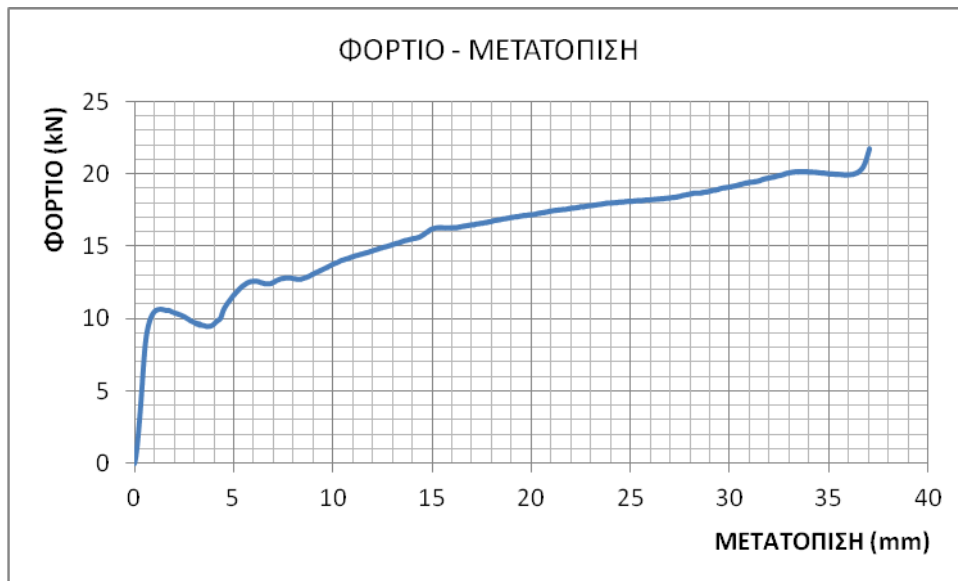


Εικόνα 3.29 : Δοκίμιο 1 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **5.1 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.9 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκίμιου 1

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 30.8 \text{ mm}$

Μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 33.5 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+8.8 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.7 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 1.6 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+10.3 %**)



Εικόνα 3.30 : Δοκίμιο 1 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **5.9 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου



Διάγραμμα 3.10 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 1

- Δοκίμιο 2

1ο πάσο

Μετά πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 46.6 \text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+20.1 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 17.4 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 1.4 \text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+7.7 %**)

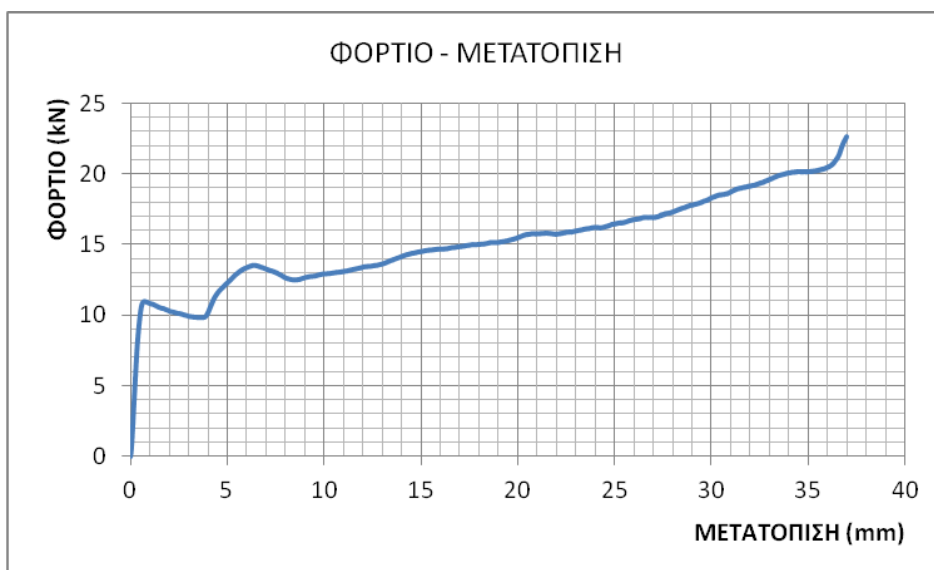


Εικόνα 3.31 : Δοκίμιο 2 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **5.6 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου



Διάγραμμα 3.11 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 2

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 31.9 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 34.5 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+8.2 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.8 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 1.55 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+10.7 %**)

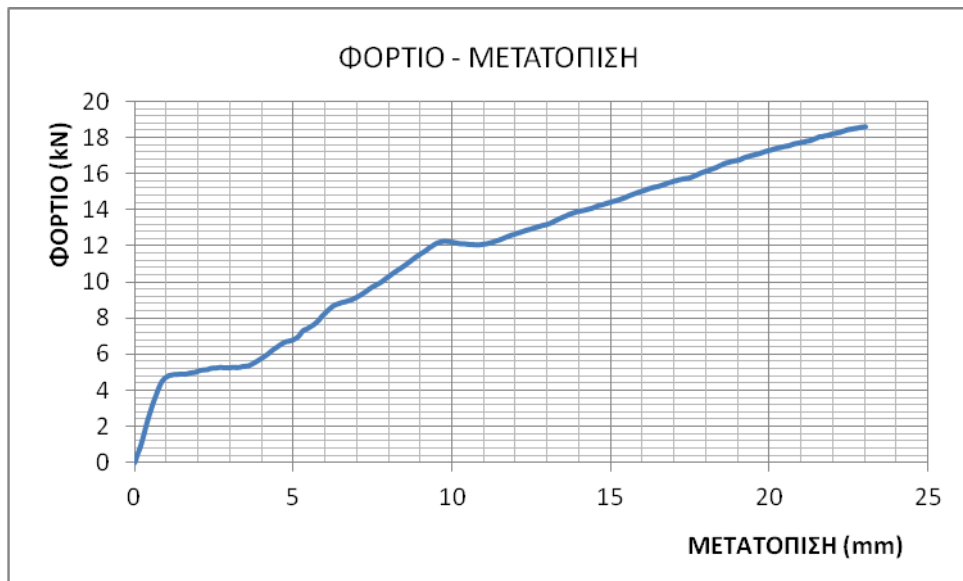


Εικόνα 3.32 : Δοκίμιο 2 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **6.7 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου



Διάγραμμα 3.12 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 2

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλα πάχους 1.5 mm με πορώδες αλουμινίου (Al 325) στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 3.33 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm με σκόνη Al 325

Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμών ονομαστικού πάχους 1.5 mm παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Dout (mm)	Din (mm)	h (mm)	hπ (mm)	θ (μοίρες)
3	25.0	21.9	38.3	1.6	15
4	25.0	22.2	38.4	1.4	15

Πίνακας 3.4 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμών 3 και 4

- Δοκίμιο 3

1ο πάσο

Μετά πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 41.1 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+7.3 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 16.8 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 1.7 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+9.7 %**)

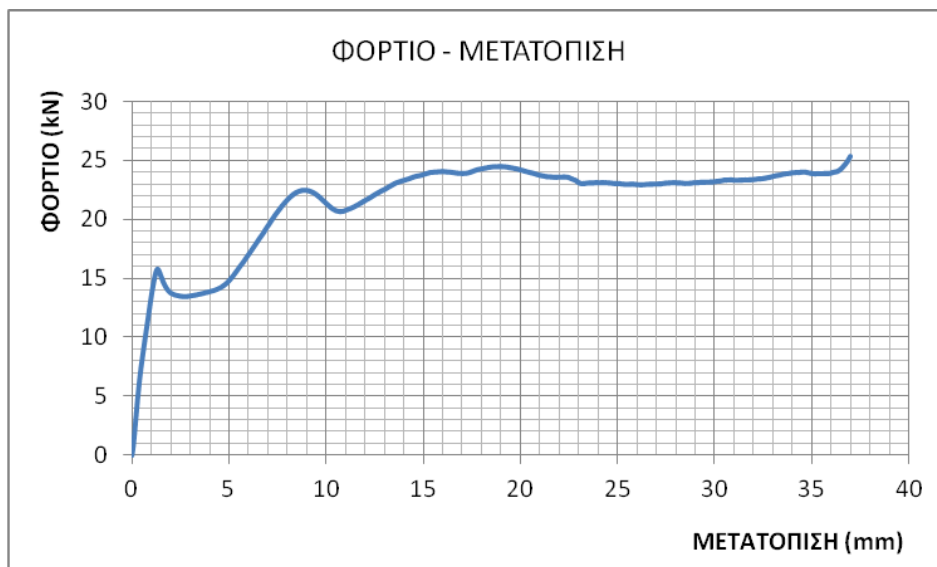


Εικόνα 3.34 : Δοκίμιο 3 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρούμε μια κοιλότητα στον πυθμένα βάθους **6.0 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.13 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 3

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 25.1 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 28.4 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+13.2 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.3 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 1.8 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+5.9 %**)

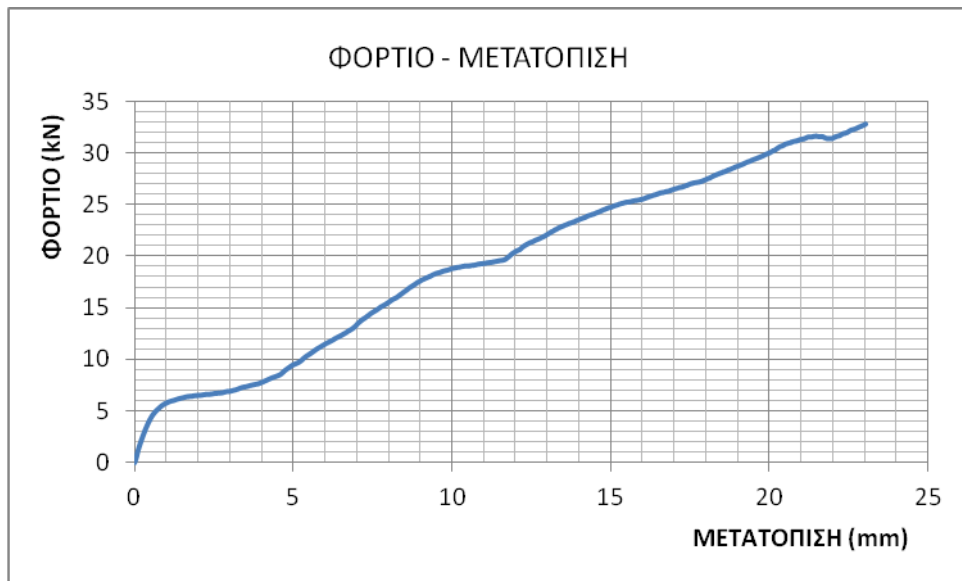


Εικόνα 3.35 : Δοκίμιο 3 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι η κοιλότητα στον πυθμένα έχει επιμηκυνθεί και έχει βάθος **7.3 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου



Διάγραμμα 3.14 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκίμιου 3

- Δοκίμιο 4

1ο πάσο

Μετά το πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 46.6 \text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+21.4 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 17.2 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 1.5 \text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+7.1 %**)

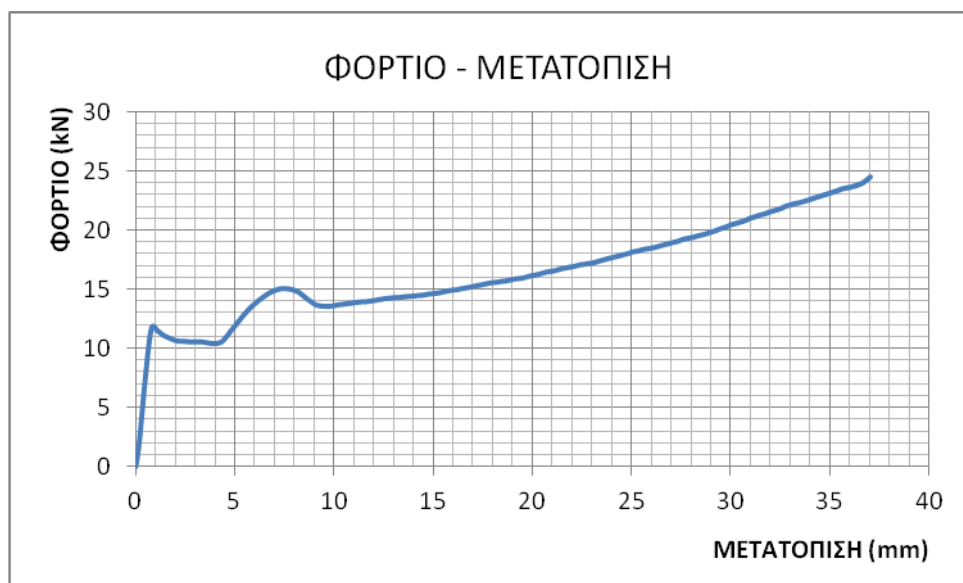


Εικόνα 3.36 : Δοκίμιο 4 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **5.7 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.15 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 4

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 30.0 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 32.8 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+9.3 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.6 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 1.65 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+10.0 %**)

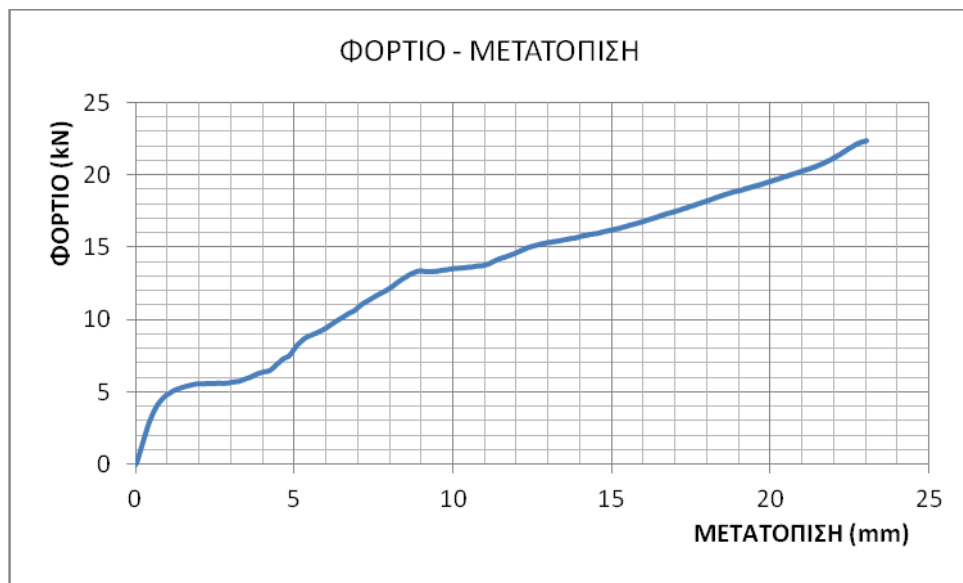


Εικόνα 3.37 : Δοκίμιο 4 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **6.9 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.16 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 4

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλα πάχους 3.0 mm με πορώδες αλουμινίου (Al 40+325) στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 3.38 : Δοκίμο ονομαστικού πάχους 3.0 mm με σκόνη Al 40+325

Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμών ονομαστικού πάχους 3.0 mm παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΔΟΚΙΜΙΟ	D _{out} (mm)	D _{in} (mm)	h (mm)	h _π (mm)	θ (μοίρες)
A	24.9	18.9	39.9	3.2	15
B	25.0	19.1	40.1	3.1	15

Πίνακας 3.5 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμών A και B

- Δοκίμο A

1ο πάσο

Μετά πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 48.9 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+22.6 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.9 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.15 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+5.0 %**)

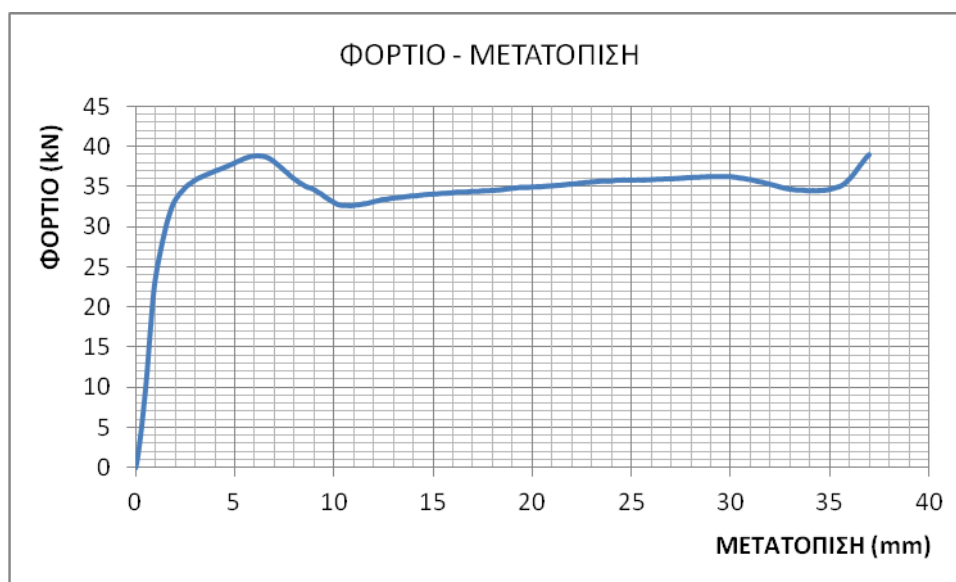


Εικόνα 3.39 : Δοκίμο A μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **4.3 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.17 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου A

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 29.6 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 34.2 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+15.5 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 10.2 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.35 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+6.4 %**)

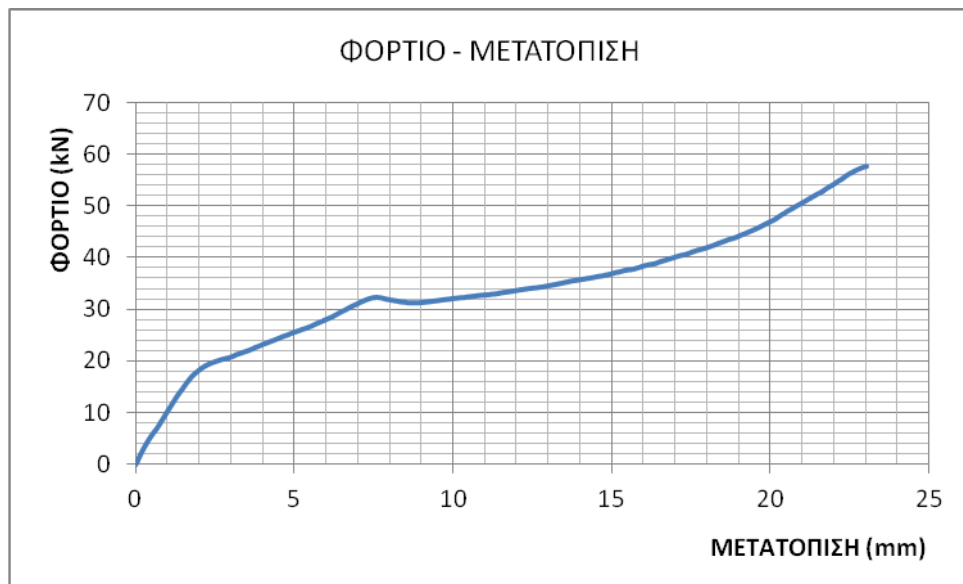


Εικόνα 3.40 : Δοκίμιο Α μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **5.4 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.18 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Α

- Δοκίμιο Β

1ο πάσο

Μετά το πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 48.9 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+22.0 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.9 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 3.15 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+6.8 %**)

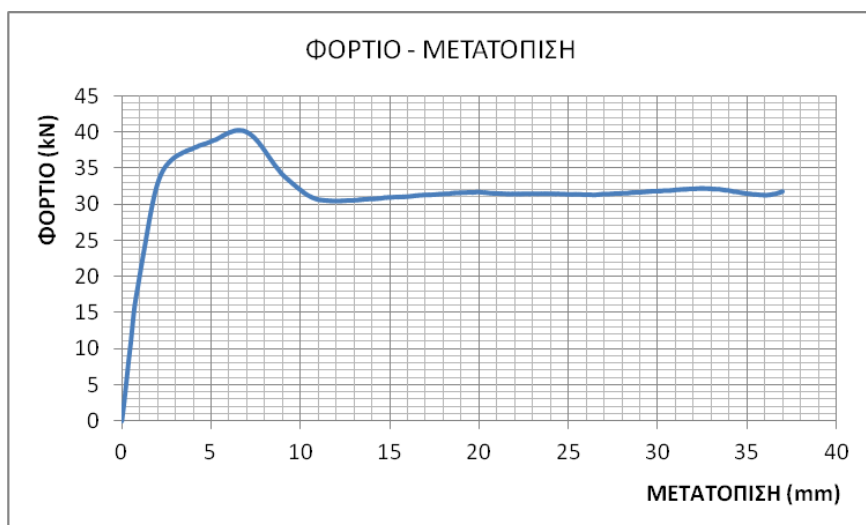


Εικόνα 3.41 : Δοκίμιο Β μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **4.2 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.19 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Β

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 29.2 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 33.5 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+14.7 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 10.0 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.45 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+9.5 %**)

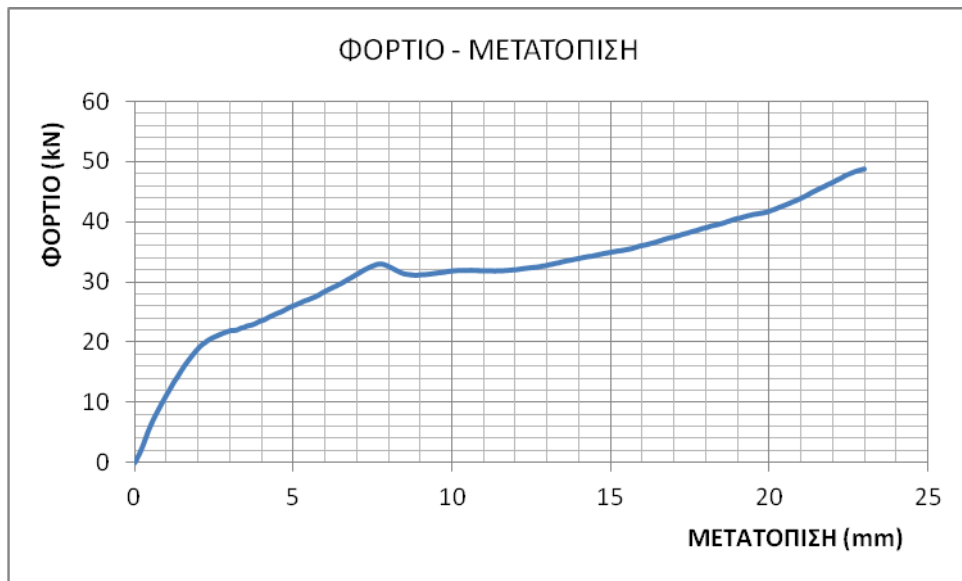


Εικόνα 3.42 : Δοκίμιο B μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμυκυνθεί και έχει ύψος **5.4 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.20 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκίμιου Β

Πείραμα : Διέλαση σε κύπελλα πάχους 3.0 mm με πορώδες αλουμινίου (Al 325) στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 3.43 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 3.0 mm με σκόνη Al 325

Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμών ονομαστικού πάχους 3.0 mm παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΔΟΚΙΜΙΟ	D _{out} (mm)	D _{in} (mm)	h (mm)	h _π (mm)	θ (μοίρες)
Γ	25.0	19.3	40.1	3.1	15
Δ	25.0	18.7	40.0	3.3	15

Πίνακας 3.6 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμών Γ και Δ

- Δοκίμιο Γ

1ο πάσο

Μετά το πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 49.5\text{mm}$ (Αύξηση κατά **+23.4 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2\text{mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 14.2\text{mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out}-D_{in}}{2} = 3.0\text{mm}$ (Αύξηση κατά **+5.3 %**)

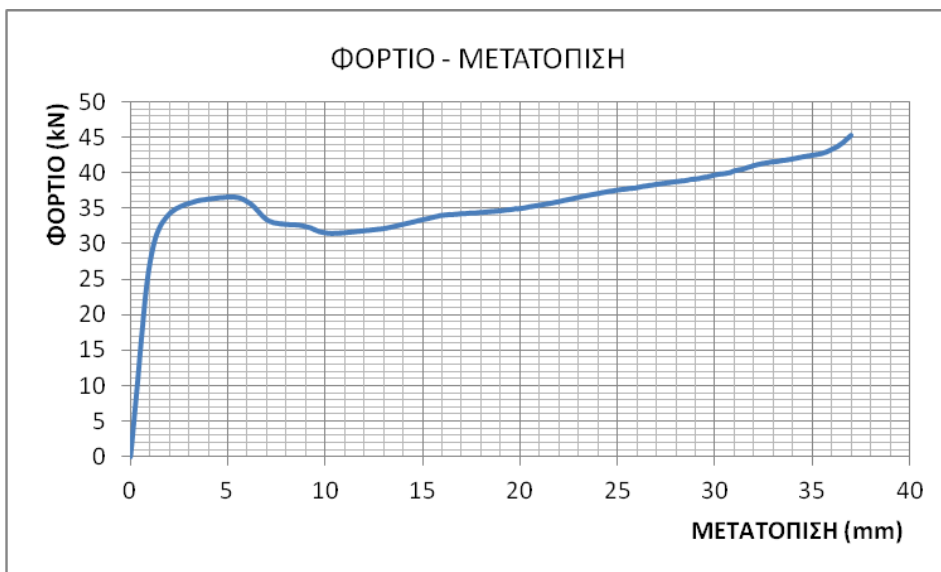


Εικόνα 3.44 : Δοκίμιο Γ μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **4.8 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.21 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκίμιου Γ

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 30.1 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 34.8 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+15.6 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 10.6 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.15 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+5.0 %**)

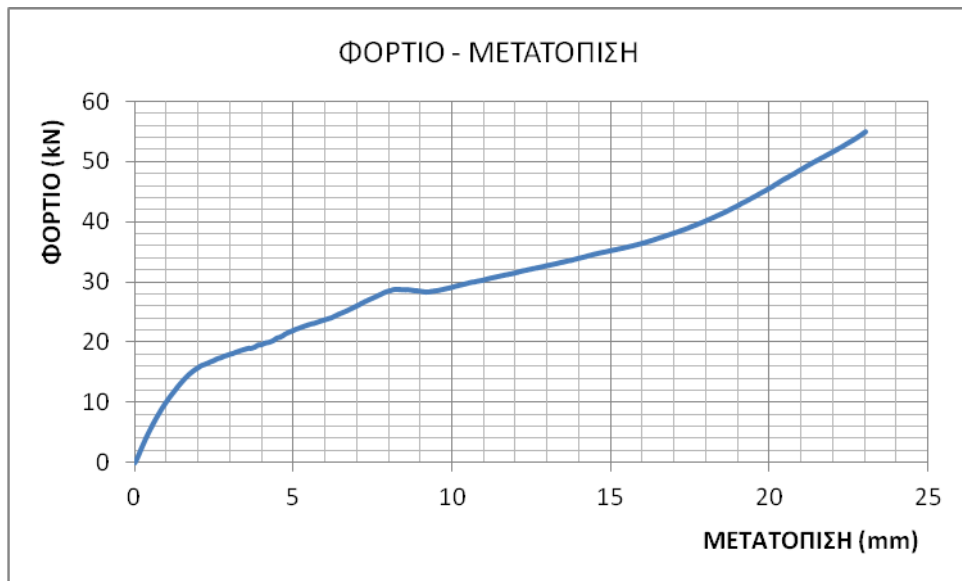


Εικόνα 3.45 : Δοκίμιο Γ μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **5.7 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.22 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκίμιου Γ

- Δοκίμιο Δ

1ο πάσο

Μετά πρώτο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 50.1\text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+25.2 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 20.2\text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 13.7\text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.25\text{ mm}$ (Αύξηση κατα **+3.2 %**)

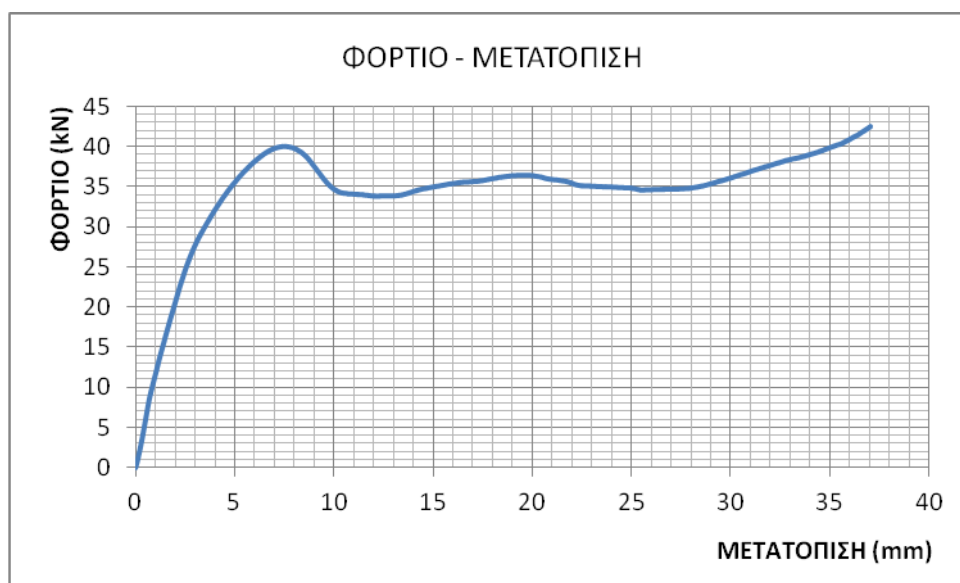


Εικόνα 3.46 : Δοκίμιο Δ μετά το πρώτο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ένα εξόγκωμα στον πυθμένα ύψους **1.7 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου



Διάγραμμα 3.23 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Δ

2ο πάσο

Μετά το πέρας του πρώτου σταδίου διέλασης τροχίσθηκε το κωνικό τμήμα του δοκιμίου. Το μήκος του μετρήθηκε ίσο με : $h_{αρχ} = 27.1 \text{ mm}$

Μετά δεύτερο στάδιο διέλασης το δοκίμιο έχει την ακόλουθη μορφή με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Συνολικό μήκος : $h = 32.8 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+21.0 %**)
- Εξωτερική διάμετρος : $D_{out} = 16.9 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος : $D_{in} = 10.1 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος : $t_{final} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} = 3.4 \text{ mm}$ (Αύξηση κατά **+4.6 %**)

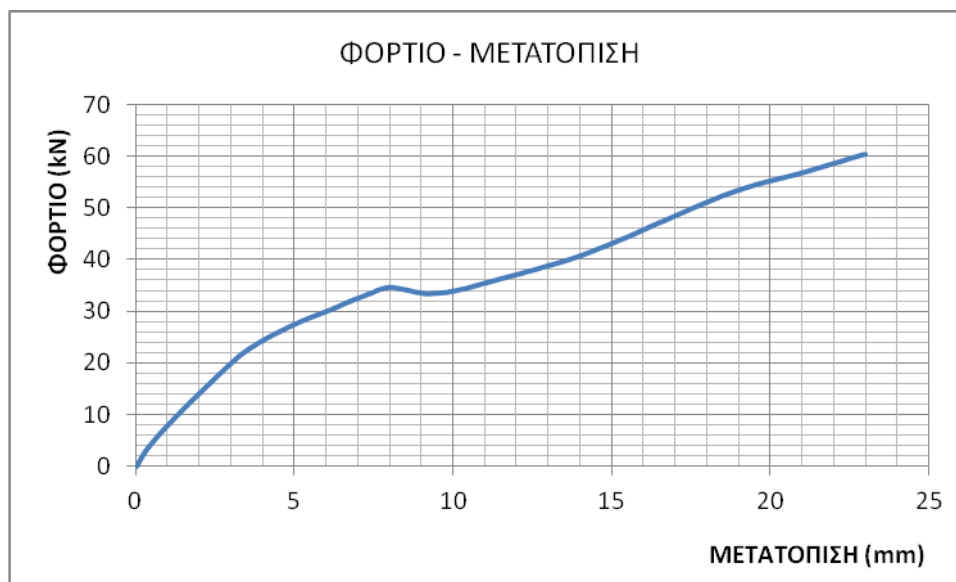


Εικόνα 3.47 : Δοκίμιο Δ μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης

Παρατηρήσεις

Σχετικά με την μορφή του τεμαχίου παρατηρείται ότι το εξόγκωμα έχει επιμηκυνθεί και έχει ύψος **2.0 mm**.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης κατά την κατεργασία της διέλασης του τεμαχίου.



Διάγραμμα 3.24 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης από το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Δ

3.8 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Σε ότι αφορά τις γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμών παρατηρούνται τα εξής :

- Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος τοιχώματος του σωλήνα τόσο μεγαλύτερη είναι η επιμήκυνση και κατά συνέπεια τόσο μικρότερη θα είναι η αύξηση του πάχους.
- Όσο πιο λεπτόκοκκη είναι η σκόνη τόσο μεγαλύτερη είναι η επιμήκυνση του δοκιμίου και κατά συνέπεια τόσο μικρότερη θα είναι η αύξηση του πάχους.
- Σημαντικό ρόλο, επίσης, παίζει το πάχος του πυθμένα. Συγκεκριμένα, μια αύξηση του πάχους του πυθμένα μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση στην επιμήκυνση του δοκιμίου. Ακόμη, μπορεί να προσδώσει και διαφορετική μορφή όπως στην περίπτωση των δοκιμών 3 και 4.

Σε ότι αφορά τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης παρατηρούμε τα εξής :

- Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος τοιχώματος του σωλήνα τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που αναπτύσσεται
- Όσο πιο λεπτόκοκκη είναι η σκόνη τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που αναπτύσσεται.

Κεφάλαιο 4. Μεταλλογραφική ανάλυση

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται υπολογισμός του πορώδους και της σκληρότητας σε κάθε δοκίμιο. Ο εν λόγω υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένες κάθε φορά τιμές ακτίνας (με κατεύθυνση από το κέντρο προς την περιφέρεια). Επίσης, παρουσιάζονται απόψεις της διεπιφάνειας χαλκού-αλουμινίου για κάθε δοκίμιο και εξάγονται συμπεράσματα.

4.2 Υπολογισμός πορώδους

Ο υπολογισμός του πορώδους σε κάθε δοκίμιο έγινε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα **ASTM E562** και **ASTM E1245**. Συγκεκριμένα, έγινε λήψη πέντε εικόνων από κάθε περιοχή (τιμή ακτίνας με κατεύθυνση από το κέντρο προς την περιφέρεια) των δοκιμίων προκειμένου να πετύχουμε στατιστική ακρίβεια 33% στον υπολογισμό του πορώδους, όπως ορίζεται από τα ανωτέρω διεθνή πρότυπα. Οι απαραίτητες μετρήσεις για τον υπολογισμό του πορώδους πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού **Image J** ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

- Μετατροπή των εικόνων από έγχρωμες σε ασπρόμαυρες.
- Τονισμός (αύξηση αντίθεσης) των σκούρων περιοχών επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή της παραμέτρου *threshold*.
- Καταγραφή του ποσοστού των σκούρων περιοχών επί της συνολικής εικόνας.
- Υπολογισμός της μέσης τιμής σε κάθε περιοχή του δοκιμίου και αποτύπωσή της σε μορφή διαγράμματος.

4.3 Υπολογισμός σκληρότητας

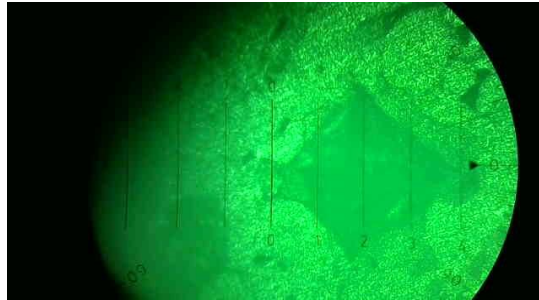
Οι σκληρομετρήσεις έγιναν με την μέθοδο *Vickers* η οποία αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια :

- Ο διεισδυτής πυραμιδικής γεωμετρίας διεισδύει στο δοκίμιο υπό το σταθερό φορτίο των **0.5 kp (P=4.902 N)** για χρονικό διάστημα **15 sec**
- Μόλις περάσει το εν λόγω χρονικό διάστημα τότε ο διεισδυτής απομακρύνεται και μετράται το μήκος των διαγωνίων του αποτυπώματος
- Υπολογίζεται η μέση τιμή των διαγωνίων (**d**) και σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο
- Υπολογίζεται η τιμή της σκληρότητας του δοκιμίου σε κάθε περιοχή

$$HV = \frac{0.1891 \cdot P}{d^2} [N/mm^2]$$

Σημείωση

Στα δοκίμια 1 και 2, στο πρώτο πάσο η μέση τιμή των διαγωνίων ήταν εκτός ορίων. Για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των τιμών σκληρότητας για τα δοκίμια αυτά. Η πολύ μικρή σκληρότητα σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο πορώδες οδηγούσαν σε υποχώρηση των κόκκων της μεταλλικής σκόνης στην περιοχή γύρω από το χώρο διείσδυσης. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης πυκνότητας και διαμέτρου των πόρων δεν ήταν διακριτά τα όρια του αποτυπώματος. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η μορφή του εν λόγω μη αξιολογήσιμου αποτυπώματος.

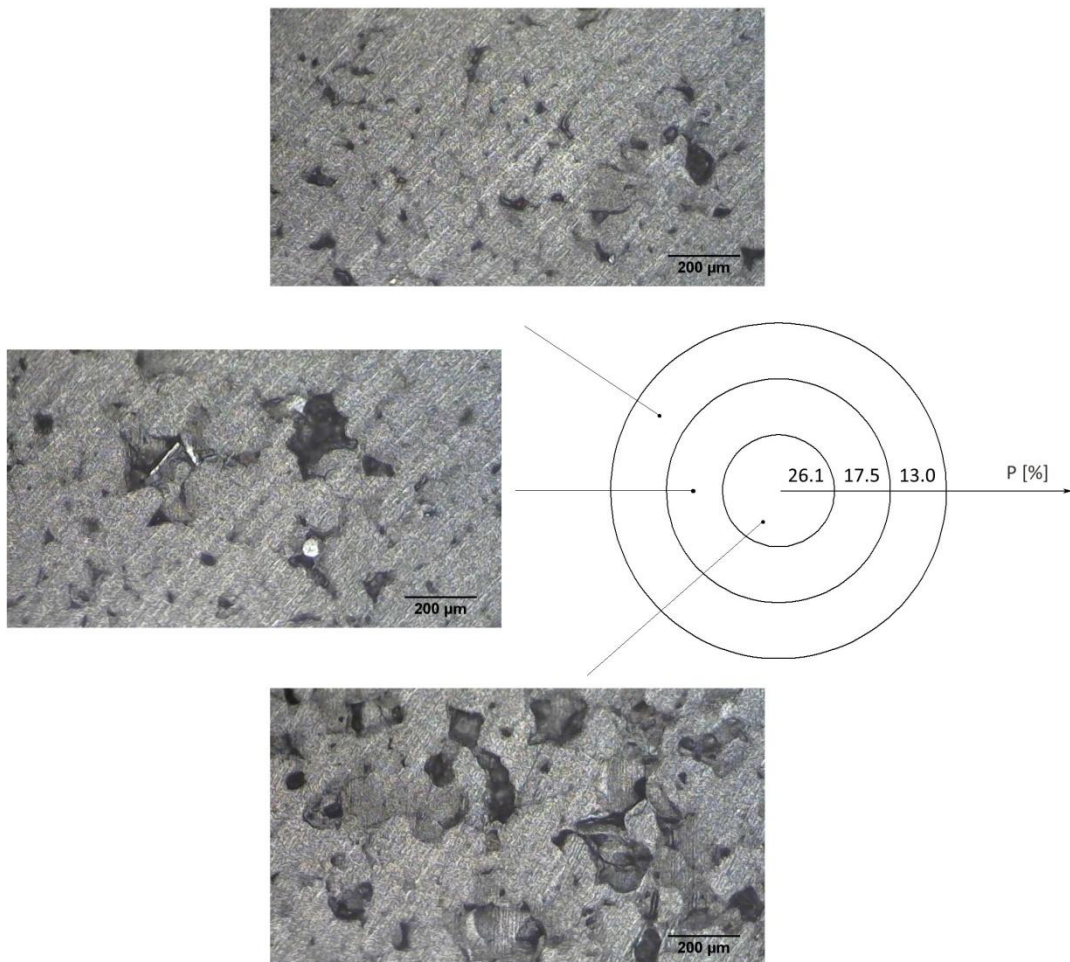


Εικόνα 4.1 : Άποψη αποτυπώματος σκληρομέτρησης Vickers στο Δοκίμιο 1.

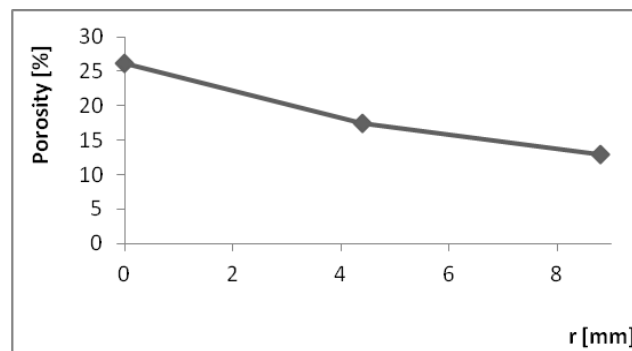
4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Δοκίμια πάχους 1.5 mm σκόνης αλουμινίου Al 40+325

- Δοκίμιο 1
- Πάσο 1



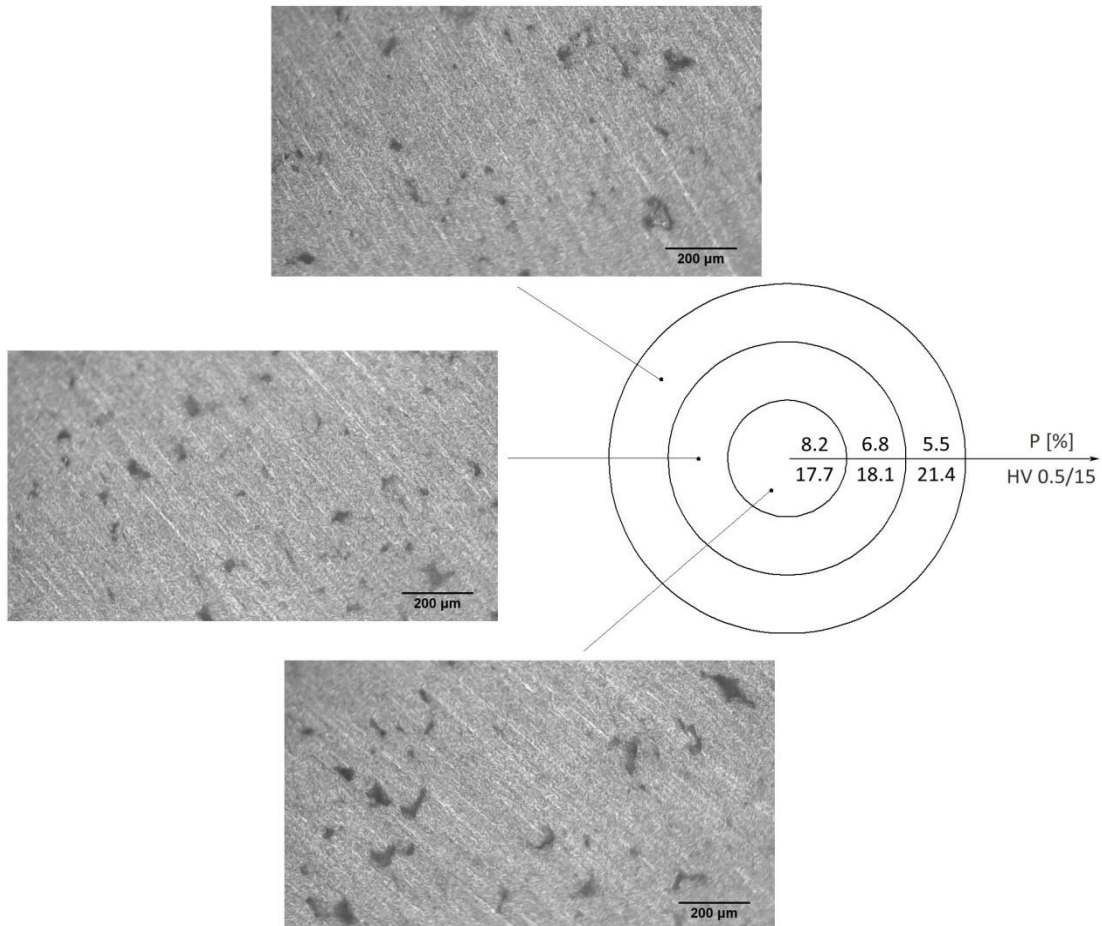
Εικόνα 4.2 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκίμιου 1 στο 1ο πάσο



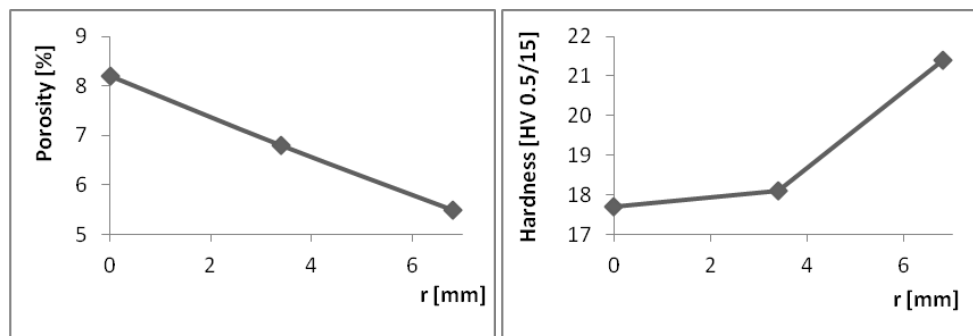
Διάγραμμα 4.1 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους του Δοκίμιου 1 στο 1ο πάσο

Στο πρώτο πάσο του δοκιμίου 1 παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι μεγάλης διαμέτρου και πυκνότητας με συνέπεια να μην είναι εφικτή η μέτρηση σκληρότητας. Παρατηρήθηκε υποχώρηση του υποστρώματος της ελεγχόμενης επιφάνειας κατά την εισχώρηση του διεισδυτή, αφήνοντας έτσι ένα μη ορθό αποτύπωμα, βλ. Εικόνα 4.1.

➤ Πάσο 2

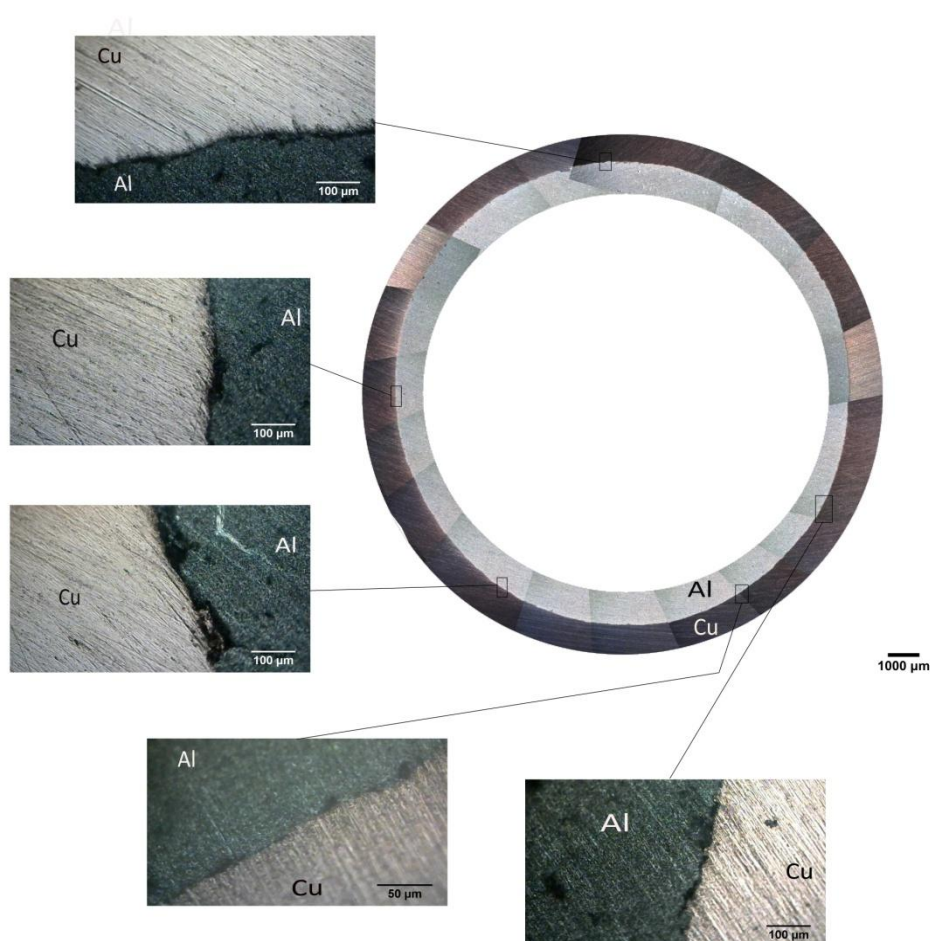


Εικόνα 4.3 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 1 στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.2 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 1 στο 2ο πάσο

Στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου 1 παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Η διάμετρος και η πυκνότητα των πόρων έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας, ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας, όπου η απότομη αύξηση της σκληρότητας είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων αντίδρασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (διεπιφάνεια σωλήνα-πυρήνα).

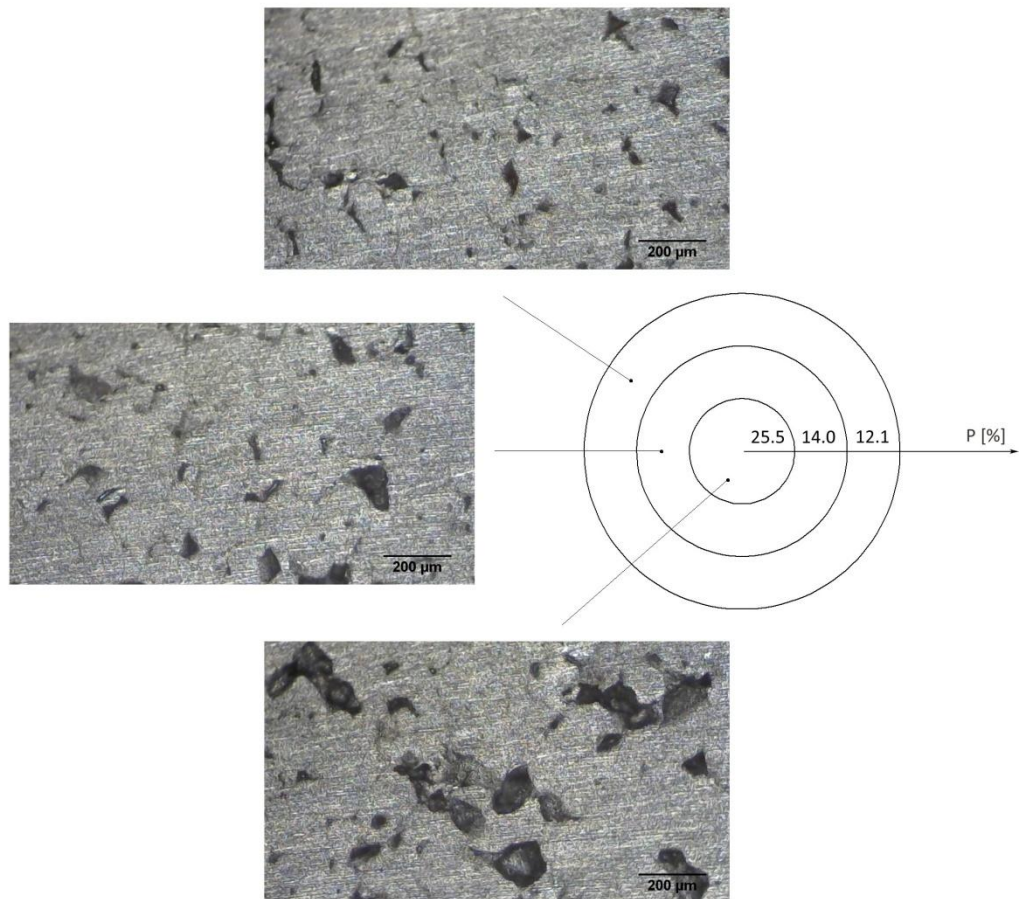


Εικόνα 4.4 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 1 (2ο πάσο)

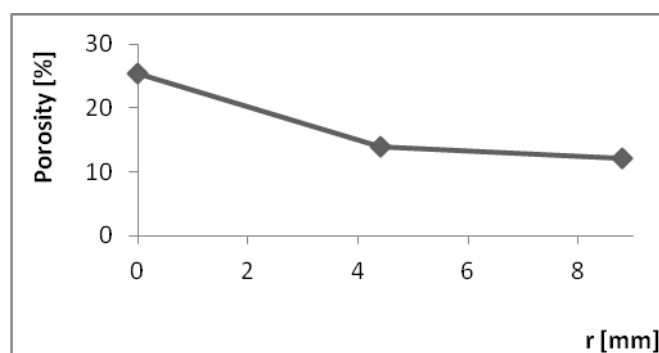
Παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές μη καλής διεπιφάνειας όπου εμφανίζονται πόροι μεγάλου μεγέθους και βάθους. Επίσης, παρατηρούνται περιοχές της διεπιφάνειας με μικρούς και πυκνούς πόρους μικρότερου βάθους.

- Δοκίμιο 2

- Πάσο 1



Εικόνα 4.5 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 2 στο 1ο πάσο

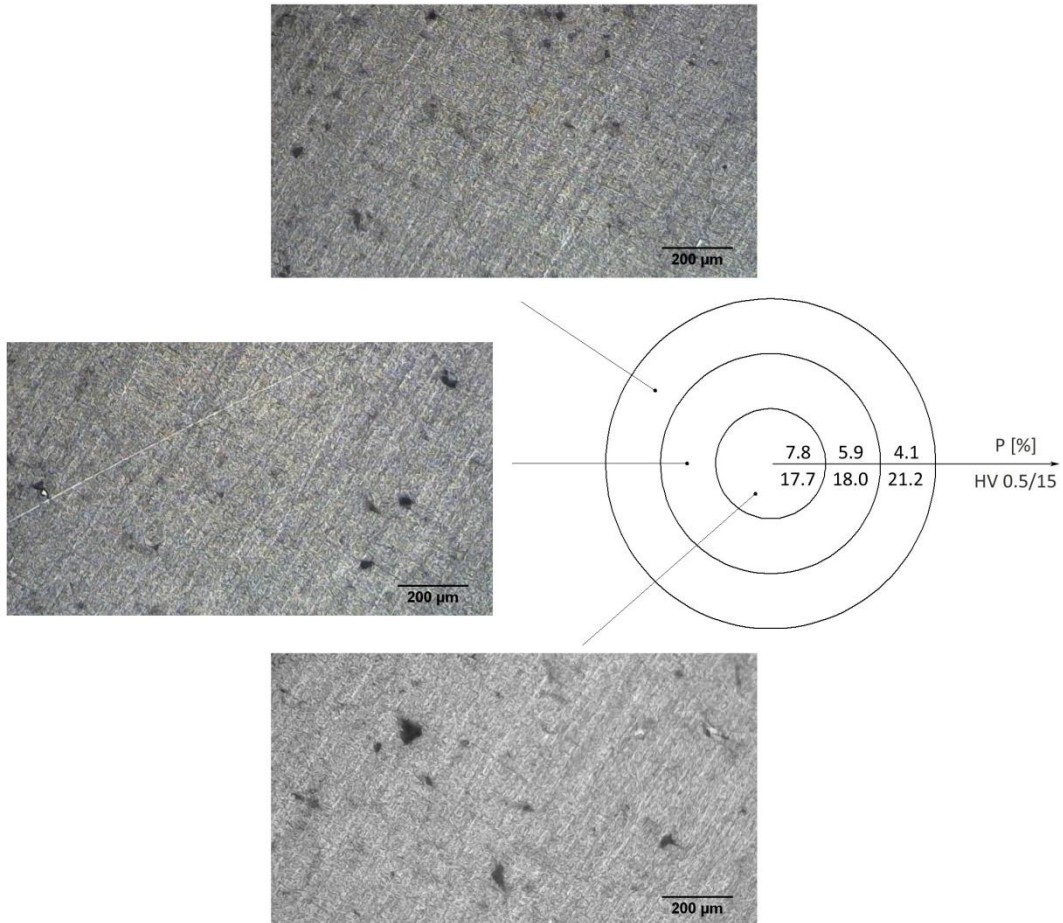


Διάγραμμα 4.3 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους του Δοκιμίου 2 στο 1ο πάσο

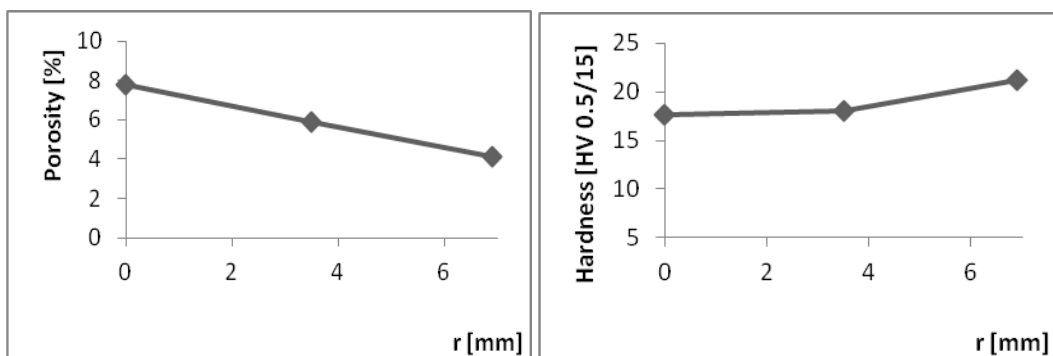
Ομοίως, στο πρώτο πάσο του δοκιμίου 2 παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι μεγάλης διαμέτρου και

πυκνότητας με συνέπεια να μην είναι εφικτή η μέτρηση σκληρότητας. Παρατηρήθηκε υποχώρηση του υποστρώματος της ελεγχόμενης επιφάνειας κατά την εισχώρηση του διεισδυτή, αφήνοντας έτσι ένα μη ορθό αποτύπωμα, βλ. Εικόνα 4.1.

➤ Πάσο 2

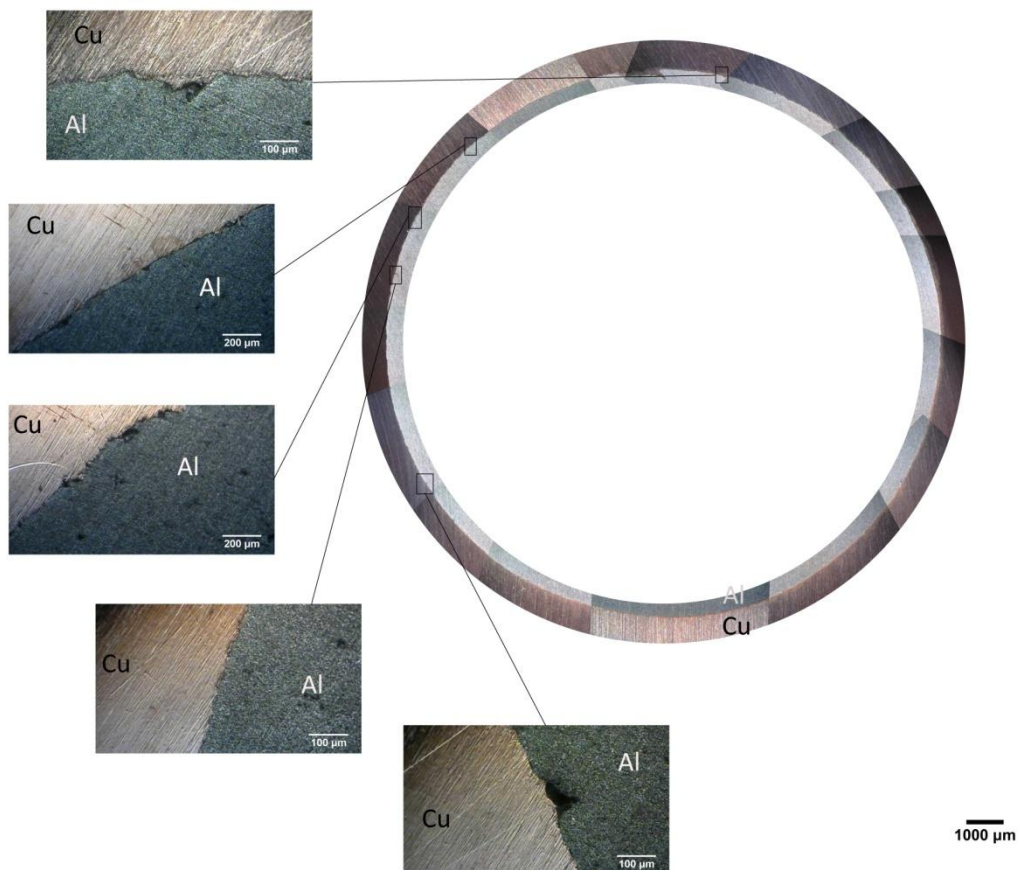


Εικόνα 4.6 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 2 στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.4 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 2 στο 2ο πάσο

Ομοίως, στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου 2 παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Η διάμετρος και η πυκνότητα των πόρων έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας, ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας, όπου η απότομη αύξηση της σκληρότητας είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων αντίδρασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (διεπιφάνεια σωλήνα-πυρήνα).



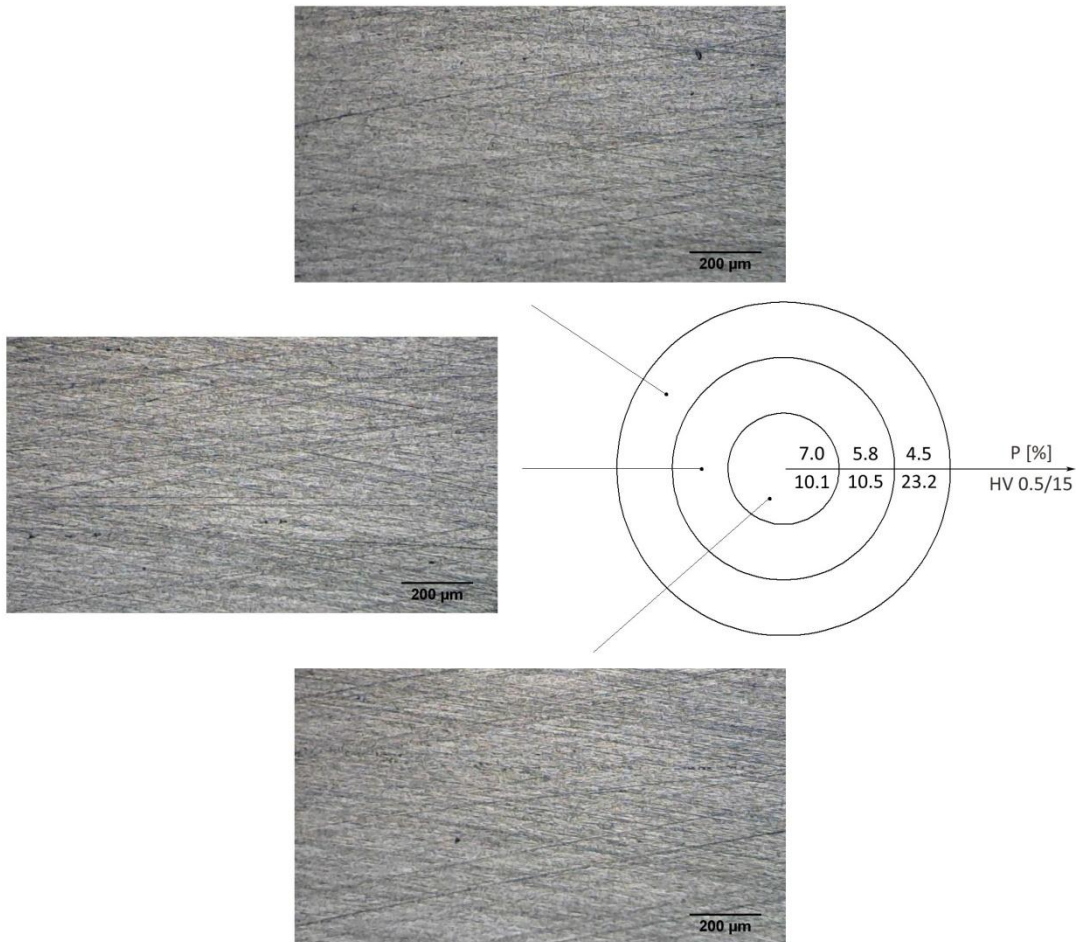
Εικόνα 4.7: Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 2 (2ο πάσο)

Όπως και στο δοκίμιο 1 έτσι και στο δοκίμιο 2, παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές μη καλής διεπιφάνειας όπου εμφανίζονται πόροι μεγάλου μεγέθους και βάθους. Επίσης, παρατηρούνται περιοχές της διεπιφάνειας με μικρούς και πυκνούς πόρους μικρότερου βάθους.

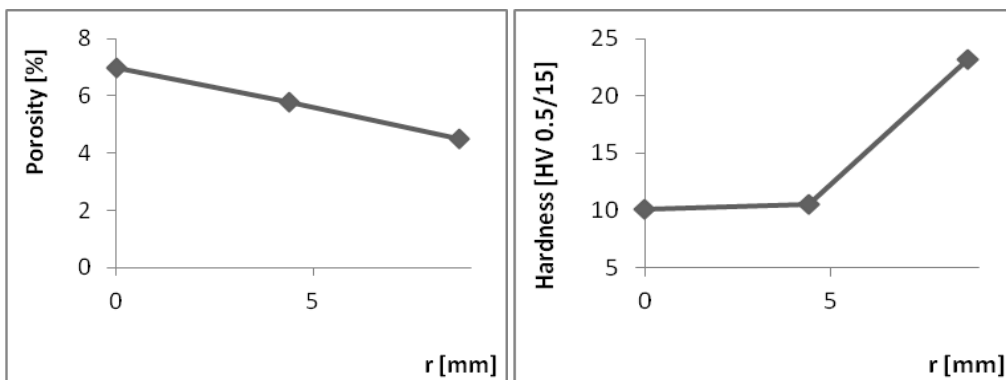
Δοκίμια πάχους 1.5 mm σκόνης αλουμινίου Al 325

- Δοκίμιο 3

➤ Πάσο 1



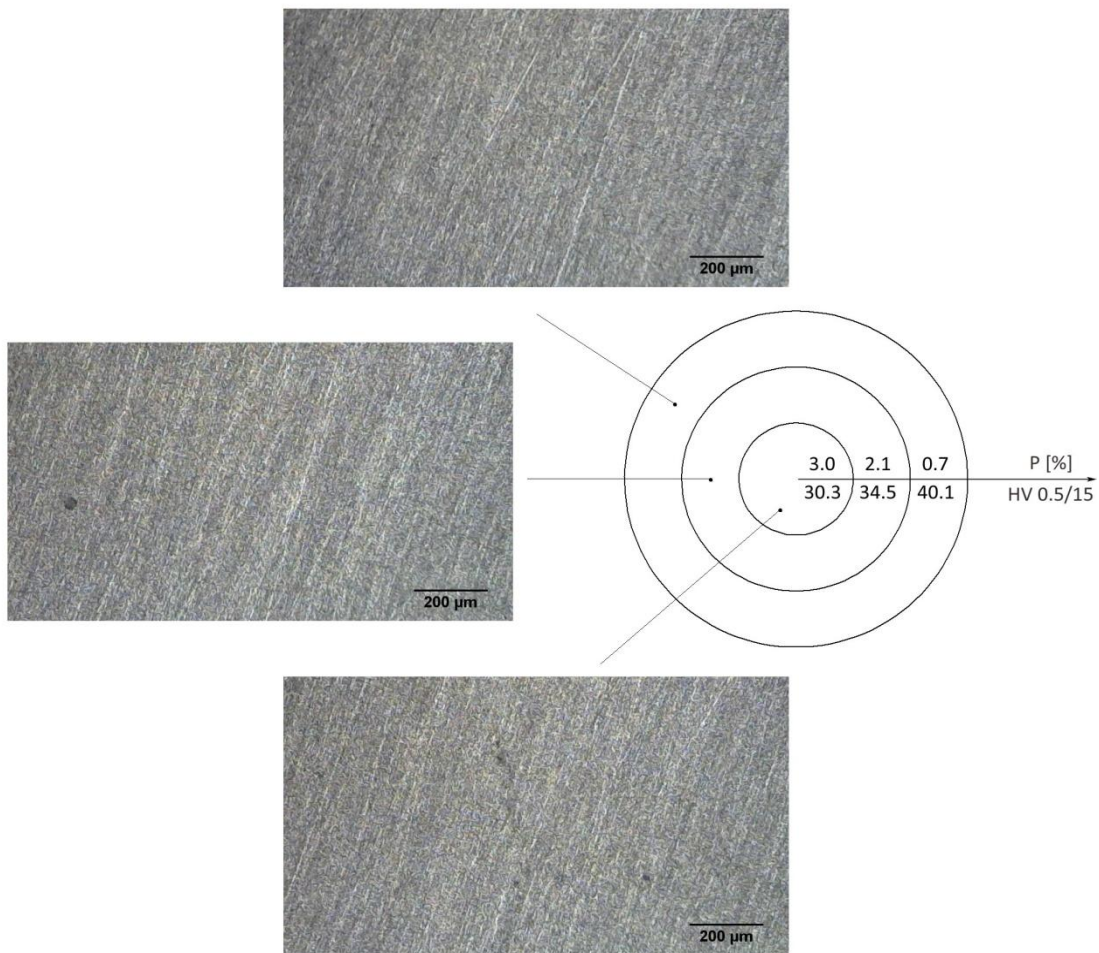
Εικόνα 4.8 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 3 στο 1ο πάσο



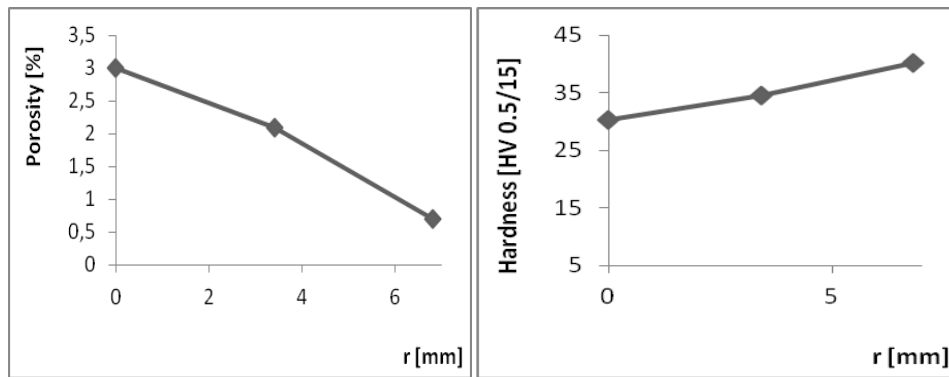
Διάγραμμα 4.5 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 3 στο 1ο πάσο

Στο πρώτο πάσο του δοκιμίου 3 παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας όπου έχουμε απότομη αύξηση της σκληρότητας. Εδώ, κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι η μέτρηση του πορώδους έγινε σε μεγάλη μεγέθυνση με χρήση του προγράμματος *Image J* λόγω του πολύ μικρού μεγέθους πόρων. Οι πόροι παρατηρούνται πολύ μικροί και πυκνοί. Η αποτύπωση του μέσου πορώδους παρουσιάζεται στο διάγραμμα. Η απεικόνιση στην Εικόνα 4.8 δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτική, λόγω της μεγάλης απόκλισης που υπήρχε μεταξύ των εικόνων που ελήφθησαν, για την εν λόγω περιοχή του δοκιμίου, σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο πρότυπο ASTM.

➤ Πάσο 2

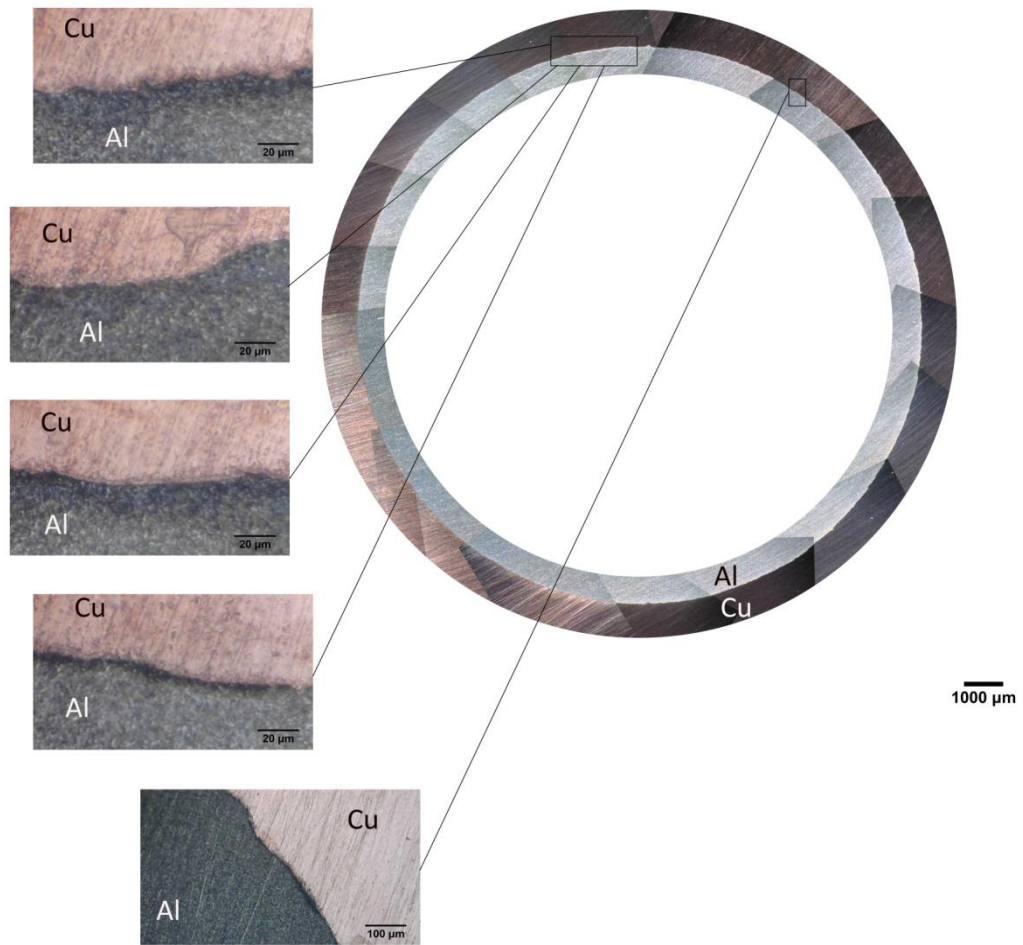


Εικόνα 4.9 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 3 στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.6 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 3 στο 2ο πάσο

Στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου 3 παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Για τους προαναφερθείς λόγους, η αποτύπωση του μέσου πορώδους παρουσιάζεται ορθά μόνο στο Διάγραμμα 4.6, καθώς στην Εικόνα 4.9 η χρησιμοποιούμενη απεικόνιση αποκλίνει αισθητά από τις υπόλοιπες της ίδιας περιοχής. Η έλλειψη επαναληψιμότητας στο πορώδες της συγκεκριμένης περιοχής του δοκιμίου καθιστά αδύνατη την αντιπροσωπευτική απεικόνιση της περιοχής αυτής. Παρατηρείται ακόμη, γραμμική αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά σε σύγκριση με αυτή του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι οι μικρές τιμές του πορώδους του πυρήνα έχουν σαν αποτέλεσμα την πιο ομογενή συμπεριφορά του υλικού.

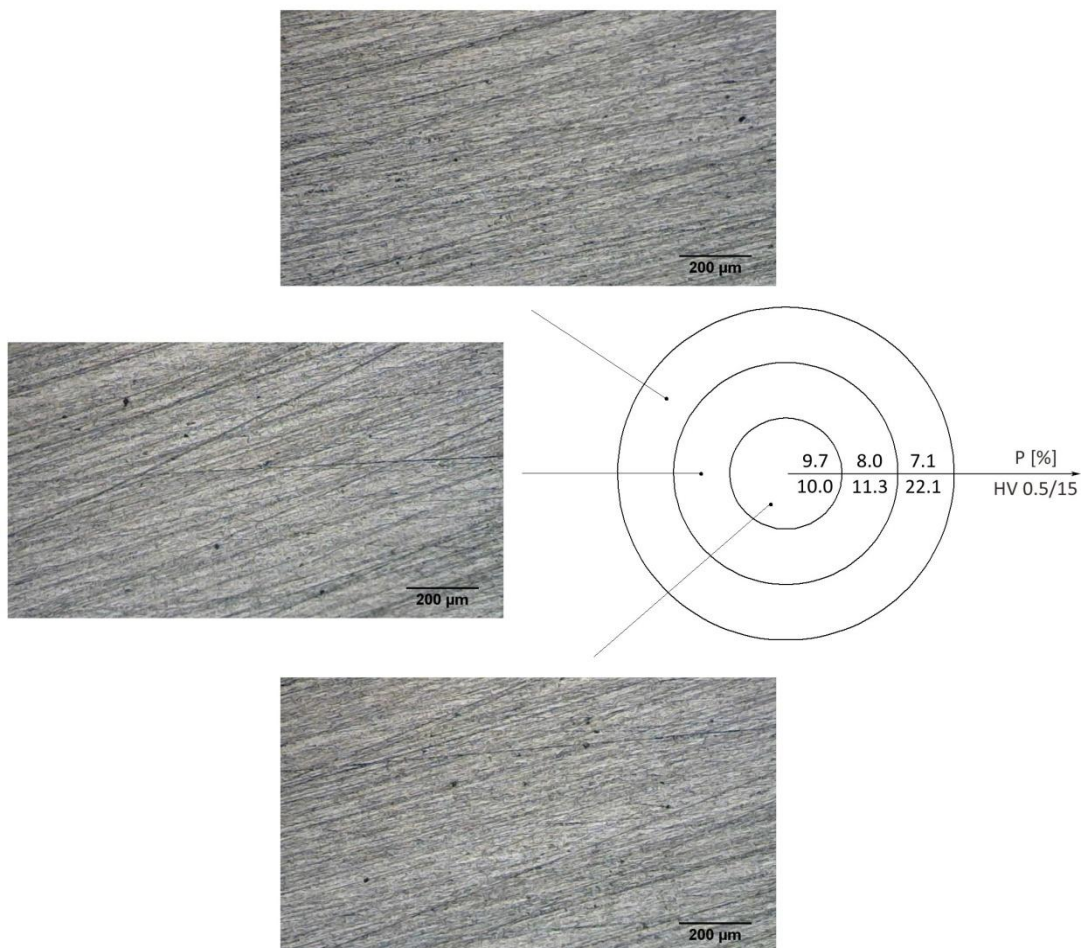


Εικόνα 4.10 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 3 (2ο πάσο)

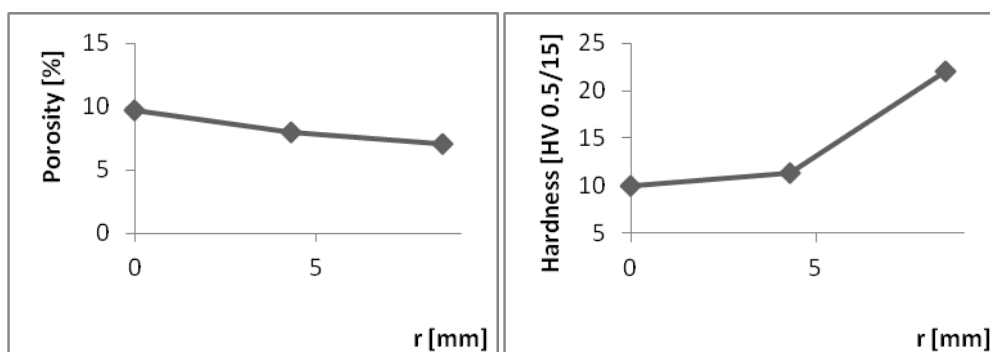
Παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές μη καλής διεπιφάνειας όπου εμφανίζονται μικρά κενά διεπιφάνειας. Επίσης, παρατηρούνται περιοχές καλής διεπιφάνειας χωρίς σημαντικές ατέλειες ή πόρους.

- Δοκίμιο 4

- Πάσο 1



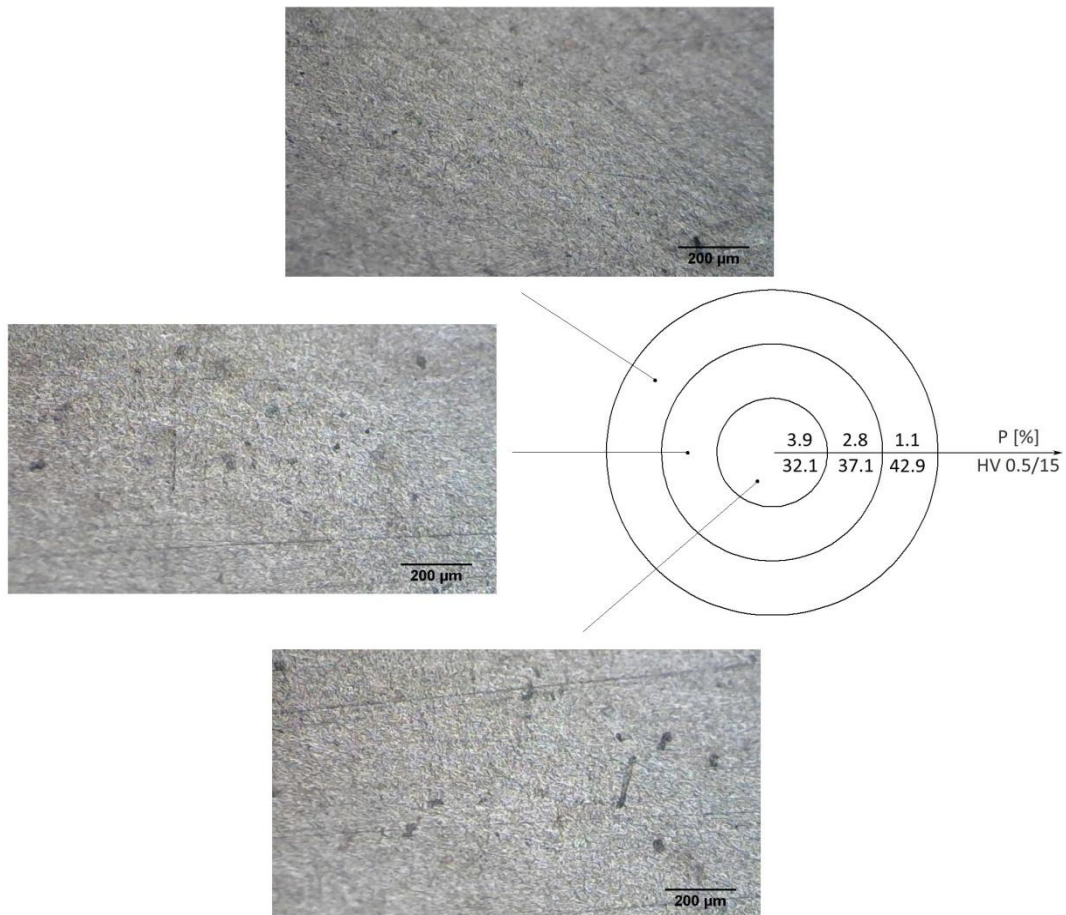
Εικόνα 4.11 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκίμιου 4 στο 1ο πάσο



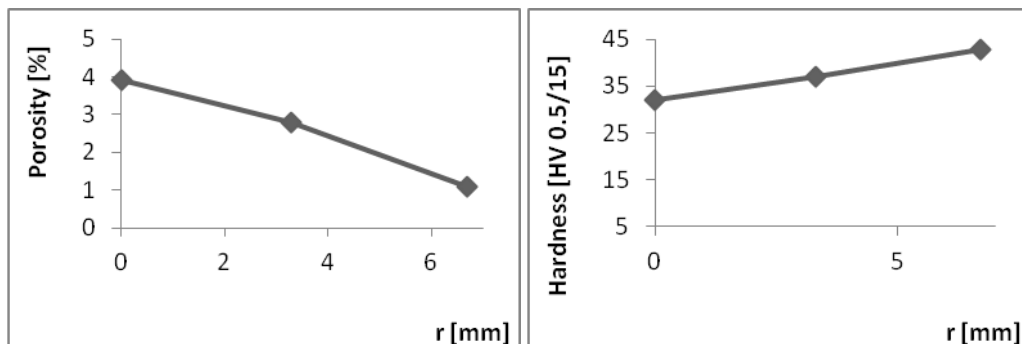
Διάγραμμα 4.7 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκίμιου 4 στο 1ο πάσο

Ομοίως, στο πρώτο πάσο του δοκιμίου 4 παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας όπου έχουμε απότομη αύξηση της σκληρότητας. Για τους προαναφερθείς λόγους, η αποτύπωση του μέσου πορώδους παρουσιάζεται ορθά μόνο στο Διάγραμμα 4.7, καθώς στην Εικόνα 4.11 η χρησιμοποιούμενη απεικόνιση αποκλίνει αισθητά από τις υπόλοιπες της ίδιας περιοχής.

➤ Πάσο 2

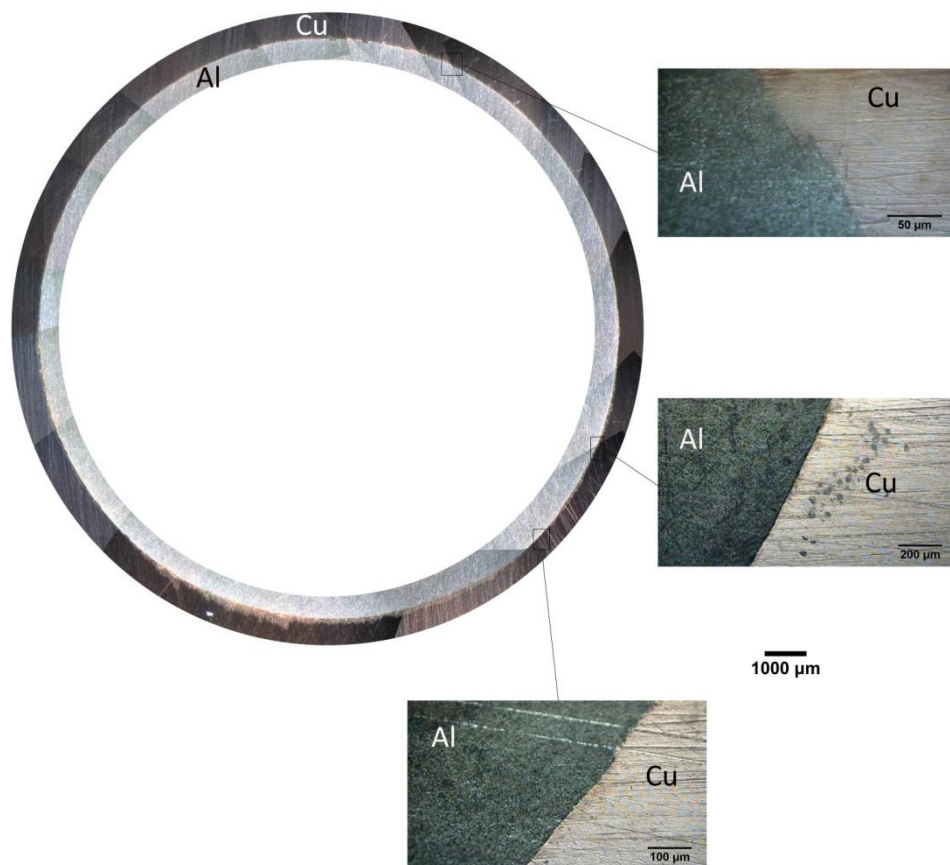


Εικόνα 4.12 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 4 στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.8 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 4 στο 2ο πάσο

Ομοίως, στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου 4 παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Για τους προαναφερθείς λόγους, η αποτύπωση του μέσου πορώδους παρουσιάζεται ορθά μόνο στο Διάγραμμα 4.8, καθώς στην Εικόνα 4.12 η χρησιμοποιούμενη απεικόνιση αποκλίνει αισθητά από τις υπόλοιπες της ίδιας περιοχής. Η έλλειψη επαναληψιμότητας στο πορώδες της συγκεκριμένης περιοχής του δοκιμίου καθιστά αδύνατη την αντιπροσωπευτική απεικόνιση της περιοχής αυτής. Παρατηρείται ακόμη, γραμμική αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά σε σύγκριση με αυτή του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι οι μικρές τιμές του πορώδους του πυρήνα έχουν σαν αποτέλεσμα την πιο ομογενή συμπεριφορά του υλικού.

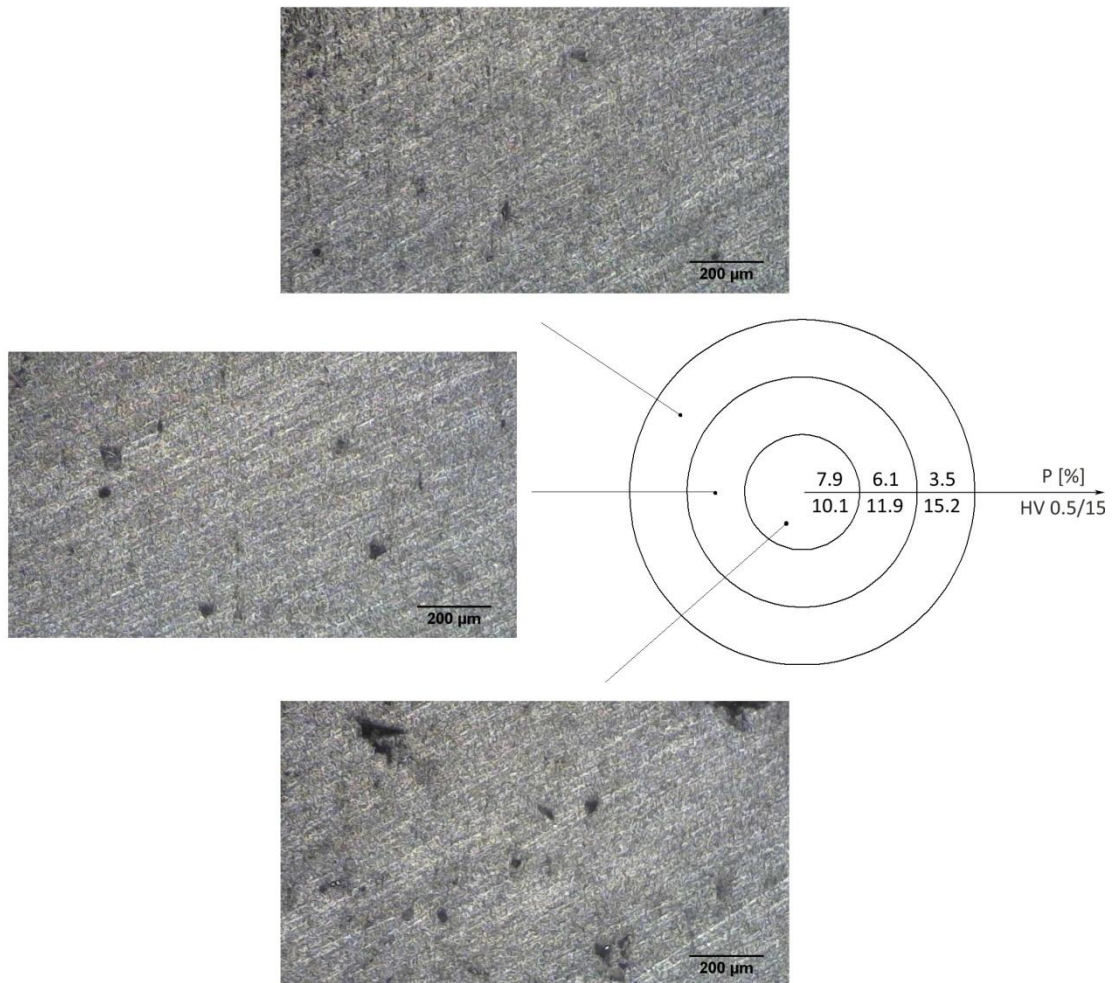


Εικόνα 4.13 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 4 (2ο πάσο)

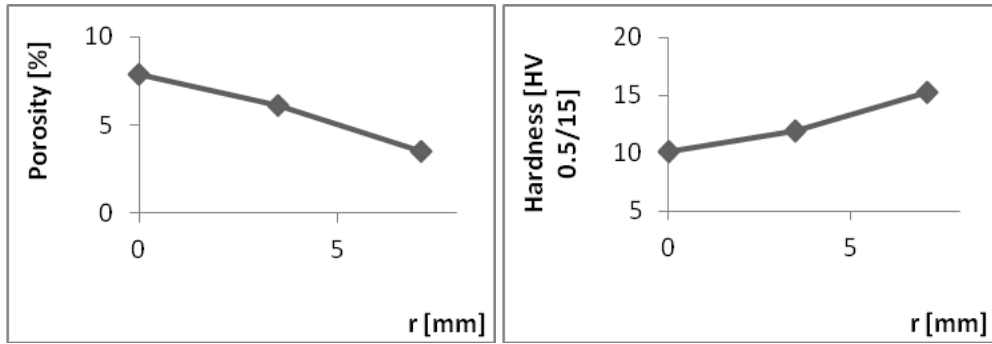
Όπως και στο δοκίμιο 3 έτσι και στο δοκίμιο 4, παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές σχετικά μη καλής διεπιφάνειας όπου εμφανίζονται μικρά κενά διεπιφάνειας. Επίσης, παρατηρούνται περιοχές καλής διεπιφάνειας χωρίς σημαντικές ατέλειες ή πόρους.

Δοκίμια πάχους 3.0 mm σκόνης αλουμινίου Al 40+325

- Δοκίμιο A
- Πάσο 1



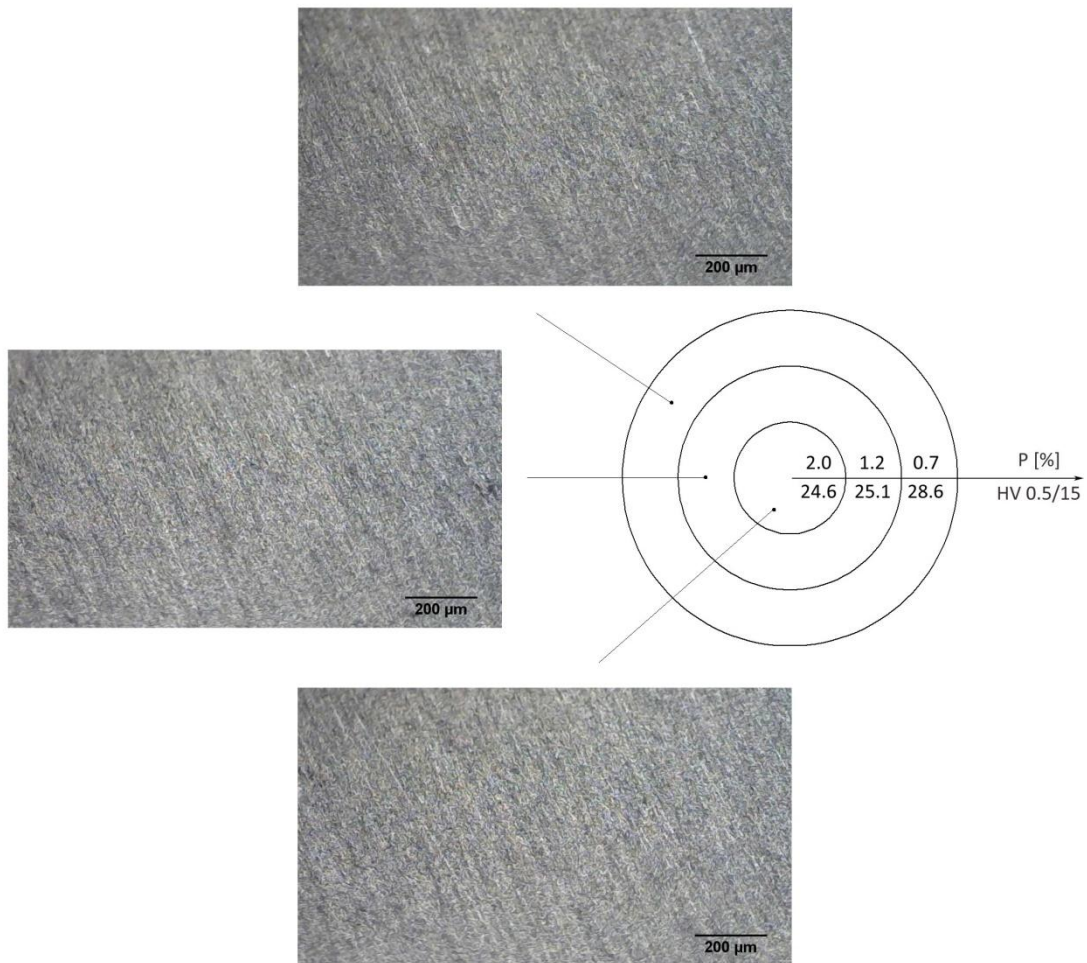
Εικόνα 4.14 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκμίου A στο 1ο πάσο



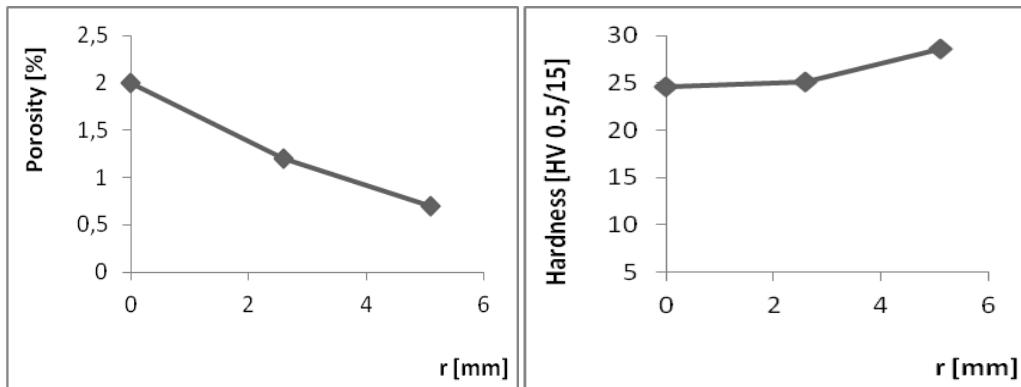
Διάγραμμα 4.9 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Α στο 1ο πάσο

Στο πρώτο πάσο του δοκιμίου Α παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι μεγάλης διαμέτρου και σχετικά μεγάλης πυκνότητας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας όπου η απότομη αύξηση της σκληρότητας είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων αντίδρασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (διεπιφάνεια σωλήνα-πυρήνα).

➤ Πάσο 2

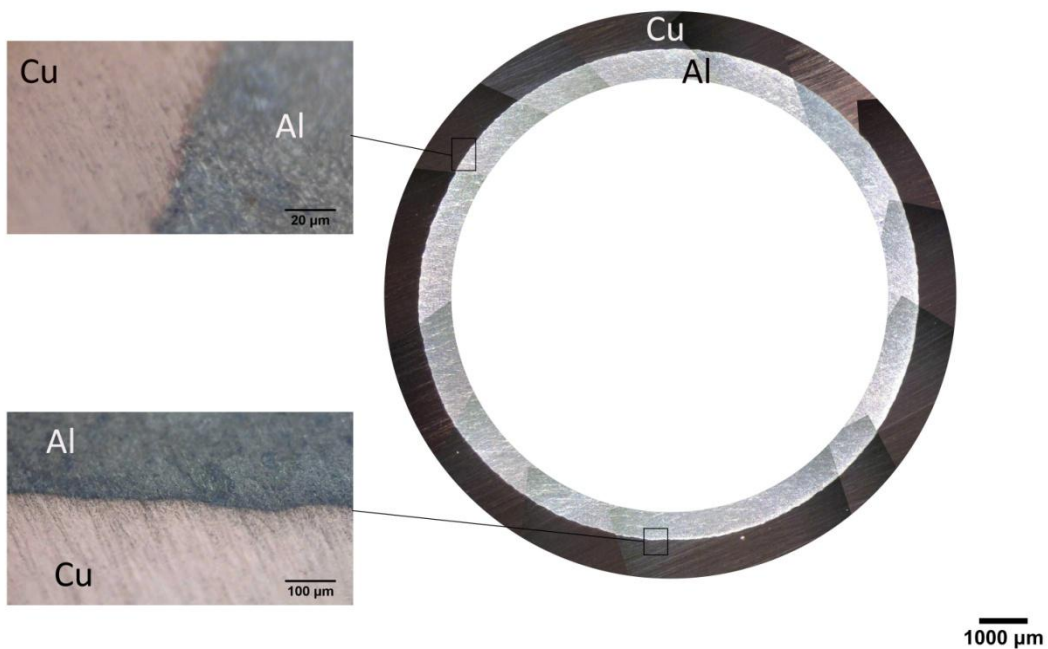


Εικόνα 4.15 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Α στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.10 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Α στο 2ο πάσο

Στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου Α παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι ο πυρήνας έχει αρχίσει να ομογενοποιείται.

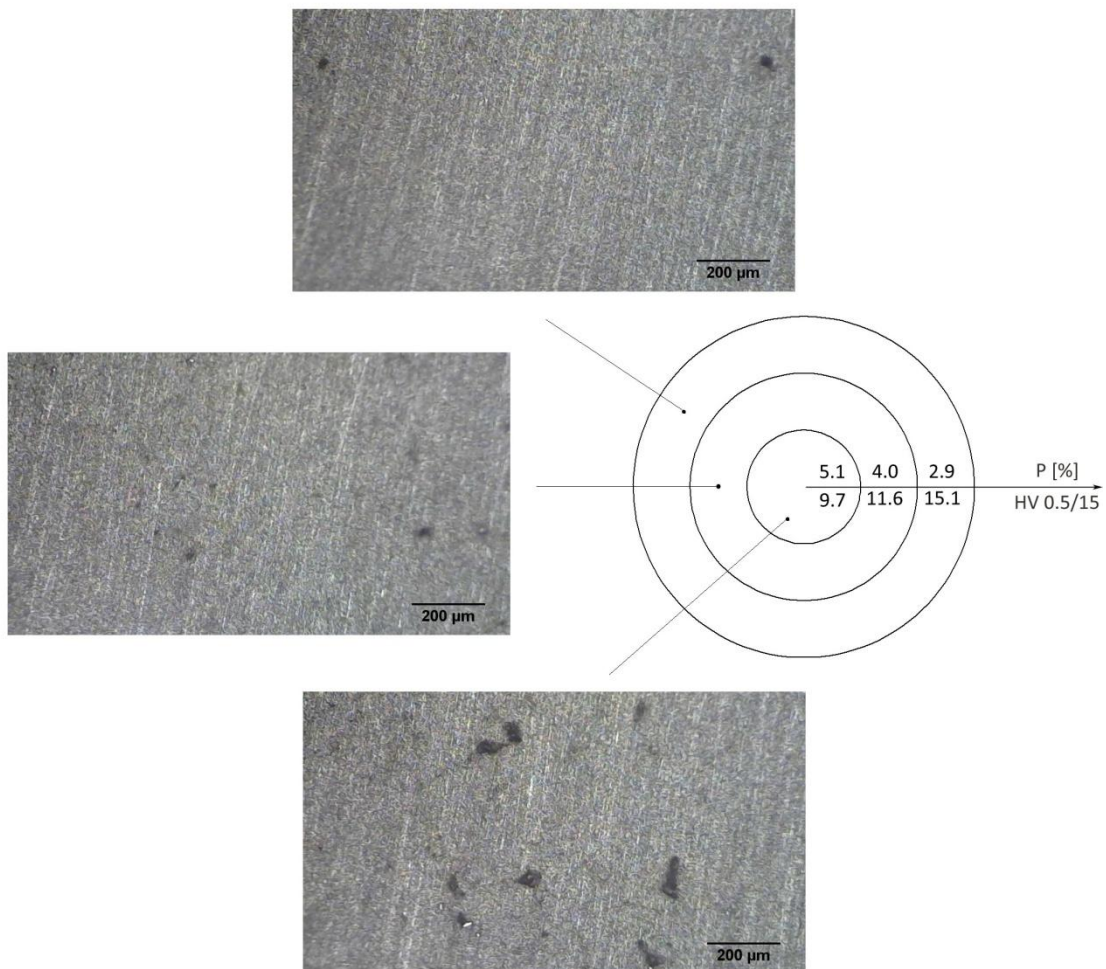


Εικόνα 4.16 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Α (2ο πάσο)

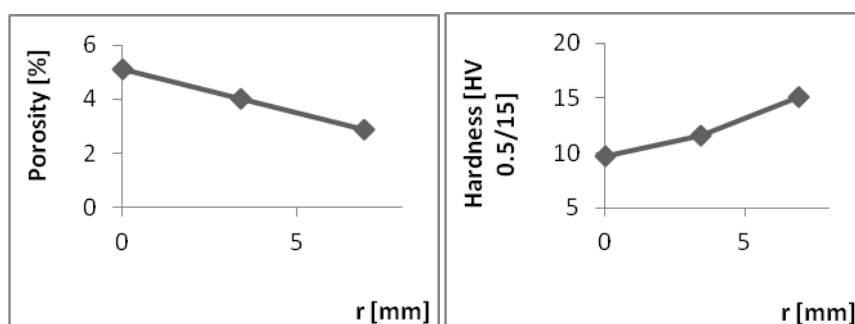
Παρατηρείται αρκετά καλή διεπιφάνεια χωρίς κενά ή πόρους.

- Δοκίμιο Β

➤ Πάσο 1



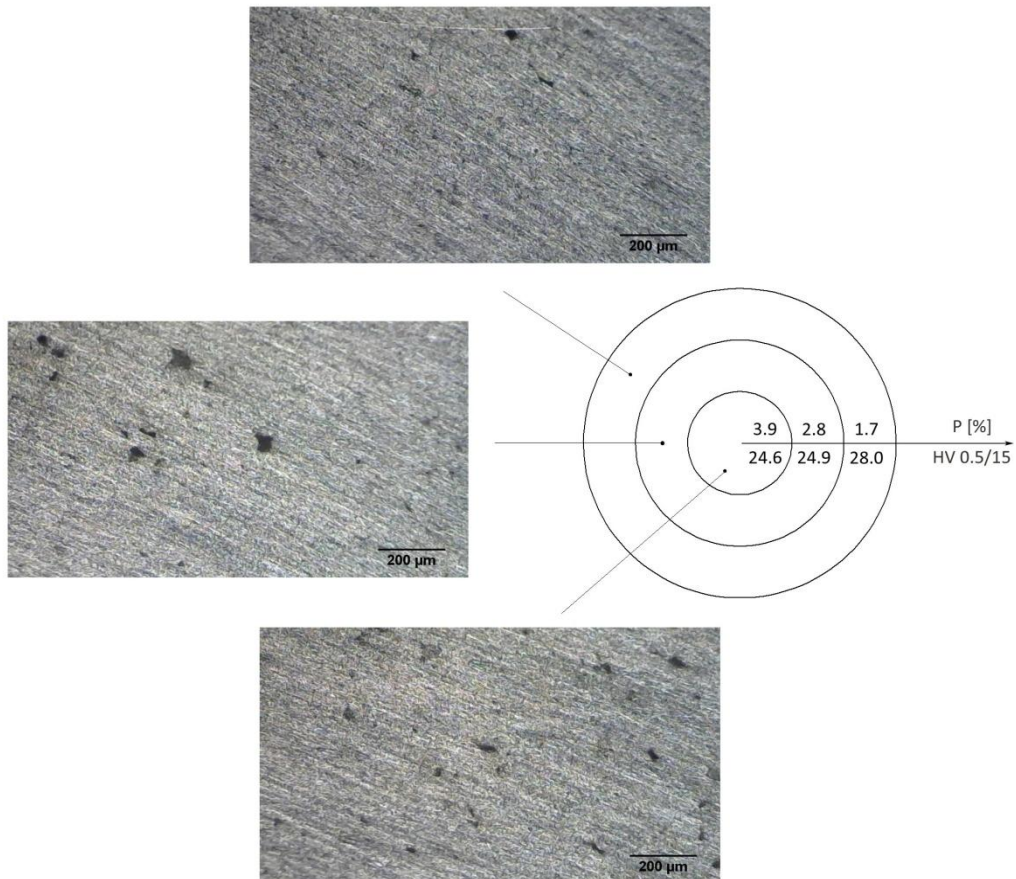
Εικόνα 4.17 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκμίου Β στο 1ο πάσο



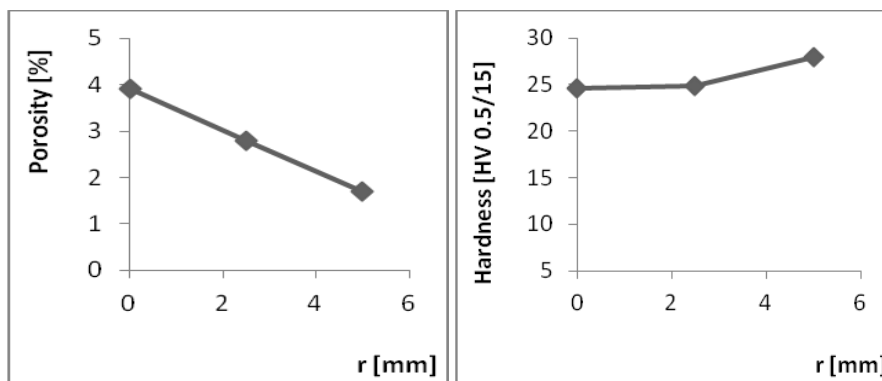
Διάγραμμα 4.11 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκμίου Β στο 1ο πάσο

Ομοίως, στο πρώτο πάσο του δοκιμίου Β παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι μεγάλης διαμέτρου και σχετικά μεγάλης πυκνότητας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας όπου έχουμε απότομη αύξηση της σκληρότητας.

➤ Πάσο 2

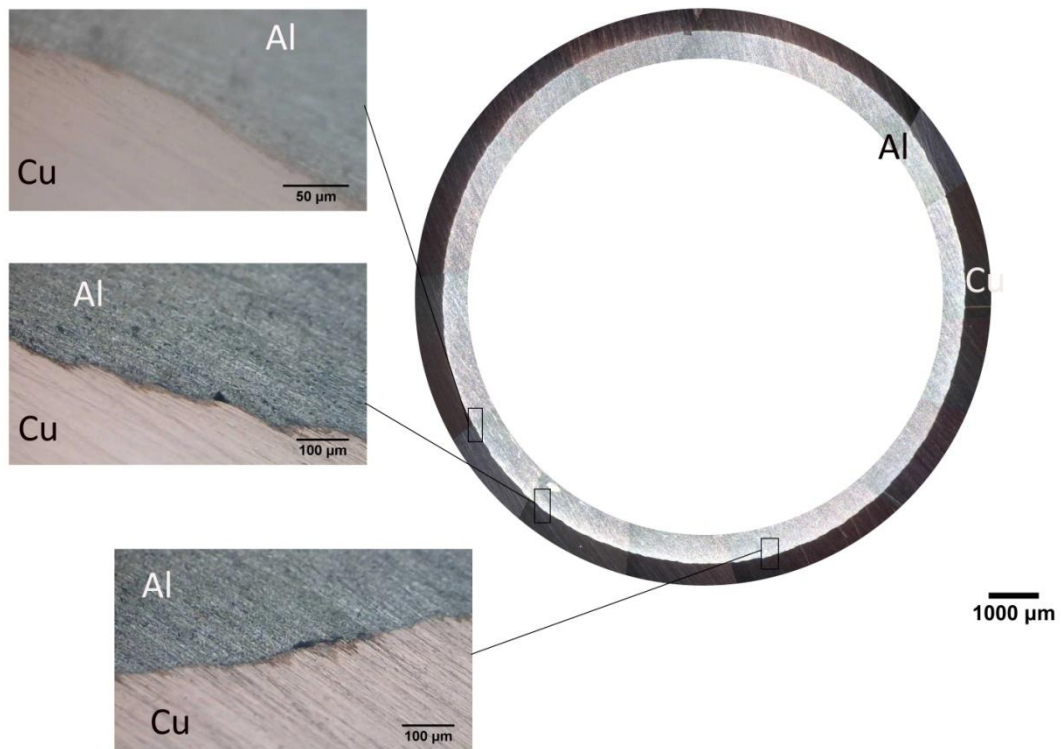


Εικόνα 4.18 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Β στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.12 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Β στο 2ο πάσο

Ομοίως, στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου Β παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι ο πυρήνας έχει αρχίσει να ομογενοποιείται.



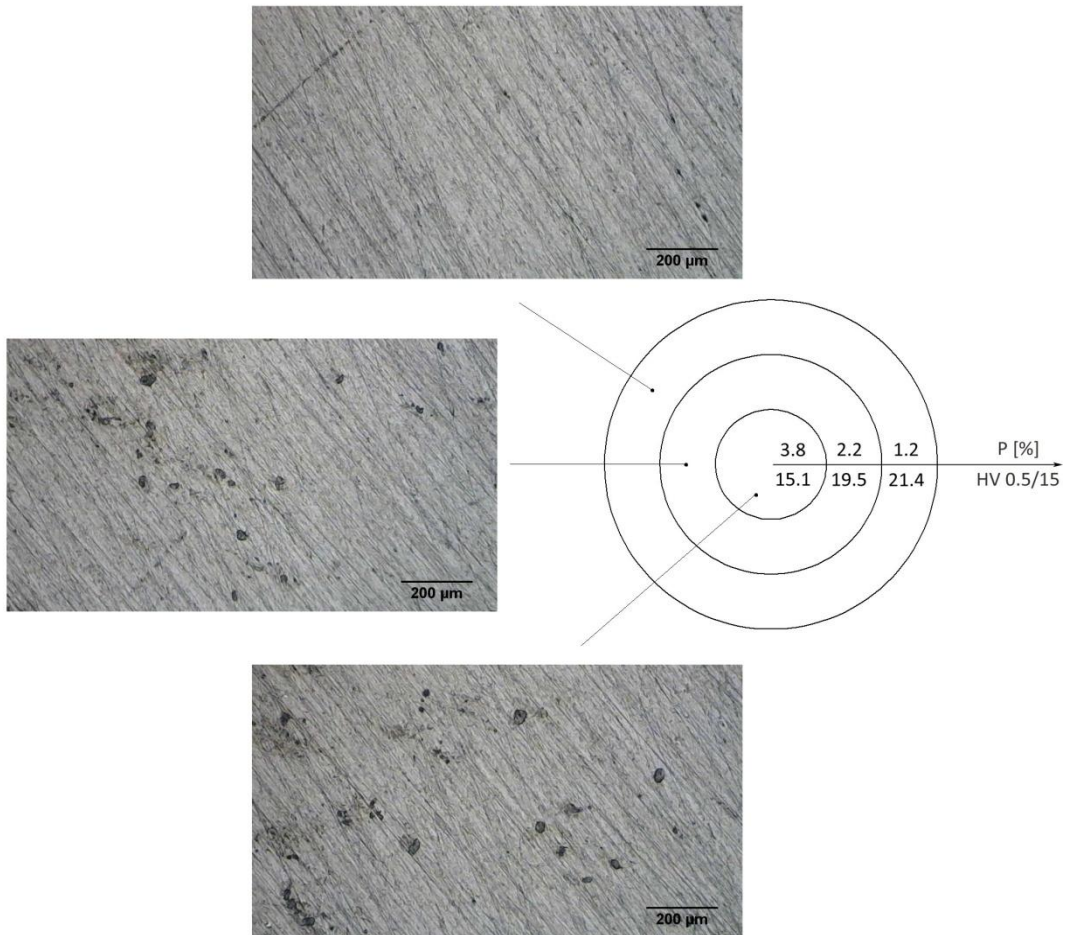
Εικόνα 4.19 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Β (2ο πάσο)

Παρατηρούνται περιοχές όχι τόσο καλής διεπιφάνειας διότι έχουμε την εμφάνιση μικρών κενών καθώς και περιοχές πολύ καλής διεπιφάνειας όπου δεν εμφανίζονται κενά ή πόροι.

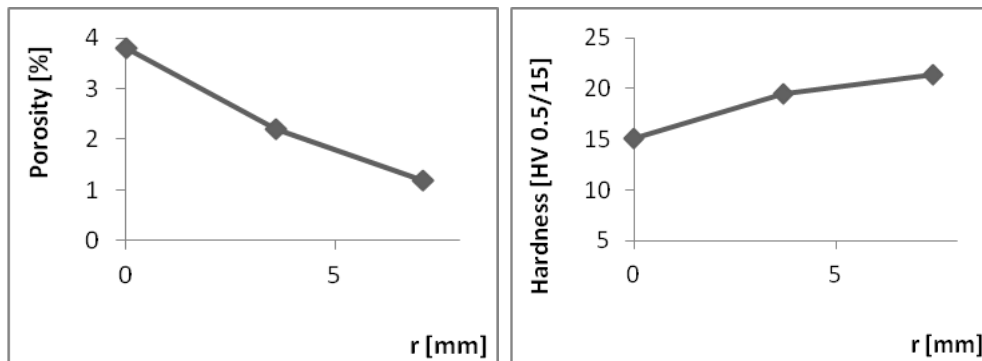
Δοκίμια πάχους 3.0 mm σκόνης αλουμινίου Al 325

- Δοκίμιο Γ

➤ Πάσο 1



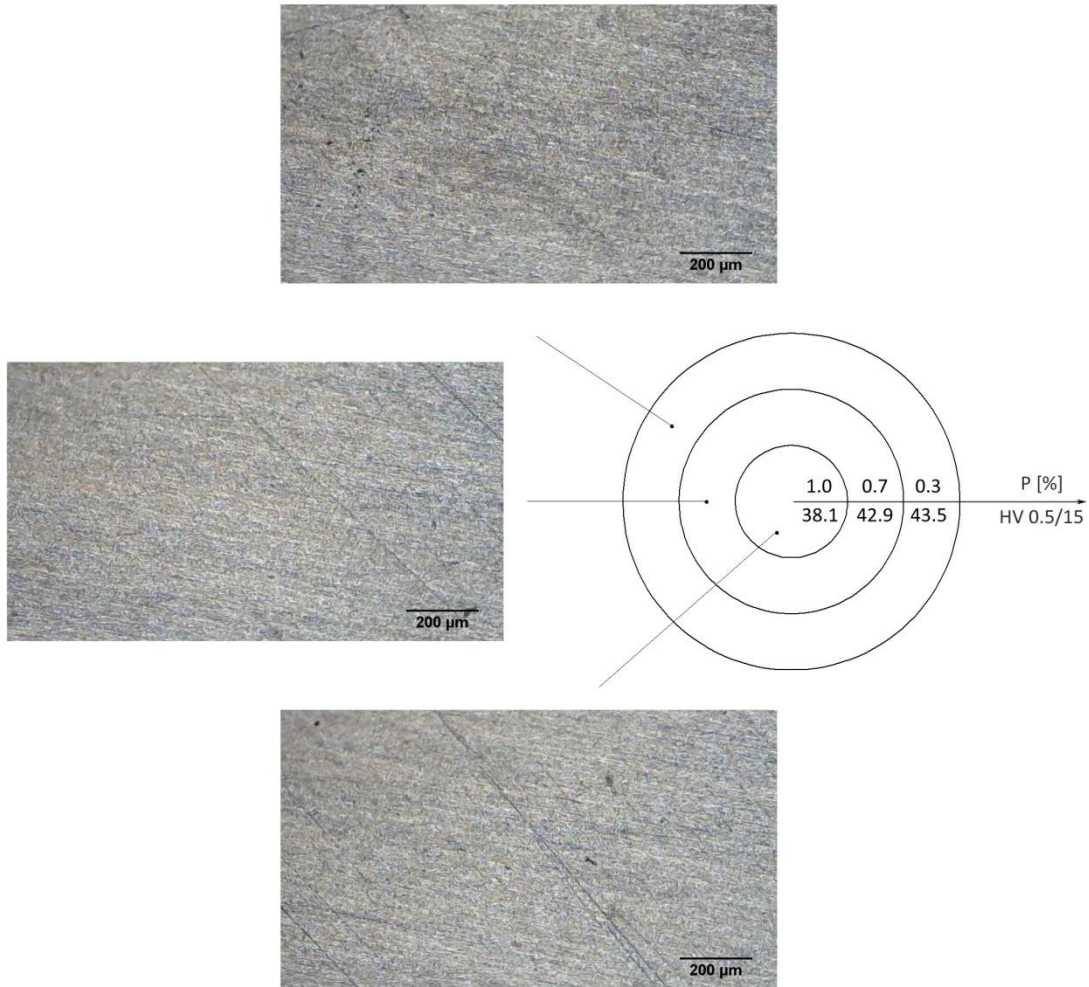
Εικόνα 4.20 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκίμιου Γ στο 1ο πάσο



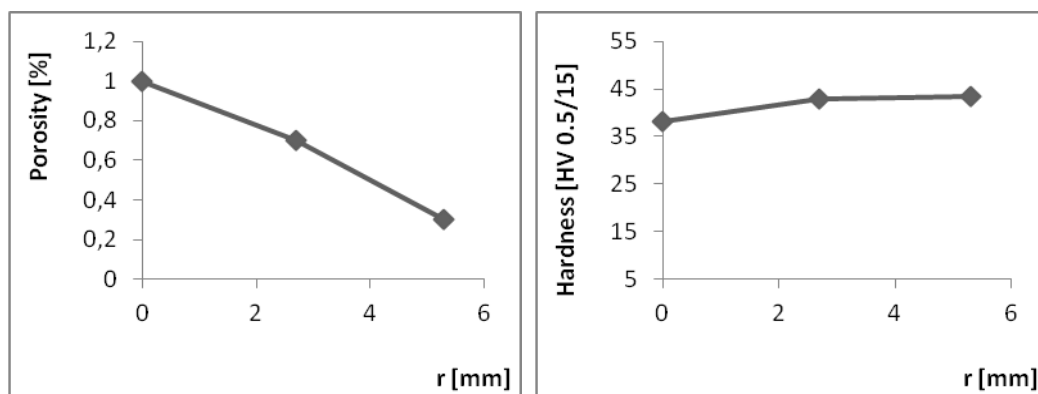
Διάγραμμα 4.13 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκίμιου Γ στο 1ο πάσο

Στο πρώτο πάσο του δοκιμίου Γ παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι σχετικά μικρής διαμέτρου και πυκνότητας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας.

➤ Πάσο 2

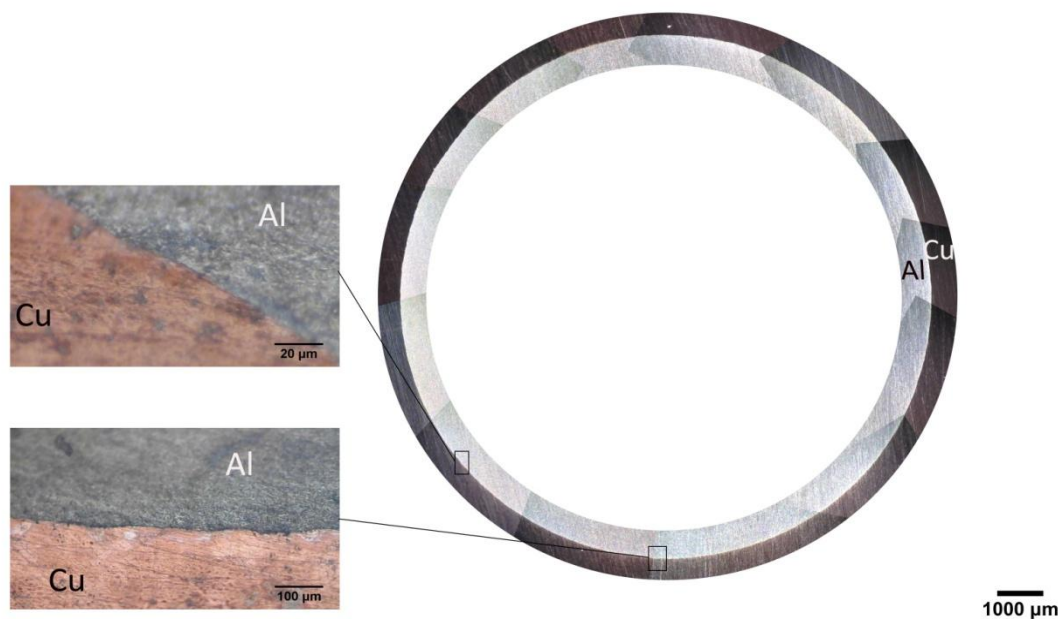


Εικόνα 4.21 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Γ στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.14 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Γ στο 2ο πάσο

Στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου Γ παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Το μέγεθος των πόρων είναι πολύ μικρό κάτι που όπως έχει αναφερθεί, δυσκολεύει την ποσοτική απεικόνιση του μέσου πορώδους. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι ο πυρήνας έχει αρχίσει να ομογενοποιείται.

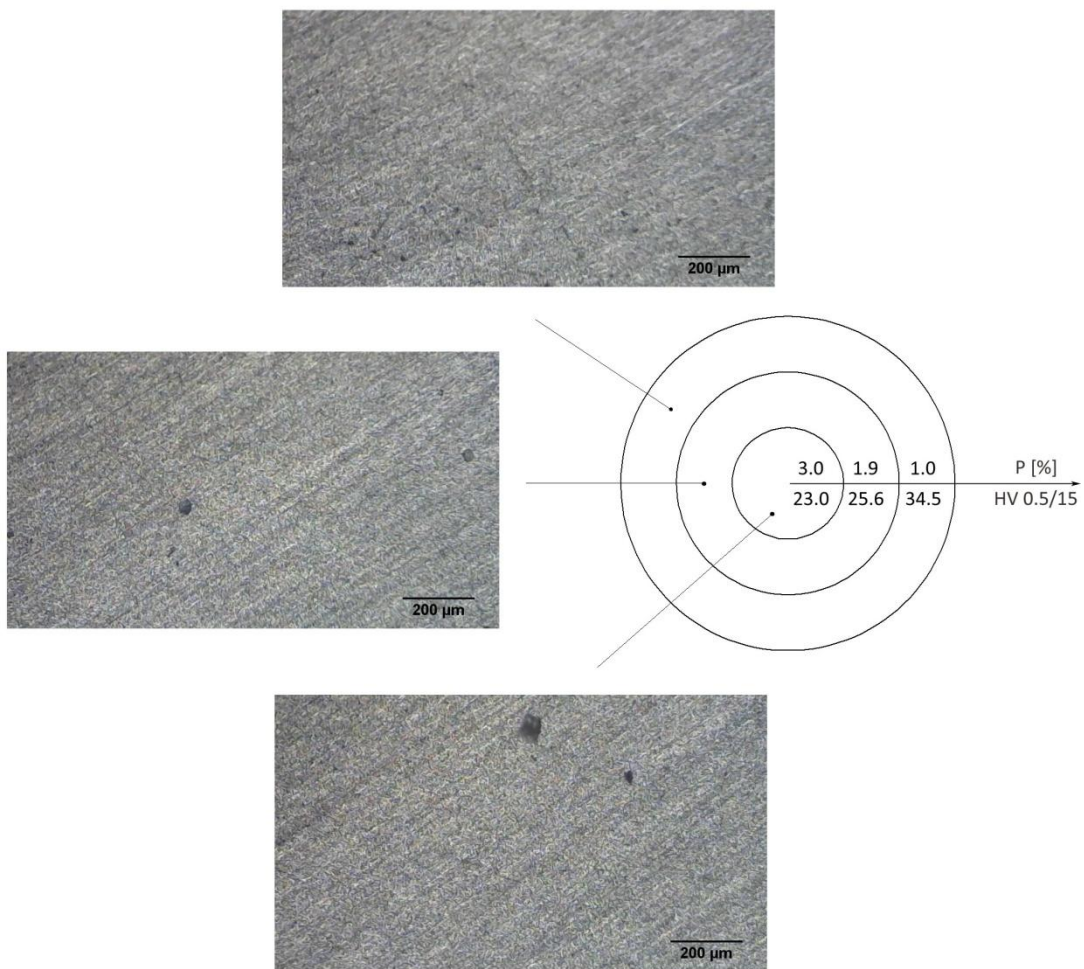


Εικόνα 4.22 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Γ (2ο πάσο)

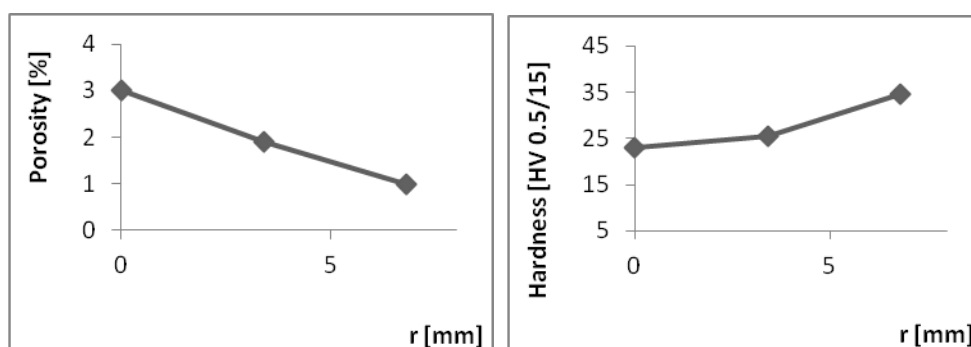
Παρατηρείται πολύ καλή ποιότητα διεπιφάνειας χωρίς κενά ή πόρους.

- Δοκίμιο Δ

➤ Πάσο 1



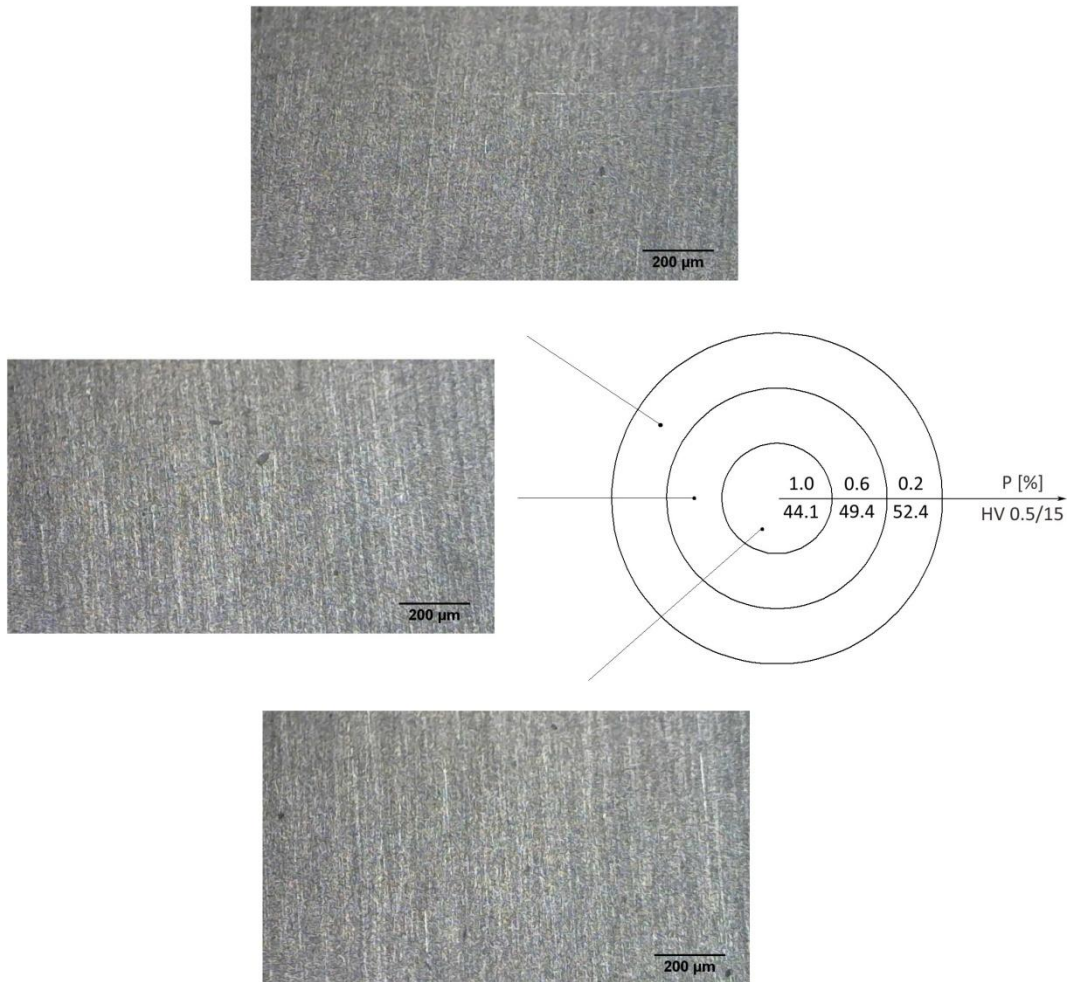
Εικόνα 4.23 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκίμιου Δ στο 1ο πάσο



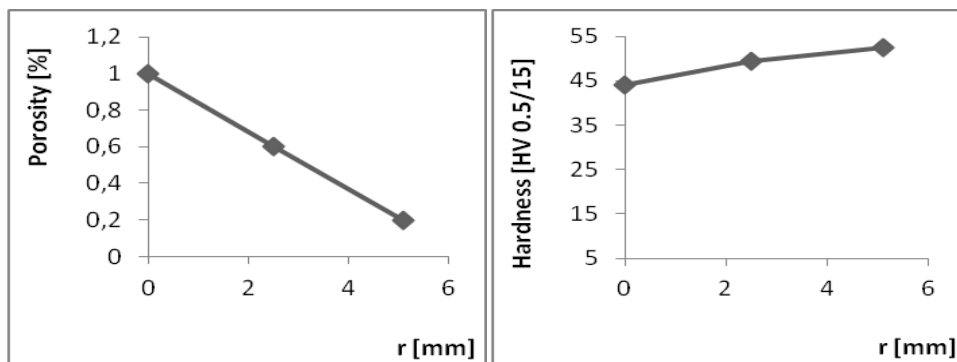
Διάγραμμα 4.15 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκίμιου Δ στο 1ο πάσο

Ομοίως, στο πρώτο πάσο του δοκιμίου Δ παρατηρείται γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Παρατηρούνται επίσης, πόροι σχετικά μικρής διαμέτρου και πυκνότητας. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας ιδίως στην περιοχή της περιφέρειας όπου έχουμε απότομη αύξηση της σκληρότητας.

➤ Πάσο 2

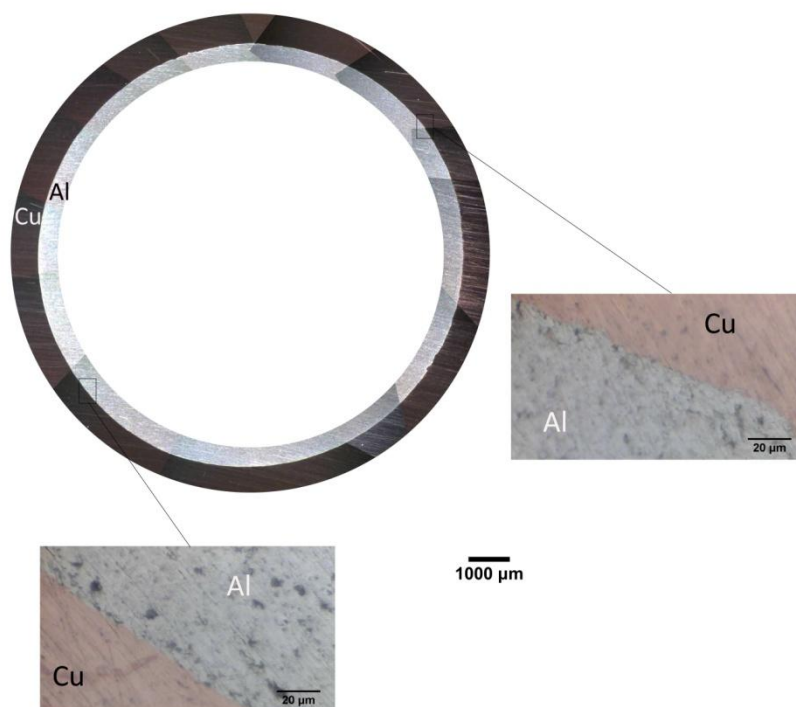


Εικόνα 4.24 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Δ στο 2ο πάσο



Διάγραμμα 4.16 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Δ στο 2ο πάσο

Ομοίως, στο δεύτερο πάσο του δοκιμίου Δ παρατηρείται επίσης, γραμμική μείωση του πορώδους αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, το πορώδες έχει μειωθεί συγκριτικά με του πρώτου πάσου. Το μέγεθος των πόρων είναι πολύ μικρό κάτι που όπως έχει αναφερθεί, δυσκολεύει την ποσοτική απεικόνιση του μέσου πορώδους. Παρατηρείται ακόμη, αύξηση της σκληρότητας αυξανόμενης της ακτίνας. Επίσης, η σκληρότητα έχει αυξηθεί σημαντικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Να σημειωθεί επίσης, ότι η αύξηση της σκληρότητας από το κέντρο στην περιφέρεια είναι σχετικά μικρή διότι ο πυρήνας έχει αρχίσει να ομογενοποιείται.

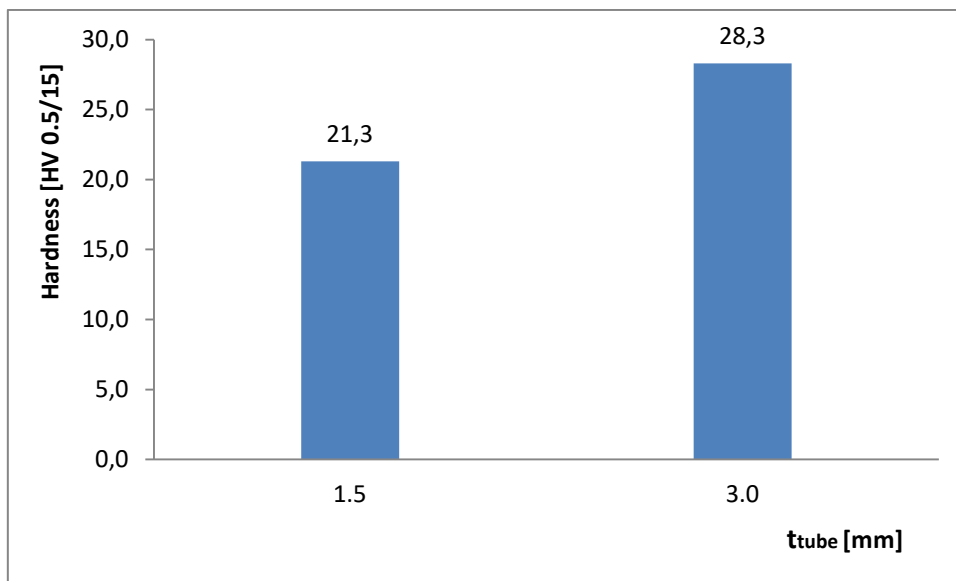


Εικόνα 4.25 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Δ (20 πάσο)

Παρατηρείται σχετικά καλή διεπιφάνεια καθώς δεν παρατηρούνται κενά. Παρόλα αυτά εμφανίζονται πολύ μικροί πόροι.

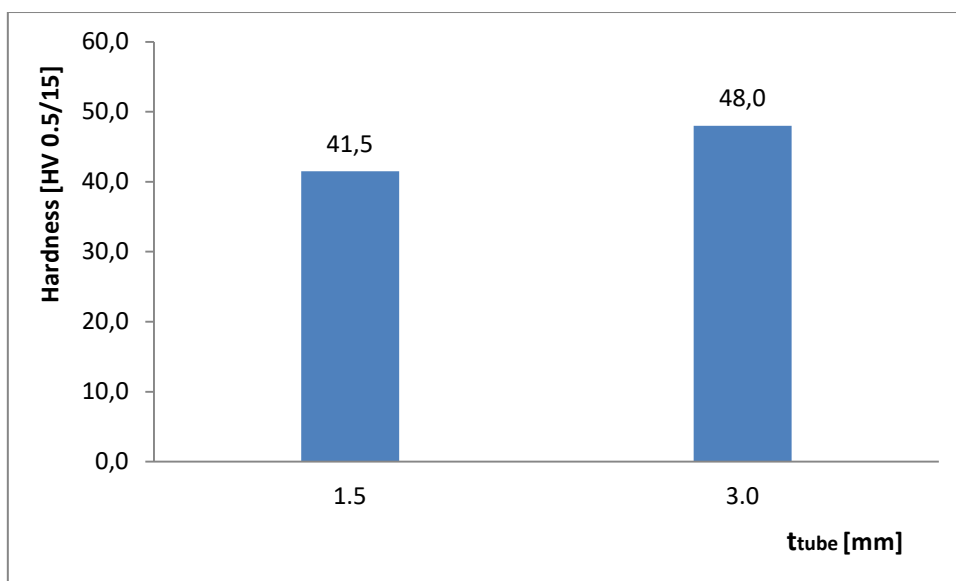
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η μέση σκληρότητα στην περιφέρεια (μέγιστη σκληρότητα) των δοκιμίων πάχους 1.5 και 3.0 mm με διαφορετική κοκκομετρία σκόνης πυρήνα.

Χονδρόκοκη σκόνη (AL 40+325)



Διάγραμμα 4.17 : Μέση σκληρότητα περιφέρειας δοκιμών πάχους 1.5 και 3.0 mm χονδρόκοκης κοκκομετρίας

Λεπτόκοκη σκόνη (AL 40+325)



Διάγραμμα 4.18 : Μέση σκληρότητα περιφέρειας δοκιμών πάχους 1.5 και 3.0 mm λεπτόκοκης κοκκομετρίας

4.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Σε ότι αφορά την κατανομή του πορώδους και της σκληρότητας δοκιμίων παρατηρούμε τα εξής :

- Σε κάθε δοκίμιο, αυξανόμενης της ακτίνας (με κατεύθυνση από το κέντρο προς την περιφέρεια) παρατηρείται μείωση του πορώδους και αύξηση της σκληρότητας.
- Στα δοκίμια ίδιου πάχους σωλήνα και διαφορετικής κοκκομετρίας σκόνης είναι εμφανές ότι όσο πιο λεπτόκοκκη είναι η σκόνη που χρησιμοποιείται ως πυρήνας, τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της σκληρότητας σε κάθε περιοχή του τελικού δοκιμίου (μετά από διέλαση) και τόσο μικρότερες οι τιμές του πορώδους.
- Στα δοκίμια με ίδια κοκκομετρία σκόνης και διαφορετικό πάχος σωλήνα, είναι εμφανές ότι αυξανόμενου του πάχους σωλήνα καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας και μικρότερες τιμές πορώδους ανά περιοχή (δηλ. κέντρο, μισή ακτίνα, περιφέρεια).

Σε ότι αφορά την εικόνα της διεπιφάνειας των δοκιμίων παρατηρούμε τα εξής :

- Στα δοκίμια ίδιου πάχους σωλήνα και διαφορετικής κοκκομετρίας σκόνης, παρατηρείται καλύτερη διεπιφάνεια για μικρότερες κοκκομετρίες.
- Στα δοκίμια με ίδια κοκκομετρία σκόνης και διαφορετικό πάχος σωλήνα, παρατηρείται καλύτερη διεπιφάνεια για μεγαλύτερο πάχος σωλήνα.

Κεφάλαιο 5. Αριθμητική προσομοίωση και αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό έχει γίνει μοντελοποίηση των πειραμάτων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *Ls-Dyna* της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

5.2 Περιγραφή μοντέλου κονιομεταλλουργίας

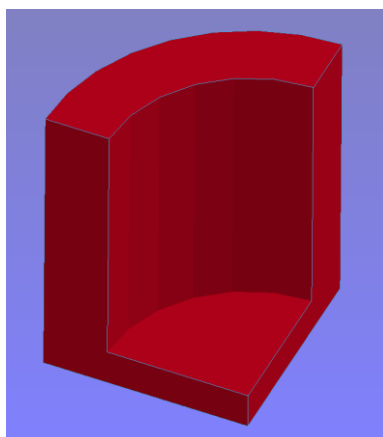
5.2.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου

Τα μοντέλα της κονιομεταλλουργίας αποτελούνται από τρία δομικά στοιχεία :

- Μήτρα

Πρόκειται για ένα δακτύλιο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Εσωτερική διάμετρος : **11.0 mm**
- Εξωτερική διάμετρος : **16.0 mm**
- Ύψος : **12.0 mm**
- Ύψος πυθμένα : **2.0 mm**

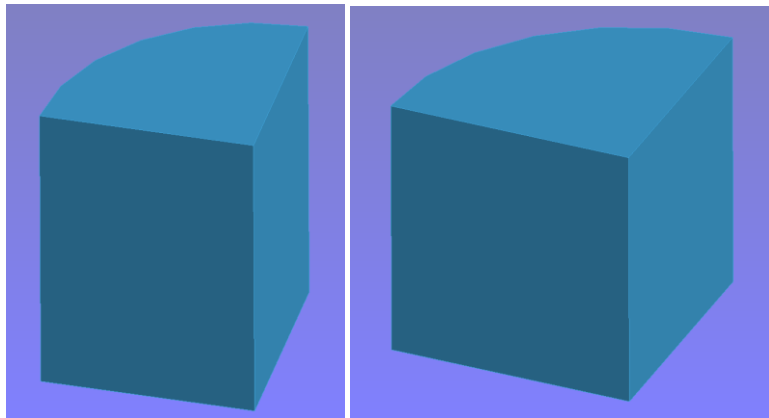


Εικόνα 5.1 : Μοντέλο μήτρας κονιομεταλλουργίας

- Δοκίμιο

Πρόκειται για ένα κύλινδρο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Για το δοκίμιο με την σκόνη **Al 40+325**
 - Διάμετρος : **11.0 mm**
 - Ύψος : **8.0 mm**
- Για το δοκίμιο με την σκόνη **Al 325**
 - Διάμετρος : **11.0 mm**
 - Ύψος : **6.0 mm**

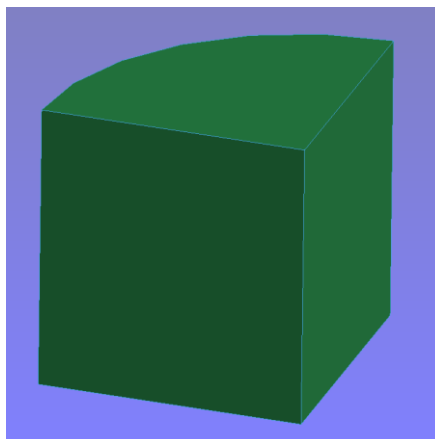


Εικόνα 5.2 : Μοντέλο σκόνης Al 40 + 325 (αριστερά) και Al 325 (δεξιά)

- Έμβολο

Πρόκειται για ένα κύλινδρο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Διάμετρος : **11.0 mm**
- Ύψος : **6.0 mm**



Εικόνα 5.3 : Μοντέλο εμβόλου κωνιομεταλλουργίας

Σημείωση

Η κατασκευή της γεωμετρίας και η πλεγματοποίηση του μοντέλου έχουν γίνει στο **1/4** της συνολικής διάταξης εκμεταλλευόμενοι την διπλή συμμετρία της.

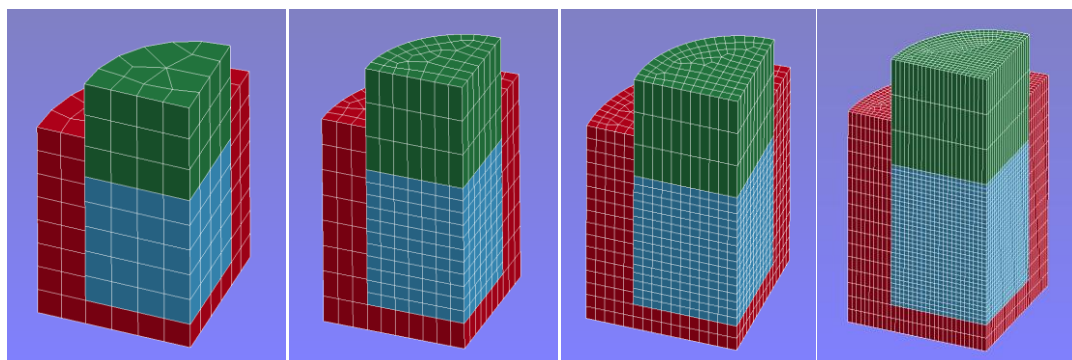
Προκειμένου να καθοριστεί η κατάλληλη πυκνότητα πλέγματος των μοντέλων δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές πλεγματοποιήσεις. Σε όλες τις προσομοιώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί **SOLID** πεπερασμένα στοιχεία.

Μοντέλο συμπίεσης σκόνης αλουμινίου 40+325

Χρησιμοποιήθηκε πλεγματοποίηση τυχαίας μορφής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Περιφέρεια (mm)	Συνολικός αριθμός πεπερασμένων σκόνης
Πλεγματοποίηση 1	1.375	1.375	1.6	1.44	65
Πλεγματοποίηση 2	0.786	0.786	0.73	0.72	517
Πλεγματοποίηση 3	0.5	0.5	0.5	0.51	1600
Πλεγματοποίηση 4	0.25	0.25	0.25	0.25	13024

Πίνακας 5.1 : Διαστάσεις πλέγματος και αριθμός πεπερασμένων στοιχείων σκόνης AI 40+325



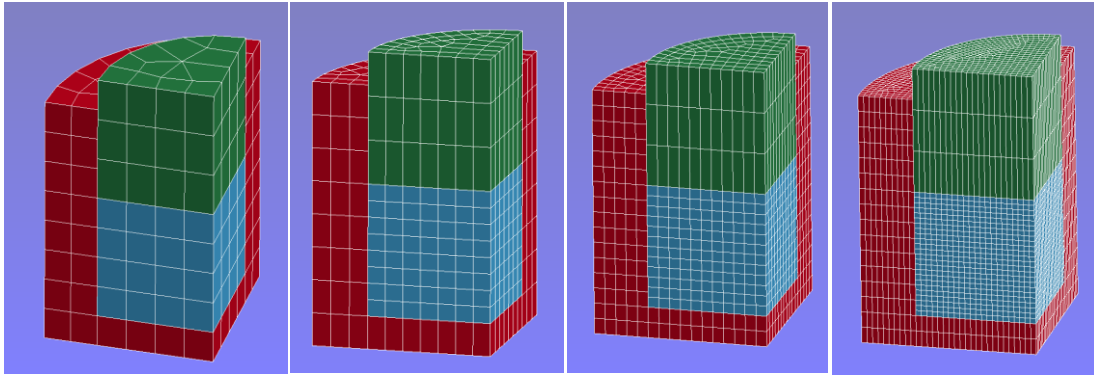
Εικόνα 5.4 : Πλεγματοποίηση 1 -> Πλεγματοποίηση 4 (αριστερά -> δεξιά). Μοντέλο σκόνης AI 40+325

Μοντέλο συμπίεσης σκόνης αλουμινίου 325

Ομοίως, χρησιμοποιήθηκε πλεγματοποίηση τυχαίας μορφής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Περιφέρεια (mm)	Συνολικός αριθμός πεπερασμένων σκόνης
Πλεγματοποίηση 1	1.375	1.375	1.5	1.44	56
Πλεγματοποίηση 2	0.786	0.786	0.75	0.72	376
Πλεγματοποίηση 3	0.5	0.5	0.5	0.51	1200
Πλεγματοποίηση 4	0.25	0.25	0.25	0.25	9768

Πίνακας 5.2 : Διαστάσεις πλέγματος και αριθμός πεπερασμένων στοιχείων σκόνης AI 325

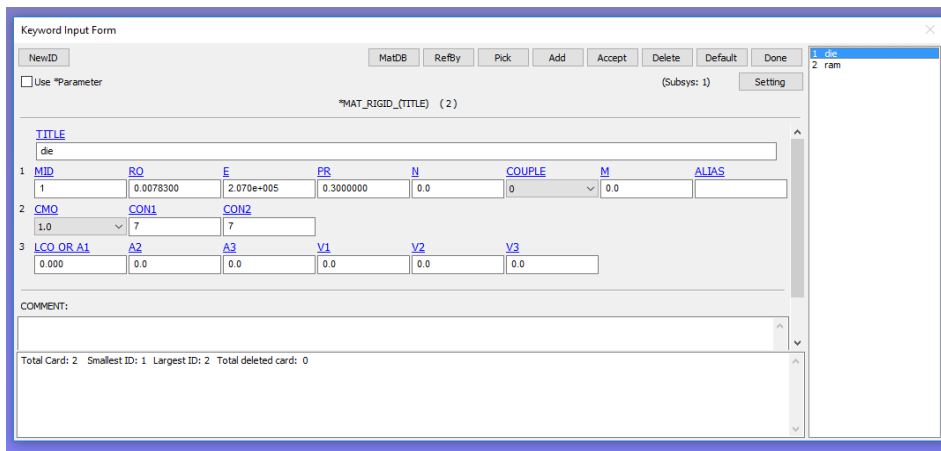


Εικόνα 5.5 : Πλεγματοποίηση 1 -> Πλεγματοποίηση 4 (αριστερά -> δεξιά). Μοντέλο σκόνης AI 325

5.2.2 Υλικά μοντέλου

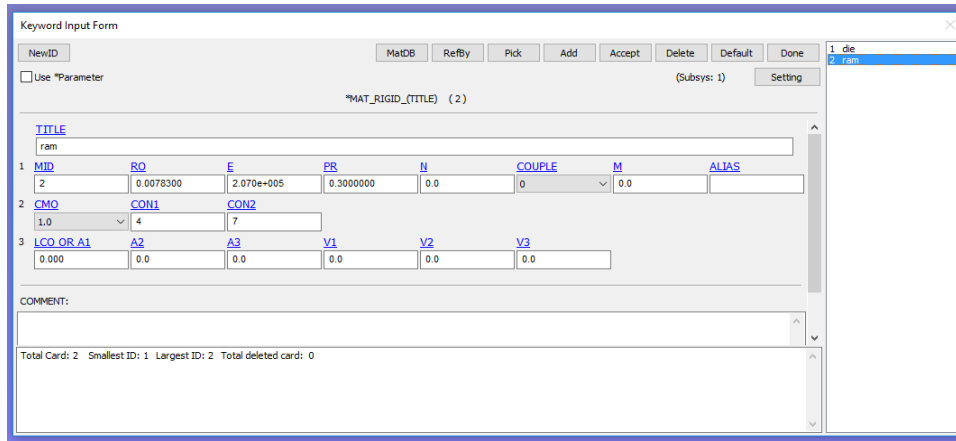
Το υλικό της μήτρας και του εμβόλου μοντελοποιήθηκε ως στερεό σώμα (**RIGID**) με τις ιδιότητες του χάλυβα. Όσον αφορά τους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας έχουμε τα εξής :

- Μήτρα
 - Δεσμευμένες μετατοπίσεις κατά x,y,z
 - Δεσμευμένες περιστροφές κατά x,y,z



Εικόνα 5.6 : Καρτέλα υλικού μήτρας

- Έμβολο
 - Δεσμευμένες μετατοπίσεις κατά x,y
 - Δεσμευμένες περιστροφές κατά x,y,z



Εικόνα 5.7 : Καρτέλα υλικού εμβόλου

Για το υλικό της σκόνης χρησιμοποιήθηκε το **GEOLOGIC_CAP_MODEL** το οποίο έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

- Σκόνη Al 40+325

Για την μοντελοποίηση του υλικού της σκόνης **Al 40+325** απαιτείται ο προσδιορισμός της αρχικής πυκνότητας (ρ_0), του αρχικού μέτρου όγκου (K_0) και του αρχικού μέτρου διάτμησης (G_0).

Η αρχική πυκνότητα έχει υπολογιστεί και έχει βρεθεί ίση με :

$$\rho_0 = 1.29 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό του αρχικού μέτρου όγκου (K_0) και του αρχικού μέτρου διάτμησης (G_0) θα γίνει η ακόλουθη εκτίμηση σύμφωνα με αντίστοιχη βιβλιογραφία.

$$K_0 = \rho_{rel} \cdot K$$

$$G_0 = \rho_{rel} \cdot G$$

Όπου K : μέτρο όγκου συμπαγούς αλουμινίου, G : μέτρο διάτμησης συμπαγούς αλουμινίου, ρ_{rel} : σχετική αρχική πυκνότητα σκόνης

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_0}{\rho_{συμπ}} = 0.48$$

Όπου $\rho_{συμπ}$: πυκνότητα συμπαγούς αλουμινίου

Από αντίστοιχη βιβλιογραφία βρίσκουμε ότι :

$$K = 67.55 \text{ GPa}$$

$$G = 25.9 \text{ GPa}$$

Συνεπώς,

$$K_0 = 32.38 \text{ GPa}$$

$$G_0 = 12.42 \text{ GPa}$$

Για την μοντελοποίηση του υλικού, όπως έχει αναφερθεί στη θεωρία, χρειαζόμαστε τον προσδιορισμό των παραμέτρων α , β , γ , θ οι οποίες προσδιορίζονται από τριαξονικές πειραματικές δοκιμές ισοστατικής συμπίεσης καθώς και την παράμετρο R . Οι παράμετροι αυτοί έχουν ληφθεί από την βιβλιογραφία.

Συνεπώς,

$$\alpha = 0$$

$$\beta = 0$$

$$\gamma = 0$$

$$\theta = 0.394$$

$$R = 2.8$$

Σε ότι αφορά τον προσδιορισμό των παραμέτρων W , D έχει γίνει η αντίστοιχη ανάλυση στην πειραματική διαδικασία.

Συνεπώς,

$$W = 0.736$$

$$D = 0.0056 \text{ MPa}^{-1}$$

- Σκόνη Al 325

Ομοίως, η αρχική πυκνότητα έχει υπολογιστεί και έχει βρεθεί ίση με :

$$\rho_0 = 1.38 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

Επίσης,

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_0}{\rho_{συμπ}} = 0.51$$

Συνεπώς,

$$K_0 = \rho_{rel} \cdot K = 34.62 \text{ GPa}$$

$$G_0 = \rho_{rel} \cdot G = 13.27 \text{ GPa}$$

Ομοίως, οι παράμετροι α , β , γ , θ και R έχουν ληφθεί από την βιβλιογραφία.

Συνεπώς,

$$\alpha = 0$$

$$\beta = 0$$

$$\gamma = 0$$

$$\theta = 0.394$$

$$R = 2.8$$

Σε ότι αφορά τον προσδιορισμό των παραμέτρων W , D έχει γίνει η αντίστοιχη ανάλυση στην πειραματική διαδικασία.

Συνεπώς,

$$W = 0.825$$

$$D = 0.0031 \text{ MPa}^{-1}$$

5.2.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές

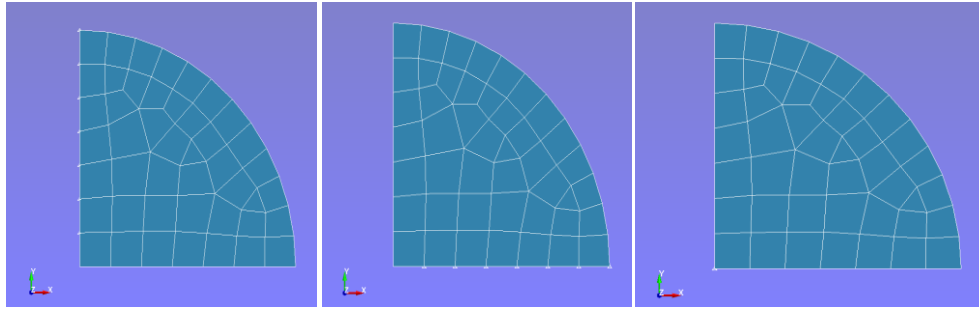
Οι επαφές μεταξύ των δομικών μερών του μοντέλου είναι οι ακόλουθες δυο :

- Μήτρα - σκόνη
- Έμβολο - σκόνη

Ως είδος της διεπαφής επιλέχθηκε το **AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE** ενώ οι συντελεστές τριβής μεταξύ των δομικών μερών επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής στατικής τριβής είναι ίσος με **0.24** και ο συντελεστής δυναμικής τριβής ίσος με **0.02**.

Οι συνοριακές συνθήκες αφορούν την σκόνη και είναι οι ακόλουθες :

- Δέσμευση μετατόπισης κατά x και δέσμευση περιστροφής κατά y,z (αριστερή εικόνα)
- Δέσμευση μετατόπισης κατά y και δέσμευση περιστροφής κατά x,z (μεσαία εικόνα)
- Δέσμευση μετατόπισης κατά x,y και δέσμευση περιστροφής κατά x,y,z (δεξιά εικόνα)



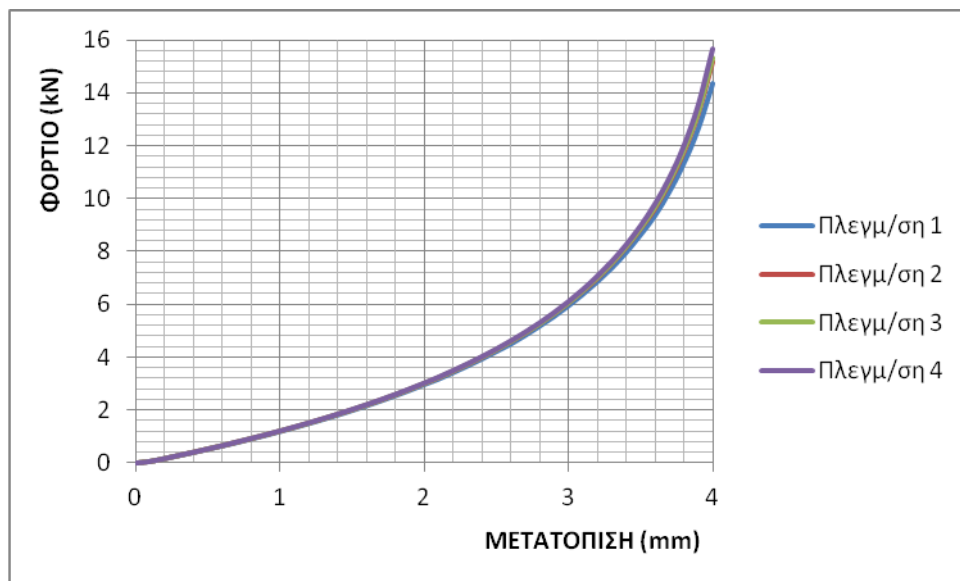
Εικόνα 5.8 : Δέσμευση βαθμών ελευθερίας στους κόμβους

Η ταχύτητα του εμβόλου τέθηκε ίση με **1 mm/msec**.

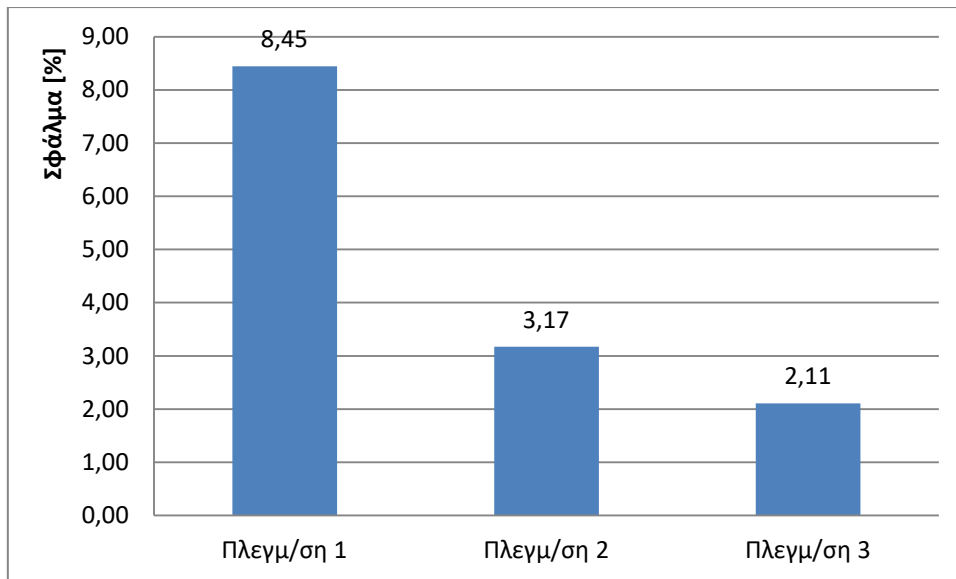
5.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης σκόνης αλουμινίου 40+325

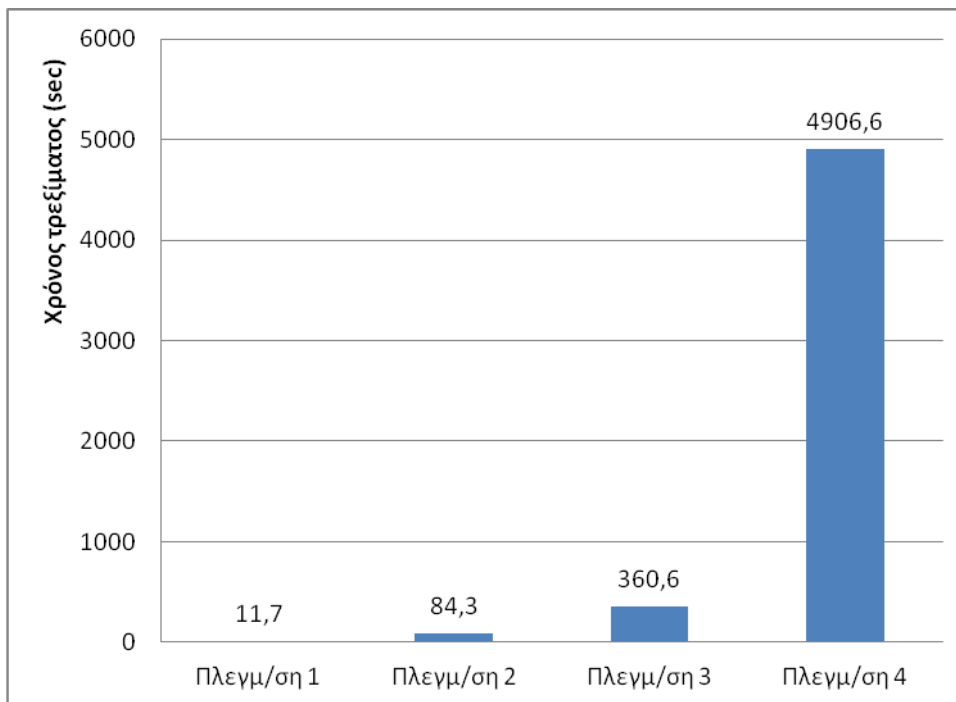
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τέσσερις διαφορετικές πλεγματοποιήσεις που δοκιμάστηκαν το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα των τριών πλεγματοποιήσεων από την πιο πυκνή πλεγματοποίηση (Πλεγματοποίηση 4) καθώς και ο χρόνος τρεξίματος των τεσσάρων διαφορετικών προσομοιώσεων.



Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις του μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325



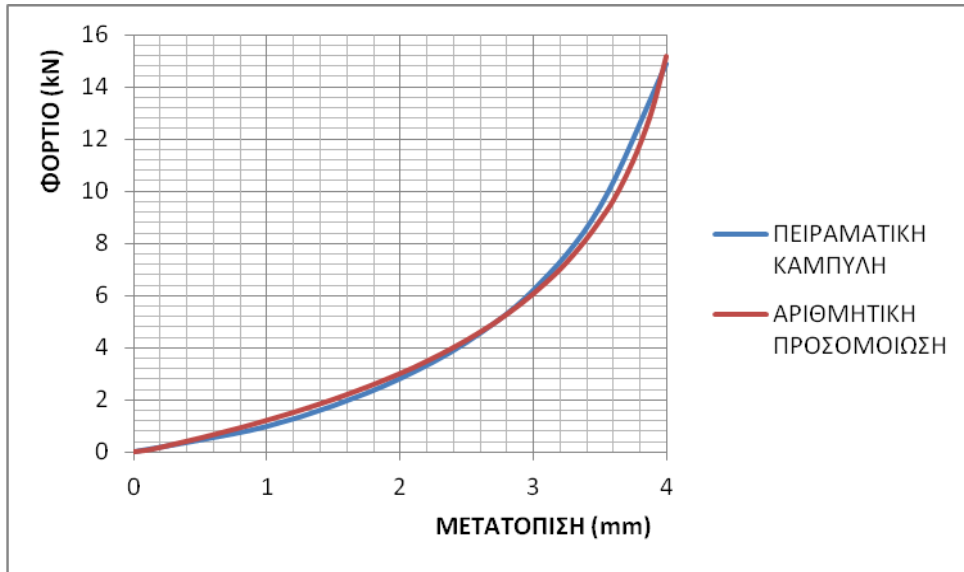
Διάγραμμα 5.2 : Ποσοστιαίο σφάλμα πλεγματοποιήσεων μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325



Διάγραμμα 5.3 : Χρόνος τρεξίματος για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325

Συνδυάζοντας τον χρόνο τρεξίματος των προσομοιώσεων με το ποσοστιαίο σφάλμα των πλεγματοποιήσεων επιλέγεται η **Πλεγματοποίηση 2** ως η απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης με την πειραματική καμπύλη.

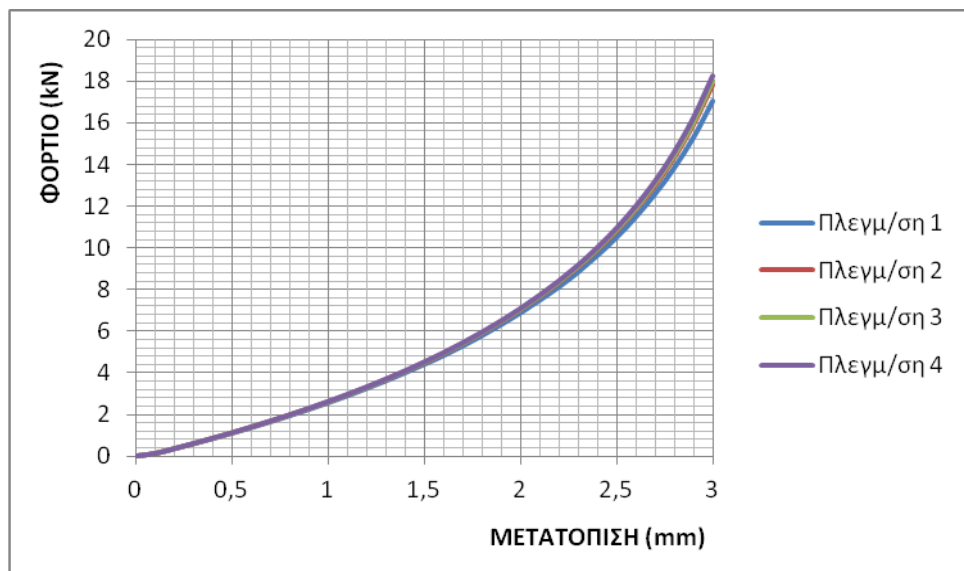


Διάγραμμα 5.4 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης συμπίεσης σκόνης **Al 40+325**

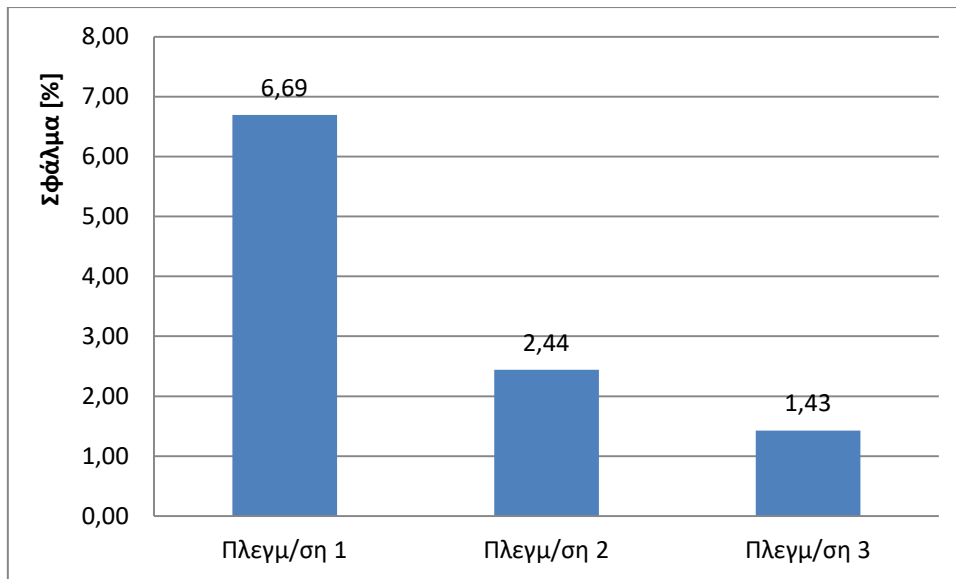
Παρατηρείται ότι η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης της δεύτερης πλεγματοποίησης παρακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό την πειραματική καμπύλη παρουσιάζοντας μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα **14.6 %**.

➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης σκόνης αλουμινίου 325

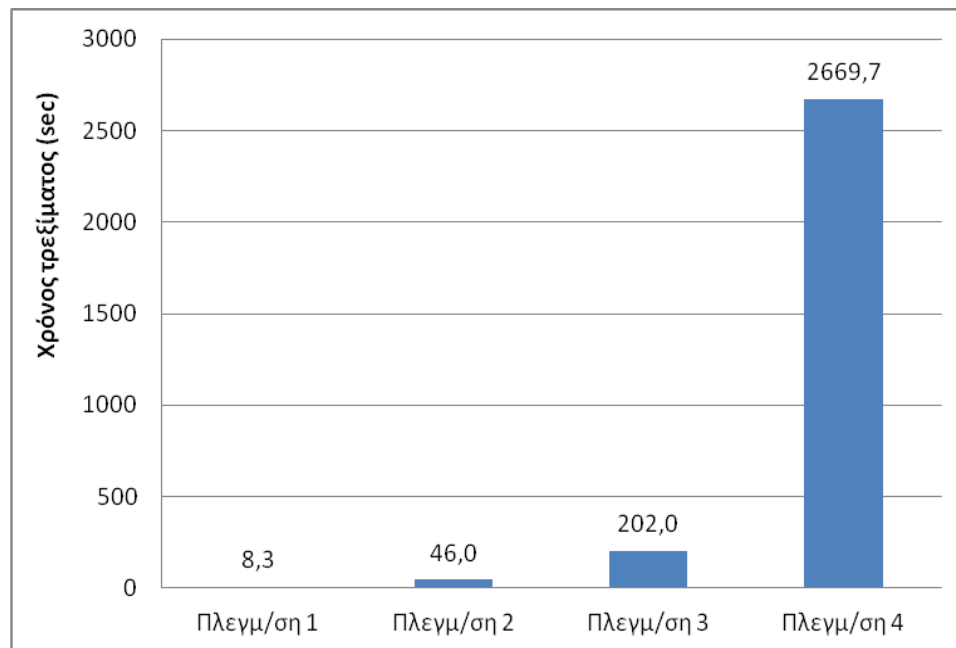
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τέσσερις διαφορετικές πλεγματοποιήσεις που δοκιμάστηκαν το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα των τριών πλεγματοποιήσεων από την πιο πυκνή πλεγματοποίηση (Πλεγματοποίηση 4) καθώς και ο χρόνος τρεξίματος των τεσσάρων διαφορετικών προσομοιώσεων.



Διάγραμμα 5.5 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις του μοντέλου συμπίεσης σκόνης **Al 325**



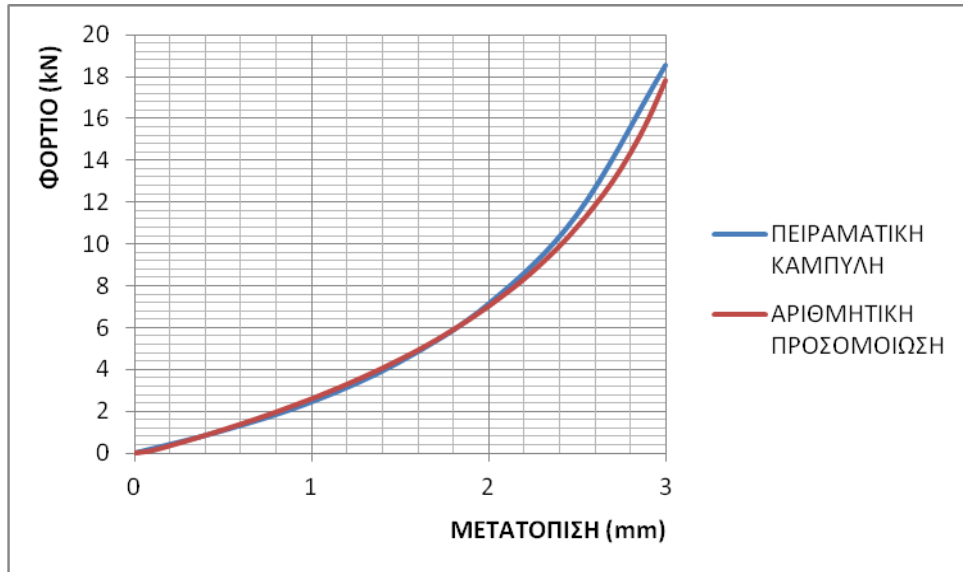
Διάγραμμα 5.6 : Ποσοστιαίο σφάλμα πλεγματοποιήσεων μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 325



Διάγραμμα 5.7 : Χρόνος τρεξίματος για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 325

Συνδυάζοντας τον χρόνο τρεξίματος των προσομοιώσεων με το ποσοστιαίο σφάλμα των πλεγματοποιήσεων επιλέγεται η **Πλεγματοποίηση 2** ως η απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.8 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης συμπίεσης σκόνης Al 325

Παρατηρείται ότι η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης της δεύτερης πλεγματοποίησης παρακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό την πειραματική καμπύλη παρουσιάζοντας μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα **8.4 %**.

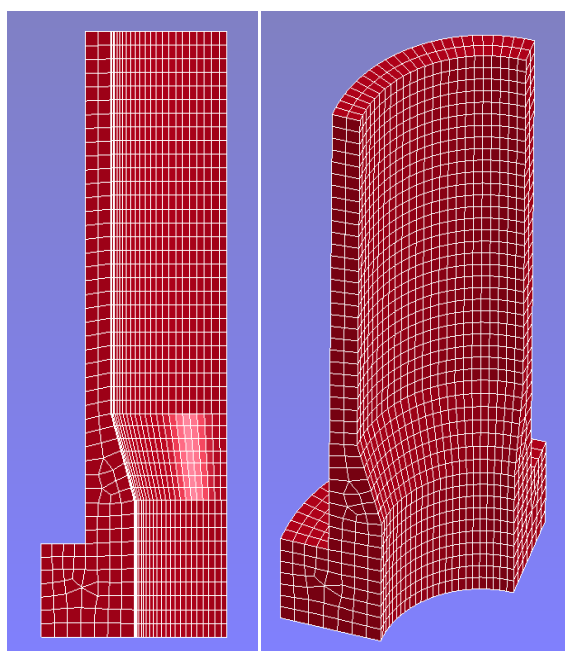
5.3 Περιγραφή μοντέλου διέλασης

5.3.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου

Τα μοντέλα της διέλασης σωλήνων αποτελούνται από τρία δομικά στοιχεία :

- Μήτρα

Οι διαστάσεις της μήτρας έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση της μήτρας έχει επιλεγθεί αραιή πλεγματοποίηση κατά το πάχος και κατά το μήκος διότι πρόκειται για άκαμπτο απαραμόρφωτο σώμα. Στην περιφέρεια της μήτρας έχουν εισαχθεί **24** πεπερασμένα στοιχεία (πυκνή πλεγματοποίηση) μήκους **0.82 mm**.



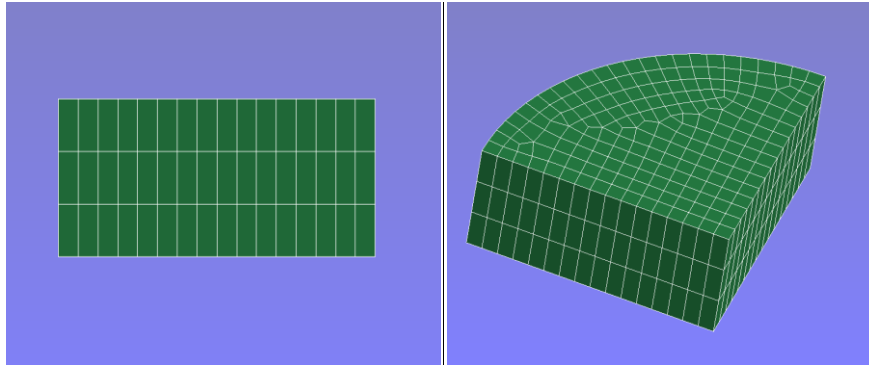
Εικόνα 5.9 : Μοντέλο μήτρας διέλασης 1ου πάσου πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

- Έμβολο

Πρόκειται για ένα κύλινδρο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Διάμετρος : **25.0 mm**
- Ύψος : **6.0 mm**

Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του εμβόλου έχει επιλεγθεί αραιή πλεγματοποίηση κατά το πάχος και κατά το μήκος διότι πρόκειται για άκαμπτο απαραμόρφωτο σώμα. Στην περιφέρεια του εμβόλου έχουν εισαχθεί **24** πεπερασμένα στοιχεία (πυκνή πλεγματοποίηση) μήκους **0.82 mm**.



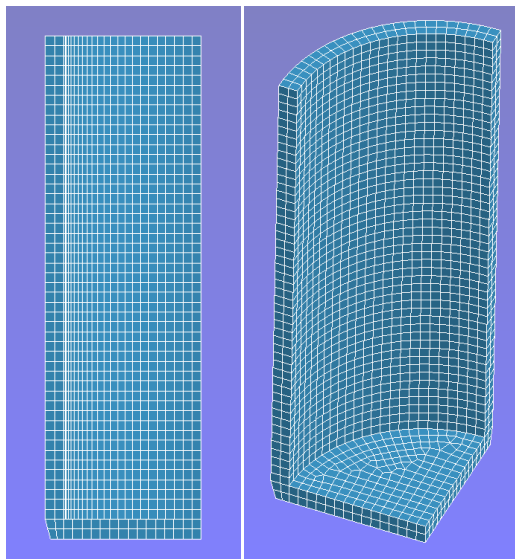
Εικόνα 5.10 : Μοντέλο εμβόλου διέλασης πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

- Σωλήνες

Έχουν χρησιμοποιηθεί δυο διαφορετικά μοντέλα σωλήνων όπου περιγράφονται στη συνέχεια.

- Δοκίμιο πάχους 1.5 mm

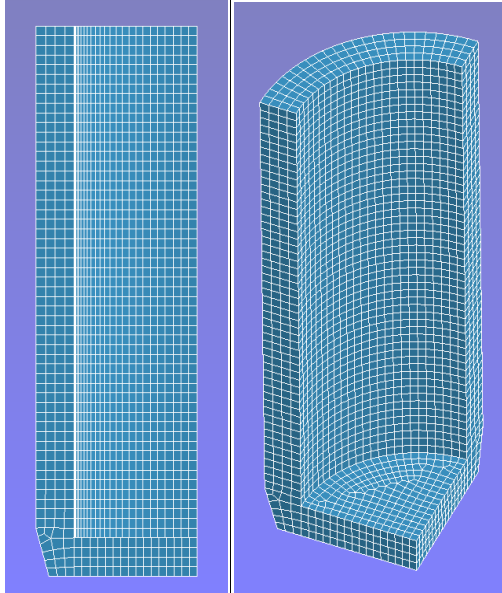
Οι διαστάσεις του δοκιμίου έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του σωλήνα έχουν χρησιμοποιηθεί **2** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **51** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.



Εικόνα 5.11 : Μοντέλο σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

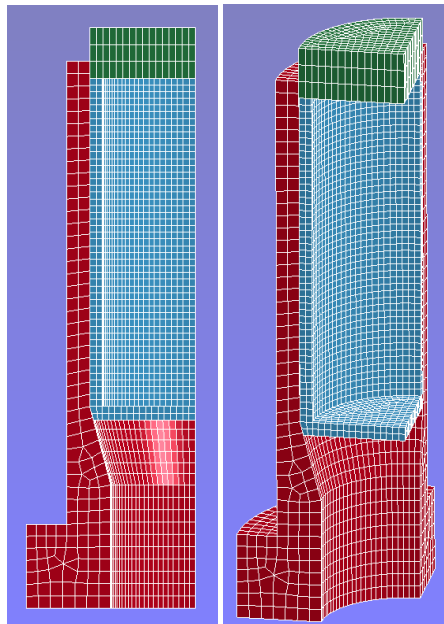
➤ Δοκίμιο πάχους 3.0 mm

Οι διαστάσεις του δοκιμίου έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του σωλήνα έχουν χρησιμοποιηθεί **4** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **57** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.



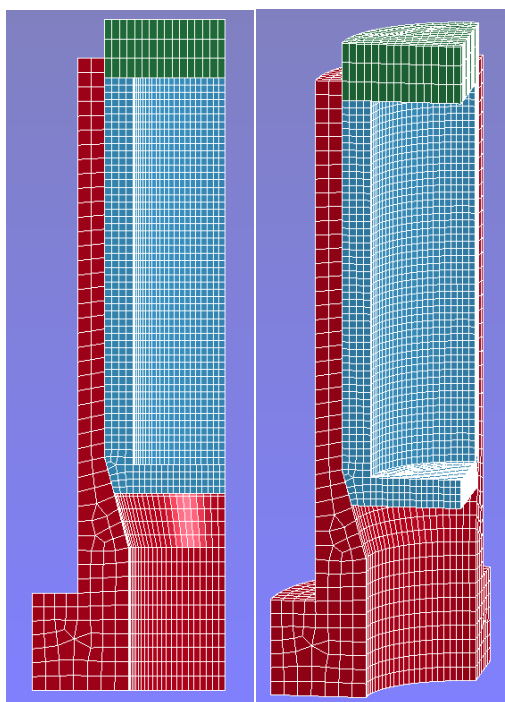
Εικόνα 5.12 : Μοντέλο σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

Μοντέλο διέλασης δοκιμίου πάχους 1.5 mm



Εικόνα 5.13 : Μοντέλο διέλασης σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

Μοντέλο διέλασης δοκιμίου πάχους 3.0 mm



Εικόνα 5.14 : Μοντέλο διέλασης σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά)

5.3.2 Υλικά μοντέλου

Το υλικό της μήτρας και του εμβόλου όπως προαναφέρθηκε μοντελοποιήθηκε ως στέρεο σώμα (**RIGID**) με τις ιδιότητες του χάλυβα. Οι δεσμευμένοι βαθμοί ελευθερίας της μήτρας και του εμβόλου είναι όπως έχουν προαναφερθεί στο μοντέλο της κonioμεταλλουργίας.

Το υλικό του σωλήνα είναι χαλκός του οποίου οι ιδιότητες έχουν προσδιοριστεί στην πειραματική διαδικασία. Από το διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης διαβάζονται οχτώ σημεία και τα καταχωρούνται στην καρτέλα υλικού. Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται τα σημεία είναι ο ακόλουθος :

Γίνεται επιλογή μιας συγκεκριμένης τιμής πραγματικής παραμόρφωσης και στη συνέχεια χαράσσεται από το σημείο αυτό ευθεία παράλληλη με την ελαστική περιοχή. Το σημείο όπου η ευθεία τέμνει το διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης είναι η πραγματική τάση που αντιστοιχεί στην ελαστική πραγματική παραμόρφωση.

Keyword Input Form

NewID: MatDB: RefBy: Pick: Add: Accept: Delete: Default: Done: 3 tube

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)

TITLE
tube

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	3	0.0089000	1.150e+005	0.3500000	260.00000	0.0	1.000e+021	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0500000	0.1000000	0.1500000	0.2000000	0.2500000	0.3000000	0.3500000
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	260.00000	280.00000	285.00000	290.00000	300.00000	310.00000	315.00000	320.00000

Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Εικόνα 5.15 : Καρτέλα υλικού σωλήνα

5.3.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές

Οι επαφές μεταξύ των δομικών μερών του μοντέλου είναι οι ακόλουθες δυο :

- Μήτρα - σωλήνας
- Έμβολο - σωλήνας

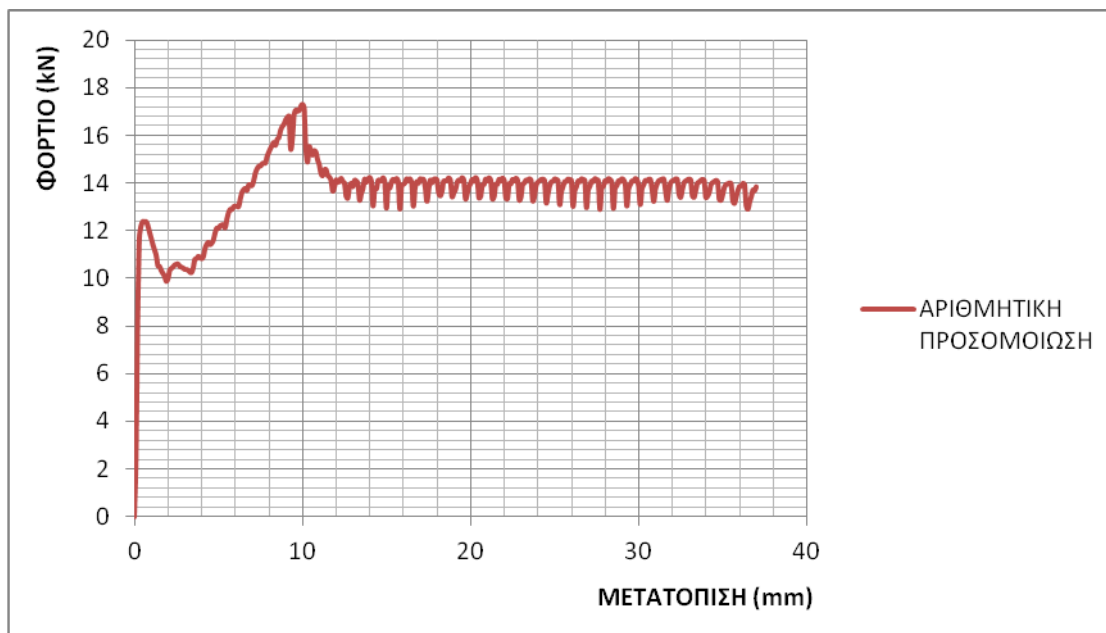
Ως είδος της διεπαφής επιλέχθηκε το **AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE** ενώ οι συντελεστές τριβής μεταξύ των δομικών μερών επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής στατικής τριβής είναι ίσος με **0.02** και ο συντελεστής δυναμικής τριβής ίσος με **0.02**.

Αντιστοίχως οι συνοριακές συνθήκες που αφορούν τον σωλήνα και το έμβολο είναι ανάλογες με αυτές του μοντέλου κonioμεταλλουργίας.

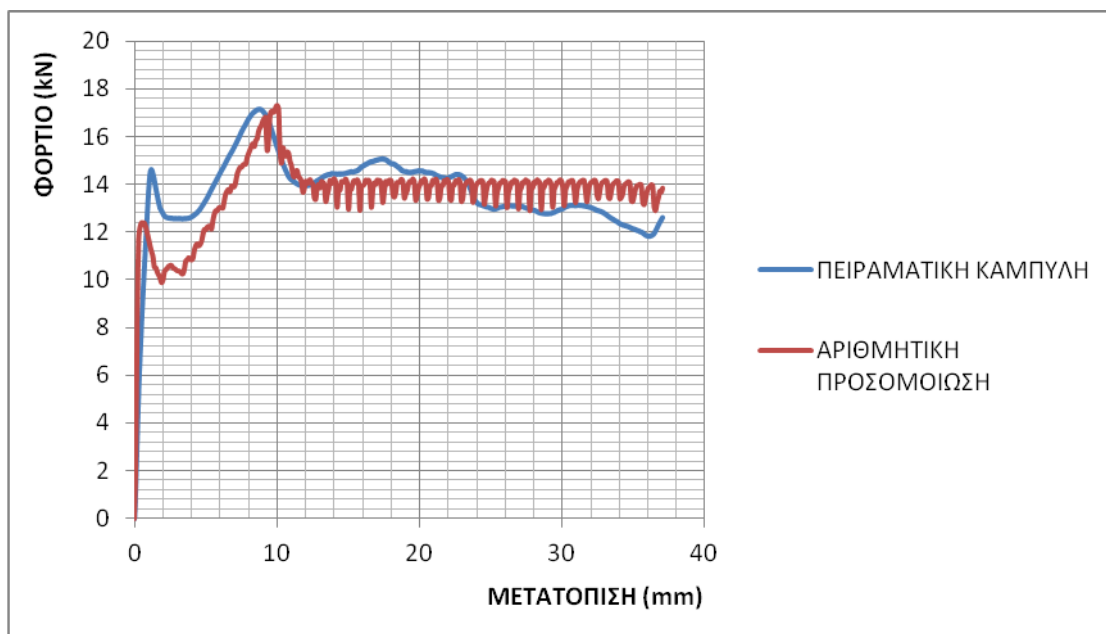
5.3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 1.5 mm

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.9 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm



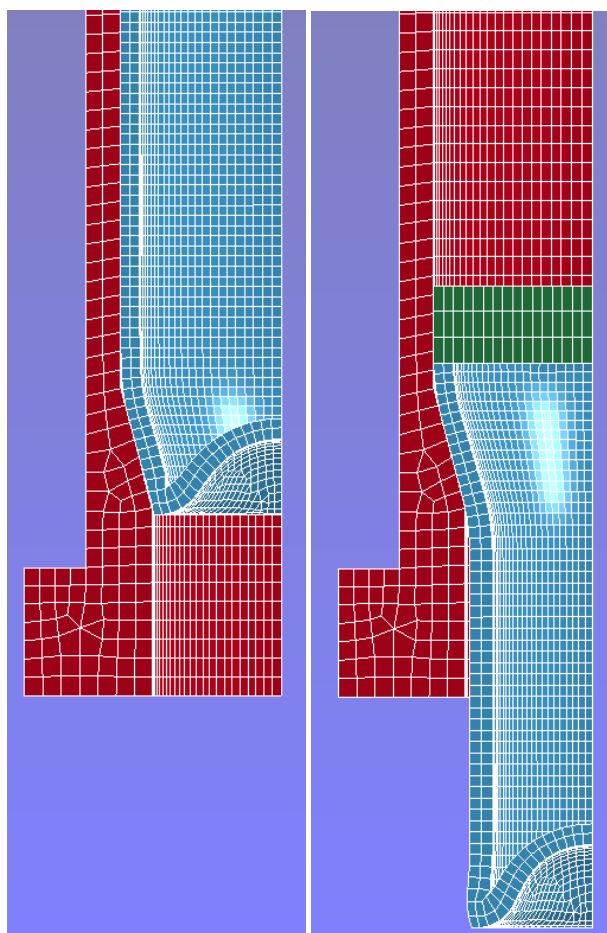
Διάγραμμα 5.10 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **1 mm** παρατηρείται το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**14.8 kN** πείραμα, **12.4 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει αρχίσει να σχηματίζεται η κοιλότητα στον πυθμένα του δοκιμίου. Στη συνέχεια, παρατηρείται μείωση του φορτίου (**12.6 kN** πείραμα, **10.4 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **2 mm** και στη συνέχεια σταθεροποίηση του μέχρι τα **4 mm** όπου και συνεχίζει να αναπτύσσεται η κοιλότητα. Ακολούθως, παρατηρείται αύξηση του φορτίου (**17.2 kN** πείραμα, **17.4 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **9 mm** όπου το δοκίμιο μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.16). Τέλος, ακολουθεί σταδιακή μείωση του φορτίου μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.16).

Να σημειωθεί, επίσης, ότι στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης. Αυτή η απόκλιση, ενδεχομένως, να οφείλεται σε όχι τόσο ακριβή προσδιορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων αλλά και του ορίου διαρροής του υλικού.

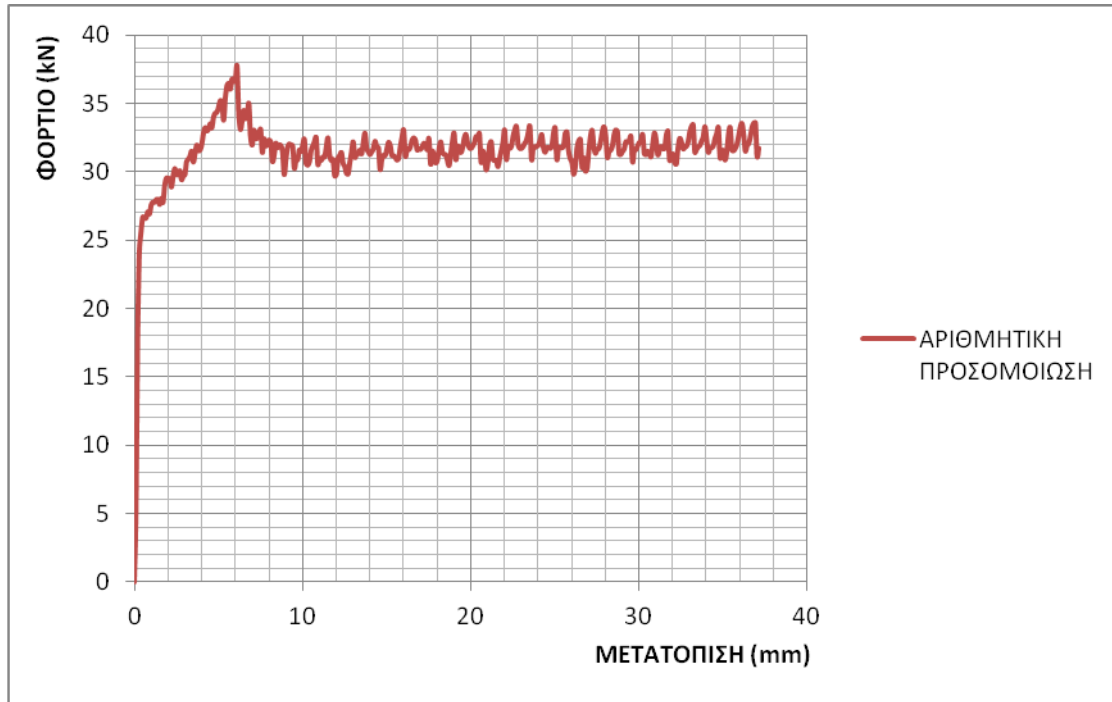
Το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα υπολογίσθηκε και βρέθηκε ίσο με **17.5 %** στην περιοχή 2 έως 4 mm.



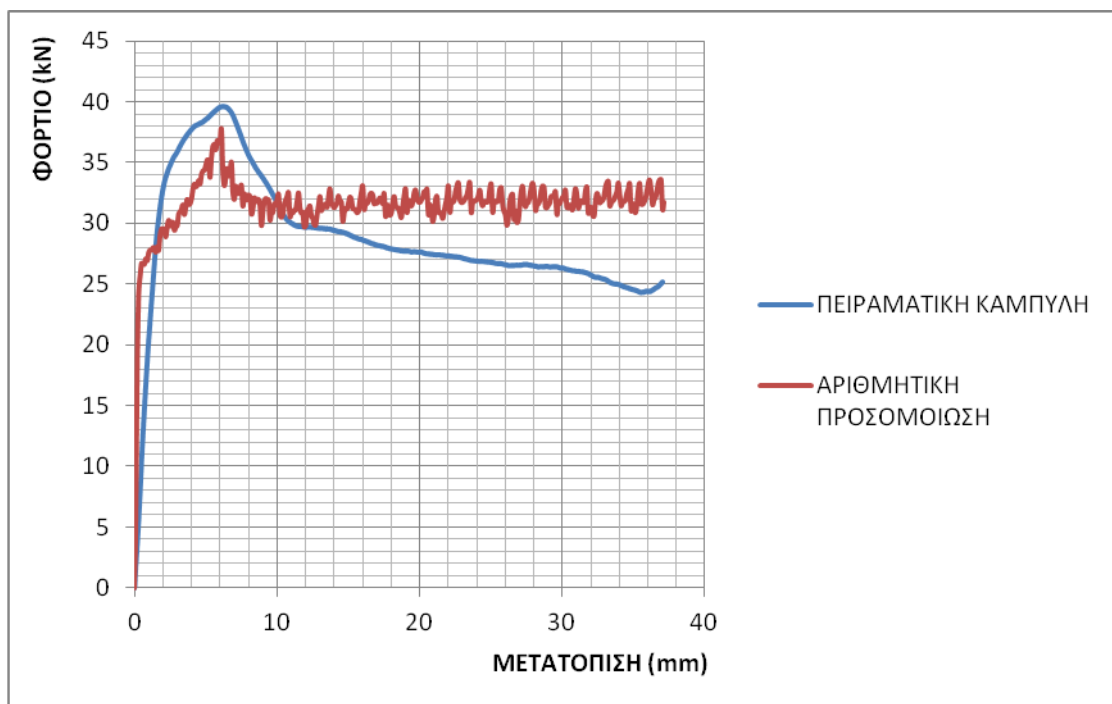
Εικόνα 5.16 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm. Εξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 3.0 mm

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.11 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm



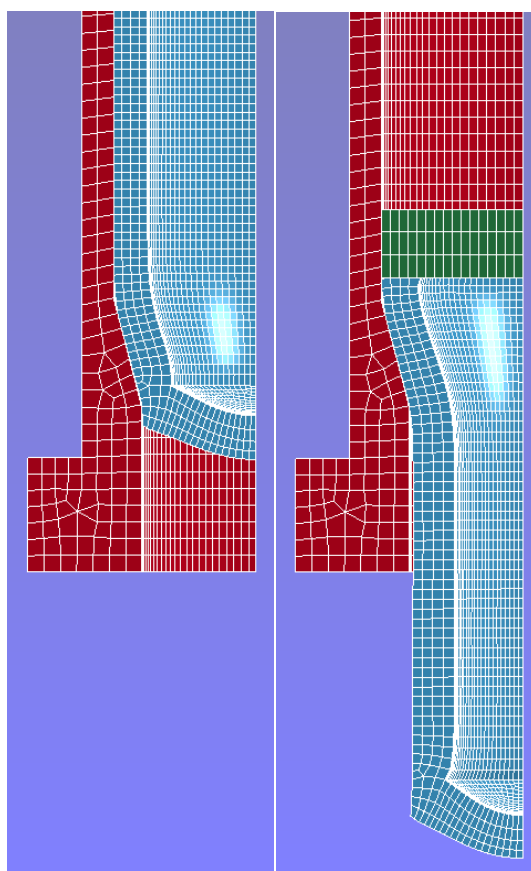
Διάγραμμα 5.12 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **6 mm** παρατηρείται η μέγιστη τιμή του φορτίου (**39.5 kN** πείραμα, **37.9 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει σχηματιστεί το εξόγκωμα στον πυθμένα του δοκίμιου. Στο σημείο αυτό, επίσης, το δοκίμιο μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.17). Τέλος, ακολουθεί σταδιακή μείωση του φορτίου μέχρι το τέλος της κατεργασίας (**25.0 kN** πείραμα, **33.0 kN** προσομοίωση) (βλέπε Εικόνα 5.17).

Να σημειωθεί, επίσης, ότι όπως και προηγουμένως, στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης.

Το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα υπολογίσθηκε και βρέθηκε ίσο με **32.0 %** στο τέλος της κατεργασίας.



Εικόνα 5.17 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm. Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

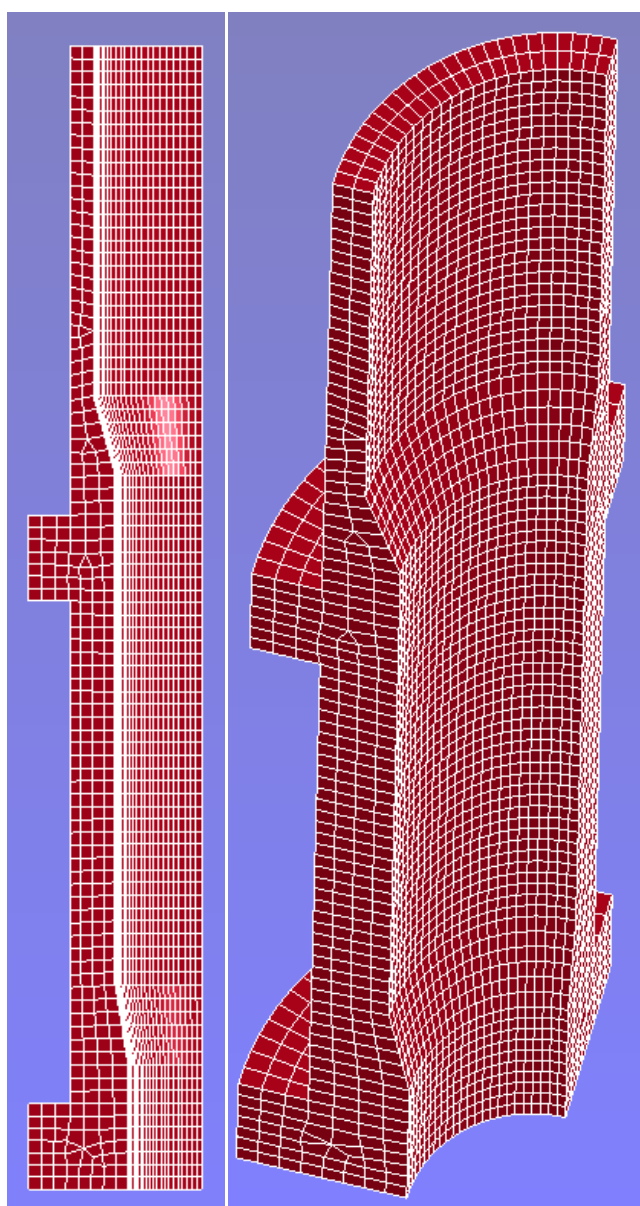
5.4 Περιγραφή μοντέλου διέλασης P.I.T

5.4.1 Γεωμετρία και πλεγματοποίηση μοντέλου

Τα μοντέλα της διέλασης PIT αποτελούνται από τέσσερα δομικά στοιχεία :

- Μήτρα

Η μήτρα του πρώτου σταδίου διέλασης και του δεύτερου σταδίου έχουν σχεδιασθεί ως ένα σώμα όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι διαστάσεις έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση της μήτρας έχει επιλεγθεί αραιή πλεγματοποίηση κατά το πάχος και κατά το μήκος διότι πρόκειται για άκαμπτο απαραμόρφωτο σώμα. Στην περιφέρεια της μήτρας έχουν εισαχθεί **24** πεπερασμένα στοιχεία (πυκνή πλεγματοποίηση) μήκους **0.82 mm**.



Εικόνα 5.18 : Μοντέλο μήτρας 1ου πάσου και 2ου πάσου διέλασης. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά)

- Έμβολο

Το μοντέλο του εμβόλου έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό της διέλασης στην παράγραφο **5.3.1**.

- Σωλήνες

Έχουν χρησιμοποιηθεί τρία διαφορετικά μοντέλα σωλήνων όπου περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

- Δοκίμιο πάχους 1.5 mm (βλέπε Πειραματική Διαδικασία Δοκίμιο 1, 2 και 4)

Οι διαστάσεις των δοκιμίων έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις του μοντέλου έχουν σχεδιασθεί στην μέση τιμή των διαστάσεων των δοκιμίων. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του σωλήνα έχουν χρησιμοποιηθεί **2** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **58** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.

- Δοκίμιο πάχους 1.5 mm (βλέπε Πειραματική Διαδικασία Δοκίμιο 3)

Οι διαστάσεις του δοκιμίου έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του σωλήνα έχουν χρησιμοποιηθεί **2** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **58** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.

- Δοκίμιο πάχους 3.0 mm (βλέπε Πειραματική Διαδικασία Δοκίμιο Α, Β, Γ και Δ)

Οι διαστάσεις των δοκιμίων έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία. Ομοίως, οι διαστάσεις του μοντέλου έχουν σχεδιασθεί στην μέση τιμή των διαστάσεων των δοκιμίων. Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση του σωλήνα έχουν χρησιμοποιηθεί **4** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **57** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.

- Σκόνη

Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο διαφορετικά μοντέλα σκόνης όπου περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

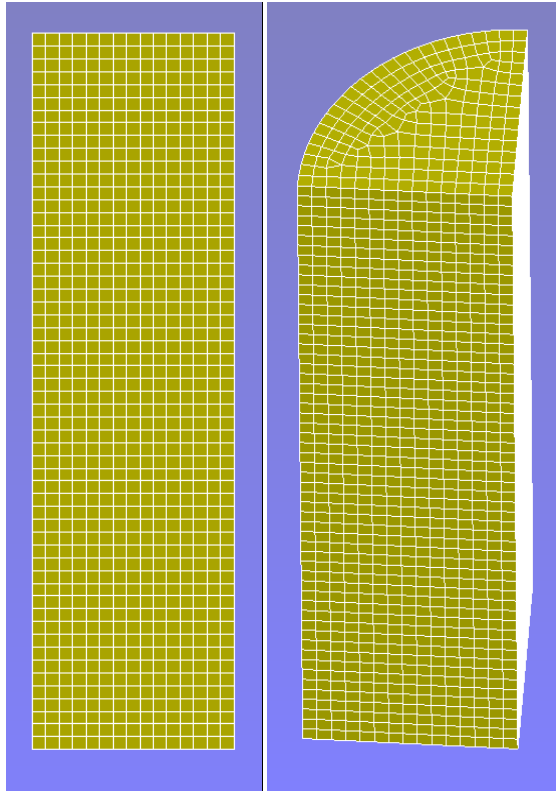
- Σκόνη στον σωλήνα πάχους 1.5 mm

Πρόκειται για ένα κύλινδρο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Διάμετρος : **22.0 mm**

- Ύψος : **37.5 mm**

Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση της σκόνης έχουν χρησιμοποιηθεί **15** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **56** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.



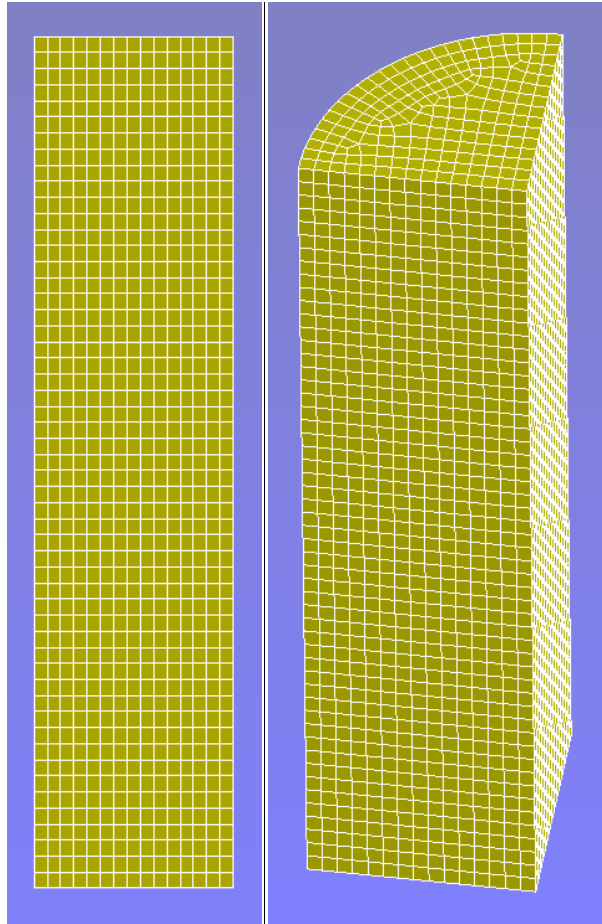
Εικόνα 5.19 : Μοντέλο σκόνης στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5mm. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά)

➤ Σκόνη στον σωλήνα πάχους 3.0 mm

Πρόκειται για ένα κύλινδρο με τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Διάμετρος : **19.0 mm**
- Ύψος : **37.0 mm**

Σε ότι αφορά την πλεγματοποίηση της σκόνης έχουν χρησιμοποιηθεί **15** πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος, **53** κατά το μήκος και **24** στην περιφέρεια.



Εικόνα 5.20 : Μοντέλο σκόνης στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0mm. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά)

5.4.2 Υλικά μοντέλου

Σε ότι αφορά το υλικό της μήτρας, του εμβόλου, του σωλήνα και της σκόνης έχει γίνει αναλυτική περιγραφή στις προηγούμενες παραγράφους.

5.4.3 Συνοριακές συνθήκες και διεπαφές

Οι επαφές μεταξύ των δομικών μερών του μοντέλου είναι οι ακόλουθες τρεις :

- Μήτρα - σωλήνας
- Έμβολο - σωλήνας, σκόνη
- Σωλήνας - σκόνη

Επιλέχθηκε το **AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE** για τις πρώτες δυο ενώ για την τελευταία επιλέχθηκε το **AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE**.

Οι συντελεστές τριβής μεταξύ των δομικών μερών επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφίας με τιμές που έχουν προαναφερθεί στα προηγούμενα μοντέλα.

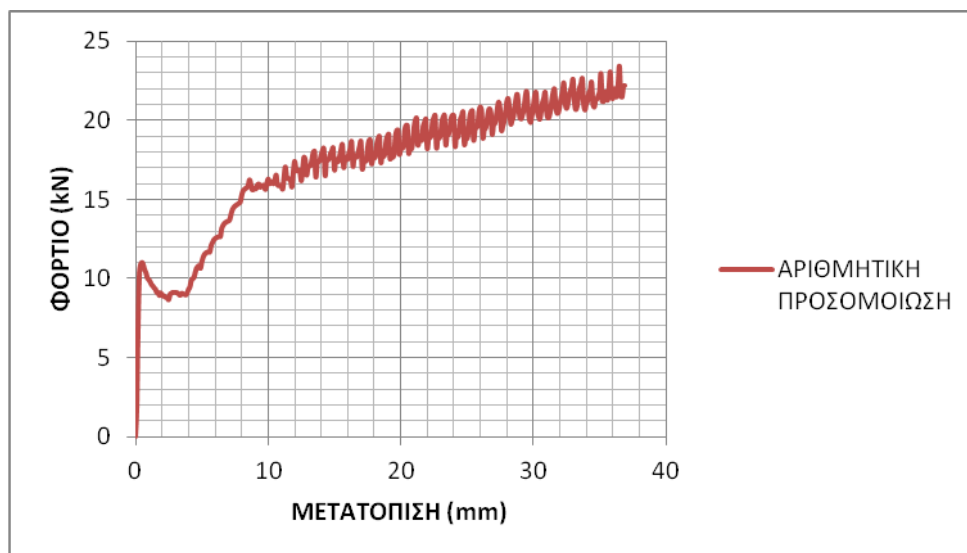
Αντιστοίχως οι συνοριακές συνθήκες αφορούν τον σωλήνα και την σκόνη είναι ανάλογες με τα προηγούμενα μοντέλα.

5.4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

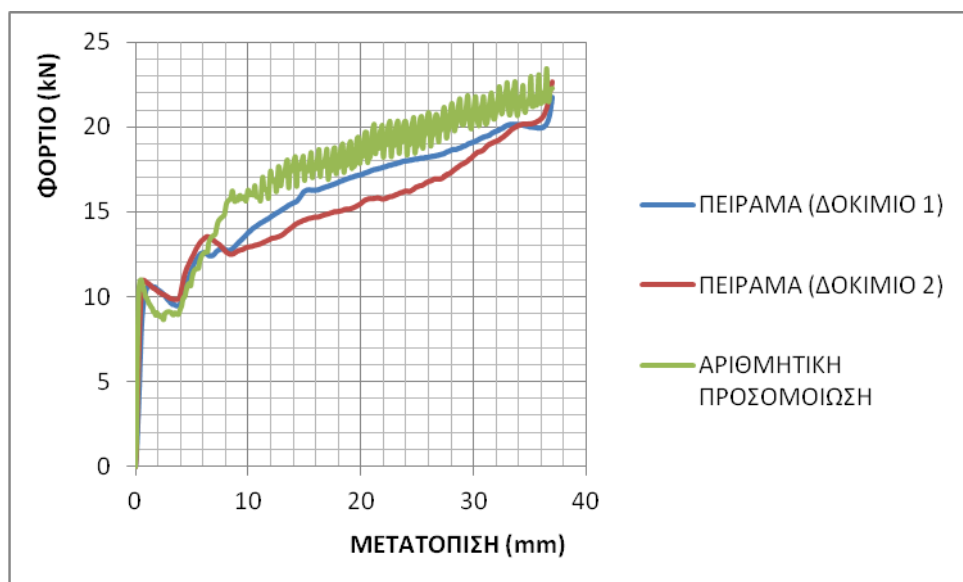
- Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 1.5 mm και σκόνης AI 40+325

1ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.13 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 40+325 (1ο πάσο)



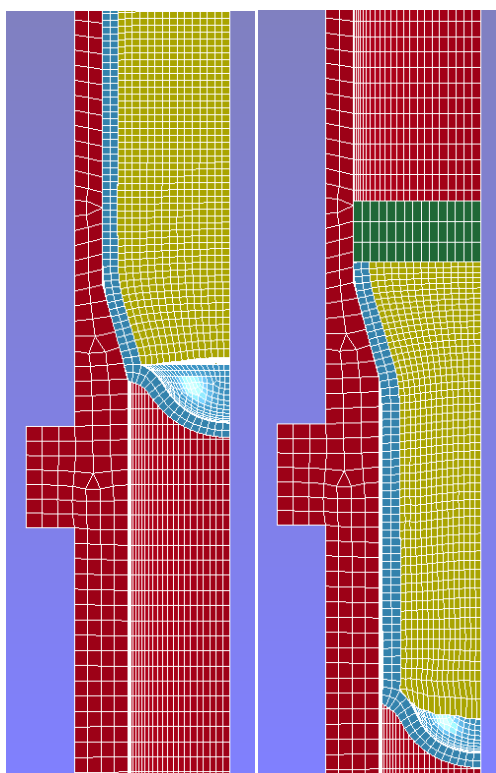
Διάγραμμα 5.14 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 40+325 (1ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **1 mm** παρατηρείται το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**10.8 kN** πείραμα, **11.0 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει αρχίσει να σχηματίζεται το εξόγκωμα στον πυθμένα του δοκιμίου. Στη συνέχεια, έχουμε μείωση του φορτίου (**9.5 kN** πείραμα, **9.0 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **4 mm** και στη συνέχεια απότομη αύξηση του (**12.5 kN** πείραμα δοκίμιο 1, **13.5 kN** πείραμα δοκίμιο 2, **16.0kN** προσομοίωση) μέχρι τα **8 mm** όπου μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.21). Τέλος, έχουμε σταδιακή αύξηση του φορτίου μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.21).

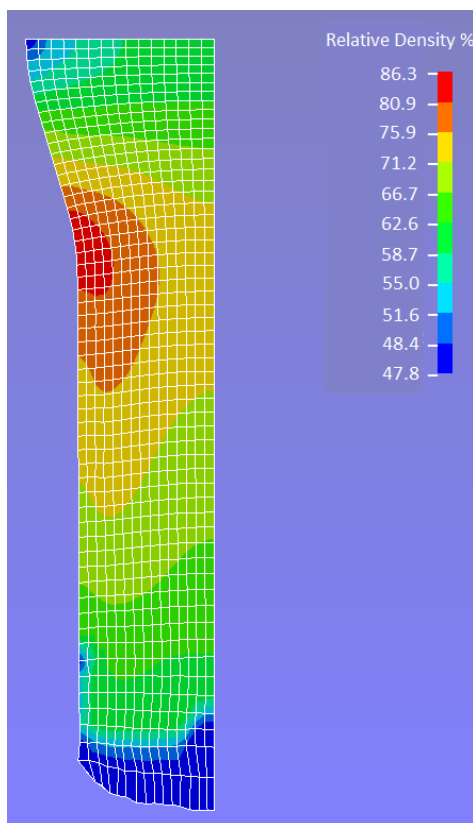
Να σημειωθεί, επίσης, ότι στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται μετά την μετατόπιση των 8 mm έως το τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **28.0 %** και για τις δυο πειραματικές καμπύλες.



Εικόνα 5.21 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 40+325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο πρώτο πάσο διέλασης.

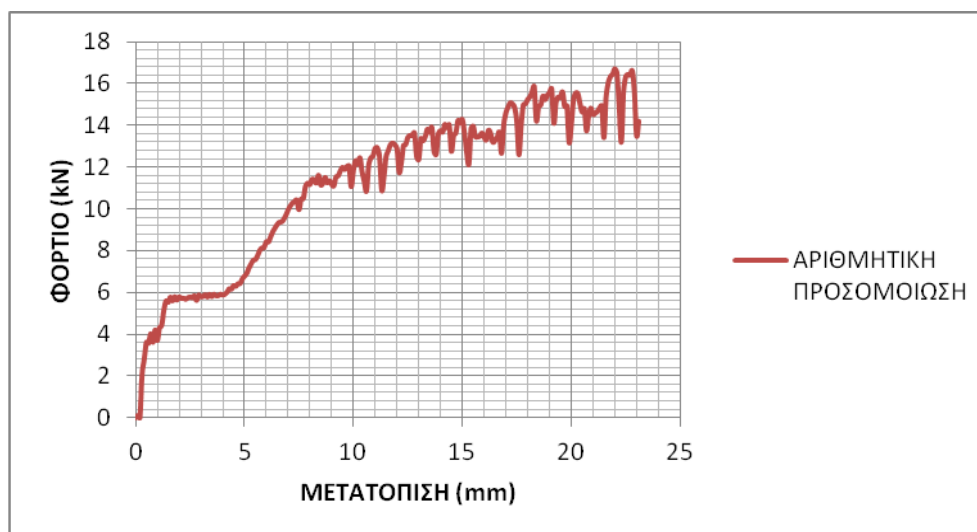


Εικόνα 5.22 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο)

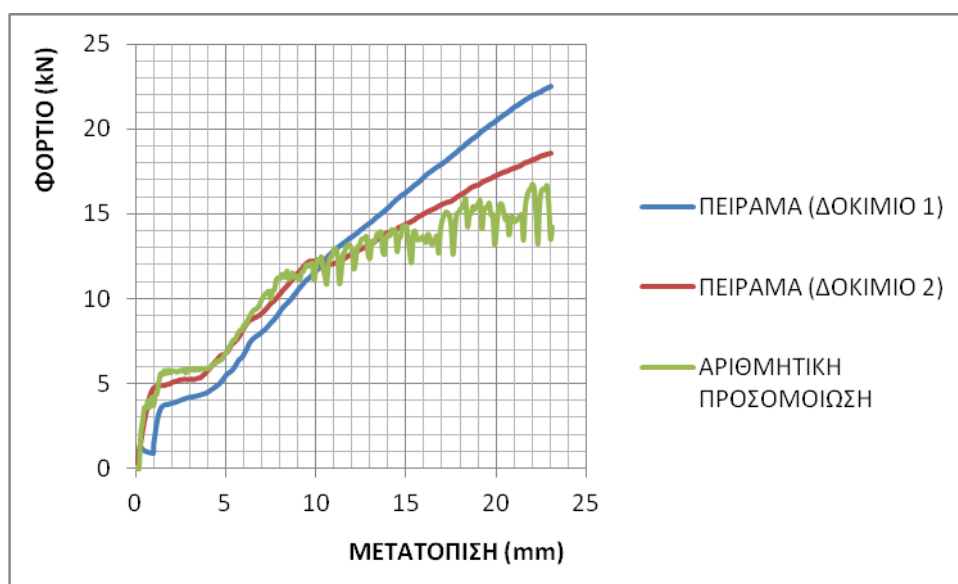
Παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**80.9 -86.3 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

2ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.15 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο)

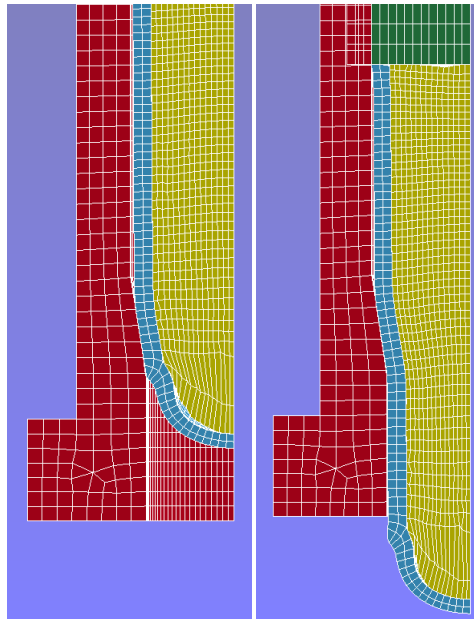


Διάγραμμα 5.16 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

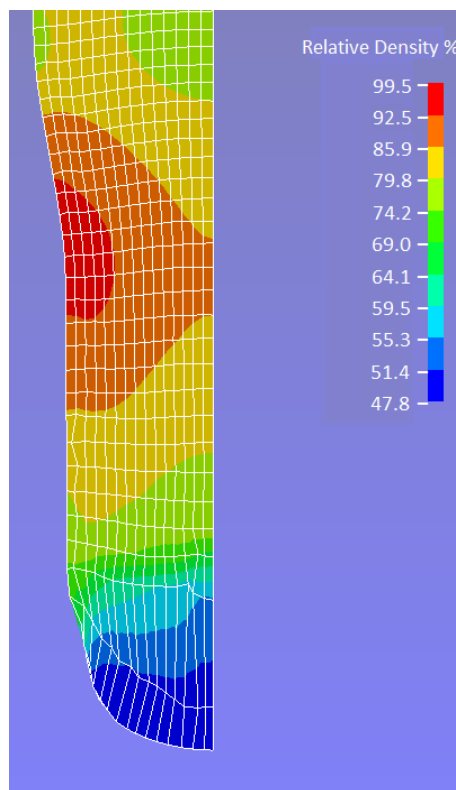
Σε μετατόπιση περίπου **1.2 mm** παρατηρείται το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**4.0kN** πείραμα δοκίμιο 1, **5.0kN** πείραμα δοκίμιο 2, **5.8kN** προσομοίωση). Στη συνέχεια, παρατηρείται σταθεροποίηση του φορτίου (**4.0kN** πείραμα δοκίμιο 1, **5.0kN** πείραμα δοκίμιο 2, **5.8kN** προσομοίωση) μέχρι τα **4 mm** και στη συνέχεια αύξηση του μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.23).

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στην μετατόπιση των 23 mm. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **33.0 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου 1 και **18.9 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου 2 .



Εικόνα 5.23 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο δεύτερο πάσο διέλασης.



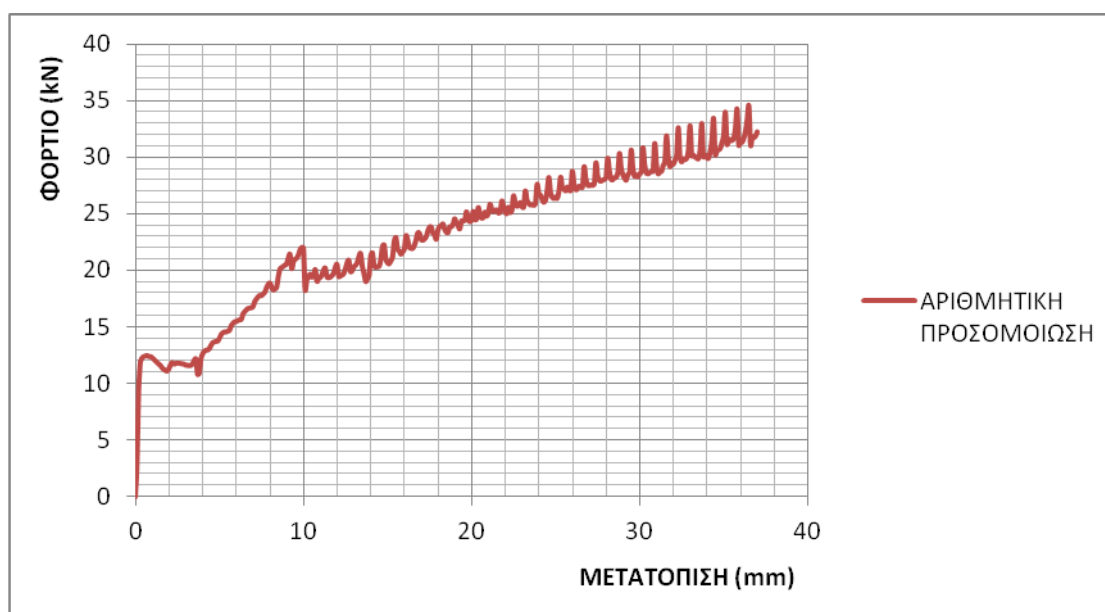
Εικόνα 5.24 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο)

Παρατηρείται μια προφανής αύξηση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα συγκριτικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**92.5 - 99.5 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

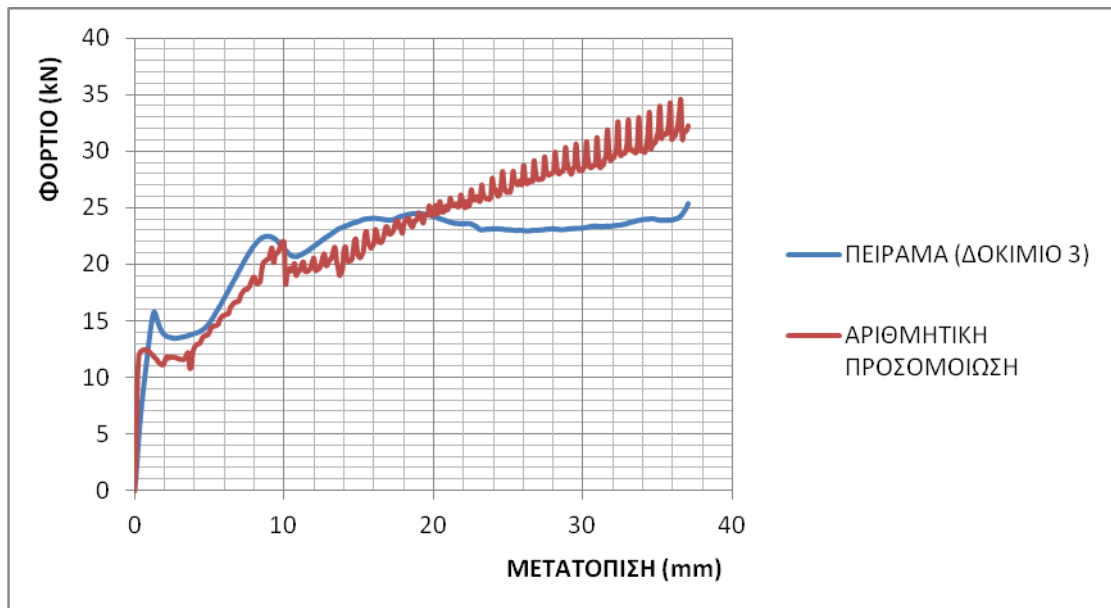
- Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 1.5 mm και σκόνης AI 325

1ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.17 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 325 (1ο πάσο)



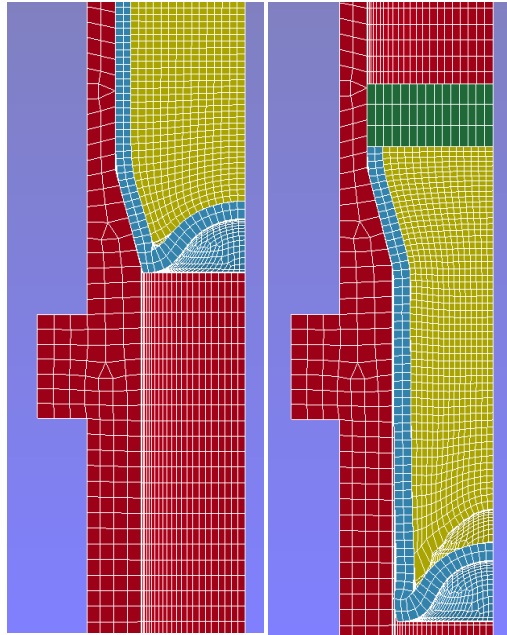
Διάγραμμα 5.18 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **1 mm** παρατηρούμε το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**16.0 kN** πείραμα, **13.5 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει αρχίσει να σχηματίζεται η κοιλότητα στον πυθμένα του δοκιμίου. Στη συνέχεια, έχουμε μείωση του φορτίου (**13.5 kN** πείραμα, **12.0 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **4 mm** και στη συνέχεια απότομη αύξηση του (**22.5 kN** πείραμα, **22.0 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **9 mm** όπου μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.25). Τέλος, έχουμε σταδιακή αύξηση του φορτίου μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.25).

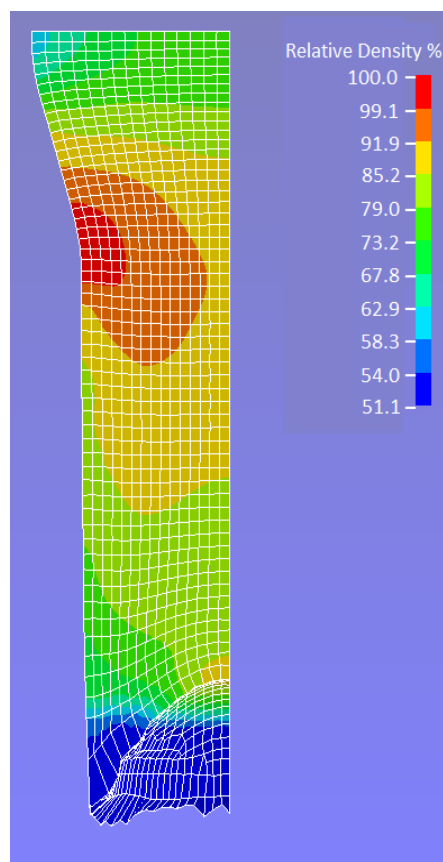
Να σημειωθεί, επίσης, ότι στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στην μετατόπιση των 36 mm στο τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **33.3 %**.



Εικόνα 5.25 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο πρώτο πάσο διέλασης.

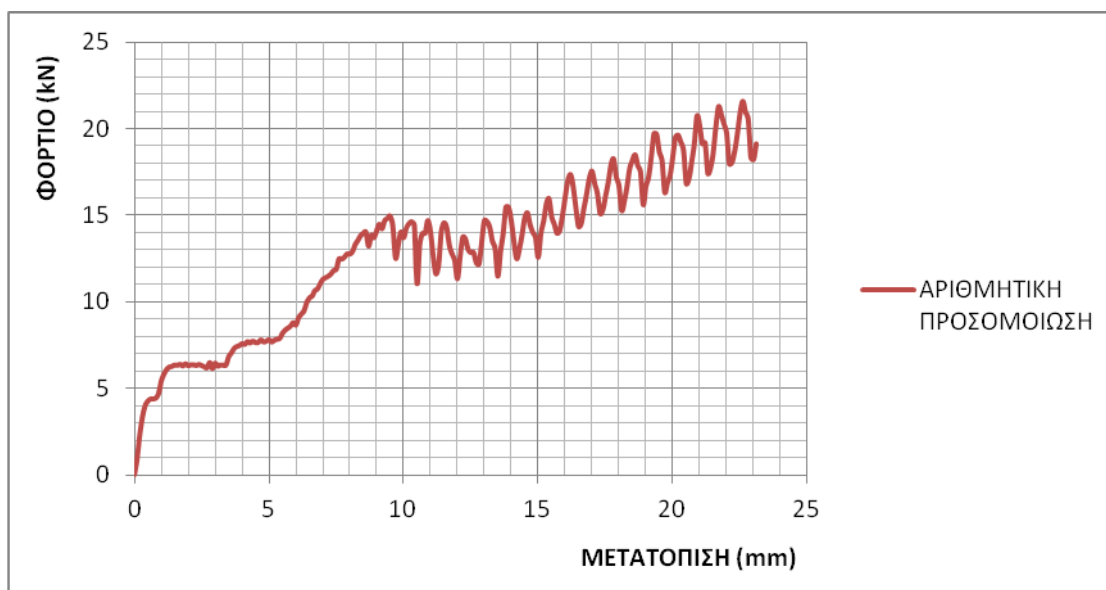


Εικόνα 5.26 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο)

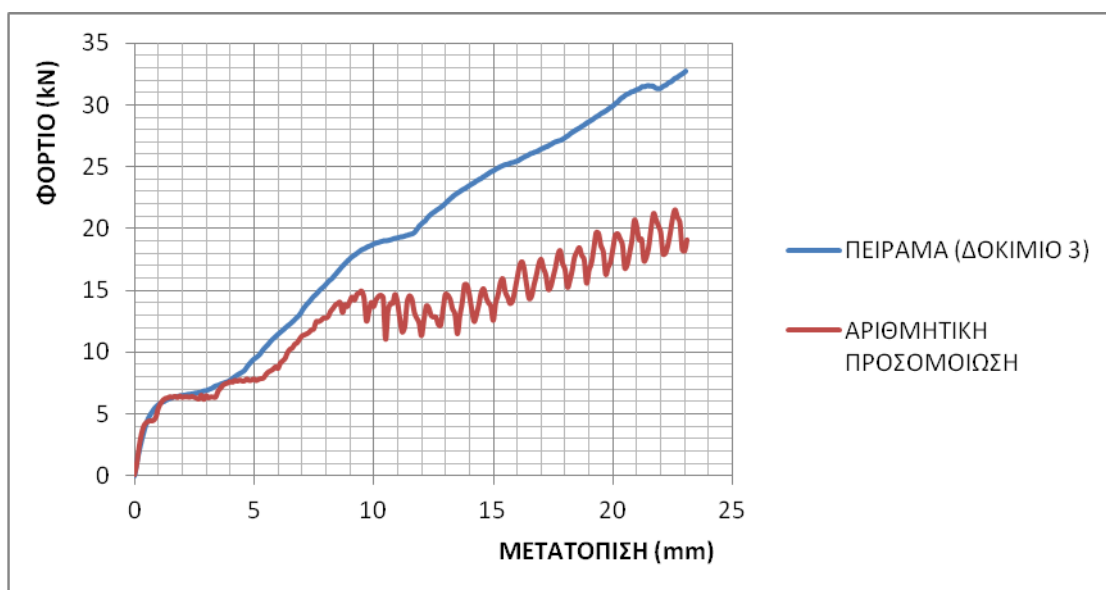
Παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**99.1-100.0 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

2ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.19 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

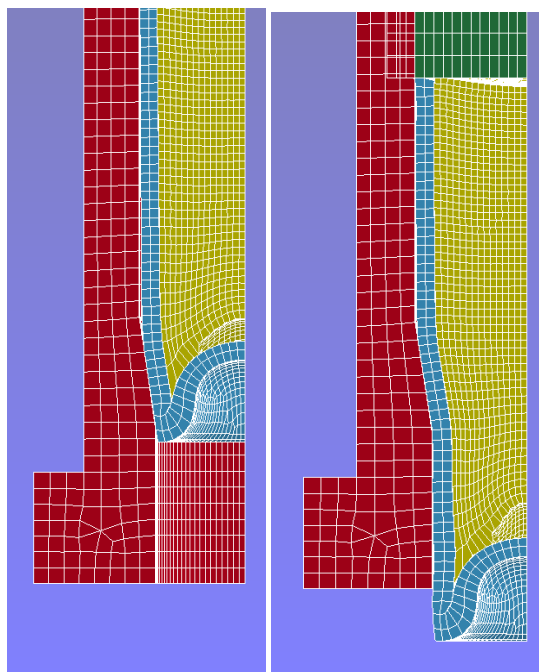


Διάγραμμα 5.20 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

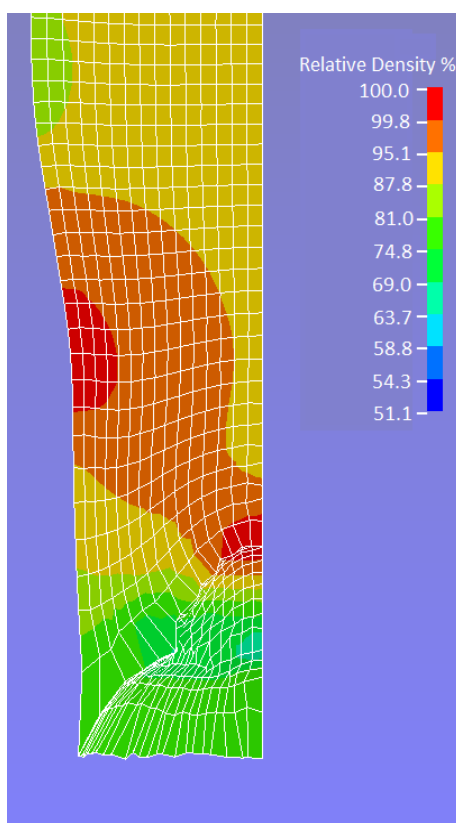
Σε μετατόπιση περίπου **2 mm** παρατηρούμε το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**6.5 kN** πείραμα, **6.5 kN** προσομοίωση). Στη συνέχεια, έχουμε σταθεροποίηση του φορτίου (**7.0 kN** πείραμα, **7.0 kN** προσομοίωση) μέχρι τα **4 mm** και στη συνέχεια αύξηση του μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Σχήμα).

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στην μετατόπιση των 23 mm στο τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **40.1 %**.



Εικόνα 5.27 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο δεύτερο πάσο διέλασης.

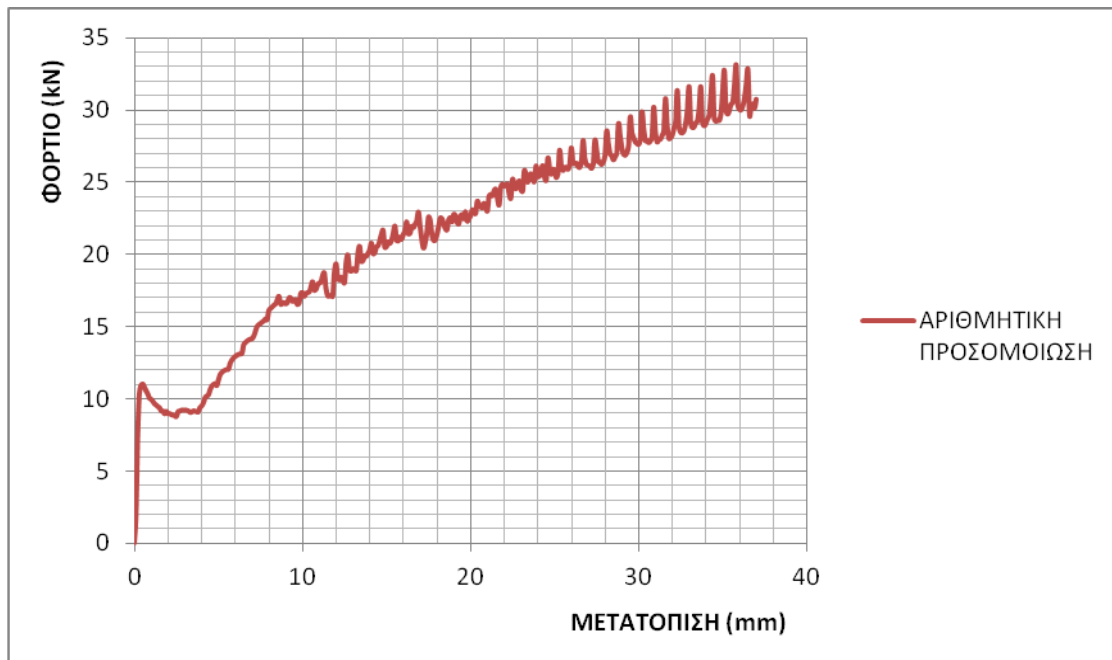


Εικόνα 5.28 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο)

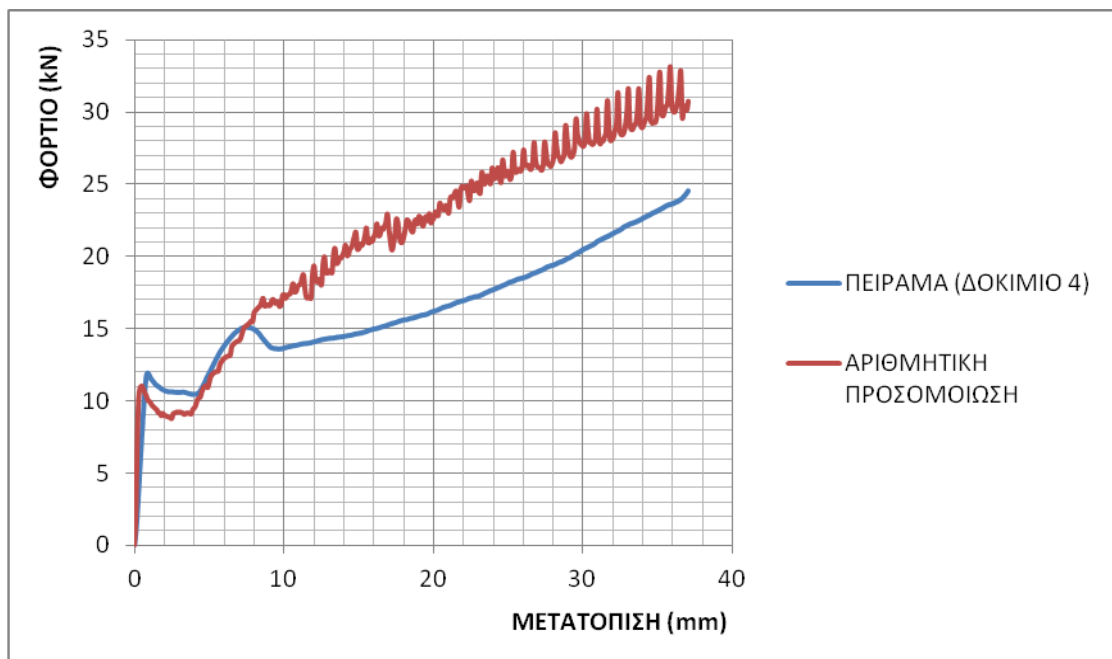
Παρατηρείται μια προφανής αύξηση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα συγκριτικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**99.8 - 100.0 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, να σημειωθεί ότι επειδή έχει δημιουργηθεί κοιλότητα στον σωλήνα η σκόνη έχει συμπιεστεί και στην περιοχή της κοιλότητας όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 5.28.

1ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.21 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο)

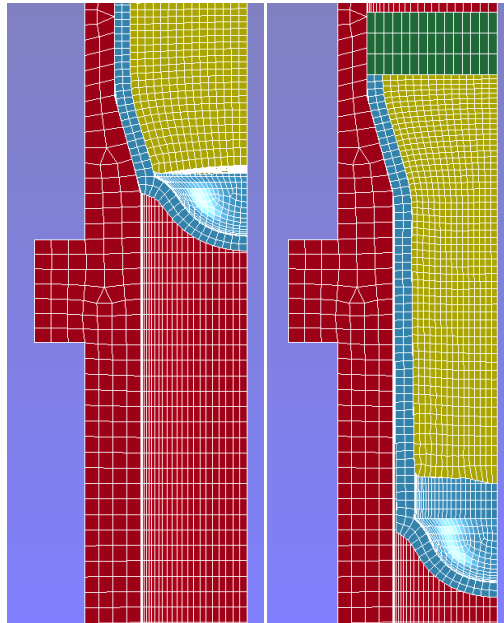


Διάγραμμα 5.22 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

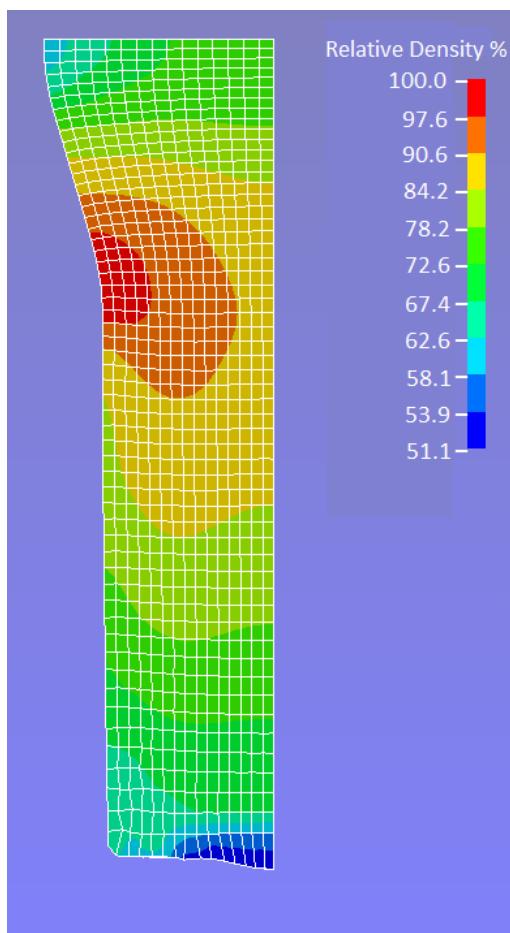
Οι παρατηρήσεις σε ότι αφορά την μορφή του διαγράμματος φορτίου - μετατόπισης στο πρώτο πάσο είναι ανάλογες με αυτές του δοκιμίου 3.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στο τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **40.0 %**.



Εικόνα 5.29 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο πρώτο πάσο διέλασης.

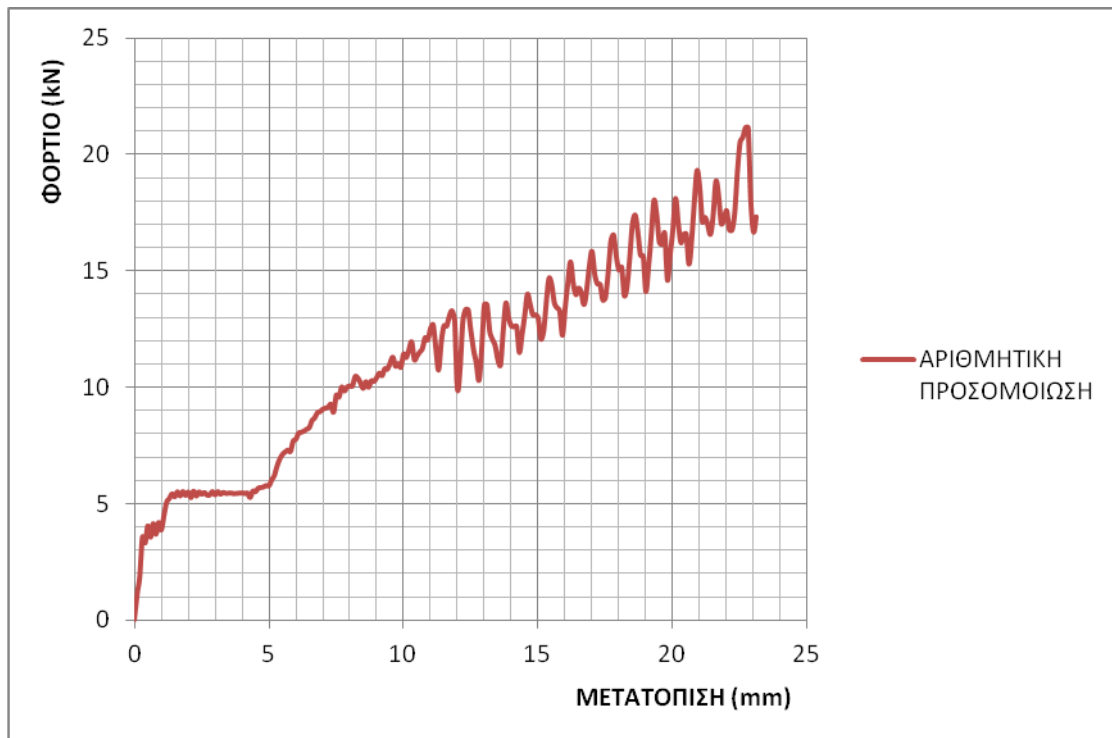


Εικόνα 5.30 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο)

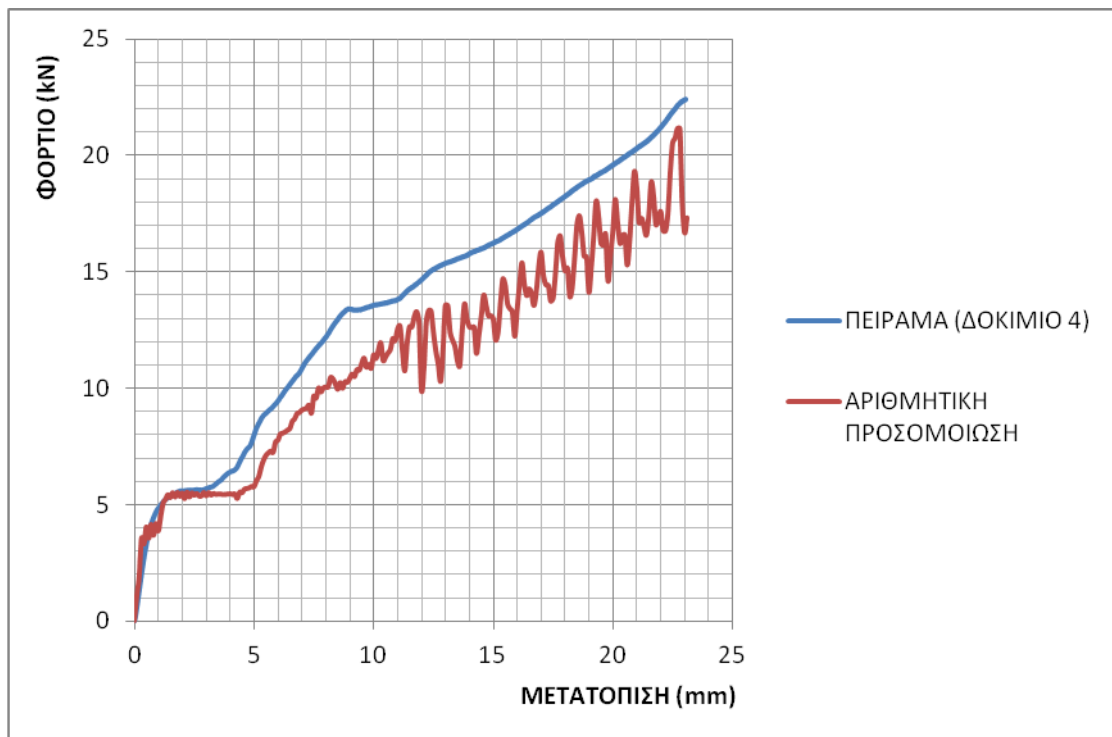
Ομοίως, παρατηρείται η εν λόγω διαμήκης και εγκάρσια κατανομή πυκνότητας. Σε ότι αφορά τις τιμές της σχετικής πυκνότητας στο δοκίμιο 4 εμφανίζονται λίγο μικρότερες από του δοκιμίου 3. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι το δοκίμιο 3 έχει αναπτύξει κοιλότητα με αποτέλεσμα η σκόνη να έχει συμπιεστεί περισσότερο.

2ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.23 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

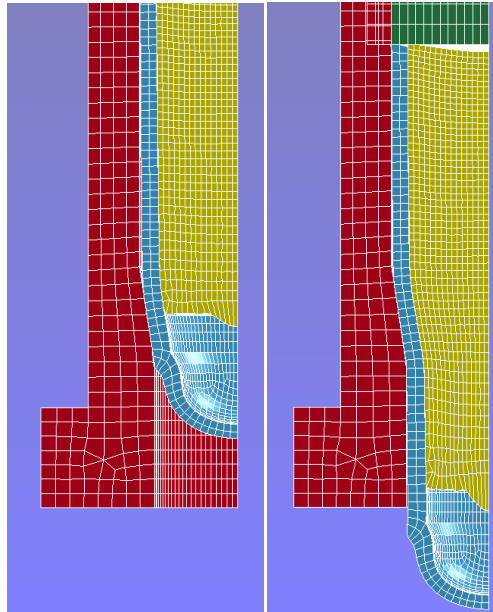


Διάγραμμα 5.24 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

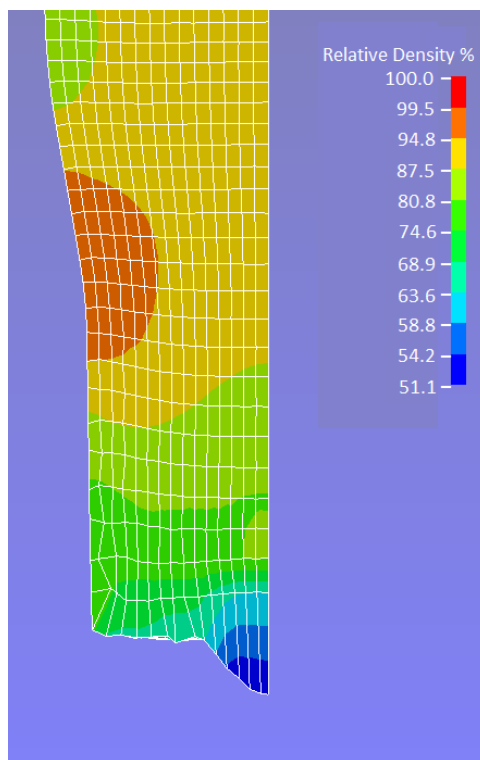
Οι παρατηρήσεις σε ότι αφορά την μορφή του διαγράμματος φορτίου - μετατόπισης στο δεύτερο πάσο είναι ανάλογες με αυτές του δοκιμίου 3.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στην μετατόπιση των 9 mm. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **24.8 %**.



Εικόνα 5.31 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο δεύτερο πάσο διέλασης.



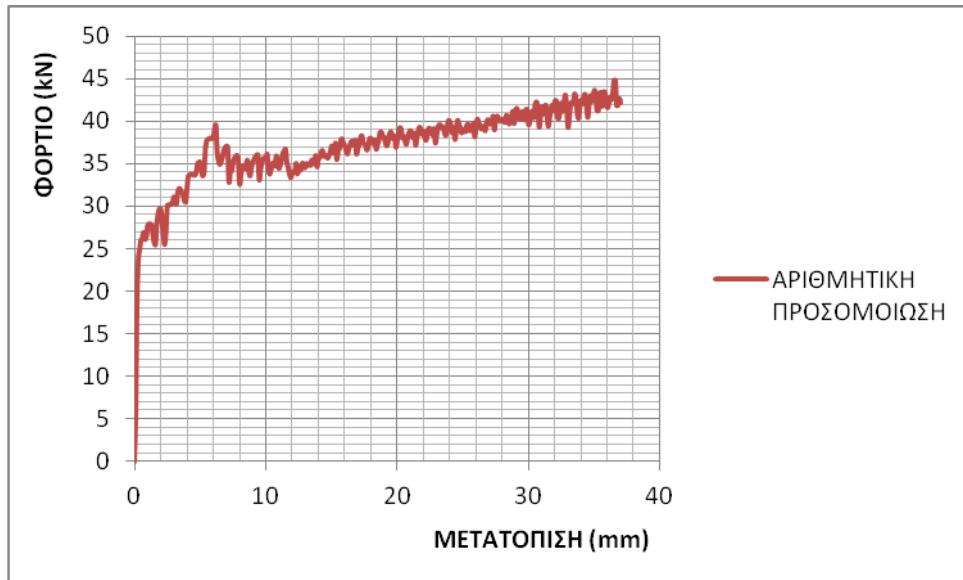
Εικόνα 5.32 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο)

Παρατηρείται μια προφανής αύξηση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα συγκριτικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Ομοίως, παρατηρείται η εν λόγω διαμήκης και εγκάρσια κατανομή πυκνότητας. Σε ότι αφορά τις τιμές της σχετικής πυκνότητας στο δοκίμιο 4 εμφανίζονται λίγο μικρότερες από του δοκίμιου 3 όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως.

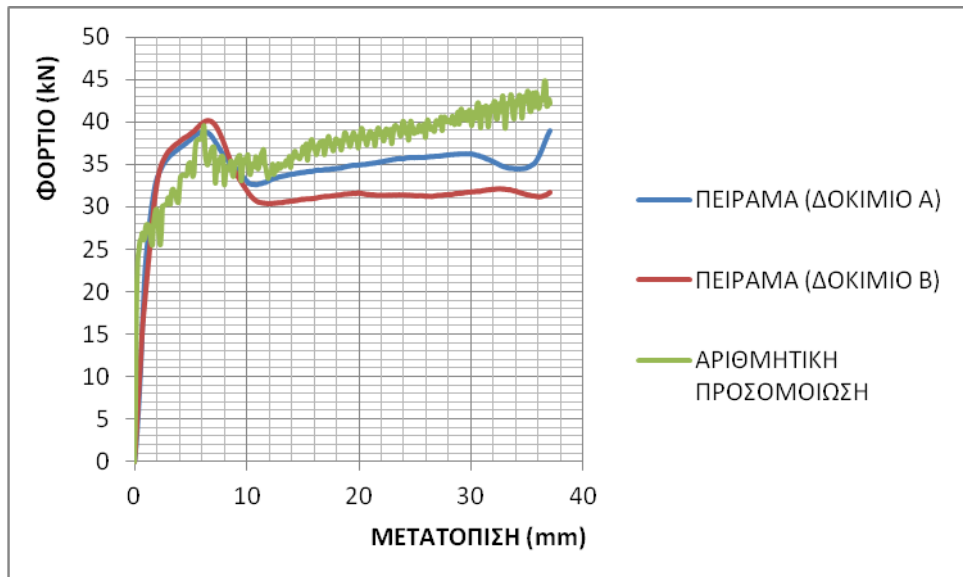
➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 3.0 mm και σκόνης AI 40+325

1ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.25 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης AI 40+325 (1ο πάσο)



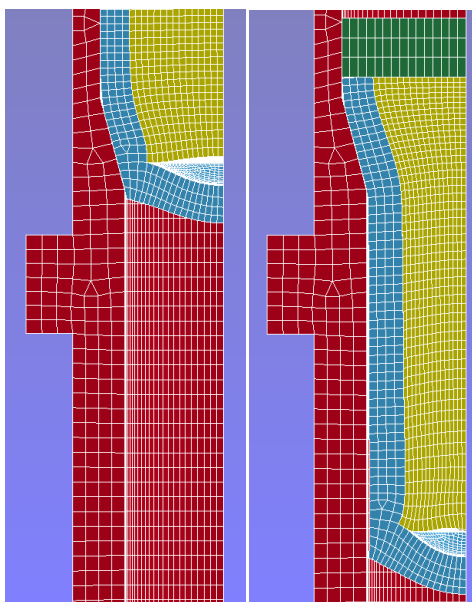
Διάγραμμα 5.26 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης AI 40+325 (1ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **6 mm** παρατηρείται την μέγιστη τιμή του φορτίου (**39.0 kN** πείραμα δοκίμιο A, **40.2 kN** πείραμα δοκίμιο B, **40.0 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει σχηματιστεί το εξόγκωμα στον πυθμένα του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό, επίσης, το δοκίμιο μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.33). Στη συνέχεια, ακολουθεί απότομη μείωση του φορτίου μέχρι τα **10 mm** (**33.0 kN** πείραμα δοκίμιο A, **30.5 kN** πείραμα δοκίμιο B, **35.0 kN** προσομοίωση) και έπειτα σταδιακή αύξηση μέχρι το τέλος της κατεργασίας.

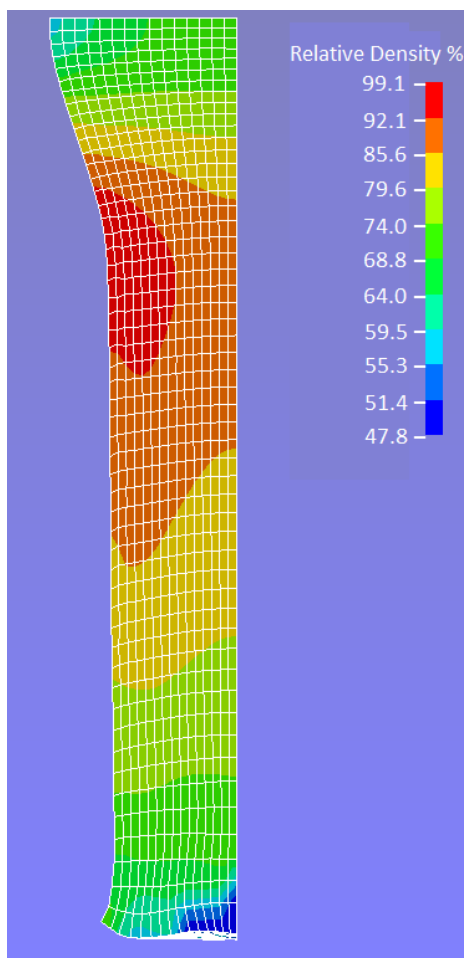
Να σημειωθεί, επίσης, ότι στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται στην μετατόπιση των 34 mm στο τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **21.0 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου A και **31.3 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου B.



Εικόνα 5.33 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο πρώτο πάσο διέλασης.

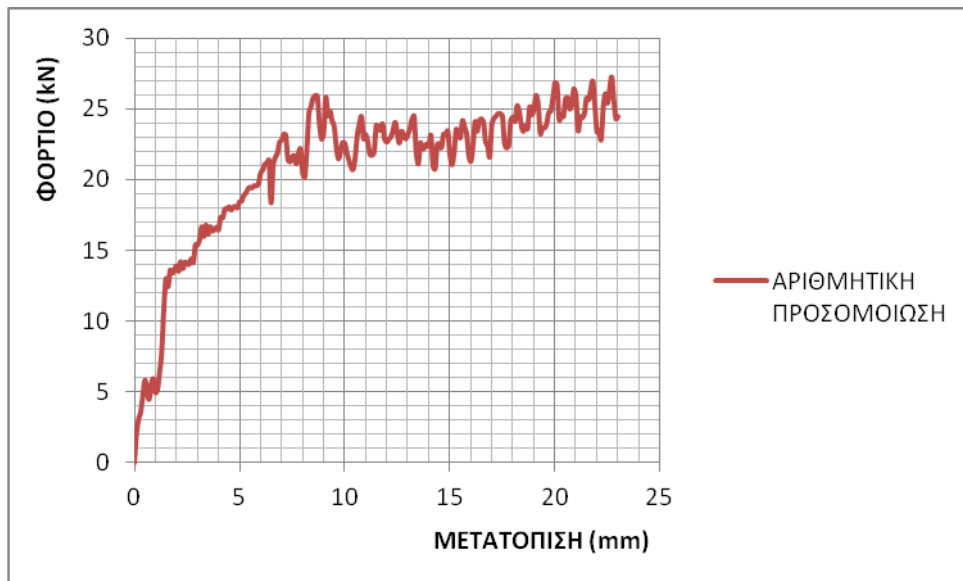


Εικόνα 5.34 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο)

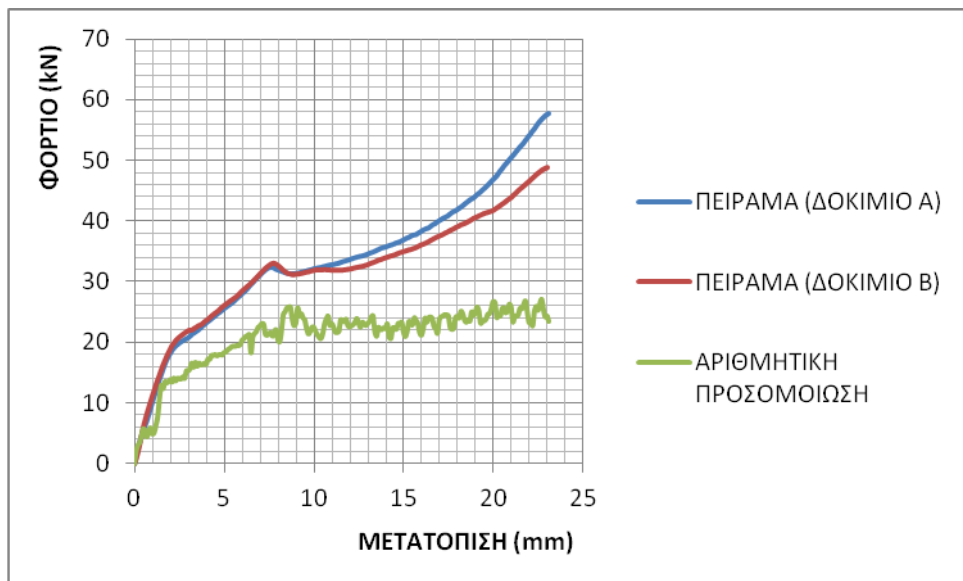
Παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**92.1-99.1 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

2ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη



Διάγραμμα 5.27 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο)

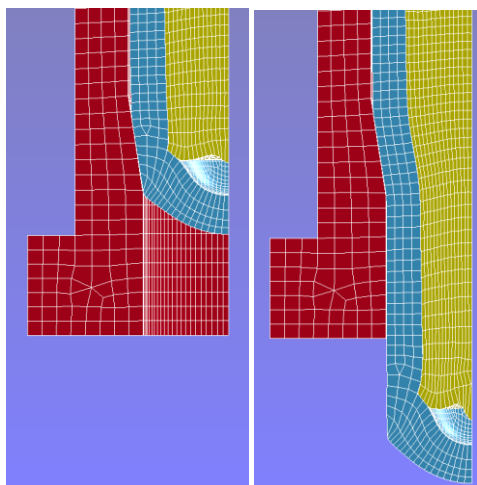


Διάγραμμα 5.28 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

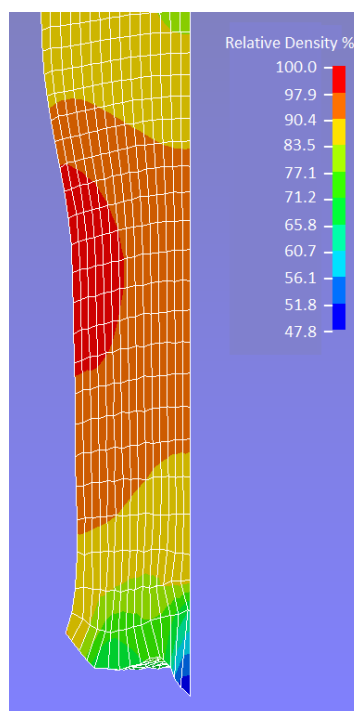
Σε μετατόπιση περίπου **8 mm** παρατηρείται το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**33.0 kN** πείραμα, **25.0 kN** προσομοίωση). Στη συνέχεια, παρατηρείται μια μικρή μείωση του φορτίου και ακολούθως μια σταδιακή αύξηση του μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.35).

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση ειδικά μετά την μετατόπιση των 8 mm που οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες του υλικού της σκόνης που έχουν προσδιορισθεί.



Εικόνα 5.35 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο). Εξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο δεύτερο πάσο διέλασης.



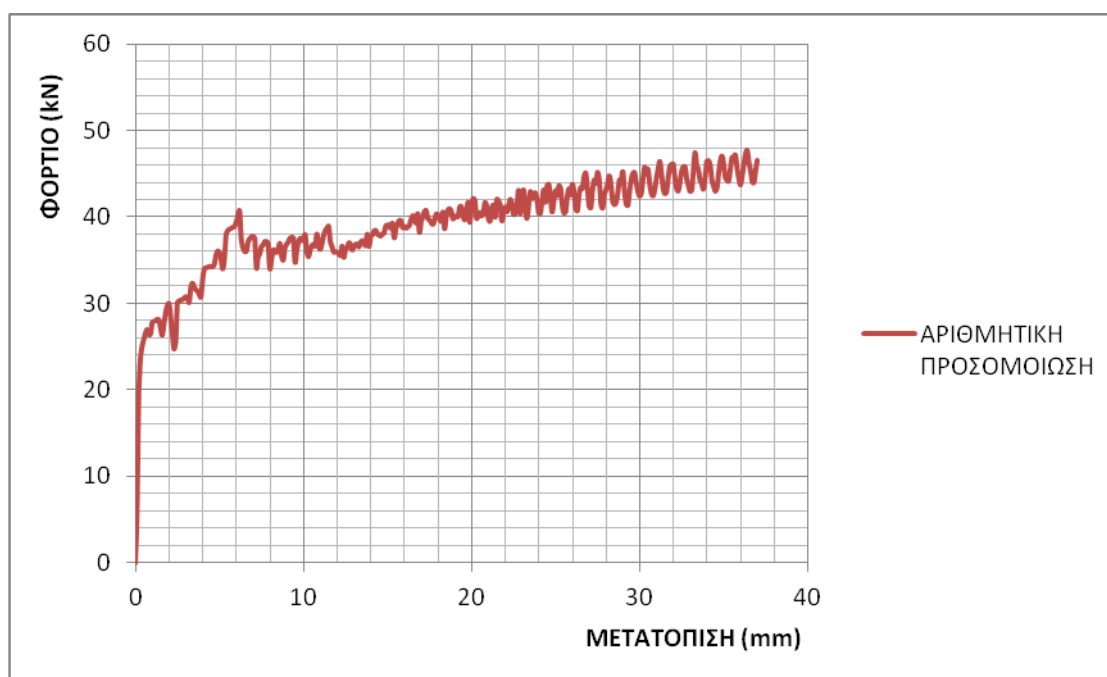
Εικόνα 5.36 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο)

Παρατηρείται μια προφανής αύξηση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα συγκριτικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**97.9 - 100.0 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

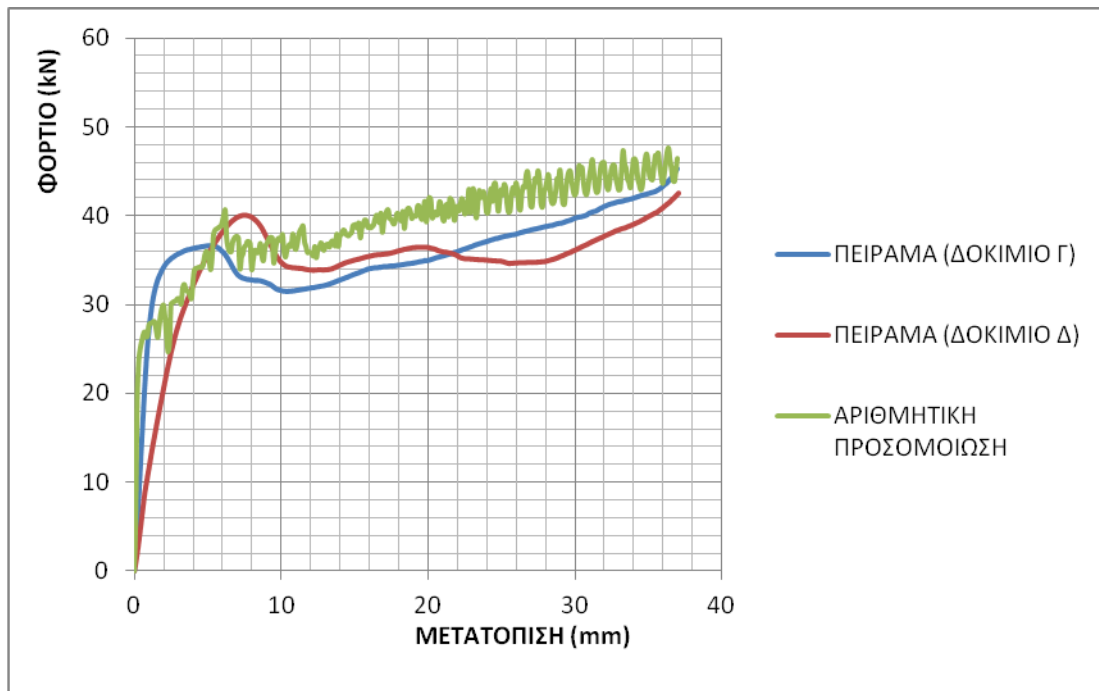
➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου πάχους 3.0 mm και σκόνης AI 325

1ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.29 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης AI 325 (1ο πάσο)



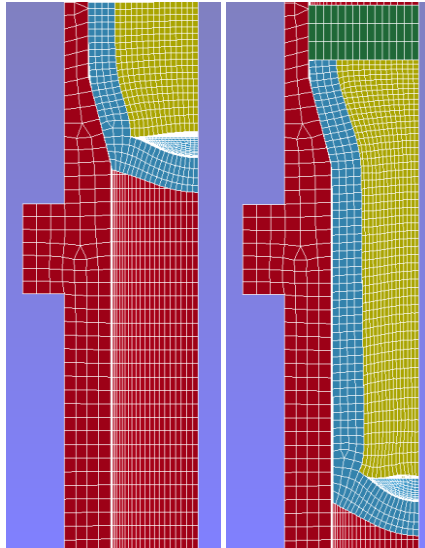
Διάγραμμα 5.30 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

Σε μετατόπιση περίπου **5 mm** για το δοκίμιο Γ και αντίστοιχα **7 mm** για το δοκίμιο Δ παρατηρούμε την μέγιστη τιμή του φορτίου (**36.2 kN** πείραμα δοκίμιο Γ, **40.0 kN** πείραμα δοκίμιο Δ, **40.6 kN** προσομοίωση) όπου εκεί έχει σχηματιστεί το εξόγκωμα στον πυθμένα του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό, επίσης, το δοκίμιο μόλις έχει εξέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας (βλέπε Εικόνα 5.37). Στη συνέχεια, έχουμε απότομη μείωση του φορτίου μέχρι τα **10 mm** περίπου (**32.0 kN** πείραμα δοκίμιο Γ, **34.0 kN** πείραμα δοκίμιο Δ, **37.0 kN** προσομοίωση) και έπειτα σταδιακή αύξηση μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.37).

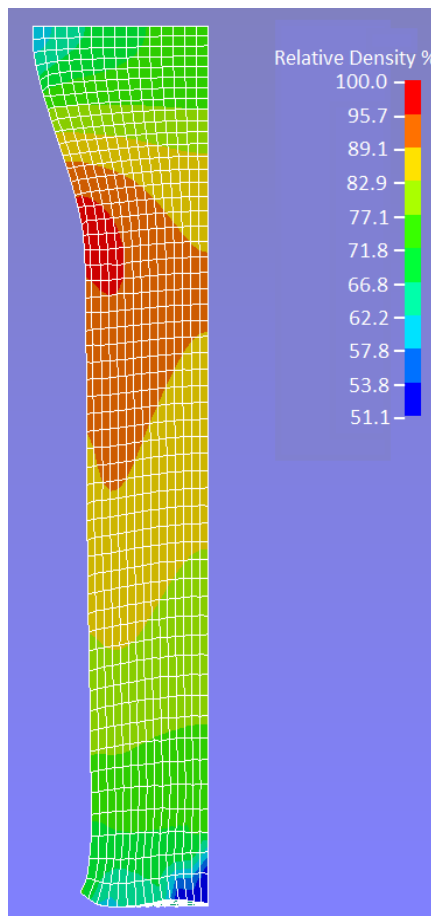
Να σημειωθεί, επίσης, ότι στην γραμμική περιοχή παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα της αριθμητικής προσομοίωσης από ότι της πειραματικής καμπύλης.

Η μεγαλύτερη απόκλιση σημειώνεται μετά την μετατόπιση των 10 mm στο τέλος της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα βρέθηκε ίσο με **17.7 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου Γ και **24.7 %** για την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου Δ.



Εικόνα 5.37 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο πρώτο πάσο διέλασης.

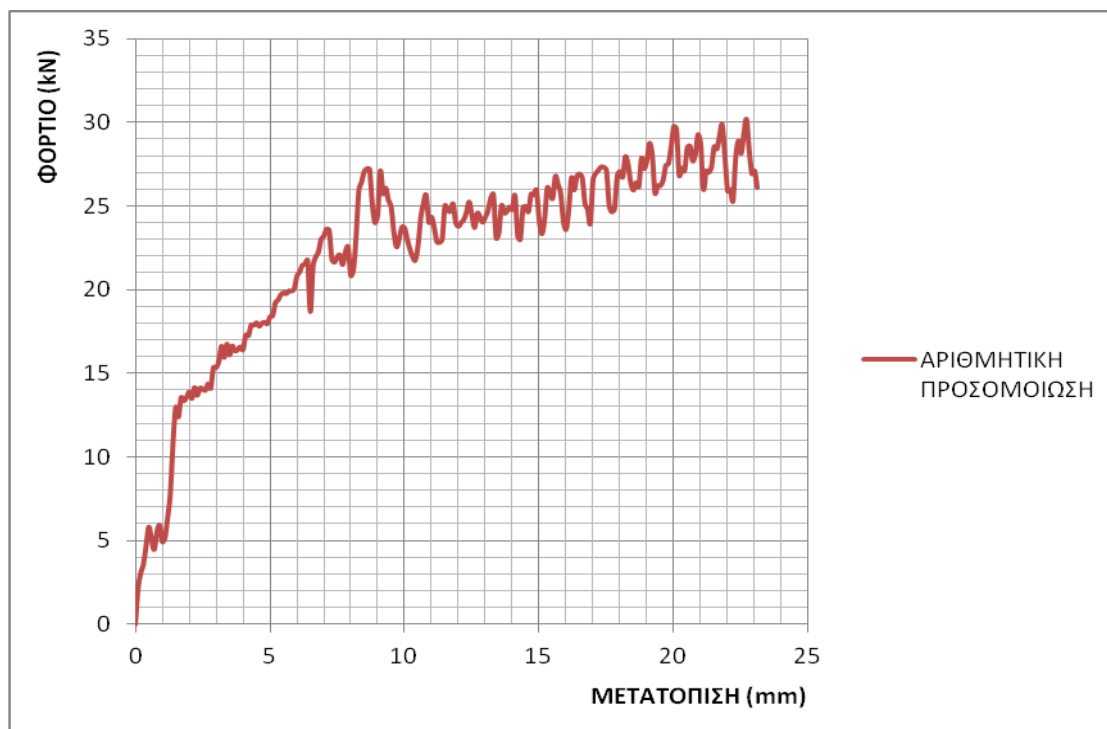


Εικόνα 5.38 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο)

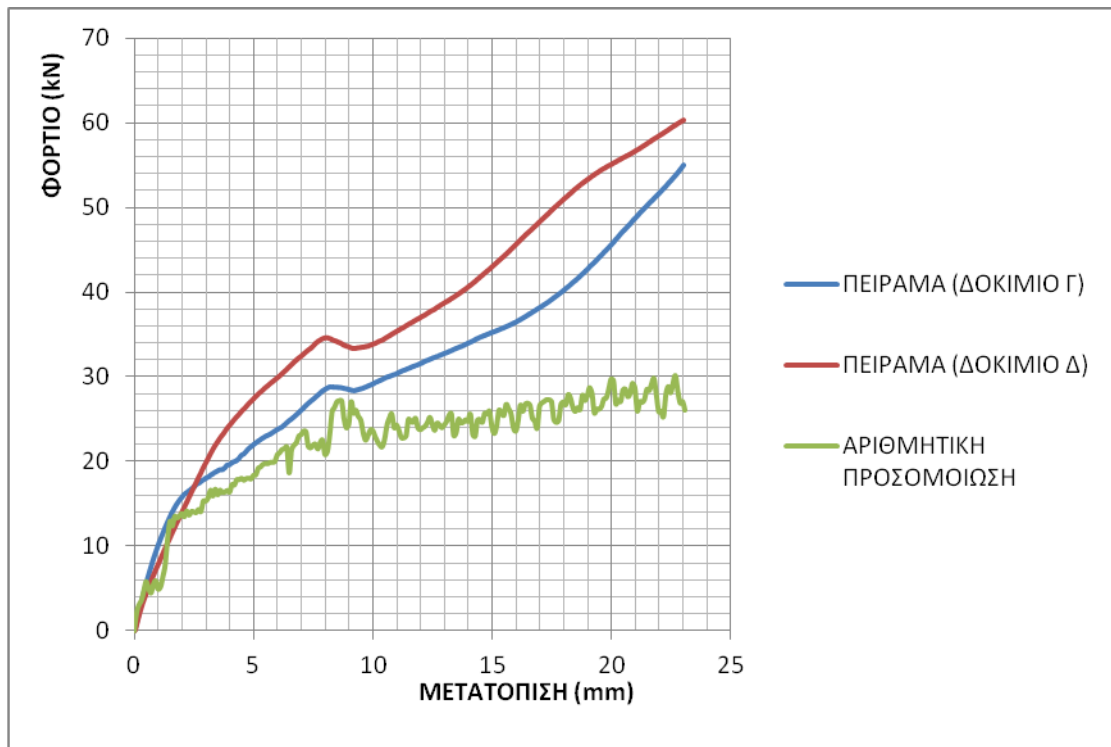
Παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**95.7-100.0 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

2ο Πάσο

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης της αριθμητικής προσομοίωσης και το αντίστοιχο συγκριτικό με την πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.31 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

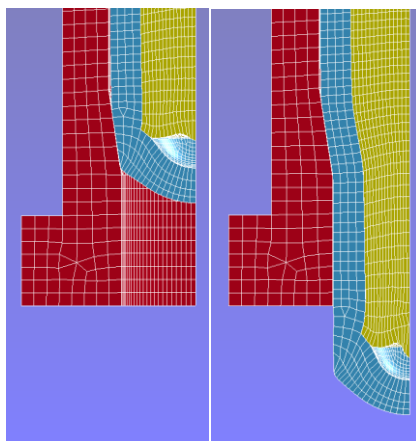


Διάγραμμα 5.32 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκίμιου ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο)

Παρατηρήσεις και σχόλια

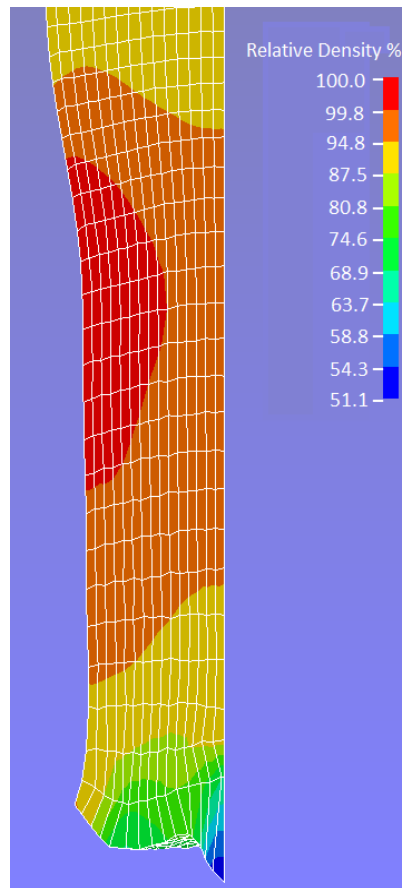
Σε μετατόπιση περίπου **8 mm** παρατηρείται το πρώτο μέγιστο του φορτίου (**29.0 kN** πείραμα δοκίμιο Γ, **34.5 kN** πείραμα δοκίμιο Δ, **27.0 kN** προσομοίωση). Στη συνέχεια, παρατηρείται μια μικρή μείωση του φορτίου και ακολούθως μια σταδιακή αύξηση του μέχρι το τέλος της κατεργασίας (βλέπε Εικόνα 5.39).

Παρατηρείται, επίσης, μεγάλη απόκλιση ειδικά μετά την μετατόπιση των 8 mm που οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες του υλικού της σκόνης που έχουν προσδιορισθεί.



Εικόνα 5.39 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο)

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της σχετικής πυκνότητας του πορώδους αλουμινίου στο δεύτερο πάσο διέλασης.



Εικόνα 5.40 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο)

Παρατηρείται μια προφανής αύξηση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα συγκριτικά με αυτήν του πρώτου πάσου. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική πυκνότητα (**99.8 - 100.0 %**) εμφανίζεται στην περιφέρεια του πυρήνα στο τέλος του κωνικού τμήματος. Ακολούθως, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας με κατεύθυνση από την περιφέρεια προς το κέντρο του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της σχετικής πυκνότητας του πυρήνα από το τέλος του κωνικού τμήματος προς κάθε διαμήκη κατεύθυνση.

5.4.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Σε ότι αφορά την κατανομή της σχετικής πυκνότητας στο πορώδες αλουμινίου εξάγονται τα εξής συμπεράσματα :

- Η σχετική πυκνότητα είναι μέγιστη στην περιοχή όπου τελειώνει το κωνικό τμήμα του σωλήνα. Όσο η απόσταση κατά μήκος από αυτήν την περιοχή μεγαλώνει τόσο η σχετική πυκνότητα μειώνεται. Επίσης, παρατηρείται ότι με κατεύθυνση προς την περιφέρεια η σχετική πυκνότητα αυξάνεται. Συνεπώς, αυτό σημαίνει ότι το πορώδες μειώνεται από το κέντρο προς την περιφέρεια, πράγμα που επαληθεύει τις παρατηρήσεις στην μεταλλογραφική ανάλυση.
- Για τα δοκίμια ίδιου πάχους και διαφορετικής κοκκομετρίας σκόνης η σχετική πυκνότητα αυξάνεται όσο πιο λεπτόκοκκη είναι η σκόνη. Επίσης, για τα δοκίμια ίδιας σκόνης και διαφορετικού πάχους σωλήνα η σχετική πυκνότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος τοιχώματος του σωλήνα. Συνεπώς, και σε αυτό το κεφάλαιο εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα με αυτά της μεταλλογραφικής ανάλυσης.

Σε ότι αφορά τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης διακρίνεται μια ικανοποιητική σύνδεση της αριθμητικής προσομοίωσης με το πείραμα. Οι αποκλίσεις των διαγραμμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων από τα πειραματικά μπορεί να οφείλεται στους εξής παράγοντες :

- Διαστατικές αποκλίσεις
- Εξιδανικευμένη σχεδίαση μοντέλων. Όπως έχει αναφερθεί οι σωλήνες έχουν σχεδιασθεί στην μέση μετρούμενη διάσταση.
- Οι προσδιοριζόμενες ιδιότητες του υλικού των κόνεων αποκλίνουν από τις πραγματικές. Όπως παρατηρήθηκε υπάρχει απόκλιση των πειραματικών διαγραμμάτων κονιομεταλλουργίας με τα αντίστοιχα διαγράμματα των αριθμητικών προσομοιώσεων. Επίσης, οι προσδιοριζόμενες ιδιότητες του χαλκού ενδεχομένως να αποκλίνουν από τις πραγματικές.
- Επιλογή συντελεστών τριβής. Όπως έχει αναφερθεί, οι τιμές των συντελεστών τριβής έχουν ληφθεί από την βιβλιογραφία επομένως μπορεί να αποκλίνουν από τις πραγματικές.

Μελλοντική έρευνα

- Πυροσυσσωμάτωση των δοκιμίων, μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων τους και σύγκριση με αυτά που δεν έχουν υποστεί πυροσυσσωμάτωση.
- Πραγματοποίηση μηχανικών δοκιμών π.χ εφελκυσμού και θλίψης προκειμένου να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες του νέου παραγόμενου υλικού πριν και μετά την πυροσυσσωμάτωση.
- Κατασκευή όσο το δυνατόν δοκιμίων με μικρές διαστατικές αποκλίσεις μεταξύ τους προκειμένου να είναι εφικτό να γίνουν εγκάρσιες και διαμήκεις τομές.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- [1]. Δ.Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες I
- [2]. Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Αθήνα 2008
- [3]. Διπλωματική εργασία : "Διέλαση διμεταλλικών και Πορώδων Υλικών" Σπυρίδωνα Α. Ράπτη

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- [4]. "Densification behavior of aluminum alloy powder under cold compaction", S.C. Lee, K.T. Kim
- [5]. "Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part I. Experimental material characterization and validation", Hedi Chtourou, Michel Guillot, Augustin Gakwaya
- [6]. "A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders", L.H. Han, J.A. Elliott, A.C. Bentham, A. Mills, G.E. Amidon, B.C. Hancock
- [7]. "Determination of the constants of cap model for compaction of three metal powders", G.H. Majzoubi, S. Jannesari
- [8]. "Determination of Cap Model Parameters using Numerical Optimization Method for Powder Compaction", Cong Lu
- [9]. "Finite Element Simulation of the Compaction and Springback of Alumix 321 PM Alloy", Stanley G. Selig and Darrel A. Doman
- [10]. "Powder Metallurgy Methods and Applications", W. Brian James
- [11]. "Consolidation of metal powders during the extrusion process", Marek Galanty, Pawel Kazanowski, Panya Kansuwan, Wojciech Z. Misiolek
- [12]. "Bi-metal rod extrusion—process and product optimization", Pawel Kazanowski, Mario E. Epler, Wojciech Z. Misiolek
- [13]. "Solid state joining of dissimilar sintered P/M preform tubes by simultaneous cold extrusion", B. Vamsi Krishna, P. Venugopal, K. Prasad Rao
- [14]. "Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalised slab method of analysis", N.R. Chitkara , A. Aleem
- [15]. "Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes from solid circular billets: application of a generalised upper bound analysis and some experiments", N.R. Chitkara , A. Aleem

Ηλεκτρονικές πηγές

[16]. <http://www.sciencedirect.com>

[17]. <http://en.wikipedia.org>

[18]. <http://www.dynasupport.com>

[19]. <http://www.espimetals.com>

[20]. <http://www.astm.org>

Ευρετήριο εικόνων

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1 : Σχηματική αναπαράσταση ευθείας (α), έμμεσης (β), υδροστατικής (γ), κρουστικής (δ) διέλασης	2
Εικόνα 1.2 : Ροή του υλικού κατά τη διέλαση	2
Εικόνα 1.3 : Φάσεις διέλασης	4
Εικόνα 1.4 : Στάδια παραγωγής προϊόντος κονιομεταλλουργίας	5
Εικόνα 1.5 : Παραγωγή κόνεων με ατομοποίηση	6
Εικόνα 1.6 : Παραγωγή κόνεων με ηλεκτρόλυση	7
Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα πυκνότητας συμπίεσματος - πίεσης συμπίεσης και απεικόνιση φάσεων κονιομεταλλουργίας	8
Εικόνα 1.8: Παραγωγή πορώδους υλικού από έγχυση αερίου στο τήγμα μετάλλου	9
Εικόνα 1.9 : Παραγωγή πορώδους υλικού με απελευθέρωση H ₂ από το ίδιο το τήγμα μετάλλου	10
Εικόνα 1.10 : Βαλβίδα μεταβλητού χρονισμού πορώδους σιδήρου	10
Εικόνα 1.11 : Ελικοειδή γρανάζια πορώδους σιδήρου	11
Εικόνα 1.12 : Έδρανα ολίσθησης στροφαλοφόρου πορώδους αλουμινίου	11
Εικόνα 1.13 : Έδρανα ολίσθησης πορώδους χαλκού	11
Εικόνα 1.14 : Φίλτρα	11

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 : Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Drucker - Prager	12
---	----

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1 : Υδραυλική Πρέσα Instron 4482.....	15
Εικόνα 3.2 : Μήτρα κονιομεταλλουργίας	15
Εικόνα 3.3 : Έμβολο κονιομεταλλουργίας	16
Εικόνα 3.4 : Διάταξη κονιομεταλλουργίας.....	16
Εικόνα 3.5 : Σκόνη αλουμινίου 40+325 mesh	17
Εικόνα 3.6 : Σκόνη αλουμινίου 325 mesh	17
Εικόνα 3.7 : Πίνακας διαστάσεων σκόνης	18

Εικόνα 3.8 : Μήτρα διέλασης 1 ^{ου} πάσου	19
Εικόνα 3.9 : Μήτρα διέλασης 2 ^{ου} πάσου	19
Εικόνα 3.10 : Εξωτερικός δακτύλιος	20
Εικόνα 3.11 : Εσωτερικός δακτύλιος.....	20
Εικόνα 3.12 : Τμήμα εξόδου μήτρας διέλασης	21
Εικόνα 3.13 : Έμβολο διέλασης Φ 25	21
Εικόνα 3.14 : Έμβολο διέλασης Φ 20	22
Εικόνα 3.15 : Χιτώνιο.....	22
Εικόνα 3.16 : Διάταξη διέλασης 1 ^{ου} πάσου	23
Εικόνα 3.17 : Διάταξη διέλασης 2 ^{ου} πάσου	23
Εικόνα 3.18 : Στιγμιότυπο απο την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 50 kN.....	24
Εικόνα 3.19 : Στιγμιότυπο απο την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 70 kN.....	24
Εικόνα 3.20 : Στιγμιότυπο απο την θλίψη του δοκιμίου Cu σε φορτίο 90 kN.....	24
Εικόνα 3.21 : Δοκίμιο Cu μετά την αξονική θλίψη.....	25
Εικόνα 3.22 : Προϊόν κονιομεταλλουργίας απο την συμπίεση της σκόνης Al 40+325.....	27
Εικόνα 3.23 : Προϊόν κονιομεταλλουργίας απο την συμπίεση της σκόνης Al 325.....	30
Εικόνα 3.24 : Διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm	32
Εικόνα 3.25 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm μετά τη διέλαση.....	32
Εικόνα 3.26 : Διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm	34
Εικόνα 3.27 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 3.0 mm μετά τη διέλαση.....	34
Εικόνα 3.28 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm με σκόνη Al 40+325	36
Εικόνα 3.29 : Δοκίμιο 1 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης.....	37
Εικόνα 3.30 : Δοκίμιο 1 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	38
Εικόνα 3.31 : Δοκίμιο 2 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης.....	39
Εικόνα 3.32 : Δοκίμιο 2 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	40
Εικόνα 3.33 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 1.5 mm με σκόνη Al 325	41
Εικόνα 3.34 : Δοκίμιο 3 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης.....	42
Εικόνα 3.35 : Δοκίμιο 3 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	43
Εικόνα 3.36 : Δοκίμιο 4 μετά το πρώτο στάδιο διέλασης.....	44
Εικόνα 3.37 : Δοκίμιο 4 μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	46
Εικόνα 3.38 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 3.0 mm με σκόνη Al 40+325	47
Εικόνα 3.39 : Δοκίμιο Α μετά το πρώτο στάδιο διέλασης	47
Εικόνα 3.40 : Δοκίμιο Α μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	49
Εικόνα 3.41 : Δοκίμιο Β μετά το πρώτο στάδιο διέλασης.....	50
Εικόνα 3.42 : Δοκίμιο Β μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	51
Εικόνα 3.43 : Δοκίμιο ονομαστικού πάχους 3.0 mm με σκόνη Al 325	52
Εικόνα 3.44 : Δοκίμιο Γ μετά το πρώτο στάδιο διέλασης	53
Εικόνα 3.45 : Δοκίμιο Γ μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης	54
Εικόνα 3.46 : Δοκίμιο Δ μετά το πρώτο στάδιο διέλασης	55
Εικόνα 3.47 : Δοκίμιο Δ μετά το δεύτερο στάδιο διέλασης.....	56

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1 : Άποψη αποτυπώματος σκληρομέτρησης Vickers στο Δοκίμιο 1.....	59
---	----

Εικόνα 4.2 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 1 στο 1ο πάσο	60
Εικόνα 4.3 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 1 στο 2ο πάσο	61
Εικόνα 4.4 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 1 (2ο πάσο)	62
Εικόνα 4.5 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 2 στο 1ο πάσο	63
Εικόνα 4.6 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 2 στο 2ο πάσο	64
Εικόνα 4.7 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 2 (2ο πάσο)	65
Εικόνα 4.8 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 3 στο 1ο πάσο	66
Εικόνα 4.9 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 3 στο 2ο πάσο	67
Εικόνα 4.10 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 3 (2ο πάσο)	69
Εικόνα 4.11 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 4 στο 1ο πάσο	70
Εικόνα 4.12 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου 4 στο 2ο πάσο	71
Εικόνα 4.13 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου 4 (2ο πάσο)	72
Εικόνα 4.14 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Α στο 1ο πάσο	73
Εικόνα 4.15 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Α στο 2ο πάσο	74
Εικόνα 4.16 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Α (2ο πάσο)	75
Εικόνα 4.17 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Β στο 1ο πάσο	76
Εικόνα 4.18 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Β στο 2ο πάσο	77
Εικόνα 4.19 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Β (2ο πάσο)	78
Εικόνα 4.20 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Γ στο 1ο πάσο	79
Εικόνα 4.21 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Γ στο 2ο πάσο	80
Εικόνα 4.22 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Γ (2ο πάσο)	81
Εικόνα 4.23 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Δ στο 1ο πάσο	82
Εικόνα 4.24 : Εικόνες πορώδους στο κέντρο, μέση και περιφέρεια του Δοκιμίου Δ στο 2ο πάσο	83
Εικόνα 4.25 : Εικόνες στην διεπιφάνεια του Δοκιμίου Δ (2ο πάσο)	84

Κεφάλαιο 5

Εικόνα 5.1 : Μοντέλο μήτρας κονιομεταλλουργίας	87
Εικόνα 5.2 : Μοντέλο σκόνης ΑΙ 40 + 325 (αριστερά) και ΑΙ 325 (δεξιά)	88

Εικόνα 5.3 : Μοντέλο εμβόλου κονιομεταλλουργίας.....	88
Εικόνα 5.4 : Πλεγματοποίηση 1 -> Πλεγματοποίηση 4 (αριστερά -> δεξιά). Μοντέλο σκόνης AI 40+325.....	89
Εικόνα 5.5 : Πλεγματοποίηση 1 -> Πλεγματοποίηση 4 (αριστερά -> δεξιά). Μοντέλο σκόνης AI 325.....	90
Εικόνα 5.6 : Καρτέλα υλικού μήτρας	90
Εικόνα 5.7 : Καρτέλα υλικού εμβόλου	91
Εικόνα 5.8 : Δέσμευση βαθμών ελευθερίας στους κόμβους	94
Εικόνα 5.9 : Μοντέλο μήτρας διέλασης 1ου πάσου πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	99
Εικόνα 5.10 : Μοντέλο εμβόλου διέλασης πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	100
Εικόνα 5.11 : Μοντέλο σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	100
Εικόνα 5.12 : Μοντέλο σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	101
Εικόνα 5.13 : Μοντέλο διέλασης σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	101
Εικόνα 5.14 : Μοντέλο διέλασης σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm πρόσοψη (αριστερά) - προοπτική όψη (δεξιά).....	102
Εικόνα 5.15 : Καρτέλα υλικού σωλήνα	103
Εικόνα 5.16 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm. Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	105
Εικόνα 5.17 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm. Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	107
Εικόνα 5.18 : Μοντέλο μήτρας 1ου πάσου και 2ου πάσου διέλασης. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά)	108
Εικόνα 5.19 : Μοντέλο σκόνης στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5mm. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά).....	110
Εικόνα 5.20 : Μοντέλο σκόνης στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0mm. Πρόσοψη (αριστερά) - Προοπτική όψη (δεξιά).....	111
Εικόνα 5.21 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 40+325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	113
Εικόνα 5.22 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας AI 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο).....	114
Εικόνα 5.23 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 40+325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	116
Εικόνα 5.24 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας AI 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο).....	116
Εικόνα 5.25 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	119
Εικόνα 5.26 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας AI 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο).....	119
Εικόνα 5.27 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης AI 325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	121

Εικόνα 5.28 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο).....	122
Εικόνα 5.29 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	124
Εικόνα 5.30 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (1ο πάσο).....	125
Εικόνα 5.31 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm σκόνης Al 325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	127
Εικόνα 5.32 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 1.5 mm (2ο πάσο).....	128
Εικόνα 5.33 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (1ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	130
Εικόνα 5.34 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο).....	131
Εικόνα 5.35 : Διέλαση σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm σκόνης Al 40+325 (2ο πάσο). Έξοδος κωνικού τμήματος (αριστερά) - Τέλος κατεργασίας (δεξιά)	133
Εικόνα 5.36 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 40+325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο).....	133
Εικόνα 5.37 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο).....	136
Εικόνα 5.38 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (1ο πάσο).....	136
Εικόνα 5.39 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο).....	138
Εικόνα 5.40 : Κατανομή σχετικής πυκνότητας Al 325 στον σωλήνα ονομαστικού πάχους 3.0 mm (2ο πάσο).....	139

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Κεφάλαιο 3

Διάγραμμα 3.1 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την θλίψη του δοκιμίου Cu	25
Διάγραμμα 3.2 : Διάγραμμα πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης.....	26
Διάγραμμα 3.3 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την συμπίεση της σκόνης Al 40+325	27
Διάγραμμα 3.4 : Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου - πρώτης αναλλοίωτης	28
Διάγραμμα 3.5 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την συμπίεση της σκόνης Al 325. 30	
Διάγραμμα 3.6 : Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όγκου - πρώτης αναλλοίωτης	31
Διάγραμμα 3.7 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την διέλαση του Δοκιμίου γ	33
Διάγραμμα 3.8 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο την διέλαση του Δοκιμίου β.....	35
Διάγραμμα 3.9 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 1	37
Διάγραμμα 3.10 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 1	38

Διάγραμμα 3.11 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 2	39
Διάγραμμα 3.12 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 2	41
Διάγραμμα 3.13 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 3	42
Διάγραμμα 3.14 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 3	44
Διάγραμμα 3.15 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 4	45
Διάγραμμα 3.16 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου 4	46
Διάγραμμα 3.17 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Α.....	48
Διάγραμμα 3.18 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Α.....	49
Διάγραμμα 3.19 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Β.....	50
Διάγραμμα 3.20 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Β.....	52
Διάγραμμα 3.21 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Γ.....	53
Διάγραμμα 3.22 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Γ.....	55
Διάγραμμα 3.23 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το πρώτο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Δ.....	56
Διάγραμμα 3.24 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης απο το δεύτερο στάδιο διέλασης του Δοκιμίου Δ.....	57

Κεφάλαιο 4

Διάγραμμα 4.1 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους του Δοκιμίου 1 στο 1ο πάσο	60
Διάγραμμα 4.2 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 1 στο 2ο πάσο	61
Διάγραμμα 4.3 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους του Δοκιμίου 2 στο 1ο πάσο	63
Διάγραμμα 4.4 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 2 στο 2ο πάσο	64
Διάγραμμα 4.5 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 3 στο 1ο πάσο	66
Διάγραμμα 4.6 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 3 στο 2ο πάσο	68
Διάγραμμα 4.7 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 4 στο 1ο πάσο	70
Διάγραμμα 4.8 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου 4 στο 2ο πάσο	71

Διάγραμμα 4.9 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Α στο 1ο πάσο	74
Διάγραμμα 4.10 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Α στο 2ο πάσο	75
Διάγραμμα 4.11 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Β στο 1ο πάσο	76
Διάγραμμα 4.12 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Β στο 2ο πάσο	77
Διάγραμμα 4.13 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Γ στο 1ο πάσο	79
Διάγραμμα 4.14 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Γ στο 2ο πάσο	80
Διάγραμμα 4.15 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Δ στο 1ο πάσο	82
Διάγραμμα 4.16 : Διάγραμμα κατανομής πορώδους και σκληρότητας του Δοκιμίου Δ στο 2ο πάσο	83
Διάγραμμα 4.17 : Μέση σκληρότητα περιφέρειας δοκιμών πάχους 1.5 και 3.0 mm χονδρόκοκκης κοκκομετρίας.....	85
Διάγραμμα 4.18 : Μέση σκληρότητα περιφέρειας δοκιμών πάχους 1.5 και 3.0 mm λεπτόκοκκης κοκκομετρίας.....	85

Κεφάλαιο 5

Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις του μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325	94
Διάγραμμα 5.2 : Ποσοστιαίο σφάλμα πλεγματοποιήσεων μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325	95
Διάγραμμα 5.3 : Χρόνος τρεξίματος για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 40+325	95
Διάγραμμα 5.4 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης συμπίεσης σκόνης AI 40+325	96
Διάγραμμα 5.5 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις του μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 325	96
Διάγραμμα 5.6 : Ποσοστιαίο σφάλμα πλεγματοποιήσεων μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 325	97
Διάγραμμα 5.7 : Χρόνος τρεξίματος για τις τέσσερις πλεγματοποιήσεις μοντέλου συμπίεσης σκόνης AI 325	97
Διάγραμμα 5.8 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης συμπίεσης σκόνης AI 325 .	98
Διάγραμμα 5.9 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm	104
Διάγραμμα 5.10 : Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm.....	104
Διάγραμμα 5.11 : Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm	106

Ευρετήριο πινάκων

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 1.5 mm.....	32
Πίνακας 3.2 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίου ονομαστικού πάχους 3.0 mm.....	34
Πίνακας 3.3 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων 1 και 2.....	36
Πίνακας 3.4 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων 3 και 4.....	41
Πίνακας 3.5 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων Α και Β	47
Πίνακας 3.6 : Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων Γ και Δ.....	52

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1 : Διαστάσεις πλέγματος και αριθμός πεπερασμένων στοιχείων σκόνης AI 40+325	89
Πίνακας 5.2 : Διαστάσεις πλέγματος και αριθμός πεπερασμένων στοιχείων σκόνης AI 325	89