

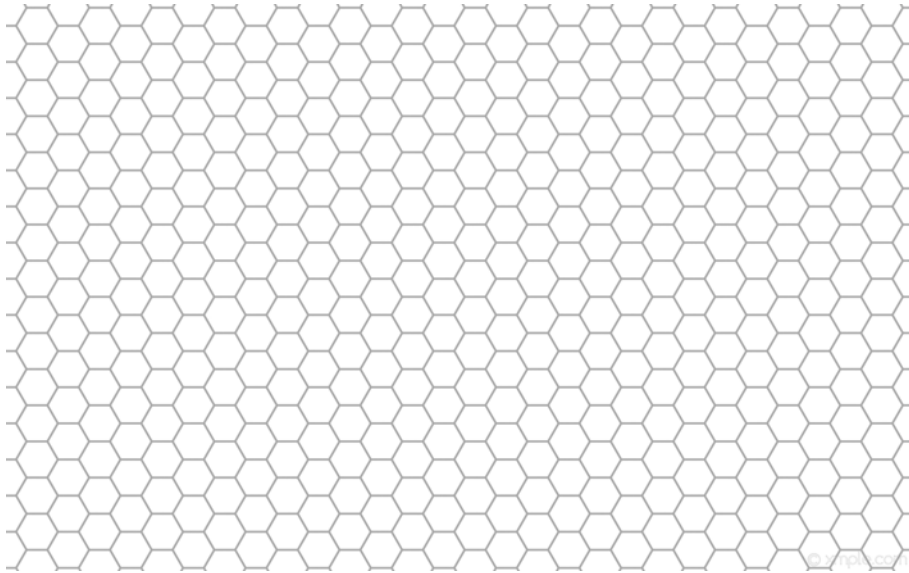
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΚΥΨΕΛΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5052 ΣΕ ΘΛΙΨΗ



Υπό

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Αράβα και Λέκτορα Καθηγητή κ. Μιχάλη Αγόρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Φίλιππο Περδικάρη του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Λαμπέα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Μιχαηλίδη για τη βοήθεια τους στις δοκιμές στοιχείων κυψελών αλουμινίου και για τις υποδείξεις τους στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ευχαριστώ τους συναδέλφους και φίλους Fausto Lorenzo Maciariello και Raffaele Esposito που με εκπαίδευσαν στη χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της Centaurus Racing Team για την προσφορά τους και την υποστήριξη τους καθώς και τους φίλους μου Βαγγέλη Ζιούτα και Νίκο Μαροπάκη για την ηθική υποστήριξη τους. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Χρήστο Καραγιάννη και Ελένη Σαρρηκώστα για την αμέριστη αγάπη τους και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Καραγιάννης

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η πειραματική και αριθμητική μελέτη της συμπεριφοράς κυψελών αλουμινίου 5052 σε θλίψη. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια κυψελών αλουμινίου διαφόρων διαστάσεων τα οποία καταπονήθηκαν σε στατικές και κρουστικές συνθήκες καταπόνησης. Στην πειραματική διερεύνηση μελετήθηκε η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης κατά τη θλίψη στη συμπεριφορά του υλικού. Στην αναλυτική μελέτη αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς θλίψης των κυψελών με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά την πραγματική συμπεριφορά του κυψελωτού υλικού όπως προέκυψε από τα πειράματα.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	ii
Περίληψη.....	iii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο	1
1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	1
2. Κυψελωτά Υλικά	3
2.1 Γραμμική ελαστική παραμόρφωση	6
2.2 Μη-Γραμμική ελαστική παραμόρφωση	7
2.3 Πλαστική παραμόρφωση	9
3. Πειραματική διαδικασία	11
3.1 Στατικά πειράματα	11
3.2 Δοκιμές κρούσης	14
3.3 Πειράματα μεγάλης κλίμακας.....	16
4. Αριθμητική ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων	19
4.1 Μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας.....	20
4.1.1 Γεωμετρία.....	20
4.1.2 Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 5052.....	21
4.1.3 Συναρμολόγηση (assembly).....	21
4.1.4 Παράμετροι της ανάλυσης (step).....	22
4.1.5 Αλληλεπίδραση (interaction).....	22
4.1.6 Φορτίο και συνοριακές συνθήκες (load).....	22
4.1.7 Πλέγμα (Mesh)	23
4.1.8 Επίλυση (job)	25
4.2 Μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες.....	25
4.3 Αριθμητικό μοντέλο 81 κυψελίδων.....	26
4.3.1 Γεωμετρία.....	26
4.3.2 Μηχανικές ιδιότητες Al 5052	27
4.3.3 Συναρμολόγηση (assembly).....	27
4.3.4 Παράμετροι ανάλυσης (step)	27
4.3.5 Αλληλεπίδραση (interaction).....	28
4.3.6 Φορτίο και συνοριακές συνθήκες (load).....	28
4.3.7 Πλέγμα (Mesh)	28
4.3.8 Επίλυση (job)	30
5. Αποτελέσματα.....	31
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα	31
5.1.1 Στατικά πειράματα	31
5.1.2 Δοκιμές κρούσης.....	35
5.1.3 Αποτελέσματα αποσβεστήρα κρούσης	39
5.2 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης.....	40
5.2.1 Αποτελέσματα μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας	40
5.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες	42
5.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης μοντέλου 81 κυψελίδων.....	44
6. Συμπεράσματα	47
7. Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	48
Βιβλιογραφία	49

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Χαρακτηριστικά κυψέλης αλουμινίου 5052.....	11
Πίνακας 3-2 Διαστάσεις δοκιμίων στατικών πειραμάτων	12
Πίνακας 3-3 Διαστάσεις δοκιμίων κρουστικών δοκιμών.....	14
Πίνακας 4-1 Ιδιότητες αλουμινίου 5052.....	21
Πίνακας 4-2 Ιδιότητες πλέγματος μοναδιαίας κυψελίδας.....	24
Πίνακας 4-3 Ιδιότητες πλέγματος άκαμπτης πλάκας.....	24
Πίνακας 4-4 Ιδιότητες πλέγματος κυψέλης.....	29
Πίνακας 4-5 Ιδιότητες πλέγματος άκαμπτης πλάκας.....	29
Πίνακας 5-1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των στατικών πειραμάτων.....	34
Πίνακας 5-2 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των δυναμικών πειραμάτων.....	35

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Διάταξη εξαγωνικής κυψέλης.....	4
Σχήμα 2-2 Εξαγωνική κυψέλη	5
Σχήμα 2-3 Φορτία κάθετα στον άξονα x3.....	6
Σχήμα 2-4 Μοναδιαία κυψελίδα	6
Σχήμα 2-5 Αξονική κάμψη μοναδιαίας κυψελίδας.....	8
Σχήμα 5-1 Παραμόρφωση εξαγωνικής κυψέλης.....	31
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για το δοκίμιο A1	33
Σχήμα 5-3 Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης δοκιμίου A1 (εμφανίζονται τα πρώτα 3 mm της παραμόρφωσης του δοκιμίου).....	33
Σχήμα 5-4 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμίων A1,A2,A3 & A4	34
Σχήμα 5-5 Διάγραμμα Δύναμης - Παραμόρφωσης του δοκιμίου B1 μετά από κρούση.....	36
Σχήμα 5-6 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμίων A1 & B1	36
Σχήμα 5-7 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης του δοκιμίου B2 μετά από κρούση	37
Σχήμα 5-8 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμίων B1, B2 & B3	38
Σχήμα 5-9 Μεταβολή μέγιστης δύναμης – Επιφάνειας δοκιμίου όπου αποτυπώνεται η γραμμική σχέση μεταξύ του φορτίου που απαιτείται για την έναρξη του τοπικού λυγισμού των δοκιμίων με την επιφάνεια τους για τα δοκίμια B1, B2, B3.....	38
Σχήμα 5-10 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης δοκιμίου αποσβεστήρα κρούσης σε κρούση	39
Σχήμα 5-11 Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για το μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας.....	41
Σχήμα 5-12 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης για μοναδιαία κυψελίδα με σταθερές και ελεύθερες επιφάνειες	43
Σχήμα 5-13 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης του αριθμητικού μοντέλου 81 κυψελίδων και του πειράματος (δοκίμιο A1)	44
Σχήμα 5-14 Διάγραμμα Δύναμης – Επιφάνειας διατομής που αποτυπώνει τη γραμμική σχέση μεταξύ του κρίσιμου φορτίου για την έναρξη του τοπικού λυγισμού των δοκιμίων με την επιφάνεια τους για τα δοκίμια A1 & A3 και το αριθμητικό μοντέλο των 81 κυψελίδων.....	46

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1 Φωτογραφία από μικροσκόπιο κυψελωτού υλικού	3
Εικόνα 3-1 Πειραματική διάταξη	13
Εικόνα 3-2 Το δοκίμιο πριν από τη θλίψη.....	13
Εικόνα 3-3 Πειραματική διάταξη	15
Εικόνα 3-4 Δοκίμιο πριν από την κρούση	15
Εικόνα 3-5 Δοκίμιο μετά την κρούση.....	16
Εικόνα 3-6 Πειραματική διάταξη στατικών πειραμάτων στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	17
Εικόνα 3-7 Δοκίμιο μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία	18
Εικόνα 3-8 Πειραματική διάταξη πειραμάτων κρούσης στο εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας του Α.Π.Θ. (το δοκίμιο της φωτογραφίας είναι διαφορετικό από το δοκίμιο του πειράματος)	18
Εικόνα 4-1 Αναγωγή στη μοναδιαία κυψελίδα.....	20
Εικόνα 4-2 Γεωμετρία μοναδιαίας κυψελίδα	21
Εικόνα 4-3 Συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδα.....	23
Εικόνα 4-4 Πλέγμα μοναδιαίας κυψελίδα και άκαμπτης πλάκας.....	24
Εικόνα 4-5 Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού της μοναδιαίας κυψελίδα	25
Εικόνα 4-6 Σχέδιο των 81 κυψελίδων στο πρόγραμμα Abaqus	26
Εικόνα 4-7 Ένωση δύο φύλλων αλουμινίου για το σχηματισμό μίας κυψελίδα.....	27
Εικόνα 4-8 Συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο των 81 κυψελίδων	28
Εικόνα 4-9 Απεικόνιση του πλέγματος της κυψέλης και της άκαμπτης πλάκας.....	29
Εικόνα 4-10 Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού	30
Εικόνα 5-1 Δοκίμιο κυψέλης αλουμινίου κατά τη θλίψη.....	34
Εικόνα 5-2 Άνω επιφάνεια δοκιμίου B1 μετά την κρούση.....	37
Εικόνα 5-3 Δοκίμιο παραμορφωμένο μετά τη δοκιμή κρούσης	40
Εικόνα 5-4 Έναρξη του τοπικού λυγισμού, δημιουργία της πρώτης πτύχωσης.....	41
Εικόνα 5-5 Ομαλοποίηση 1 ^{ης} πτύχωσης και δημιουργία 2 ^{ης} πτύχωσης.....	41
Εικόνα 5-6 Ομαλοποίηση 2 ^{ης} πτύχωσης και δημιουργία 3 ^{ης} πτύχωσης	42
Εικόνα 5-7 Παραμόρφωση της μοναδιαίας κυψελίδα μετά από μετατόπιση 7 mm της άκαμπτης πλάκας.....	42
Εικόνα 5-8 Έναρξη τοπικού λυγισμού στην περίπτωση της μοναδιαίας κυψελίδα με σταθερές επιφάνειες.....	43
Εικόνα 5-9 Μοναδιαία κυψελίδα με σταθερές επιφάνειες μετά από μετατόπιση 6 mm της επάνω επιφάνειας της	43
Εικόνα 5-10 Έναρξη και ομαλοποίηση της πρώτης πτύχωσης εξαιτίας του τοπικού λυγισμού	45
Εικόνα 5-11 Παραμόρφωση της κυψέλης μετά από μετατόπιση 1 mm της επάνω επιφάνειας	45

1. Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Τα κυψελωτά υλικά είναι μία σύνθεση κυψελών με στέρεες επιφάνειες ή ακμές τα οποία χρησιμοποιούνται σε ελαφριές κατασκευές όπου απαιτείται χαμηλό βάρος και στιβαρότητα. Τα συγκεκριμένα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε τομείς της επιστήμης του μηχανολόγου μηχανικού όπως η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία που κατά το σχεδιασμό τίθενται στόχοι όπως η μείωση του ωφέλιμου βάρους αλλά και η ασφάλεια σε κρουστικά φορτία. Τα υλικά αυτά πέρα από τις καλές μηχανικές ιδιότητες έχουν μεγάλη ικανότητα στην απορρόφηση ενέργειας κάτω από δυναμικά φορτία κρούσης.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των κυψελών αλουμινίου 5052 σε θλίψη. Στη μελέτη λαμβάνονται υπόψη στη συμπεριφορά του υλικού ο ρυθμός παραμόρφωσης και η κλίμακα του μεγέθους του δοκιμίου. Το κίνητρο για αυτή την εργασία δόθηκε από το έργο Formula Student, όπου ομάδες φοιτητών καλούνται να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ένα αγωνιστικό μονοθέσιο αυτοκίνητο και να συμμετάσχουν σε διεθνής διαγωνισμούς σε αγωνίσματα πίστας. Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του αυτοκινήτου και για να είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς του διαγωνισμού είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός αποσβεστήρα κρούσης (Impact Attenuator), μίας συσκευής που απορροφά ενέργεια κατά την κρούση. Για την κατασκευή αυτού του κατασκευαστικού στοιχείου χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες αλουμινίου (aluminum honeycomb) λόγω του χαμηλού τους βάρους και της δυνατότητάς τους να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας όταν συνθλίβονται.

1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε 7 κεφάλαια που περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

Στο κεφάλαιο 1 αναφέρονται εν συντομία οι λόγοι που οδήγησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στα κυψελωτά υλικά και ειδικότερα στις κυψέλες αλουμινίου, γίνεται σύντομη αναφορά στις μεθόδους παραγωγής τους και στις ιδιότητες τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση. Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία των στατικών και δυναμικών πειραμάτων καθώς και ο εξοπλισμός και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται το αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς θλίψης κυψελωτών στοιχείων από αλουμίνιο. Περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus καθώς και οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν για τη δημιουργία του.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική σπουδή. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του αριθμητικού μοντέλου.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 7 δίνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

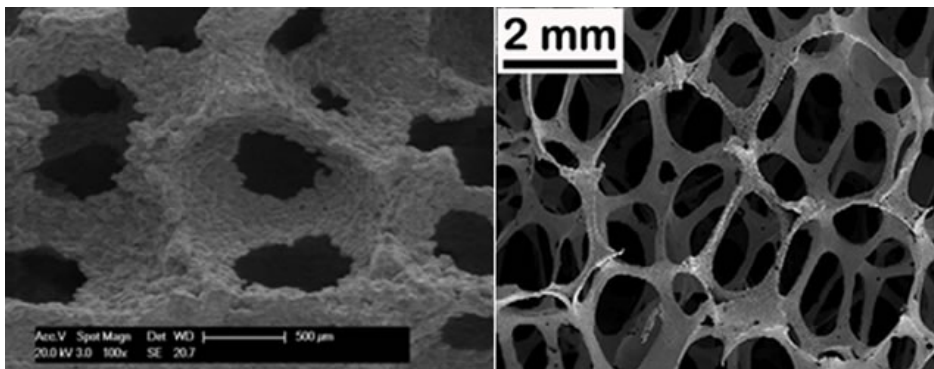
2. Κυψελωτά Υλικά

Όταν ο σύγχρονος άνθρωπος φτιάχνει μεγάλες κατασκευές χρησιμοποιεί συμπαγή υλικά: σίδερο, τσιμέντο, γυαλί. Όταν η φύση φτιάχνει μεγάλες κατασκευές χρησιμοποιεί κυψελωτά υλικά: ξύλο, κόκαλα, κοράλλια. Πρέπει να υπάρχει κάποιος λόγος γι' αυτό.

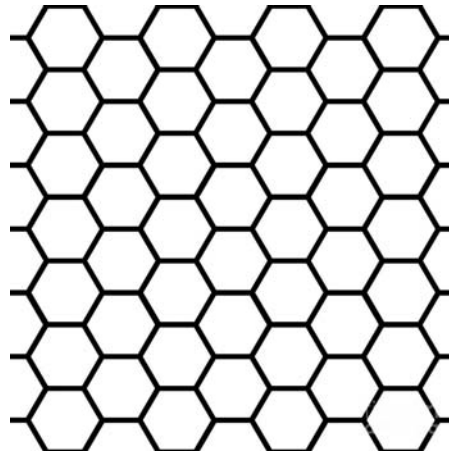
M. F. Ashby

Όπως αναφέρεται στο βιβλίο των Gibson και Ashby Cellular Solids, “Structure and Properties” [1] ένα κυψελωτό υλικό αποτελείται από ένα σύμπλεγμα στέρεων επιφανειών που σχηματίζουν κυψέλες. Με τον όρο κυψέλη εννοούμε ένα μικρό θάλαμο που περιφράζεται από στέρεες πλευρές (Εικόνα 2-1). Κυψελωτά υλικά μπορούμε να συναντήσουμε καθημερινά στη φύση, όπως το ξύλο, ο φελλός, το σφουγγάρι κ.α. Ο άνθρωπος τα χρησιμοποιεί για χρόνια σε διάφορες εφαρμογές και τελευταία χρόνια ξεκίνησε να κατασκευάζει τεχνητά κυψελωτά υλικά. Ένα απλό παράδειγμα είναι οι εξαγωνικές κυψέλες αλουμινίου που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφριές κατασκευές. Άλλα τεχνητά κυψελωτά υλικά είναι οι αφροί πολυμερών που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές από καθημερινά αντικείμενα μέχρι και την αεροναυπηγική. Πλέον υπάρχουν τεχνικές για την παρασκευή αφρών από μέταλλα, κεραμικά και άλλα υλικά. Αυτοί οι νέοι αφροί χρησιμοποιούνται κυρίως στις κατασκευές ως μονωτικά υλικά αλλά και σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας. Η χρήση των κυψελωτών υλικών εκμεταλλεύεται όλο το εύρος των συνδυαστικών ιδιοτήτων τους οι οποίες προέρχονται αποκλειστικά από τη δομή τους.

Υπάρχουν δύο τυπικές δομές κυψελωτών υλικών. Η πιο απλή είναι μια σειρά από πολύγωνα που όταν αναπτύσσονται στο χώρο δημιουργούν μία δομή όμοια με αυτή μιας κυψέλης μελισσών γι' αυτό και ονομάζονται honeycombs (Σχήμα 2-1). Συνήθως, ό μως, οι κυψέλες αποτελούνται από πολύεδρα στο χώρο τα οποία ονομάζονται αφροί (foams). Αν οι κυψέλες αυτές ενώνονται μόνο με τις ακμές τους και όχι με επιφάνειες τότε ονομάζονται υλικά ανοιχτής κυψέλης (open cell). Υπάρχουν, βέβαια, και περιπτώσεις όπου σε ένα υλικό υπάρχουν και ανοιχτές και κλειστές κυψέλες.



Εικόνα 2-1 Φωτογραφία από μικροσκόπιο κυψελωτού υλικού [1]



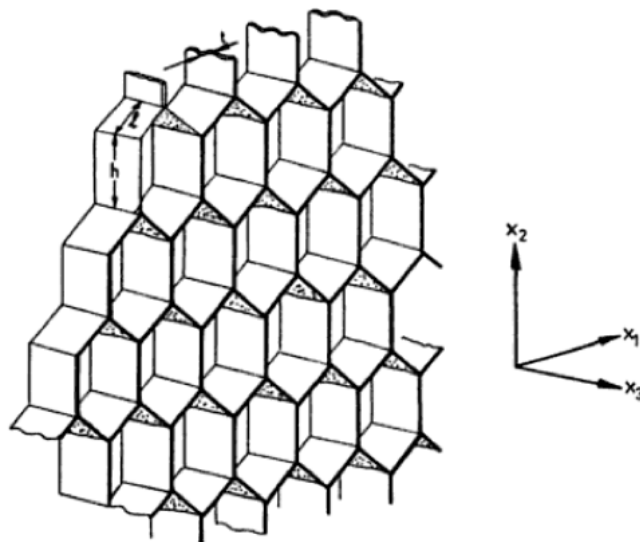
Σχήμα 2-1 Διάταξη εξαγωνικής κυψέλης

Η πιο σημαντική ιδιότητα των κυψελωτών υλικών είναι η σχετική πυκνότητα ρ^*/ρ_s . Η σχετική πυκνότητα είναι η πυκνότητα του κυψελωτού υλικού διαιρεμένη με την πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένες οι πλευρές των κυψελών. Είναι δυνατή η κατασκευή υλικών πολύ χαμηλής σχετικής πυκνότητας της τάξης του 0.001. Άλλες σημαντικές ιδιότητες αυτών των υλικών είναι η θερμική αγωγιμότητα τους, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες. Οι αφοί πολυμερών υλικών π.χ. χρησιμοποιούνται συχνά για τη θερμική μόνωση κτιρίων ακόμη και στους προωθητικούς πυραύλους διαστημοπλοίων. Οι πολυγωνικές κυψέλες (honeycombs) διαφόρων υλικών χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά σε ελαφριές κατασκευές.

Οι εξαγωνικές κυψέλες (honeycomb) χρησιμοποιούνται κυρίως για την απορρόφηση ενέργειας. Η στιβαρή και ελαφριά κατασκευή τους β ρίσκει εφαρμογή στους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής, της στρατιωτικής βιομηχανίας, των κατασκευών κ.α. Η δομή του υλικού βασίζεται σε μία απλή εξαγωνική κυψέλη όπως αυτή ενός μελισσιού. Η παρασκευή τους μπορεί να γίνει με τέσσερις τουλάχιστον διαφορετικούς τρόπους. Ο πιο συνηθισμένος είναι το πρεσάρισμα ενός φύλλου αλουμινίου ώστε να πάρει το σχήμα μισής εξαγωνικής κυψέλης και στη συνέχεια η κόλληση με ένα άλλο αντίστοιχο φύλλο. Ένας άλλος διαδεδομένος τρόπος είναι η εφαρμογή κόλλας σε συγκεκριμένα σημεία ανάμεσα σε 2 φύλλα αλουμινίου και στη συνέχεια με την εφαρμογή πίεσης τα σημεία όπου δεν είχε εφαρμοστεί η κόλλα παίρνουν το σχήμα της εξαγωνικής κυψέλης. Χαρτί ποτισμένο με ρητίνη είναι μία άλλη μέθοδος παρασκευής του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση το χαρτί αφού κολληθεί και πάρει το σχήμα της κυψέλης βυθίζεται σε ρητίνη για να γίνει πιο στιβαρό. Οι κυψέλες μπορούν να παρασκευαστούν επίσης και με χύτευση. Για την κατασκευή κυψελών αλουμινίου, που είναι το αντικείμενο της εργασίας, χρησιμοποιούνται κυρίως οι πρώτες δύο μέθοδοι.

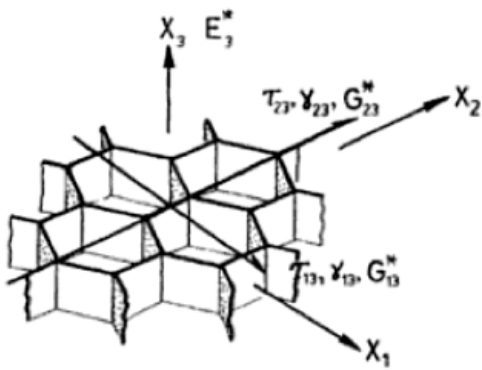
Τα τελευταία χρόνια οι κυψέλες αλουμινίου βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στη βιομηχανία. Συναντιούνται κυρίως ως πυρήνας, ανάμεσα σε φύλλα ανθρακονήματος, υαλοβάμβακα ή άλλου χαμηλού βάρους υλικού. Το αποτέλεσμα είναι μία επιφάνεια με πολύ μεγάλη αντοχή στην κάμψη. Τέτοιου είδους σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή στοιχείων της δομής αεροπλάνων, αγωνιστικών αυτοκινήτων, διαστημοπλοίων κ.α.

Στο Σχήμα 2-2 φαίνεται μία εξαγωνική κυψέλη, η αντοχή και η ακαμψία στον άξονα x_2 είναι πολύ μικρές γιατί οι τάσεις στη διεύθυνση αυτή κάνουν τις κυψέλες να υποχωρούν με την εφαρμογή φορτίου. Αντίθετα, στη διεύθυνση x_3 η αντοχή και η ακαμψία είναι πολύ μεγαλύτερες και αυτό γιατί απαιτείται και η θλίψη των τοιχωμάτων των κυψελών προκειμένου να υπάρξει πλαστική παραμόρφωση.

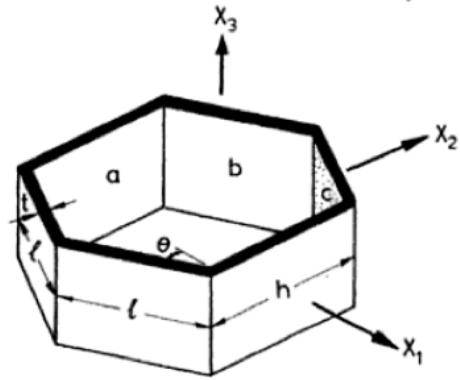


Σχήμα 2-2 Εξαγωνική κυψέλη

Η χρησιμότητα των κυψελών έγκειται στο γεγονός ότι μπορούν να δεχτούν αξονικά ή διατμητικά φορτία στο επίπεδο που περνάει από τον άξονα των κυψελών (Σχήμα 2-3). Όταν φορτίζονται σ' αυτή την κατεύθυνση τα τοιχώματα των κυψελών επεκτείνονται ή συνθλίβονται, όμως δεν κάμπτονται. Το μέτρο ελαστικότητας σ' αυτή τη διεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι στη διεύθυνση κάθετα στον άξονα των κυψελών.



Σχήμα 2-3 Φορτία κάθετα στον άξονα x3



Σχήμα 2-4 Μοναδιαία κυψελίδα

2.1 Γραμμική ελαστική παραμόρφωση

Για την ανάλυση της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς σε θλίψη των κυψελών θεωρούμε ότι η πυκνότητα είναι πολύ μικρή έτσι ώστε το πάχος t των τοιχωμάτων να είναι πολύ μικρότερο από το πλάτος τους l . Ακόμη θεωρούμε ότι τα τοιχώματα των κυψελών έχουν όλα το ίδιο πάχος. Το μέτρο ελαστικότητας για αξονική φόρτιση στη διεύθυνση x_3 , E_3^* σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας E_s του βασικού υλικού της κυψέλης για την επιφάνεια που φέρει το φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{E_3}{E_s} = \left\{ \frac{\frac{h}{l} + 2}{2 \left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right) \cos\theta} \right\} \left(\frac{t}{l} \right) = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t}{l} \quad (2.1)$$

Όπου ρ^* είναι η ειδική πυκνότητα του κυψελωτού υλικού και ρ_s η πυκνότητα του βασικού υλικού. Οι παράμετροι h , l , t , θ δίνονται στο Σχήμα 2-4.

Για τους λόγους Poisson ν_{31}^* και ν_{32}^* (Σχήμα 2-3) σε σχέση με το λόγο Poisson του αρχικού υλικού ν_s ισχύει:

$$\nu_{31}^* = \nu_{32}^* = \nu_s \quad (2.2)$$

Οι λόγοι Poisson ν_{13}^* και ν_{23}^* βρίσκονται από σχέσεις αναλογίας.

$$\nu_{13}^* = \frac{E_1^*}{E_3^*} = 0 \quad (2.3) \quad \nu_{23}^* = \frac{E_2^*}{E_3^*} = 0 \quad (2.4)$$

Όπου E_1^* , E_2^* , E_3^* τα μέτρα ελαστικότητας στις διευθύνσεις x_1 , x_2 , x_3 αντίστοιχα.

2.2 Μη-Γραμμική ελαστική παραμόρφωση

Καθώς οι κυψέλες φορτίζονται στη διεύθυνση του άξονα x_3 παραμορφώνονται μέχρι που τελικά κάμπτονται. Τα τοιχώματα των κυψελών λυγίζουν περιοδικά δημιουργώντας πτυχώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Η κάμψη των τοιχωμάτων των κυψελών που περιορίζεται στις δύο παράλληλες προς το φορτίο ακμές τους είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα. Το καμπτικό φορτίο εξαρτάται από τη ροπή αδράνειας του τοιχώματος και από το πλάτος (l ή h) του και όχι από το ύψος (b) του. Για τοίχωμα μήκους l το καμπτικό φορτίο P_{crit} είναι:

$$P_{crit} = \frac{KE_s}{l-v_s^2} \left(\frac{t^3}{l}\right) \quad (2.5)$$

Όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του βασικού υλικού, v_s είναι ο λόγος Poisson του βασικού υλικού και οι παράμετροι t , l δίνονται από το Σχήμα 2-4.

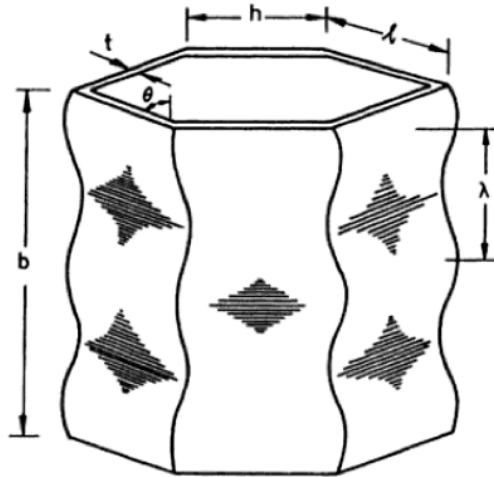
Ο όρος K είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες. Αν στις ακμές των τοιχωμάτων επιτρέπεται η στροφή και το ύψος b είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το μήκος l ($b > 3l$), τότε $K=2.0$. Αν οι ακμές είναι πακτωμένες τότε $K=6.2$. Σε μια εξαγωνική κυψέλη οι ακμές των τοιχωμάτων των κυψελών δεν είναι ούτε ελεύθερες ούτε πακτωμένες γι' αυτό χρησιμοποιείται κατά προσέγγιση η τιμή $K=4$. Τότε, το ελαστο-καμπτικό φορτίο είναι το άθροισμα όλων των φορτίων που εφαρμόζονται σε κάθε πλευρά των κυψελών ξεχωριστά δίνοντας την ελαστική τάση σ_{el}^* :

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = \left(\frac{2}{l-v_s^2}\right) \frac{\frac{l}{h}+2}{\left(\frac{h}{l}+\sin\theta\right)\cos\theta} \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (2.6)$$

Όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του βασικού υλικού, v_s είναι ο λόγος Poisson του βασικού υλικού και οι παράμετροι h , t , l , θ δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Για κανονικά εξάγωνα και λόγο Poisson του αρχικού υλικού $v_s=0.3$ η σχέση γίνεται:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = 5.2 \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (2.7)$$



Σχήμα 2-5 Αξονική κάμψη μοναδιαίας κυψελίδας

Ο λυγισμός που προκαλείται από διάτμηση στη διεύθυνση του άξονα x_3 μπορεί να αναλυθεί συνδυάζοντας τη γραμμική ελαστική διάτμηση στον άξονα x_3 με το λυγισμό λόγω διάτμησης ενός τοιχώματος μιας μοναδιαίας κυψελίδας, τ_{crit} :

$$\tau_{crit} = \frac{CE_s}{1-\nu_s^2} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (2.8)$$

Όπου C μία σταθερά, E_s το μέτρο ελαστικότητας του βασικού υλικού, ν_s ο λόγος Poisson του βασικού υλικού και οι παράμετρο t, l δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Για φόρτιση στο επίπεδο x_1-x_3 η ισορροπία απαιτεί:

$$2\tau_{13}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \cos\theta \quad (2.9)$$

Όπου τ_{13} η διατμητική τάση στο επίπεδο x_1-x_3 , τ_b η διατμητική τάση στο τοίχωμα b και οι παράμετροι h, t, l, θ δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Ο ελαστικός λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα στα τοιχώματα b και c . Θέτοντας $\tau_b = \tau_{crit}$ προκύπτει:

$$\tau_{13}^* = \frac{CE_s \left(\frac{t}{l}\right)^3}{(1-\nu_s^2) \left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right)} \quad (2.10)$$

Όπου τ_{13}^* η διατμητική τάση στο επίπεδο $x_1- x_3$, C μία σταθερά, E_s το μέτρο ελαστικότητας του βασικού υλικού, ν_s ο λόγος Poisson του βασικού υλικού και οι παράμετρο h , t , l , θ δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Για φόρτιση στο επίπεδο $x_2- x_3$ η ισορροπία απαιτεί:

$$2\tau_{23}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \sin\theta + \tau_a t h \quad (2.11)$$

Όπου τ_{23} η διατμητική τάση στο επίπεδο $x_2- x_3$, τ_b η διατμητική τάση στο τοίχωμα b , τ_a η διατμητική τάση στο τοίχωμα a και οι παράμετροι h , t , l , θ δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα a είναι διπλάσια απ' ότι στο τοίχωμα b και c (Σχήμα 2-4). Επομένως, αναμένεται να ξεκινήσει λυγισμός λόγω της διάτμησης:

$$\tau_{23}^* = \frac{CE_s \left(\frac{t}{l}\right)^3}{2(l-\nu_s^2)\cos\theta} \quad (2.12)$$

Όπου τ_{23}^* η διατμητική τάση στο επίπεδο $x_2- x_3$, C μία σταθερά, E_s το μέτρο ελαστικότητας του βασικού υλικού, ν_s ο λόγος Poisson του βασικού υλικού και οι παράμετρο t , l , θ δίνονται από το Σχήμα 2-4.

Στην πραγματικότητα η αντοχή σε διάτμηση στη διεύθυνση του άξονα x_3 μπορεί να μετρηθεί μόνο όταν οι κυψέλες αλουμινίου είναι σε επαφή με στέρεες πλάκες, γι' αυτό υποθέτουμε ότι και οι τέσσερις ακμές του κάθε τοιχώματος των κυψελίδων είναι σταθερές και παίρνουμε τη σταθερά $C=8.44$, μία ενδιάμεση τιμή για τις τιμές του λόγου $b/l=2$ και $b/l=\infty$.

2.3 Πλαστική παραμόρφωση

Όταν οι τάσεις στο επίπεδο κάθετο στον άξονα x_3 ξεπεράσουν το όριο διαρροής του υλικού τότε τα τοιχώματα των κυψελών αρχίζουν να καταρρέουν αξονικά. Αυτό ορίζει ένα πάνω όριο για την πλαστική παραμόρφωση της κυψέλης σ_{pl}^* που δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = \frac{\frac{h}{l}+2}{2\cos\theta\left(\frac{h}{l}+\sin\theta\right)} \left(\frac{t}{l}\right) = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.13)$$

Όπου σ_{ys} το όριο διαρροής του βασικού υλικού, ρ^* είναι η ειδική πυκνότητα του κυψελωτού υλικού και ρ_s η πυκνότητα του βασικού υλικού. Οι παράμετροι h , l , t , θ δίνονται στο Σχήμα 2-4.

Αυτή η εξίσωση περιγράφει πλήρως την αντοχή σε εφελκυσμό αλλά όταν τα φορτία είναι θλιπτικά σπάνια φτάνουν αυτό το όριο καθώς συμβαίνει πρώτα λυγισμός.

Κατά τον αξονικό λυγισμό οι κυψελίδες διπλώνουν προοδευτικά με ένα μήκος κύματος λ το οποίο είναι συχνά περίπου ίσο με το μήκος l του τοιχώματος της κυψελίδας. Περαιτέρω περιγραφή του μηχανισμού παραμόρφωσης των εξαγωνικών κυψελών γίνεται στο Κεφάλαιο 5.1.

3. Πειραματική διαδικασία

Για την πειραματική μελέτη της κυψέλης αλουμινίου σε θλίψη πραγματοποιήθηκε μία σειρά στατικών και δυναμικών πειραμάτων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων είναι κυψέλες αλουμινίου κράματος 5052. Η προμήθεια του υλικού έγινε από την εταιρεία I.MA.TEC. Honeycomb & Derivati. Τα χαρακτηριστικά του υλικού φαίνονται στον Πίνακα 3-1 [2]:

Μέγεθος κυψέλης	1/8 inch ή 3,175mm
Πάχος κυψέλης	0,001inch ή 0.0254 mm
Πυκνότητα	4.5 lb/ft ³ ή 72.083 kg/m ³

Πίνακας 3-1 Χαρακτηριστικά κυψέλης αλουμινίου 5052

3.1 Στατικά πειράματα

Τα στατικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός των πειραμάτων αυτών ήταν η κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού όταν εφαρμόζεται σε αυτό θλιπτική φόρτιση.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μηχανής θλίψης/εφελκυσμού MTS με δυναμοκυψέλη μέγιστου φορτίου 5kN. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικοί δίσκοι που δέθηκαν στις αρπάγες του εμβόλου της μηχανής θλίψης ώστε να υπάρχει επαρκής χώρος για να στηριχτεί το δοκίμιο αλλά και να κατανεμηθεί το φορτίο ομοιόμορφα (Εικόνα 3-1). Για τη στήριξη των δοκιμίων δε χρησιμοποιήθηκε κάποια ιδιοσυσκευή, οι επαπτόμενες στις πλάκες επιφάνειες των δοκιμίων ήταν ελεύθερες (Εικόνα 3-2).

Η παρασκευή των δοκιμίων έγινε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών από την αρχική πλάκα κυψέλης αλουμινίου διαστάσεων 1220 mm x 2440 mm x 50 mm με μηχανουργική κοπή χρησιμοποιώντας γωνιακό τροχό. Η κοπή με γωνιακό τροχό αποδείχτηκε, μετά από δοκιμές, ο αποδοτικότερος τρόπος κοπής της κυψέλης αλουμινίου. Άλλες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η κοπή με πριόνι και με τροχό κοπής μετάλλων, το αποτέλεσμα

των οποίων δεν ήταν ικανοποιητικό καθώς τα τοιχώματα των κυψελών καταστρέφονταν δημιουργώντας πολλές ανεπιθύμητες ατέλειες στα δοκίμια. Οι ατέλειες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού και οδηγούν σε πρόωρο λυγισμό.

Συνολικά πέντε δοκίμια κυψελών αλουμινίου υποβλήθηκαν σε θλίψη. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του πειράματος γι' αυτό και τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής δεν καταγράφηκαν. Οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στον Πίνακα 3-2.

Δοκίμιο	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Μετατόπιση Dz
A1	45 mm	45 mm	50 mm	40 mm
A2	46 mm	46 mm	50 mm	40 mm
A3	27 mm	30 mm	50 mm	40 mm
A4	28 mm	30 mm	50 mm	40 mm

Πίνακας 3-2 Διαστάσεις δοκιμίων στατικών πειραμάτων

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θλίψη με μέγιστη μετατόπιση την τιμή 40 mm. Η ταχύτητα του εμβόλου που καθορίζει την ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate) για τα πρώτα 5 mm τέθηκε στα 2.5 mm/min ενώ για τα υπόλοιπα 33 mm τέθηκε στα 11 mm/min. Ο λόγος που το strain rate είναι μικρότερο στην αρχή του πειράματος είναι για να εξασφαλιστεί ότι η καταγραφή των δεδομένων είναι αρκετή ώστε να αποτυπωθεί στο διάγραμμα (Σχήμα 5-2) η αύξηση του φορτίου μέχρι το σημείο λυγισμού στην αρχή του φαινομένου.

Επιπλέον, για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιήθηκε μία σειρά στατικών πειραμάτων με 8 δοκίμια διαστάσεων παρόμοιων με το μοντέλο των 81 κυψελίδων που περιγράφεται παρακάτω (Κεφάλαιο 4.2). Για τα πειράματα αυτά ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία όπως και στα υπόλοιπα πειράματα. Η κοπή των δοκιμίων στις ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων δε δύναται καθώς απαιτείται βιομηχανικός εξοπλισμός, για το λόγο αυτό, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο A3 με την καλύτερη δυνατή προσέγγιση (Πίνακας 3-2).



Εικόνα 3-1 Πειραματική διάταξη



Εικόνα 3-2 Το δοκίμιο πριν από τη θλίψη

3.2 Δοκιμές κρούσης

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων που αφορά δυναμική κρούση σε θλίψη πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η καταγραφή της συμπεριφοράς του υλικού κατά την κρουστική φόρτιση με διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης. Επίσης, έγινε συσχέτιση του κρίσιμου φορτίου με την επιφάνεια του υλικού με τη χρήση δοκιμών διαφορετικών διαστάσεων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός Πύργου κρούσης της εταιρείας Instron 9250 HV (Εικόνα 3-3). Οι κύριες παράμετροι που ρυθμίζονται στο μηχάνημα είναι το ύψος και το βάρος της κεφαλής κρούσης. Έτσι ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την ταχύτητα της κεφαλής κατά την κρούση και την κινητική του ενέργεια. Στο σώμα της κεφαλής προστίθενται βαρίδια διαφόρων μαζών ώστε με την ανύψωση στο κατάλληλο ύψος να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα ή ενέργεια κρούσης. Η μέγιστη ταχύτητα που επιτυγχάνεται είναι 25 m/s ενώ η μέγιστη ενέργεια κρούσης είναι 1000J. Πριν από κάθε δοκιμή κρούσης ρυθμίζονται οι παράμετροι της μηχανής, η κεφαλή κρούσης έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο και στη συνέχεια ρυθμίζεται το ύψος του ώστε να έχει την καθορισμένη ταχύτητα ή ενέργεια κρούσης. Για τη στήριξη των δοκιμών δε χρησιμοποιήθηκε κάποια ιδιοσυσκευή, τα δοκίμια εδράζονταν σε μία μεταλλική κατασκευή τοποθετημένη κάτω από τον Πύργο κρούσης (Εικόνα 3-4).

Τα δοκίμια του πειράματος προετοιμάστηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών με τον ίδιο τρόπο που προετοιμάστηκαν τα δοκίμια των στατικών πειραμάτων. Συνολικά δοκιμάστηκαν εννέα δοκίμια, τρία για κάθε κατηγορία μεγέθους. Το πρώτο δοκίμιο κάθε κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του πειράματος και τα αποτελέσματά τους δεν καταγράφηκαν επίσημα. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράμετροι κρούσης φαίνονται στον Πίνακα 3-3.

Δοκίμιο	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Ταχύτητα v	Ενέργεια κρούσης E
B1	40 mm	50 mm	50 mm	4.65 m/s	200 J
B2	55 mm	57 mm	50 mm	5.56 m/s	280 J
B3	68 mm	88 mm	50mm	7.60 m/s	528 J

Πίνακας 3-3 Διαστάσεις δοκιμών κρουστικών δοκιμών

Η ταχύτητα και η ενέργεια της κρούσης μεταβάλλονταν ανάλογα με τις διαστάσεις του δοκιμίου με τη ρύθμιση του κατάλληλου ύψους της κεφαλής κρούσης έτσι ώστε να επιτευχθούν ίδιες συνθήκες παραμόρφωσης σε κάθε δοκίμιο (Εικόνα 3-5).



Εικόνα 3-3 Πειραματική διάταξη



Εικόνα 3-4 Δοκίμιο πριν από την κρούση



Εικόνα 3-5 Δοκίμιο μετά την κρούση

3.3 Πειράματα μεγάλης κλίμακας

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν και κάποια δοκιμαστικά πειράματα σε μεγαλύτερα δοκίμια κυψελίδων καθώς και μία δοκιμή μεγάλης κλίμακας για τη μελέτη της συμπεριφοράς θλίψης ενός κατασκευαστικού στοιχείου από κυψέλη αλουμινίου. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Εικόνα 3-6) καθώς και στο εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Οι δοκιμές βοήθησαν στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του αποσβεστήρα κρούσης (Impact Attenuator) του πρώτου αυτοκινήτου της Centaurus Racing Team.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα πειράματα κρούσης του στοιχείου αποσβεστήρα κρούσης. Ο αποσβεστήρας αποτελείται από τέσσερα κομμάτια κυψέλης αλουμινίου διαστάσεων 100 x 200 x 50 mm που ενώνονταν με πλάκες αλουμινίου ίσης επιφάνειας, πάχους 2 mm με κόλλα 2 συστατικών. Η κατασκευή αυτή εδράζεται σε ένα πλαίσιο χαλύβδινων σωλήνων πάνω στο οποίο έχει συγκολληθεί μία χαλύβδινη πλάκα πάχους 4 mm (Εικόνα 3-7). Σκοπός των πειραμάτων ήταν να διαπιστωθεί αν η συμπεριφορά του αποσβεστήρα σε θλίψη καλύπτει τις προδιαγραφές που τίθενται από τους κανονισμούς του διαγωνισμού Formula

Student. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή πρέπει να είναι σε θέση να απορροφά ενέργεια μεγαλύτερη των 7350 J όταν έρχεται σε σύγκρουση με αντικείμενο βάρους 300 kg με ταχύτητα κρούσης 7 m/s. Ακόμη, η μέγιστη επιβράδυνση πρέπει να είναι μικρότερη των 40 g ενώ η μέση επιβράδυνση μικρότερη των 20 g. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον πύργο κρούσης του Εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλουργίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Εικόνα 3-8). Στην κορυφή του πύργου δένονταν το βάρος των 300 kg ενώ στη βάση του εδράζονταν τα δοκίμια. Το βάρος απελευθερωνόταν την κατάλληλη στιγμή με έναν μηχανισμό και πραγματοποιούσε ελεύθερη πτώση. Η μέτρηση της επιβράδυνσης έγινε με κατάλληλα ποτενσιόμετρα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών περιγράφονται στην παράγραφο 5.1.3.



Εικόνα 3-6 Πειραματική διάταξη στατικών πειραμάτων στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 3-7 Δοκίμιο μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 3-8 Πειραματική διάταξη πειραμάτων κρούσης στο εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας του Α.Π.Θ. (το δοκίμιο της φωτογραφίας είναι διαφορετικό από το δοκίμιο του πειράματος)

4. Αριθμητική ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Αρκετές μελέτες ασχολούνται με την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς των κυψελωτών υλικών. Η αριθμητική μελέτη συνήθως συνδυάζεται με πειραματική μελέτη του φαινομένου ώστε να επαληθευτούν τα αριθμητικά μοντέλα. Στην πλειοψηφία τους το αναλυτικό μοντέλο που εξετάζουν περιορίζεται στη μελέτη της συμπεριφοράς μίας και μόνο κυψέλης και στη συνέχεια γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων σε μοντέλο πλήρους κλίμακας καθώς η γενική παραδοχή, που αποδεικνύεται πειραματικά, είναι ότι η ενέργεια που απορροφάται είναι ανάλογη του όγκου του υλικού [3][4][5][6]. Σε πολλές περιπτώσεις γίνεται μελέτη του κυψελωτού υλικού ως πυρήνα ανάμεσα σε δύο επιφάνειες όπου στη μοντελοποίηση είτε περιλαμβάνονται οι επιφάνειες του εκάστοτε υλικού στην πάνω και κάτω διατομή της κυψέλης, είτε λαμβάνονται υπόψιν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες [7][8][9].

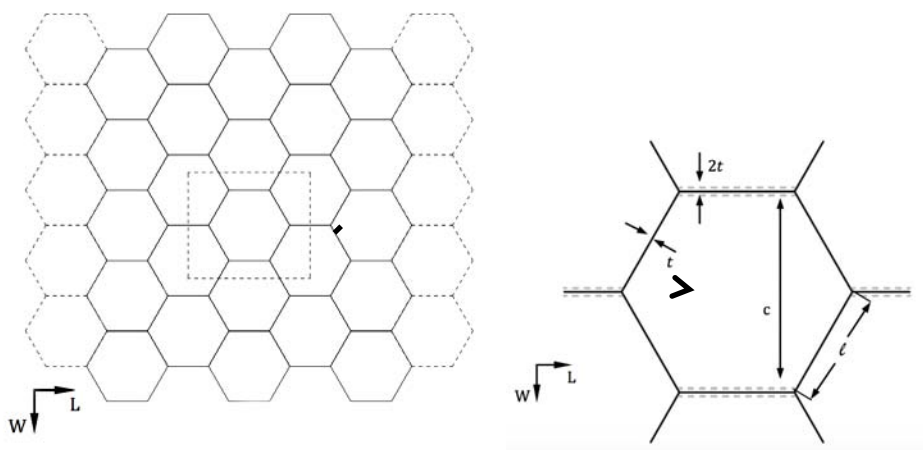
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς θλίψης της κυψέλης αλουμινίου αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και χρήση του λογισμικού Abaqus. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει αξιόπιστα αριθμητικά αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετα προβλήματα της μηχανικής των υλικών. Η χρήση της σε σύνθετα μοντέλα αυξάνει πολλές φορές τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, το πρόβλημα αυτό όμως, ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών.

Η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την κυψέλη αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε πρώτα για την προσομοίωση μίας μοναδιαίας κυψελίδας και στη συνέχεια για την προσομοίωση της θλίψης ενός μοντέλου 81 κυψελίδων.

Η ανάπτυξη του μοντέλου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: α) τη γεωμετρία (part) όπου σχεδιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου, β) τις ιδιότητες του υλικού (property) όπου εισάγονται στο μοντέλο οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, γ) τη συναρμολόγηση (assembly) κατά την οποία οι διάφορες γεωμετρίες τοποθετούνται στο χώρο, δ) τις παραμέτρους της ανάλυσης (step), ε) την αλληλεπίδραση (interaction) όπου συνδέονται οι διάφορες γεωμετρίες μεταξύ τους, στ) το φορτίο και τις συνοριακές συνθήκες (load), ζ) το πλέγμα (mesh) όπου δημιουργούνται τα στοιχεία και οι κόμβοι επάνω στη γεωμετρία και τέλος η) την ανάλυση (job) κατά τη διάρκεια της οποίας γίνεται η επίλυση του προβλήματος.

4.1 Μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας

Προκειμένου να απλοποιηθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας. Λόγω της περιοδικότητας των κυψελωτών υλικών η μελέτη της συμπεριφοράς τους μπορεί να απλοποιηθεί και να επικεντρωθεί στη μελέτη μόνο μίας κυψελίδας με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας στη συνέχεια ανάγονται, λόγω συμμετρίας, σε μία μεγαλύτερη κυψέλη (Εικόνα 4-1).

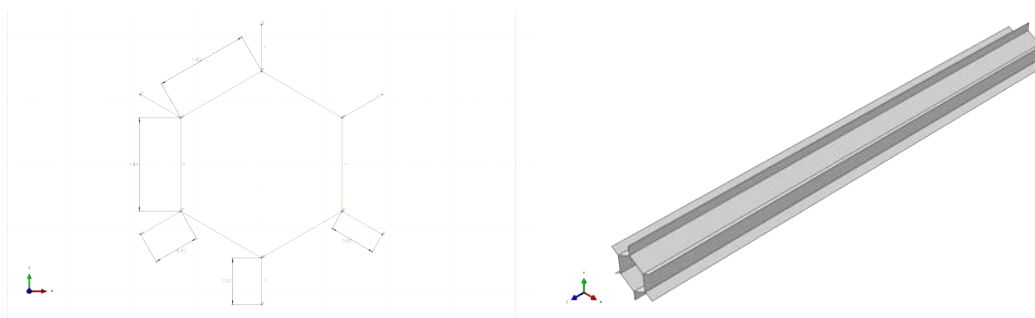


Εικόνα 4-1 Αναγωγή στη μοναδιαία κυψελίδα

4.1.1 Γεωμετρία

Η γεωμετρία σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks. Όπως και στο μοντέλο 81 κυψελίδων οι διαστάσεις της κυψελίδας ελήφθησαν από το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία (Πίνακας 3-1). Στη γεωμετρία συμπεριλαμβάνονται και τα τοιχώματα των γειτονικών κυψελίδων κατά το ήμισυ προκειμένου να εφαρμοστούν σε αυτά περιοδικές συνοριακές συνθήκες (4.1.6 Φορτίο (load)) οπότε, ακριβέστερα, σχεδιάστηκε 1,5 κυψελίδα (Εικόνα 4-2).

Επιπλέον, σχεδιάστηκε μία λεπτή άκαμπτη επιφάνεια διαστάσεων $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ πάνω στην οποία εφαρμόζονται το φορτίο και οι συνοριακές συνθήκες. Στην επιφάνεια αυτή ορίστηκε ένα σημείο αναφοράς ώστε να διευκολυνθεί η συλλογή των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα η δύναμη αντίδρασης της κυψελίδας και η μετατόπιση της πάνω επιφάνειάς της.



Εικόνα 4-2 Γεωμετρία μοναδιαίας κυψελίδα

4.1.2 Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 5052

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5052 ελήφθησαν από τον προμηθευτή των κυψελών αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και συγκρίθηκαν με τη βιβλιογραφία. Για την αριθμητική ανάλυση απαιτούνται τέσσερις βασικές ιδιότητες του υλικού: η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής και ο λόγος Poisson οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-1).

Πυκνότητα, ρ	2.68 E-9 tonne/mm
Μέτρο ελαστικότητας, E	70300 MPa
Όριο διαρροής, σ_0	193 MPa
Λόγος Poisson, ν	0.33

Πίνακας 4-1 Ιδιότητες αλουμινίου 5052

Στην άκαμπτη επιφάνεια δεν ανατέθηκαν μηχανικές ιδιότητες καθώς δε συμμετέχει στην αριθμητική επίλυση. Το λογισμικό συμπεριλαμβάνει στην επίλυση μόνο τις γεωμετρίες στις οποίες έχουν ανατεθεί μηχανικές ιδιότητες. Απαιτείται όμως να οριστεί η μάζα της πλάκας (20 kg) ώστε να εφαρμοστούν σε αυτή οι συνοριακές συνθήκες.

4.1.3 Συναρμολόγηση (assembly)

Στο βήμα αυτό η κυψελίδα και η επίπεδη πλάκα τοποθετούνται κατάλληλα στο χώρο ώστε να σχηματίσουν μία ενιαία γεωμετρία (Εικόνα 4-3). Η επίπεδη πλάκα εφάπτεται στην επάνω επιφάνεια της κυψέλης.

4.1.4 Παράμετροι της ανάλυσης (step)

Σε αυτό το βήμα ρυθμίζονται οι παράμετροι της αριθμητικής ανάλυσης. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκαν δύο μέθοδοι, η μέθοδος buckle και η μέθοδος implicit.

Η μέθοδος buckle προσομοιώνει το λυγισμό της κυψέλης και δίνει τις ιδιομορφές του λυγισμού της όταν σε αυτή εφαρμόζεται θλιπτικό φορτίο. Οι ιδιομορφές αυτές καταγράφονται σε ένα αρχείο και στη συνέχεια εισάγονται στην επόμενη ανάλυση ως ατέλεια του πλέγματος όπως αναλύεται παρακάτω (Κεφάλαιο 4.1.7).

Η μέθοδος implicit προσομοιώνει τα στατικά φορτία που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και τις μεγάλες παραμορφώσεις που προκλήθηκαν στη γεωμετρία. Με τη μέθοδο implicit το πρόγραμμα, για κάθε νέα χρονική στιγμή (increment), δημιουργεί ένα νέο μητρώο ακαμψίας σύμφωνα με τη νέα γεωμετρία (εφόσον υπάρχει παραμόρφωση) και σύμφωνα με το υλικό (εφόσον υπάρχουν αλλαγές στις ιδιότητες του). Επιπλέον, χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson που επιβάλλει την ισορροπία μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων και των εξωτερικών φορτίων. Ο επαναπροσδιορισμός του μητρώου ακαμψίας και οι επαναλήψεις Newton-Raphson που απαιτεί αυτή η μέθοδος, αυξάνουν αρκετά τον υπολογιστικό χρόνο, τα αποτελέσματα, όμως, έχουν μεγάλη ακρίβεια [10]. Οι ιδιομορφές από την προσομοίωση του λυγισμού με τη μέθοδο buckle καταγράφηκαν σε ένα αρχείο ώστε να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση με τη μέθοδο implicit.

Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης με τη μέθοδο implicit ορίστηκε στα 10 δευτερόλεπτα. Ο μέγιστος αριθμός προσαυξήσεων (increments) είναι 10.000 με το μικρότερο δυνατό μέγεθος να είναι $1 \cdot 10^{-9}$ και το αρχικό μέγεθος 0.01 δευτερόλεπτα.

4.1.5 Αλληλεπίδραση (interaction)

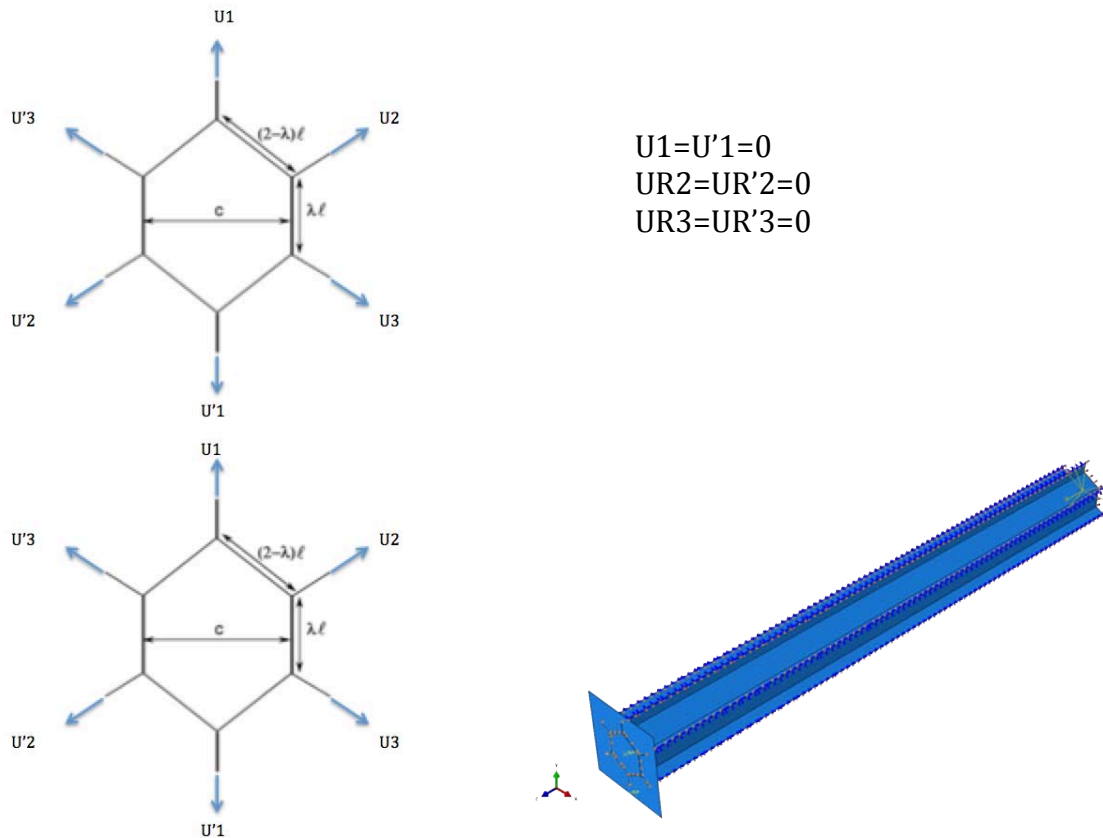
Η μοναδιαία κυψελίδα συνδέεται με την επίπεδη πλάκα με μία απλή σύνδεση επιφάνειας προς επιφάνεια (tie constrain) με το πάνω μέρος της κυψελίδας να συνδέεται με την κάτω επιφάνεια της πλάκας (Εικόνα 4-3)

4.1.6 Φορτίο και συνοριακές συνθήκες (load)

Στο βήμα αυτό ορίζεται το φορτίο θλίψης καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο μοντέλο. Αρχικά, στην κάτω επιφάνεια της κυψέλης περιορίζεται η μετατόπιση και η στροφή ως προς τον z άξονα. Στην άκαμπτη πλάκα ορίζεται μία μετατόπιση 10 mm ως προς τον z άξονα ενώ οι μετατοπίσεις και οι στροφές δεν επιτρέπονται στις

υπόλοιπες διευθύνσεις. Η μετατόπιση της πλάκας ως προς τον z άξονα καταπονεί θλιπτικά την κυψελίδα.

Επίσης, εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες στις ακμές των τοιχωμάτων της κυψέλης οι οποίες προσομοιώνουν την περιοδικότητα που υπάρχει σε μία εξαγωνική κυψέλη. Πιο συγκεκριμένα περιορίζονται οι μετατοπίσεις στην ακτινική διεύθυνση και οι στροφές στο κάθετο στα τοιχώματα επίπεδο (Εικόνα 4-3). Η ιδέα αυτή εφαρμόστηκε και στην εργασία [3].



Εικόνα 4-3 Συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας

4.1.7 Πλέγμα (Mesh)

Ένα πολύ σημαντικό βήμα της αριθμητικής ανάλυσης είναι η δημιουργία του πλέγματος. Το πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό ώστε τα αποτελέσματα να είναι ακριβή αλλά, ταυτόχρονα, να μην απαιτείται μεγάλος υπολογιστικός χρόνος.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9067 τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία (shell elements) (Εικόνα 4-4). Το πλέγμα της μοναδιαίας κυψελίδας αποτελείται από 9018 γραμμικά τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία τύπου S4R με μήκος πλευράς 0.3 mm (Πίνακας 4-

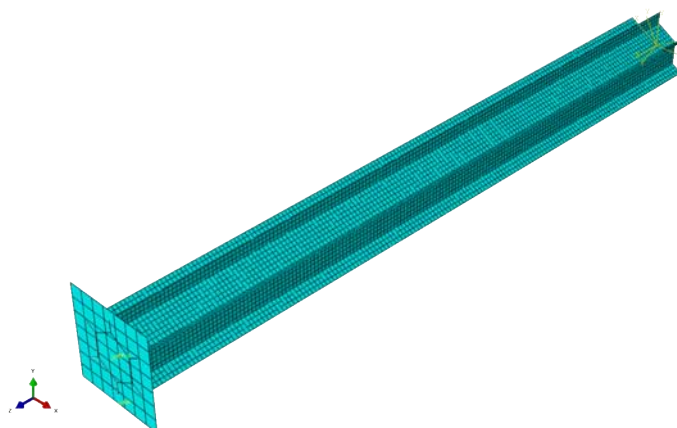
2). Η άκαμπτη πλάκα αποτελείται από 49 γραμμικά τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία τύπου R3D4 με μήκος πλευράς 1 mm (Πίνακας 4-3).

Μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας	
Αριθμός Στοιχείων	9018
Αριθμός Κόμβων	9072
Τύπος Στοιχείου	S4R

Πίνακας 4-2 Ιδιότητες πλέγματος μοναδιαίας κυψελίδας

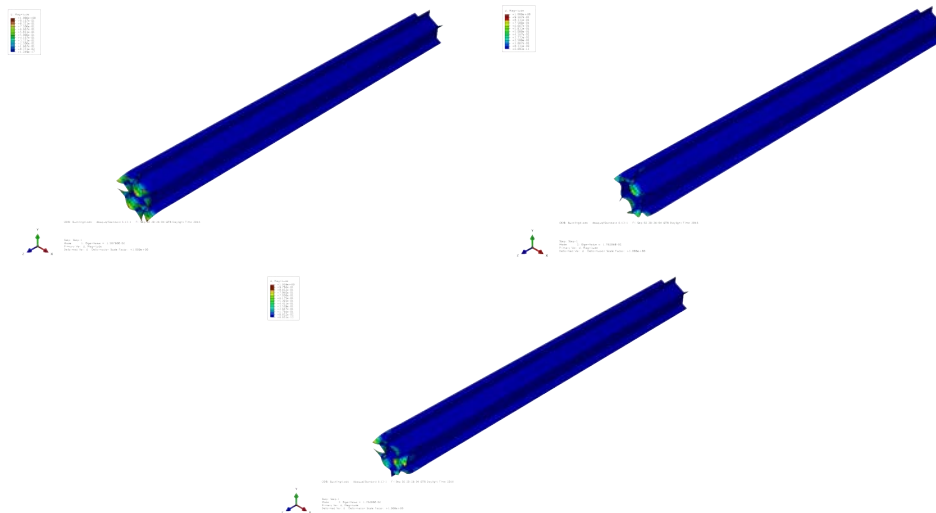
Μοντέλο άκαμπτης πλάκας	
Αριθμός Στοιχείων	49
Αριθμός Κόμβων	64
Τύπος Στοιχείου	R3D4

Πίνακας 4-3 Ιδιότητες πλέγματος άκαμπτης πλάκας



Εικόνα 4-4 Πλέγμα μοναδιαίας κυψελίδας και άκαμπτης πλάκας

Το πρόγραμμα στοιχίζει τα στοιχεία σε τέλεια σειρά επάνω στη γεωμετρία. Στα πραγματικά υλικά όμως συνήθως υπάρχουν ατέλειες που υποβοηθούν στην παραμόρφωση του υλικού. Η τέλεια στοίχιση των στοιχείων δεν επιτρέπει την έναρξη του τοπικού λυγισμού. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η εισαγωγή μίας ελεγχόμενης ατέλειας στο πλέγμα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις πρώτες ιδιομορφές από την ανάλυση λυγισμού (buckle) (Εικόνα 4-5) οι οποίες εισήχθησαν, με έναν συντελεστή της τάξης του 10^{-3} , ως ατέλεια του πλέγματος ώστε να επιτευχθεί ο τοπικός λυγισμός με τη σωστή μορφή.



Εικόνα 4-5 Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού της μοναδιαίας κυψελίδας

4.1.8 Επίλυση (job)

Όταν ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα το πρόβλημα είναι έτοιμο για επίλυση. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για την επίλυση της αριθμητικής ανάλυσης του μοντέλου των 81 κυψελίδων λόγω των πολύ λιγότερων στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε αυτή την ανάλυση.

4.2 Μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες

Η μελέτη του μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας συνεχίστηκε με την περίπτωση των σταθερών επιφανειών της κυψελίδας. Η διαφορά της νέας ανάλυσης από αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.1 βρίσκεται στις συνοριακές συνθήκες όπου οι επάνω και κάτω επιφάνειες της κυψελίδας, σε αυτή την περίπτωση, είναι σταθερές, δηλαδή, δεν επιτρέπεται η μετατόπιση και η στροφή σε καμία διεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η περίπτωση όπου η κυψέλη αλουμινίου χρησιμοποιείται σαν πυρήνας σε μία κατασκευή ανθρακονήματος ή αλουμινίου όπου οι επάνω και κάτω επιφάνειες της έχουν κολληθεί στο κυρίως υλικό, όπως είναι το σασί ενός αυτοκινήτου ή η άτρακτος ενός ελικοπτέρου. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιες όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.1.

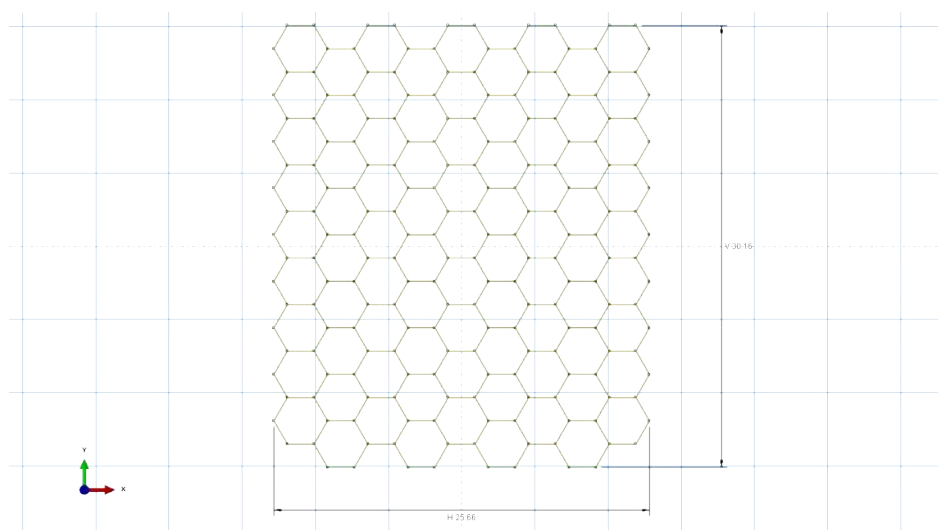
4.3 Αριθμητικό μοντέλο 81 κυψελίδων

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των κυψελών αλουμινίου σε θλίψη χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο πολλαπλών κυψελίδων όμοιο με τα δοκίμια των στατικών πειραμάτων. Για λόγους περιορισμού του υπολογιστικού χρόνου, επιλέχθηκε ένα μοντέλο 81 κυψελίδων και συγκρίθηκε με πειραματικά αποτελέσματα. Τα βήματα της ανάπτυξης του αριθμητικού μοντέλου είναι όμοια με αυτά του μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας και περιγράφονται παρακάτω.

4.3.1 Γεωμετρία

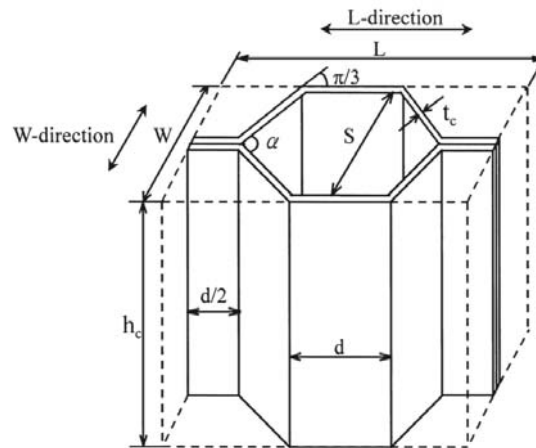
Η γεωμετρία σχεδιάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks. Για τη σχεδίαση των κυψελίδων ελήφθησαν οι διαστάσεις του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία (Πίνακας 3-1). Το στοιχείο έχει μήκος 30,16 mm, πλάτος 25,66 mm και ύψος 50 mm με συνολική επιφάνεια 773,9 mm² (Εικόνα 4-6).

Επιπλέον, σχεδιάστηκε μία λεπτή άκαμπτη επιφάνεια διαστάσεων 40 mm x 40 mm πάνω στην οποία εφαρμόζονται το φορτίο και οι συνοριακές συνθήκες. Στην επιφάνεια αυτή ορίστηκε ένα σημείο αναφοράς ώστε να διευκολυνθεί η συλλογή των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα η δύναμη αντίδρασης της κυψέλης και η μετατόπιση της πάνω επιφάνειάς της.



Εικόνα 4-6 Σχέδιο των 81 κυψελίδων στο πρόγραμμα Abaqus

Στο βήμα αυτό ορίζεται και το πάχος των τοιχωμάτων των κυψελίδων. Λόγω του τρόπου παρασκευής του υλικού (Κεφάλαιο 2) το πάχος δεν είναι το ίδιο σε όλα τα τοιχώματα. Καθώς δύο φύλλα αλουμινίου ενώνονται προκειμένου να σχηματίσουν μία κυψελίδα (Εικόνα 4-7) δημιουργούν τοιχώματα με διπλάσιο πάχος από τα υπόλοιπα. Έτσι ορίζεται η τιμή για τα τοιχώματα πάχους $t=0.001$ in, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, και πάχους $2t=0.002$ in. Η λεπτομέρεια αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς τυχόν παράληψη της θα οδηγούσε σε λανθασμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 4-7 Ένωση δύο φύλλων αλουμινίου για το σχηματισμό μίας κυψελίδας

4.3.2 Μηχανικές ιδιότητες Al 5052

Οι μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου των 81 κυψελίδων και της άκαμπτης επιφάνειας τέθηκαν όμοια με το μοντέλο της μοναδιαίας κυψελίδας (Παράγραφος 4.1.2).

4.3.3 Συναρμολόγηση (assembly)

Στο βήμα αυτό η κυψέλη αλουμινίου και η επίπεδη πλάκα τοποθετούνται κατάλληλα στο χώρο ώστε να σχηματίσουν μία ενιαία γεωμετρία (Εικόνα 4-8). Η επίπεδη πλάκα εφάπτεται στην επάνω επιφάνεια της κυψέλης.

4.3.4 Παράμετροι ανάλυσης (step)

Όπως και στην περίπτωση των 81 κυψελίδων, επιλέχθηκε η μέθοδος buckle και η μέθοδος implicit ώστε να προσομοιωθούν τα στατικά φορτία που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια των φυσικών πειραμάτων.

Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκε στα 10 δευτερόλεπτα. Ο μέγιστος αριθμός προσαυξήσεων (increments) είναι 10.000 με το μικρότερο δυνατό μέγεθος να είναι $1 \cdot 10^{-9}$ και το αρχικό μέγεθος 0.01 δευτερόλεπτα. Ο μεγάλος αριθμός προσαυξήσεων και το

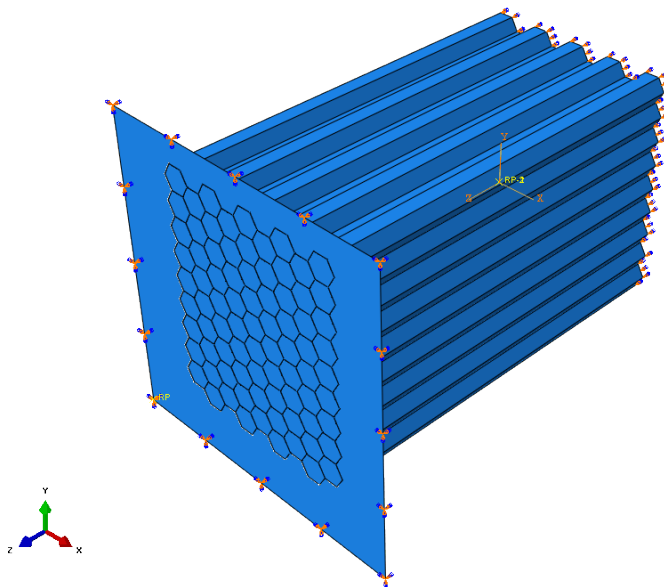
μικρό μέγεθος τους είναι αναγκαία προκειμένου να μην υπάρχει σφάλμα στη σύγκλιση των εξισώσεων και τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα.

4.3.5 Αλληλεπίδραση (interaction)

Η κυψέλη και η επίπεδη επιφάνεια πέρα από τη σωστή τοποθέτηση τους στο χώρο πρέπει και να συνδέονται μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μία απλή σύνδεση επιφάνειας προς επιφάνεια (tie constrain) με το πάνω μέρος της κυψέλης να συνδέεται με την κάτω επιφάνεια της πλάκας (Εικόνα 4-8).

4.3.6 Φορτίο και συνοριακές συνθήκες (load)

Στο βήμα αυτό ορίζεται το φορτίο θλίψης καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο μοντέλο. Αρχικά, στην κάτω επιφάνεια της κυψέλης περιορίζεται η μετατόπιση και η στροφή ως προς τον z άξονα. Στην άκαμπτη πλάκα ορίζεται μία μετατόπιση 10 mm ως προς τον z άξονα ενώ οι μετατοπίσεις και οι στροφές δεν επιτρέπονται στις υπόλοιπες διευθύνσεις. Η μετατόπιση της πλάκας ως προς τον z άξονα καταπονεί θλιπτικά την κυψελίδα (Εικόνα 4-8).



Εικόνα 4-8 Συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο των 81 κυψελίδων

4.3.7 Πλέγμα (Mesh)

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 111300 τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία (shell elements) (Εικόνα 4-9). Το πλέγμα της μοναδιαίας κυψελίδας αποτελείται από 111200 γραμμικά τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία τύπου S4R με μήκος

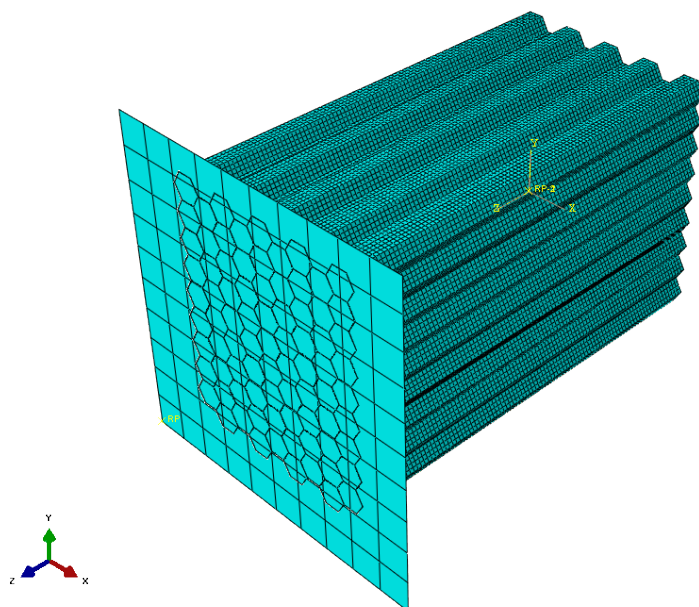
πλευράς 0.5 mm (Πίνακας 4-4). Η άκαμπτη πλάκα αποτελείται από 100 γραμμικά τετράπλευρα κελυφοειδή στοιχεία τύπου R3D4 με μήκος πλευράς 4 mm (Πίνακας 4-5).

Μοντέλο 81 κυψελίδων	
Αριθμός Στοιχείων	111200
Αριθμός Κόμβων	104232
Τύπος Στοιχείου	S4R

Πίνακας 4-4 Ιδιότητες πλέγματος κυψέλης

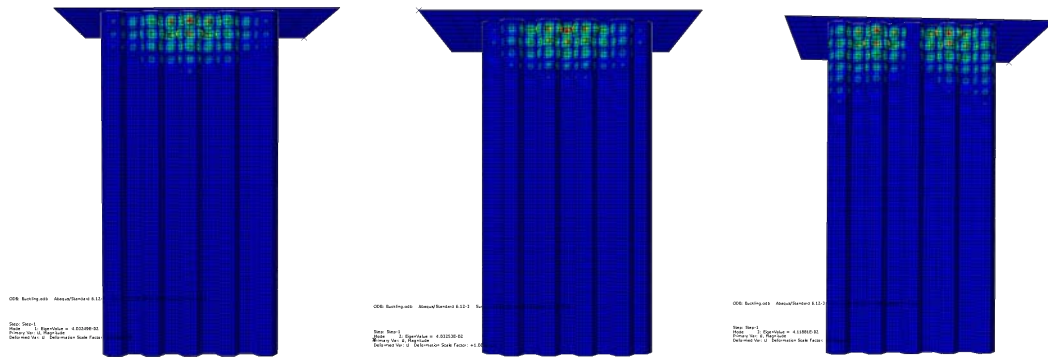
Μοντέλο άκαμπτης πλάκας	
Αριθμός Στοιχείων	121
Αριθμός Κόμβων	100
Τύπος Στοιχείου	R3D4

Πίνακας 4-5 Ιδιότητες πλέγματος άκαμπτης πλάκας



Εικόνα 4-9 Απεικόνιση του πλέγματος της κυψέλης και της άκαμπτης πλάκας

Όπως και στο μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας έτσι και στο μοντέλο 81 κυψελίδων εισάγεται μία ατέλεια στο πλέγμα η οποία διευκολύνει την έναρξη του τοπικού λυγισμού. Συγκεκριμένα εισάγονται με τη μορφή ατέλειας οι τρεις πρώτες ιδιομορφές του λυγισμού (Εικόνα 4-10).



Εικόνα 4-10 Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού

4.3.8 Επίλυση (job)

Μόλις ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα το πρόβλημα είναι έτοιμο για επίλυση. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των στοιχείων και από την πολυπλοκότητα της προσομοίωσης.

5. Αποτελέσματα

5.1 Πειραματικά αποτελέσματα

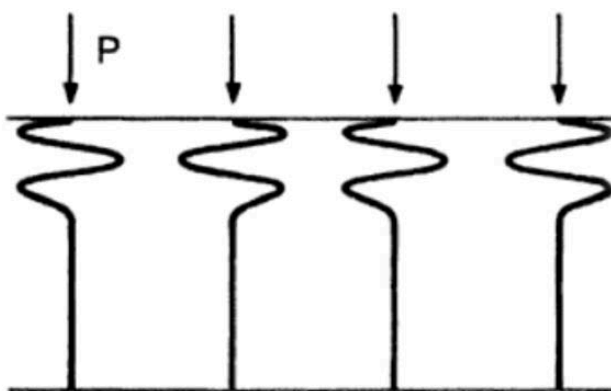
5.1.1 Στατικά πειράματα

Τα αποτελέσματα των στατικών πειραμάτων βοήθησαν στην κατανόηση της συμπεριφοράς και του μηχανισμού παραμόρφωσης των κυψελών αλουμινίου σε θλιπτική καταπόνηση κατά τον άξονα x3 (Σχήμα 2-3).

Ο μηχανισμός παραμόρφωσης διακρίνεται σε τρία βήματα [11][12]. Το πρώτο βήμα είναι η έναρξη της πρώτης πτύχωσης. Στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια του υλικού εμφανίζεται τοπικός λυγισμός. Οι κάθετες ακμές των κυψελών παραμένουν απαραμόρφωτες μέχρι το σημείο αυτό.

Το δεύτερο βήμα είναι η ομαλοποίηση της πρώτης πτύχωσης και η έναρξη της δεύτερης. Στο βήμα αυτό η πτύχωση αυξάνεται σταδιακά και οι κάθετες ακμές παραμορφώνονται. Καθώς ολοκληρώνεται η πρώτη πτύχωση ταυτόχρονα δημιουργείται και η δεύτερη. Οι πτυχές διαδίδονται εναλλάξ στις δύο ακμές των τοιχωμάτων της κυψέλης. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου είναι πιθανό να παρατηρηθούν διεισδύσεις, σχισμές ή ακόμα και αποκολλήσεις στις κάθετες ακμές των κυψελών.

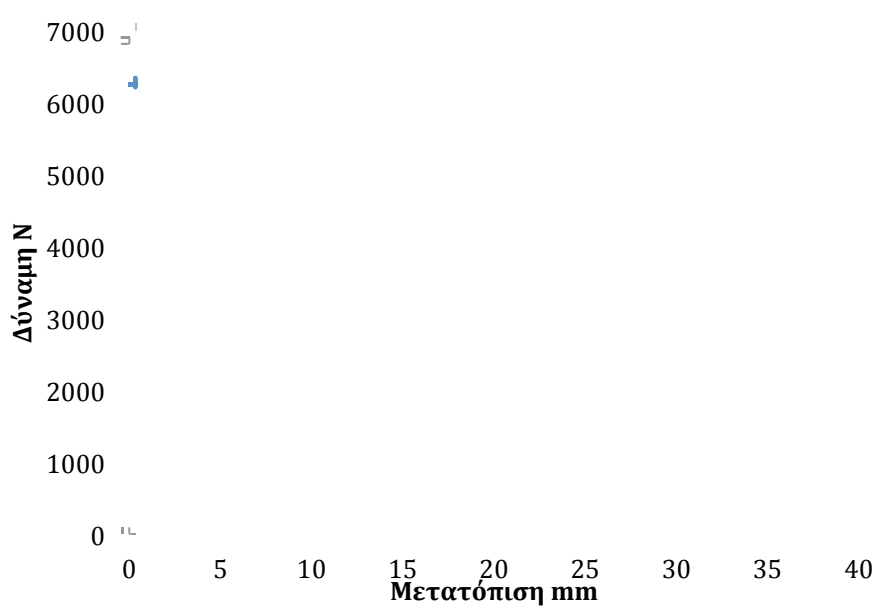
Το τρίτο βήμα είναι η ομαλοποίηση της δεύτερης πτύχωσης και η έναρξη της τρίτης. Όπως και στο δεύτερο βήμα, η τρίτη πτύχωση δημιουργείται ταυτόχρονα με την ολοκλήρωση της δεύτερης. Παρατηρείται ότι οι κάθετες ακμές παραμορφώνονται συμμετρικά ή αντισυμμετρικά με τις πτυχές στα τοιχώματα των κυψελών (Σχήμα 5-1).



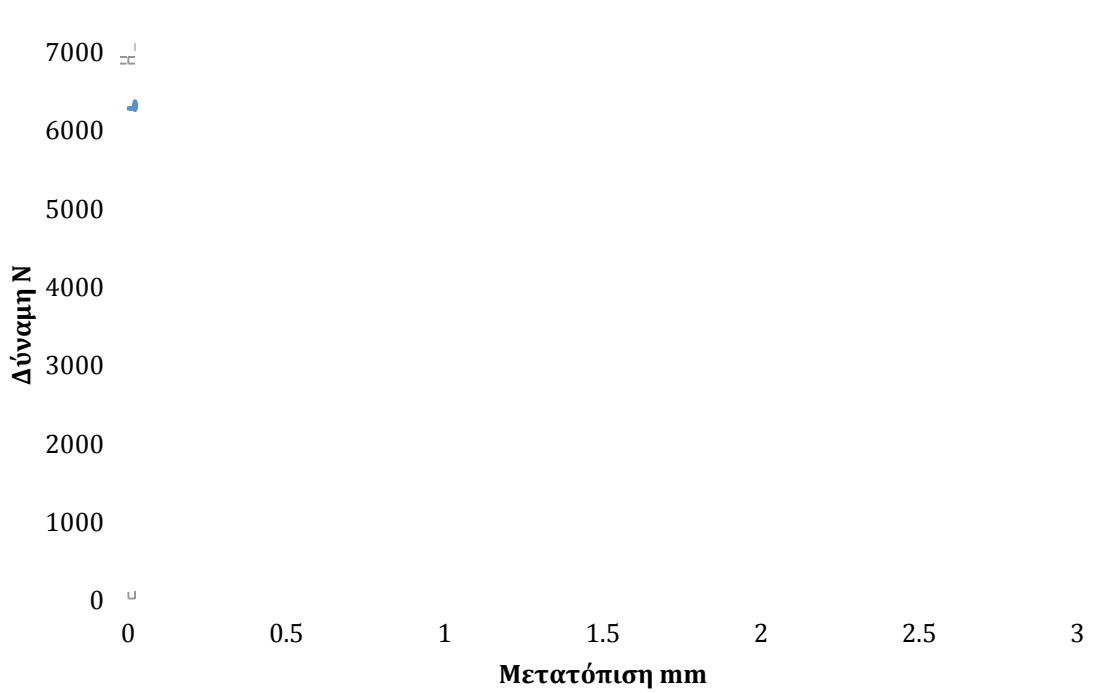
Σχήμα 5-1 Παραμόρφωση εξαγωνικής κυψέλης

Ο ίδιος μηχανισμός παραμόρφωσης εμφανίζεται στη συνέχεια σε όλο το μήκος των κυψελών. Η διαδοχική δημιουργία και ομαλοποίηση πτυχώσεων συνεχίζεται μέχρι τέλους έως ότου οι κυψέλες δε μπορούν να παραμορφωθούν περαιτέρω και δε μπορεί να απορροφηθεί επιπλέον ενέργεια. Ο μηχανισμός αυτός παρατηρείται σε όλα τα υλικά εξαγωνικής κυψέλης ανεξαρτήτως υλικού και διαστάσεων.

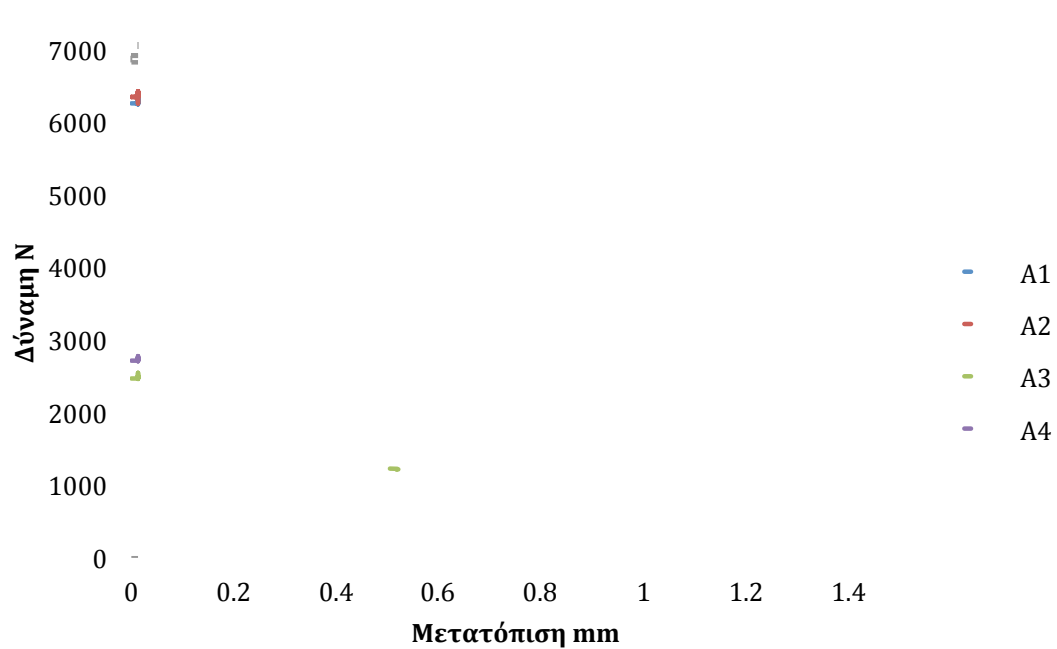
Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για το δοκίμιο A1 (Σχήμα 5-3), το φορτίο, αρχικά, αυξάνεται γραμμικά στην ελαστική περιοχή μέχρι να φτάσει το σημείο έναρξης του τοπικού λυγισμού στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Το πρώτο τμήμα της καμπύλης στην ελαστική περιοχή του Σχήματος 5-3 δεν είναι γραμμικό διότι οι επιφάνεια του δοκιμίου δεν είναι τέλειο επίπεδο και συνεπώς δεν υπάρχει τέλεια εφαρμογή με την πλάκα του εμβόλου στην έναρξη του πειράματος. Στην περίπτωση του δοκιμίου A1 το φορτίο που απαιτείται για την έναρξη του τοπικού λυγισμού είναι 6,34 kN. Στο σημείο αυτό δημιουργείται η πρώτη πτύχωση, οι ακμές των τοιχωμάτων των κυψελίδων υποχωρούν και το θλιπτικό φορτίο μειώνεται. Η απότομη μείωση του φορτίου σε ένα τοπικό ελάχιστο αντιστοιχεί στην έναρξη της παραμόρφωσης των κάθετων ακμών των κυψελών. Καθώς ομαλοποιείται η 1^η πτύχωση ταυτόχρονα δημιουργείται και η 2^η πτύχωση, το φορτίο αυξάνεται σε τοπικό μέγιστο το οποίο είναι χαμηλότερο από το πρώτο λόγω του ότι έχει γίνει ήδη έναρξη του τοπικού λυγισμού. Το φορτίο, στη συνέχεια, διακυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους έχοντας μία σταθερή μέση τιμή σχηματίζοντας, έτσι, ένα πλατό (Σχήμα 5-2). Οι πτυχές δημιουργούνται σταδιακά αλλά σταθερά (Εικόνα 5-1), μέχρις ότου το δοκίμιο να μη δέχεται επιπλέον παραμόρφωση. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται στο δοκίμιο A2 το οποίο καταπονήθηκε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Στο Σχήμα 5-4 γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμίων που δοκιμάστηκαν σε στατική θλιπτική καταπόνηση. Είναι εμφανές ότι το μέγιστο φορτίο λυγισμού είναι μεγαλύτερο για τα δοκίμια A1 και A2 καθώς η επιφάνεια τους είναι μεγαλύτερη από τα δοκίμια A3 και A4. Παρατηρείται, λοιπόν, μία συσχέτιση μεταξύ του μέγιστου φορτίου λυγισμού και της επιφάνειας της κυψέλης. Επιπλέον, υπάρχει μία διαφορά κλίσης του φορτίου στην ελαστική περιοχή μεταξύ των δοκιμίων A1,A2 και A3,A4 η οποία οφείλεται στη μεταβολή της δυσκαμψίας με την αύξηση της επιφάνειας του στοιχείου. Το μέγιστο φορτίο λυγισμού του δοκιμίου A2 συμβαίνει για μετατόπιση μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου A1 καθώς όπως εξηγήθηκε παραπάνω υπάρχουν ατέλειες στην επιφάνεια των δοκιμίων και η εφαρμογή του δοκιμίου με την πλάκα του εμβόλου δεν είναι τέλεια. Το φορτίο λυγισμού και η συνολική μετατόπιση της πάνω επιφάνειας των δοκιμίων φαίνονται στον Πίνακα 5-1.



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για το δοκίμιο A1



Σχήμα 5-3 Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης δοκιμίου A1 (εμφανίζονται τα πρώτα 3 mm της παραμόρφωσης του δοκιμίου)



Σχήμα 5-4 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμών A1,A2,A3 & A4



Εικόνα 5-1 Δοκίμιο κυψέλης αλουμινίου κατά τη θλίψη

Δοκίμιο	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Επιφάνεια	Κρίσιμο φορτίο Ferit	Μετατόπιση Dz
A1	45 mm	45 mm	50 mm	2025 mm ²	6,34 kN	40 mm
A2	46 mm	46 mm	50 mm	2116 mm ²	6,43 kN	40 mm
A3	27 mm	30 mm	50 mm	810 mm ²	2,54 kN	40 mm
A4	28 mm	30 mm	50 mm	840 mm ²	2,76 kN	40 mm

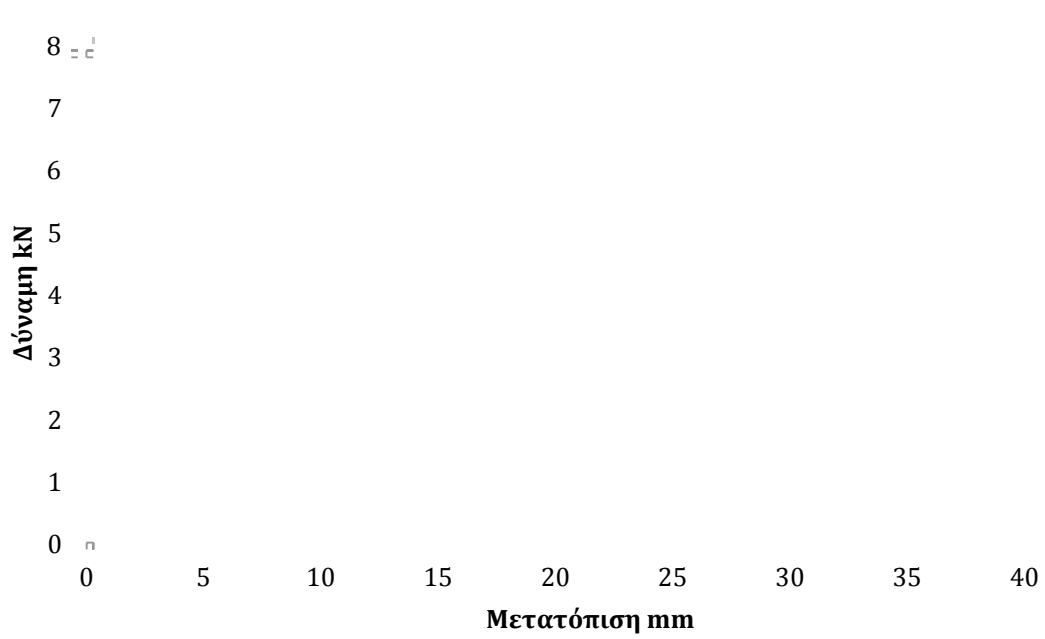
Πίνακας 5-1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των στατικών πειραμάτων

5.1.2 Δοκιμές κρούσης

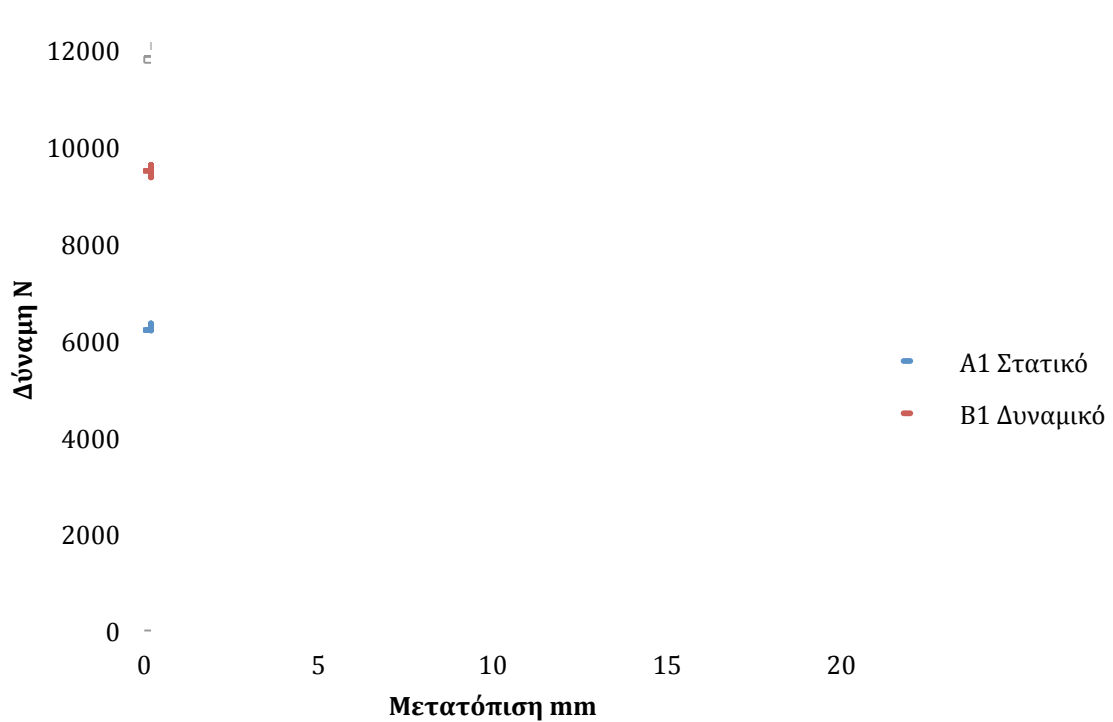
Στα πειράματα κρούσης ο μηχανισμός παραμόρφωσης των κυψελών είναι ίδιος, όμως, λόγω της μεγάλης ταχύτητας παραμορφώσεων, το φαινόμενο είναι πιο έντονο. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης του δοκιμίου B1 (Σχήμα 5-5) το φορτίο αυξάνεται στην ελαστική περιοχή μέχρι την έναρξη του τοπικού λυγισμού στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια το φορτίο μειώνεται καθώς παραμορφώνονται οι ακμές των τοιχωμάτων των κυψελίδων. Η διαφορά του φαινομένου της κρούσης με τη στατική θλίψη έγκειται στη δημιουργία των πτυχώσεων καθώς τα τοιχώματα των κυψελίδων καταρρέουν και φαίνεται στο Σχήμα 5-6 όπου απεικονίζονται τα διαγράμματα Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμίων A1 και B1 των οποίων οι διαστάσεις είναι παρόμοιες. Κατά τη στατική θλίψη η μεταβολή του εύρους του φορτίου είναι μικρή καθώς οι πτυχώσεις δημιουργούνται διαδοχικά. Στην κρούση, λόγω της ορμής της κεφαλής κρούσης, οι πτυχώσεις δημιουργούνται κατά ομάδες και ομαλοποιούνται ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται οι επόμενες πτυχώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εύρος μεταβολής του φορτίου να είναι μεγαλύτερο από ότι στη στατική θλίψη. Καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται και το δοκίμιο παραμορφώνεται απορροφώντας την ενέργεια της κρούσης, το εύρος της μεταβολής του φορτίου μειώνεται μέχρις ότου το δοκίμιο παραμορφωθεί πλήρως (Εικόνα 5-2).

Δοκίμιο	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Ταχύτητα v	Ενέργεια κρούσης E	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού F_{crit}
B1	45 mm	50 mm	50 mm	4.65 m/s	200 J	7.1 kN
B2	55 mm	57 mm	50 mm	5.56 m/s	280 J	9.6 kN
B3	68 mm	88 mm	50 mm	7.60 m/s	528 J	17.75 kN

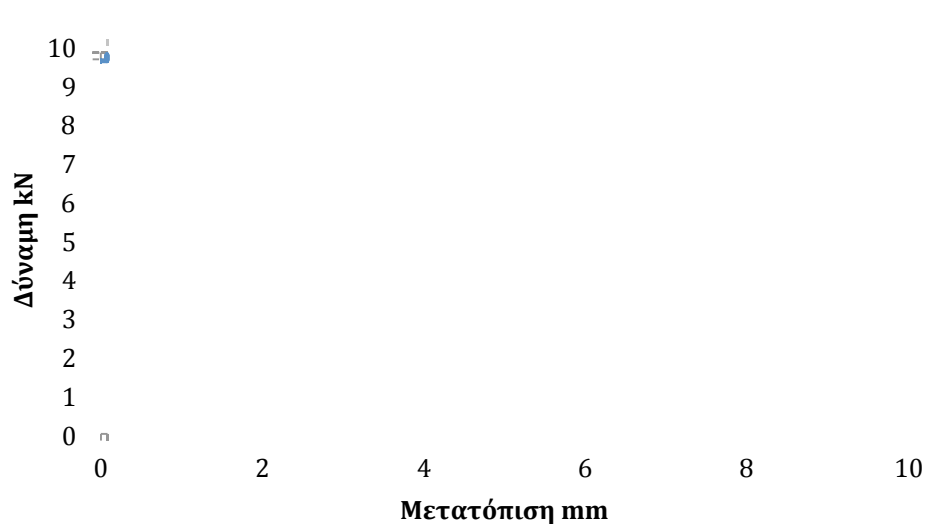
Πίνακας 5-2 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των δυναμικών πειραμάτων



Σχήμα 5-5 Διάγραμμα Δύναμης - Παραμόρφωσης του δοκιμίου B1 μετά από κρούση



Σχήμα 5-6 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμίων A1 & B1



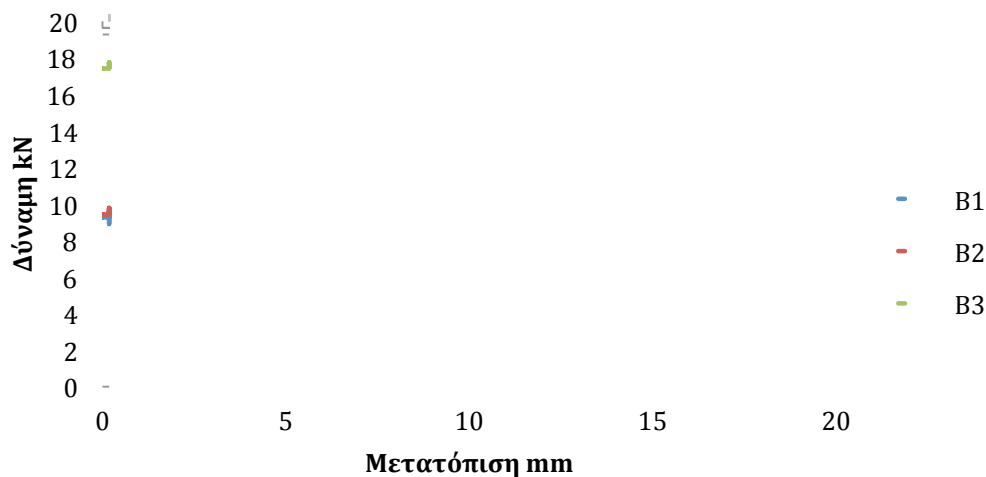
Σχήμα 5-7 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης του δοκιμίου B2 μετά από κρούση



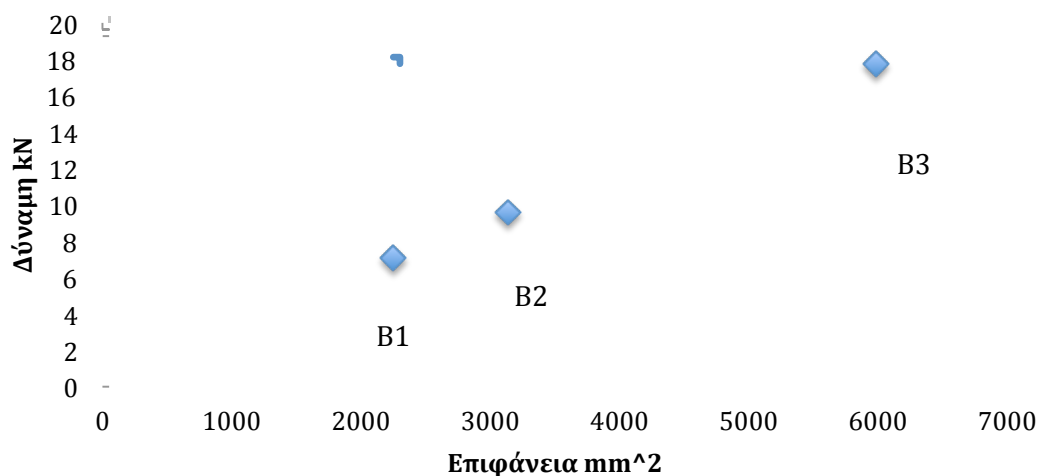
Εικόνα 5-2 Άνω επιφάνεια δοκιμίου B1 μετά την κρούση

Στα δυναμικά πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων (Πίνακας 5-2) τα οποία υποβλήθηκαν σε κρουστική καταπόνηση. Από τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης (Σχήμα 5-5, 5-7, 5-8) παρατηρείται, όπως είναι λογικό, ότι υπάρχει μία σχέση μεταξύ του φορτίου που απαιτείται για την έναρξη του τοπικού λυγισμού και της επιφάνειας του δοκιμίου, το απαιτούμενο φορτίο, δηλαδή, αυξάνεται αναλογικά με την επιφάνεια του δοκιμίου. Η σχέση του κρίσιμου φορτίου για την έναρξη του λυγισμού με την επιφάνεια του δοκιμίου αποτυπώνεται στο Σχήμα 5-9 όπου τα σημεία στην καμπύλη είναι το κρίσιμο φορτίο που καταγράφηκε για κάθε ένα από τα τρία δοκίμια. Η σχέση αυτή ισχύει και για το μέσο φορτίο που διατηρείται μέχρι την ολοκλήρωση του φαινομένου. Ακόμη, παρατηρείται ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του δοκιμίου B3 εμφανίζεται για μετατόπιση

μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμών B2 και B1. Η διαφορά αυτή οφείλεται πιθανόν στο γεγονός της έναρξης τοπικού λυγισμού λόγω του μεγάλου ρυθμού παραμόρφωσης που δεν προκαλεί την κατάρρευση των τοιχωμάτων των κυψελίδων, το οποίο συμβαίνει στη συνέχεια του φαινομένου όταν το φορτίο έχει αυξηθεί αρκετά ώστε να αναγκάσει τα τοιχώματα των κυψελίδων να υποχωρήσουν. Η εμφάνιση του τοπικού λυγισμού απεικονίζεται στην καμπύλη με την εμφάνιση ενός "γόνατου" (αλλαγή κλίσης) πριν το μέγιστο φορτίο αστοχίας. Από τη μελέτη του Σχήματος 5-8 παρατηρείται ότι η μεταβολή αυτή στη γραμμική συμπεριφορά πραγματοποιείται σε υψηλότερες τιμές δύναμης όσο αυξάνεται η επιφάνεια του στοιχείου. Η λεπτομερέστερη εξήγηση του φαινομένου απαιτεί περαιτέρω έρευνα.



Σχήμα 5-8 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης των δοκιμών B1, B2 & B3

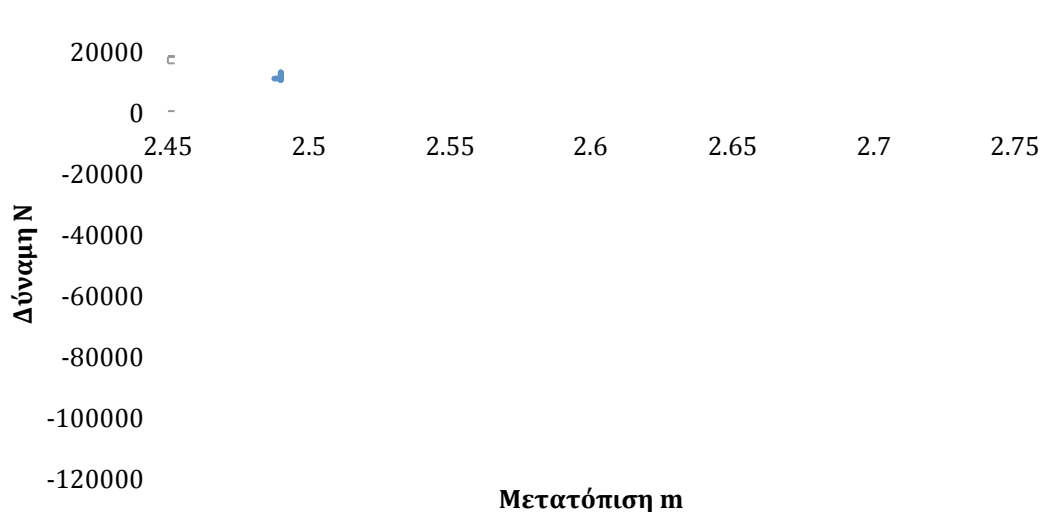


Σχήμα 5-9 Μεταβολή μέγιστης δύναμης – Επιφάνειας δοκιμίου όπου αποτυπώνεται η γραμμική σχέση μεταξύ του φορτίου που απαιτείται για την έναρξη του τοπικού λυγισμού των δοκιμών με την επιφάνεια τους για τα δοκίμια B1, B2, B3

5.1.3 Αποτελέσματα αποσβεστήρα κρούσης

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων των δοκιμών κρούσης του αποσβεστήρα κρούσης (Impact attenuator). Η φύση του πειράματος καθώς και οι συνοριακές συνθήκες διαφέρουν από τα υπόλοιπα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν γι' αυτό και δεν επιχειρείται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 5-10 φαίνεται η καμπύλη Δύναμης – Μετατόπισης του δοκιμίου το οποίο περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.3. Οι τιμές στο συγκεκριμένο διάγραμμα έχουν αρνητικό πρόσημο για τη δύναμη και τη μετατόπιση. Λόγω των διαφορετικών συνοριακών συνθηκών - τα δοκίμια είναι στερεωμένα στο χαλύβδινο πλαίσιο το οποίο παραλαμβάνει και αυτό κάποια από την ενέργεια της κρούσης - η καμπύλη διαφέρει από την αντίστοιχη καμπύλη των υπόλοιπων πειραμάτων. Η εξέλιξη του φαινομένου, όμως, είναι παρόμοια καθώς μετά την επαφή της κεφαλής κρούσης με το δοκίμιο υπάρχει μία αύξηση του φορτίου μέχρι ένα τοπικό μέγιστο ενώ στη συνέχεια διαμορφώνεται ένα πλατό το οποίο διατηρείται μέχρι την πλήρη παραμόρφωση του μοντέλου (Εικόνα 5-3). Οι τιμές του φορτίου είναι μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς πρόκειται για δοκίμιο μεγάλης κλίμακας. Η ενέργεια που απορροφάται είναι 8150 J ενώ η μέγιστη επιβράδυνση είναι 34,43 g και η μέση επιβράδυνση 12,43 g. Στην εικόνα 5-3 φαίνεται το παραμορφωμένο δοκίμιο μετά τη δοκιμή κρούσης. Τα 4 κομμάτια κυψελών αλουμινίου έχουν παραμορφωθεί πλήρως ενώ παραμόρφωση παρατηρείται και στη χαλύβδινη πλάκα καθώς και στο χαλύβδινο πλαίσιο. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα το πείραμα κρίθηκε επιτυχημένο και το μοντέλο κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στον Χείρωνα, το πρώτο αυτοκίνητο της Centaurus Racing Team.



Σχήμα 5-10 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης δοκιμίου αποσβεστήρα κρούσης



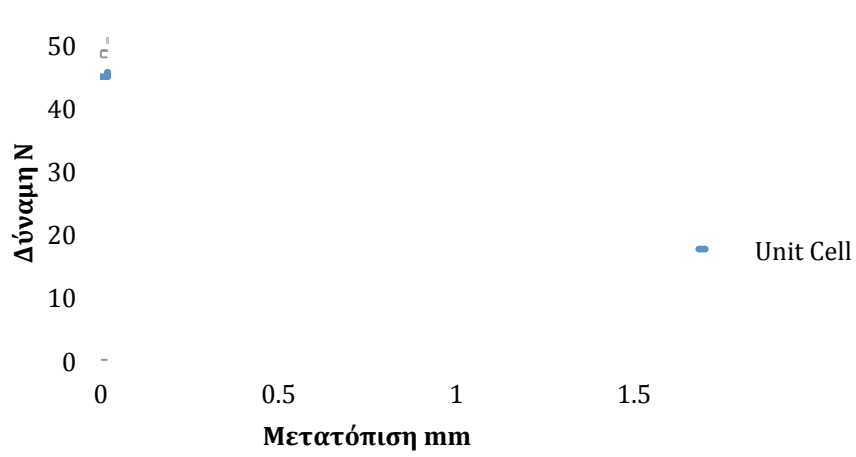
Εικόνα 5-3 Δοκίμιο παραμορφωμένο μετά τη δοκιμή κρούσης

5.2 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης

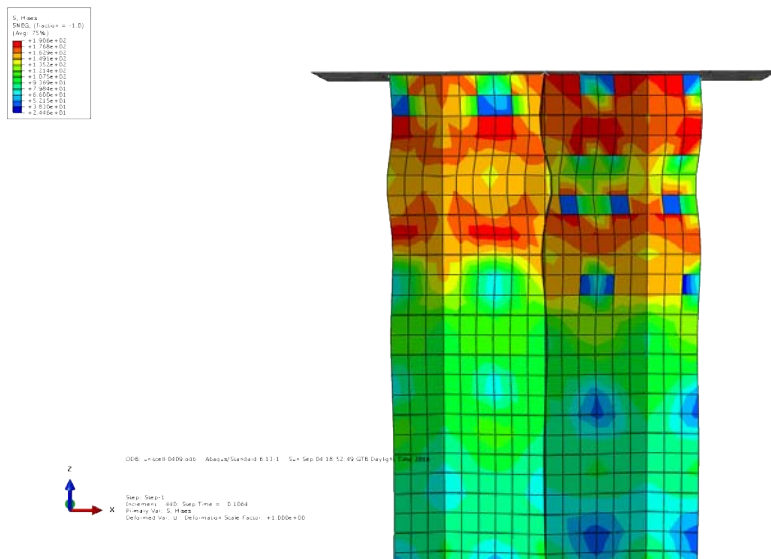
Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης περιορίζονται στη μελέτη της στατικής θλιπτικής καταπόνησης και παρουσιάζονται παρακάτω.

5.2.1 Αποτελέσματα μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας

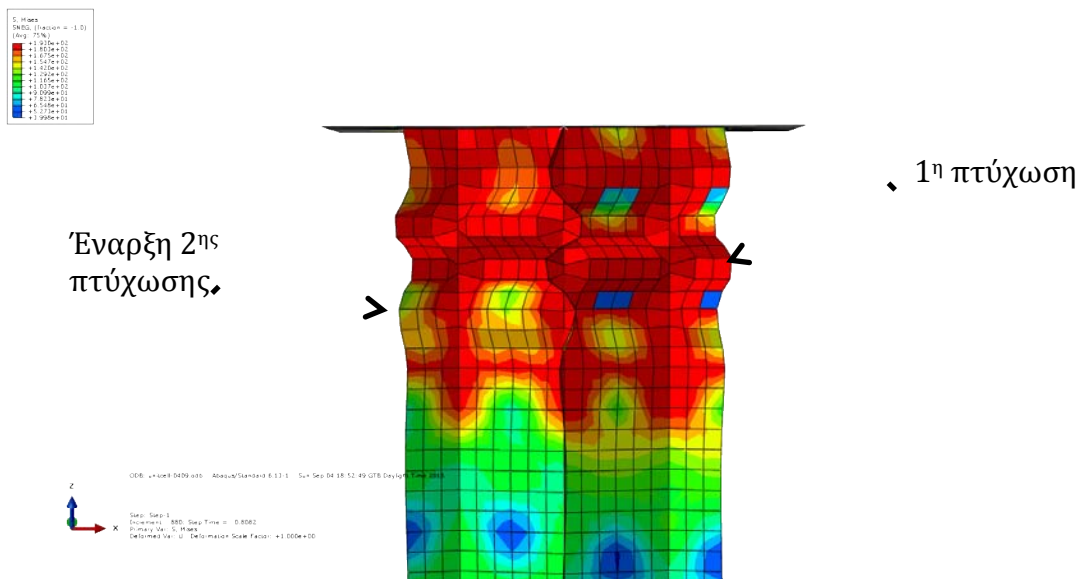
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης της μοναδιαίας κυψελίδας. Η καμπύλη Δύναμης – Μετατόπισης ακολουθεί όμοια συμπεριφορά με αυτή των πειραμάτων όπου το φορτίο μεταβάλλεται με την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού (Σχήμα 5-11). Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 5-4 φαίνεται η έναρξη του τοπικού λυγισμού που αντιστοιχεί σε φορτίο 45 N. Από το σημείο αυτό και έπειτα το φορτίο μειώνεται μέχρι ένα ελάχιστο όπου ολοκληρώνεται η πρώτη πτύχωση και εμφανίζεται η δεύτερη. Το φορτίο αυξάνεται μέχρι τη δημιουργία της 2^{ης} πτύχωσης και την έναρξη του τοπικού λυγισμού (Εικόνα 5-5) και στη συνέχεια μειώνεται και πάλι μέχρι να εμφανιστεί η τρίτη πτύχωση (Εικόνα 5-6). Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται μέχρι την πλήρη παραμόρφωση της κυψελίδας. Το φορτίο μεταβάλλεται μεταξύ ενός σταθερού εύρους τιμών δημιουργώντας ένα σταθερό πλατό. Στην περίπτωση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων οι τυχόν ατέλειες του υλικού που εμφανίζονται κατά την παρασκευή του ή κατά την προετοιμασία των δοκιμών δεν υπολογίζονται γι' αυτό και η καμπύλη Δύναμης – Μετατόπισης είναι ομαλή και το εύρος του φορτίου είναι σταθερό και σχετικά μικρό καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Λόγω της επαναληψιμότητας του φαινομένου η ανάλυση τερματίστηκε μετά από μετατόπιση 7 χιλιοστών της άκαμπτης πλάκας (Εικόνα 5-7).



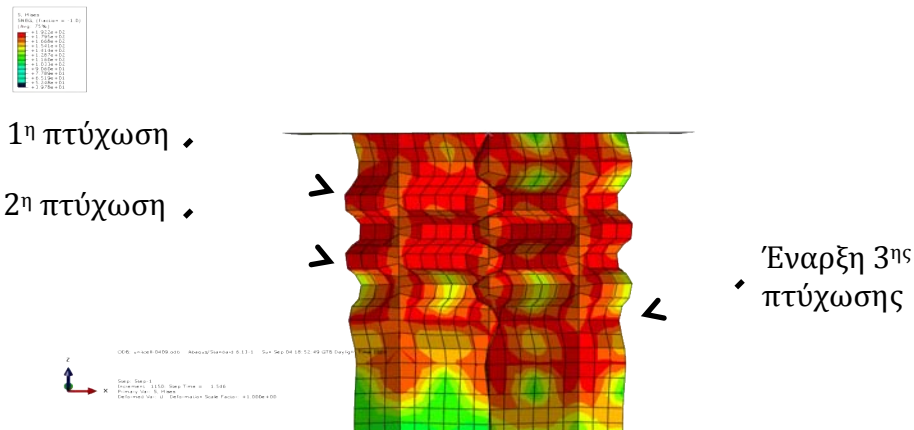
Σχήμα 5-11 Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για το μοντέλο μοναδιαίας κυψελίδας



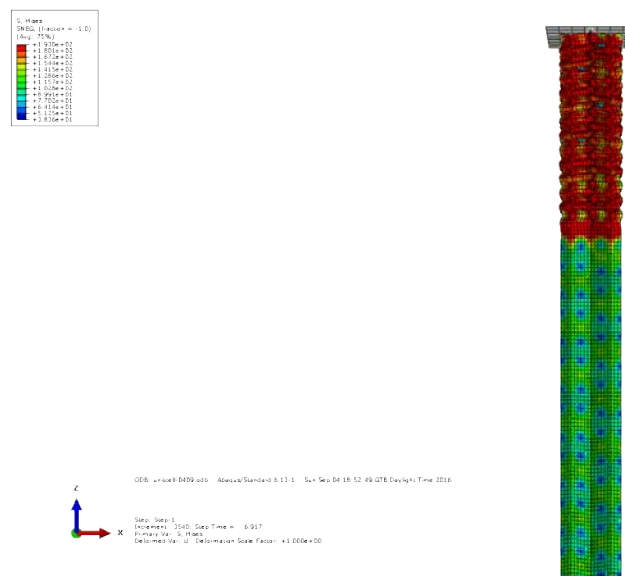
Εικόνα 5-4 Έναρξη του τοπικού λυγισμού, δημιουργία της πρώτης πτύχωσης



Εικόνα 5-5 Ομαλοποίηση 1ης πτύχωσης και δημιουργία 2ης πτύχωσης



Εικόνα 5-6 Ομαλοποίηση 2^{ης} πτύχωσης και δημιουργία 3^{ης} πτύχωσης

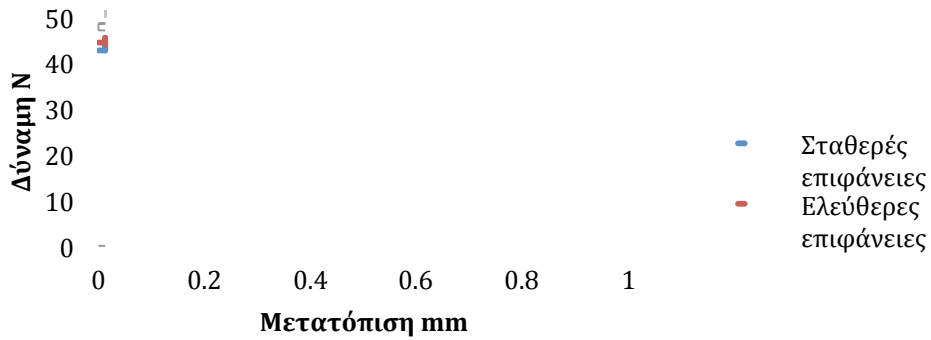


Εικόνα 5-7 Παραμόρφωση της μοναδιαίας κυψελίδας μετά από μετατόπιση 7 mm της άκαμπτης πλάκας

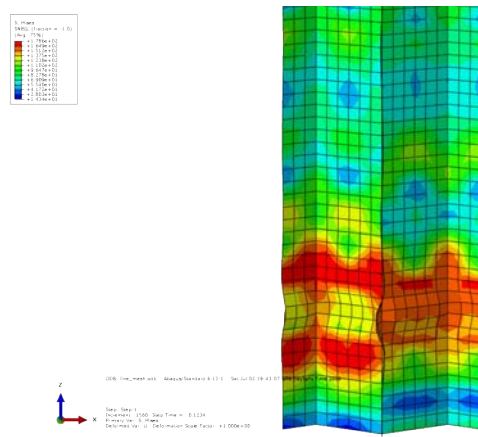
5.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες

Στην περίπτωση της μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες τα αποτελέσματα διαφέρουν ελάχιστα. Το κρίσιμο φορτίο που απαιτείται για την έναρξη του τοπικού λυγισμού είναι 44 N, όμοιο με το αντίστοιχο φορτίο για την περίπτωση των ελεύθερων επιφανειών (45 N), ενώ η καμπύλη Δύναμης – Μετατόπισης έχει την ίδια μορφή με την πρώτη περίπτωση (Σχήμα 5-12). Ο μηχανισμός παραμόρφωσης είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε στην πρώτη περίπτωση (Παράγραφος 5.2.2). Η μεγάλη διαφορά εντοπίζεται στην έναρξη του τοπικού λυγισμού η οποία δεν εμφανίζεται σε μία από τις δύο ακριανές επιφάνειες, οι οποίες πλέον είναι σταθερές, αλλά σε κάποιο τυχαίο σημείο κατά μήκος της κυψελίδας (Εικόνα 5-8 & 5-9). Στην προηγούμενη περίπτωση οι επάνω και κάτω επιφάνειες είναι οι πιο ευάλωτες καθώς κινούνταν ελεύθερα γι' αυτό και η παραμόρφωση εμφανίζεται σε μία από τις δύο αυτές επιφάνειες. Ακόμη, το μέγιστο φορτίο λυγισμού για τη μοναδιαία κυψελίδα με σταθερές επιφάνειες εμφανίζεται για μετατόπιση μεγαλύτερη από το αντίστοιχο φορτίο για τη μοναδιαία κυψελίδα με ελεύθερες επιφάνειες λόγω των διαφορετικών συνοριακών συνθηκών.

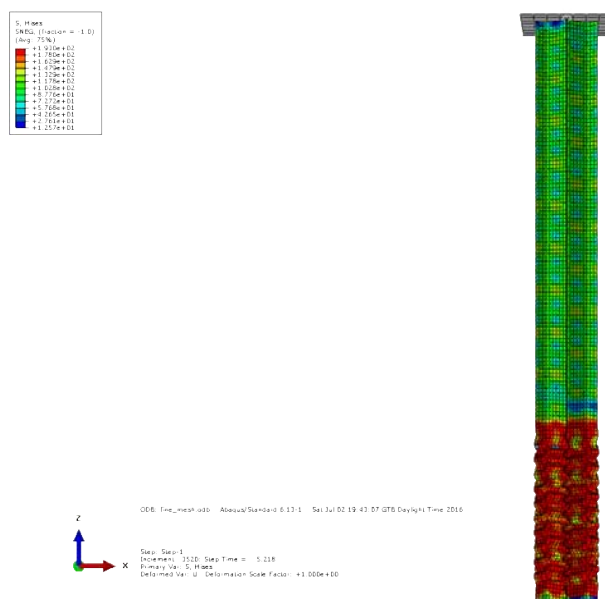
Μοναδιαία κυψελίδα



Σχήμα 5-12 Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης για μοναδιαία κυψελίδα με σταθερές και ελεύθερες επιφάνειες



Εικόνα 5-8 Έναρξη τοπικού λυγισμού στην περίπτωση της μοναδιαίας κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες

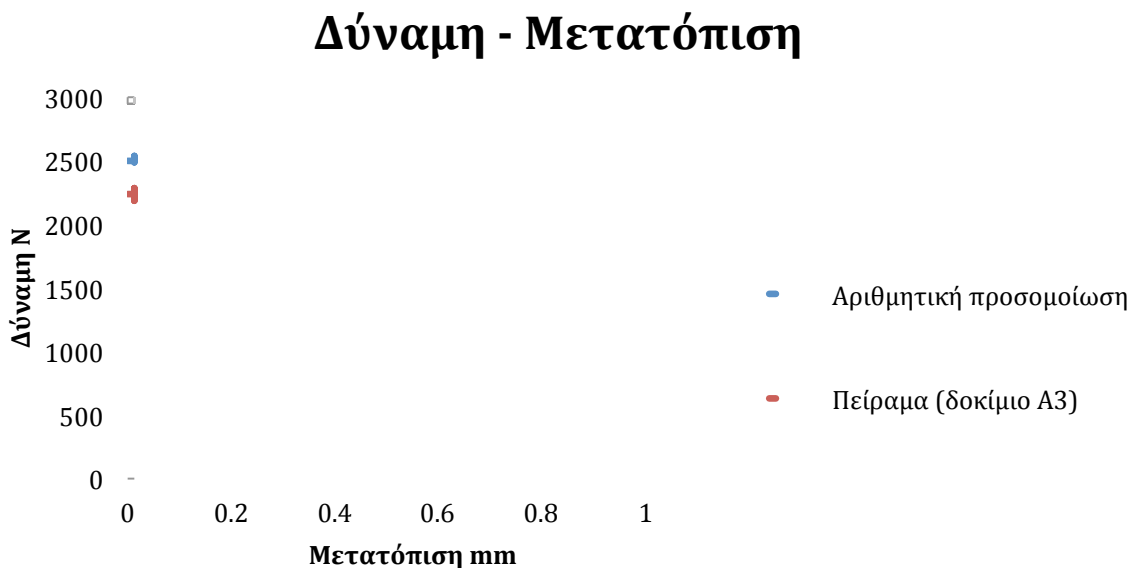


Εικόνα 5-9 Μοναδιαία κυψελίδα με σταθερές επιφάνειες μετά από μετατόπιση 6 mm της επάνω επιφάνειας της

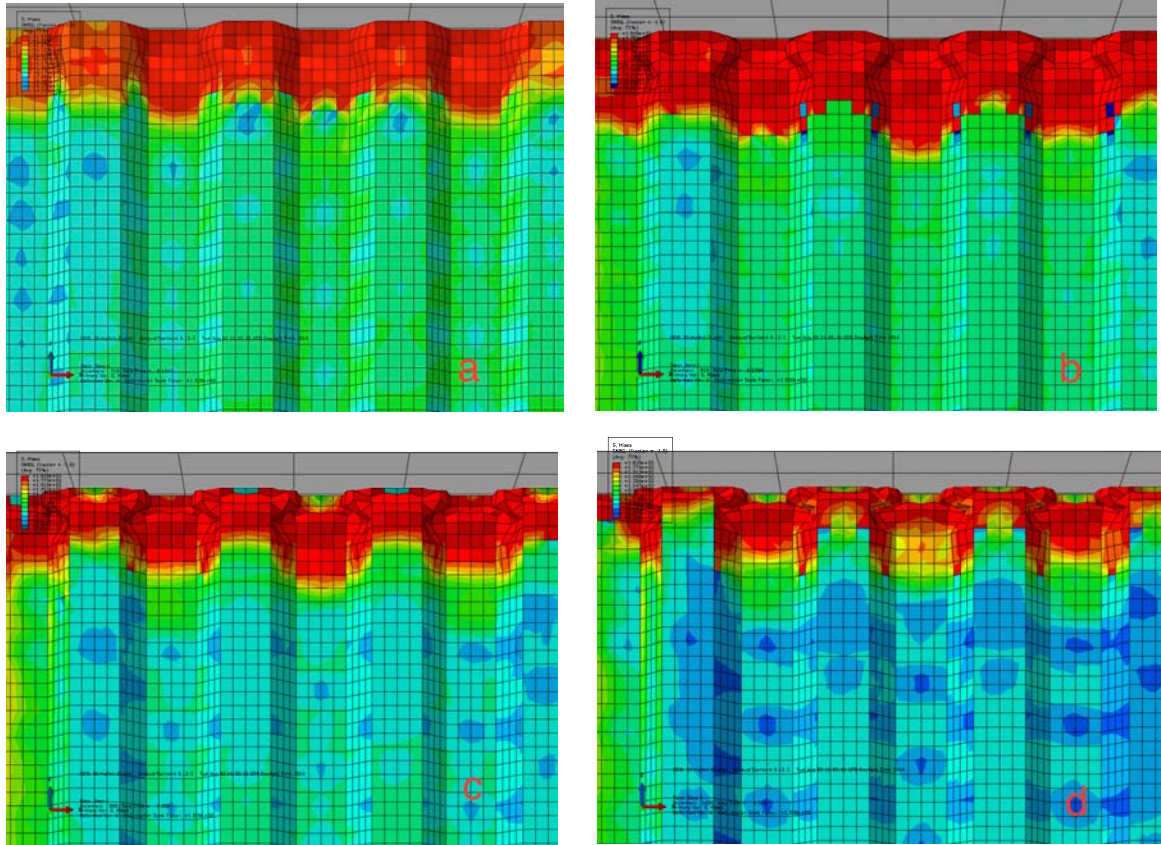
5.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης μοντέλου 81 κυψελίδων

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.1, μία ανάλυση σε μοντέλο πλήρους κλίμακας δεν ήταν εφικτή καθώς απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και μέσα. Για το λόγο αυτό μοντελοποιήθηκε ένα στοιχείο 81 κυψελίδων σε στατική θλιπτική καταπόνηση.

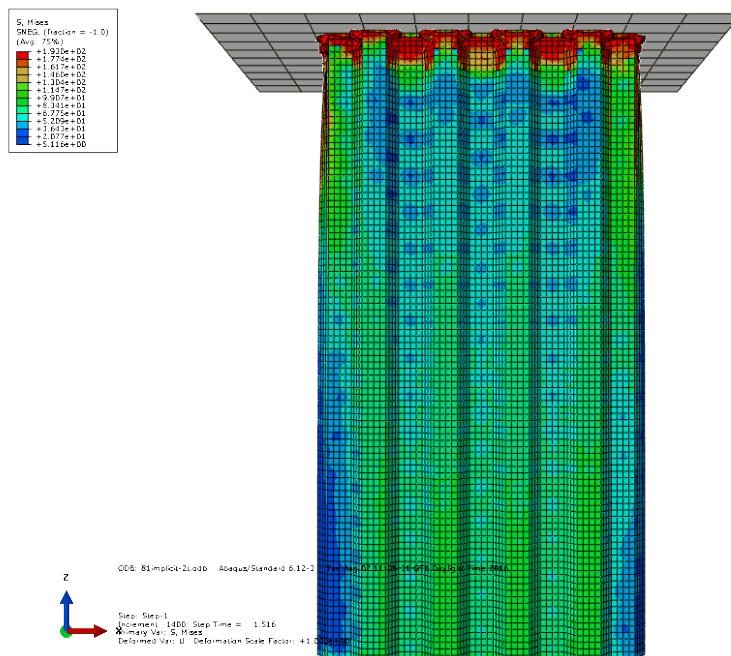
Τα αποτελέσματα από την αριθμητική ανάλυση συγκρίνονται στο Σχήμα 5-13 με το πείραμα για στοιχείο παρόμοιας επιφάνειας. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, η καμπύλη του φορτίου ως προς τη μετατόπιση της επάνω επιφάνειας ακολουθεί όμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο A3. Το φορτίο αυξάνεται αρχικά στην ελαστική περιοχή μέχρι την έναρξη του τοπικού λυγισμού στην επάνω επιφάνεια της κυψέλης. Στη συνέχεια το φορτίο ελαττώνεται καθώς ομαλοποιείται η πρώτη πτύχωση και δημιουργείται η επόμενη. Η εξέλιξη του φαινομένου φαίνεται οπτικά στις Εικόνες 5-10 & 5-11. Το μέγιστο φορτίο λυγισμού του δοκιμίου A3 είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο φορτίο του αριθμητικού μοντέλου καθώς έχει ελαφρώς μεγαλύτερη επιφάνεια (Πίνακας 5-1). Επίσης, λόγω των ατελειών στις επιφάνειες του δοκιμίου το μέγιστο φορτίο λυγισμού εμφανίζεται για μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με το αριθμητικό μοντέλο όπου δεν υπάρχουν ατέλειες στη γεωμετρία που να επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της ανάλυσης η προσομοίωση τερματίστηκε μετά από μετατόπιση 1 mm της άκαμπτης πλάκας στην επάνω επιφάνεια του κυψελωτού στοιχείου.



Σχήμα 5-13 Σύγκριση διαγραμμάτων Δύναμης – Μετατόπισης του αριθμητικού μοντέλου 81 κυψελίδων και του πειράματος (δοκίμιο A1)

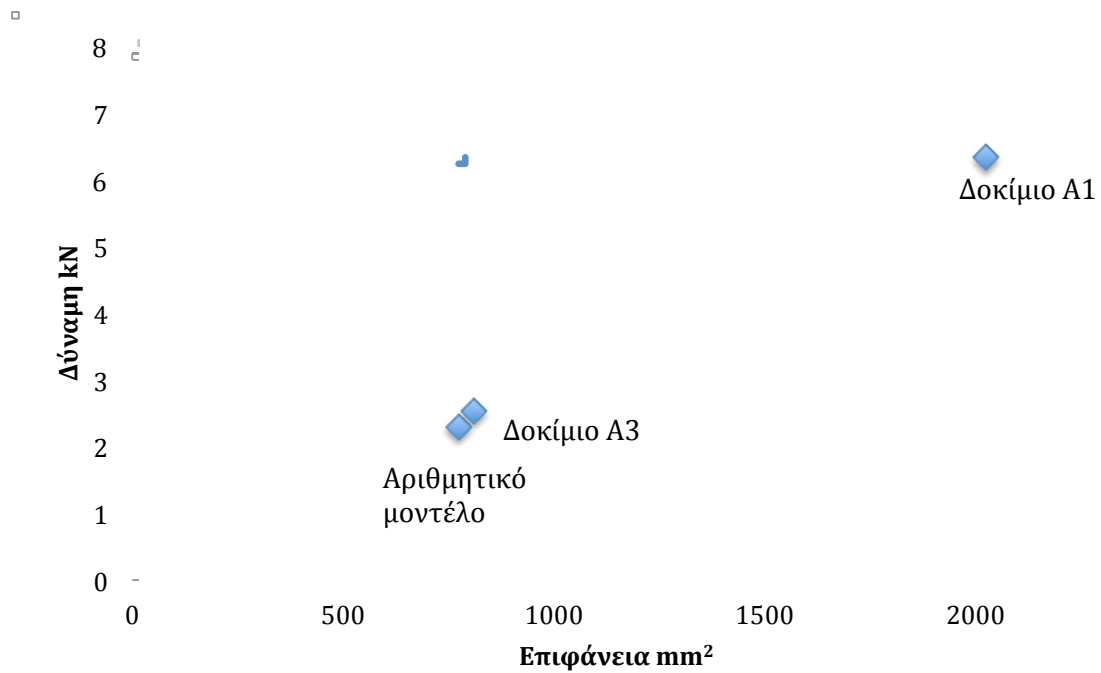


Εικόνα 5-10 Έναρξη και ομαλοποίηση της πρώτης πτύχωσης εξαιτίας του τοπικού λυγισμού



Εικόνα 5-11 Παραμόρφωση της κυψέλης μετά από μετατόπιση 1 mm της επάνω επιφάνειας

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης συμφωνούν με τα αντίστοιχα πειραματικά τόσο ως προς τη μορφή της καμπύλης όσο και ως προς την τιμή του κρίσιμου φορτίου για την έναρξη του λυγισμού. Το κρίσιμο φορτίο ακολουθεί την καμπύλη Δύναμης – Επιφάνειας που ακολουθούν τα δοκίμια των πειραμάτων για ίδιες συνθήκες παραμόρφωσης (Σχήμα 5-14).



Σχήμα 5-14 Διάγραμμα Δύναμης – Επιφάνειας διατομής που αποτυπώνει τη γραμμική σχέση μεταξύ του κρίσιμου φορτίου για την έναρξη του τοπικού λυγισμού των δοκιμίων με την επιφάνειά τους για τα δοκίμια A1 & A3 και το αριθμητικό μοντέλο των 81 κυψελίδων.

6. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε πειραματικά και αναλυτικά η συμπεριφορά των κυψελών αλουμινίου 5052 σε θλίψη. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

1. Μετά το κρίσιμο φορτίο αστοχίας παρατηρείται πτώση της δύναμης και εκτεταμένη παραμόρφωση υπό σταθερή δύναμη λόγω της δημιουργίας διαδοχικών πτυχώσεων με την εξέλιξη του φαινομένου της παραμόρφωσης.
2. Το κρίσιμο φορτίο για την έναρξη του τοπικού λυγισμού αυξάνεται γραμμικά με την επιφάνεια του κυψελωτού στοιχείου. Αντίστοιχα αυξάνεται και η δύναμη που αντιστοιχεί στη σταθεροποιημένη κατάσταση παραμόρφωσης μετά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.
3. Ο μηχανισμός παραμόρφωσης του υλικού παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το ρυθμό παραμόρφωσης. Στα πειράματα υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης παρουσιάζεται φαινόμενο τοπικού πριν το οριακό φορτίο αστοχίας κάτι που δε συμβαίνει στα στατικά πειράματα.
4. Το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε με το λογισμικό Abaqus συμφωνεί ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Η τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού για συγκεκριμένη επιφάνεια συμφωνεί με την αντίστοιχη τιμή των πειραμάτων για δοκίμιο με παρόμοιες διαστάσεις.
5. Η σύγκριση με βάση το αριθμητικό μοντέλο της παραμόρφωσης θλίψης μίας μοναδιαίας κυψελίδας με ελεύθερες επιφάνειες με την παραμόρφωση της κυψελίδας με σταθερές επιφάνειες έδειξε ότι στην πρώτη περίπτωση το σύστημα συμπεριφέρεται λιγότερο δύσκαμπτα ενώ δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή στο μέγιστο φορτίο λυγισμού.

7. Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Περαιτέρω μελέτη χρειάζεται για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με την εισαγωγή της Ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Επίσης είναι σημαντική η εξέλιξη του μοντέλου για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού σε δυναμικά φορτία. Το μοντέλο αυτό απαιτεί χρήση της μεθόδου explicit και δυνατών υπολογιστικών μέσω προκειμένου να ολοκληρωθεί. Ακόμη, απαιτείται καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των ατελειών της γεωμετρίας στη συμπεριφορά παραμόρφωσης του κυψελωτού στοιχείου.

Βιβλιογραφία

1. Ashby, L.: Cellular solids structure and properties 2nd edn. Cambridge University Press (1997)
2. Imatec In: www.imatec.it. Available at: <http://www.imatec.it/wp-content/uploads/2016/05/Nido-dape-alluminio-5052-IT-7.pdf>
3. Domenico Asprone, F.: Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures. *Composite Structures* 105, 240–255 (2013)
4. Sun Deqiang, Z.: Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings. *Composite Structures* 92, 2609–2621 (2010)
5. Ayman Ashab, D.: Finite Element Analysis of Aluminum Honeycombs Subjected to Dynamic Indentation and Compression Loads. *MDPI-Materials* (March 2016)
6. J. Singer, J.: Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures Volume 2, Shells, Built-up Structures, Composites and Additional Topics. Wiley (2002)
7. Amelie Kolopp, R.: Modeling impact on aluminium sandwich including velocity effects in honeycomb cores. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. ISSN 1099-6362 (2013)
8. Zhang, J.: Equivalent Laminated Model of the Aluminum Honeycomb Sandwich Panel. In : International Conference on Material Science and Application (ICMSA 2015) (2015)
9. Jeom Kee Paika, A.: The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures* 35, 205–231 (1999)
10. Dassault Systemes: ABAQUS (2013) ABAQUS Documentation'.
11. Y. Aminanda, B.: Experimental Analysis and Modeling of the Crushing of Honeycomb Cores. *Applied Composite Materials* 12, 213–227 (2005)
12. A. Wilbert, W.-Y.: Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb. *International Journal of Solids and Structures* 48, 803–816 (2011)