ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΟΝΕΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΟΥΣΤΑΜΠΑΣΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΟΝΕΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΟΥΣΤΑΜΠΑΣΙΔΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Γ. Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία, με τίτλο «Εκρηκτική συμπίεση μεταλλικών και κεραμικών κόνεων: Πειραματική και Αριθμητική μοντελοποίηση», πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της, η μελέτη της Εκρηκτικής συμπίεσης διαφόρων αντιπροσωπευτικών μεταλλικών και κεραμικών κόνεων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και την έρευνα, και η εξέτασής των μακροσκοπικά και μικροσκοπικά. Για καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας προσομοιώθηκε στον υπολογιστή, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και του εμπορικού κώδικα LS-DYNA3D

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν για να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Πρωτίστως, τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Δημήτρη Μανωλάκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως προς την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την αμέριστη στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης τον διδακτορικό Γιώργο Κούζιλο που βοήθησε αρκετά για την ολοκλήρωση της εργασίας. Τον διδακτορικό Αχιλλέα Βορτσέλα και τον Πρωτεσίλαο Κωνστάτζο που με βοήθησαν με την προσομοίωση στο LS-DYNA, και το τεχνικό προσωπικό για την βοήθειά τους στο πειραματικό μέρος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου Μωυσή και Δημήτρη.

Ευχαριστώ

Αλέξανδρος Ουσταμπασίδης

.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αναφέρεται στη μελέτη της Εκρηκτική συμπίεση μεταλλικών και κεραμικών κόνεων, των συνθηκών που επηρεάζουν την κατεργασία διαμόρφωσης, της τελικής γεωμετρίας και μικροδομής των εξεταζομένων υλικών.

Η εκρηκτική συμπίεση, είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί κρουστικά κύματα για τη συμπίεση μεταλλικών και κεραμικών κόνεων, με σκοπό τη διαμόρφωση τεχνικά υγειών προϊόντων. Τα κρουστικά κύματα, που δημιουργούνται από την εκτόνωση της εκρηκτικής ύλης και που διαδίδονται μέσω του πορώδους, προκαλούν την ανακατάταξη των κόκκων της κόνης και τη κατάρρευση του πορώδους από την επίδραση έντονων θλιπτικών τασικών πεδίων. Ακολουθεί η αποφόρτιση, όπου οι συμπιεσμένοι κόκκοι αποδίδουν την ελαστική θλιπτική ενέργεια με τη μορφή εφελκυστικών τασικών κυμάτων χαλάρωσης. Η ανάκλαση των κρουστικών κυμάτων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εφελκυστικών τασικών κυμάτων, που επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα του συμπιέσματος.

Η εκρηκτική συμπίεση κόνης, αποτελεί μια μέθοδο παραγωγής αντικειμένων με απλή γεωμετρία, και στη συγκεκριμένη περίπτωση την κυλινδρική. Ανήκει στην δυναμική συμπίεση κόνης, όπου η εκρηκτική ύλη χρησιμοποιείται σαν ένα έμβολο με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Η προσομοίωση του πειράματος έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και του εμπορικού κώδικα LS-DYNA. Για την κατανόηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε η μελέτη της περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των κεραμικών και μεταλλικών κόνεων, καθώς και του μεταλλικού κοιλοδοκού κυκλικής διατομής και της εκρηκτικής ύλης.

Επίσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και της προσομοίωσης στο LS-DYNA και βγαίνουν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας υπάρχει η σχετική βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή……1

1.1 Κονιομεταλλουργία……1

1.2 Σύνθεση Κόνεων……3

2. Υλικά και Εφαρμογές……5

2.1 Μέταλλα……5

2.1.1 Χαλκός (Cu)……5

2.1.2 Αλουμίνιο (Al)……6

2.2 Κεραμικά……7

2.2.1 Οξείδιο του Αργιλίου (Al_2O_3)……10

2.2.2 Καρβίδιο του Τιτανίου (TiC)……11

3. Δυναμική Συμπίεση Κόνεων……13

3.1 Τασικά Κύματα……13

3.1.1 Ελαστικά Κύματα……14

3.1.2 Πλαστικά Κύματα……15

3.1.3 Κρουστικά Κύματα……16

3.2 Καταστατικές Εξισώσεις Πορώδων Υλικών……18

4. Συμπίεση Κόνεων……21

4.1 Στατική Συμπίεση Κόνεων……21

4.1.1 Στατική Μονοαξονική Συμπίεση……21

4.1.2 Πυροσυσσωμάτωση……23

4.1.3 Ισοστατική Συμπίεση……24

4.2 Δυναμική Συμπίεση Κόνεων……...……..……25

4.2.1 Ισοδυναμική Συμπίεση……..……..……..….26

4.2.2 Κρουστική Ισοδυναμική Συμπίεση……..……..…..27

4.2.3 Ηλεκτρομαγνητική Ισοδυναμική Συμπίεση……..…….…….……27

4.3 Εκρηκτική Συμπίεση…….……...28

4.4 Μέθοδοι Εκρηκτικής Συμπίεσης…….…….…….……...…..29

4.4.1 Εκρηκτική Μονοαξονική Συμπίεση……...……29

2.5.2 Εκρηκτική Ισοδυναμική Συμπίεση……..……..30

5. Εκρηκτικές Ύλες…….34

5.1 Σύσταση των Εκρηκτικών Υλών…….……..……..34

5.2 Έναυση-Πυροδότηση……...……...……..……35

5.3 Δομή Εκρηκτικού Κύματος……..……..……..36

5.4 Βραδυκρουστικές και Διαρρηκτικές Εκρηκτικές Ύλες….……..……..39

5.5 Ιδανική και μη Ιδανική Έκρηξη…….…….…….40

5.6 Ισχύς……..…….…….……...…..40

5.7 Μηχανισμοί Δυναμικής Συμπίεσης……..……...…..41

5.7.1 Θερμικό Μοντέλο…….……..…….43

5.7.2 Βισκοπλαστικό Μοντέλο…….…….……..44

5.8 Πεπερασμένα Στοιχεία στη Συμπίεση Κόνεων……..…...46

5.8.1 Στατική Συμπίεση……...……...……..47

5.8.2 Δυναμική Συμπίεση……..……..49

6. Πειραματική Διαδικασία…….…….…..51

6.1 Αξονοσυμμετρική Εκρηκτική Συμπίεση……..…..……51

6.2 Πειραματική Διεργασία……..…….……52

6.3 Εκρηκτική Ύλη……...……55

6.4 Φαινόμενη Πυκνότητα …….……..……55

6.4.1 Υπολογισμός της Τελικής Φαινόμενης Πυκνότητας…….55

6.5 Χαλύβδινος Σωλήνας……..56

6.6 Πείραμα Κόνης Αλουμινίου (Al)……..……57

6.7 Πείραμα Κόνης Χαλκού (Cu)……...59

6.8 Πείραμα Κόνης Καρβιδίου του Τιτανίου με Αλουμίνιο……..……...62

6.9 Πείραμα Κόνης Αλουμίνας……...……66

7. Μοντελοποίηση της εκρηκτική συμπίεσης…….……69

7.1 Εισαγωγή ……..…….……..69

7.2 Περιγραφή μοντέλου……...…..……70

7.2.1 Πεπερασμένα Στοιχεία……...…….……..72

7.2.2 Υλικά…….…….…….……75

7.2.3 Επαφή (Contact)…….……..……..….82

7.2.4 Όρια και Απαραμόρφωτος Τοίχος…….…….……82

7.2.5 Εκπυρσοκρότηση……..……83

7.2.6 Θερμικές Ιδιότητες των Υλικών…….…….……83

7.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης……..83

8. Τελικά Συμπεράσματα……...……...……90

9. Βιβλιογραφία……..……..……..91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

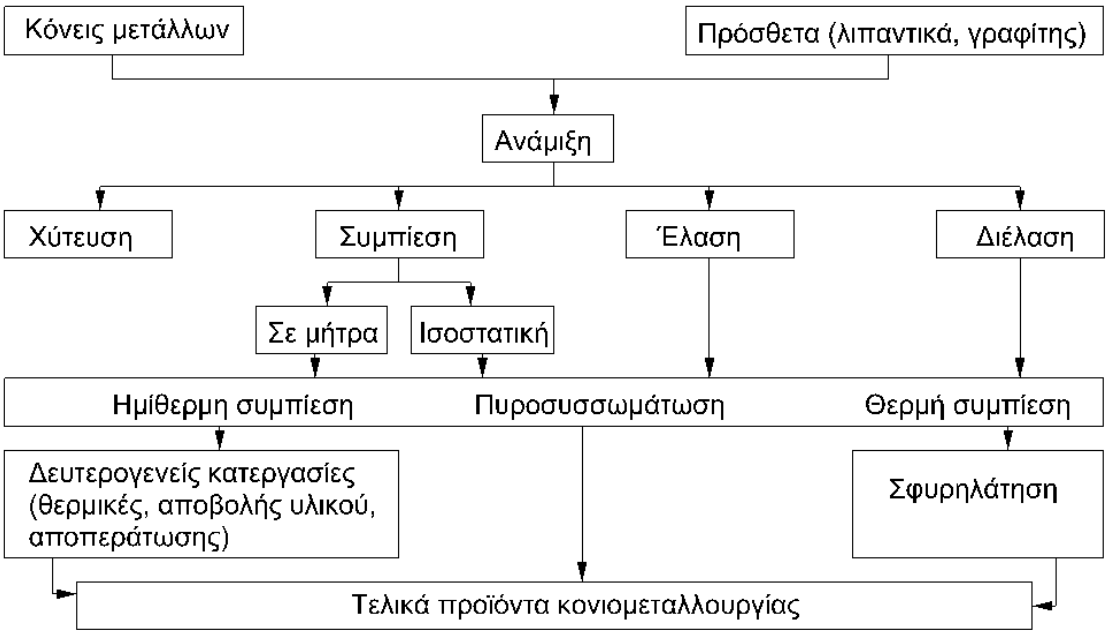
Η κονιομεταλλουργία είναι μια από τις βασικές κατεργασίες για την μορφοποίηση των μετάλλων. Οι φάσεις για την μορφοποίηση με την κονιομεταλλουργία είναι:

α) Σύνθεση της κόνης και τροφοδότηση της κόνης στη μήτρα

β) Συμπίεση του μείγματος σε μήτρα

γ) Θερμική κατεργασία του συμπιέσματος σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και θερμοκρασία

Η τεχνολογία της συμπίεσης κόνεων είναι αρκετά παλαιά όπως μαρτυρούν προϊόντα σιδήρου στην Αίγυπτο και η στήλη του Δελχί στην Ινδία και αντικείμενα από πολύτιμα μέταλλα κατασκευασμένα από τους Ίνκας. Στους νεώτερους χρόνους, το 1829, συμπιέζονταν τεμάχια πλατίνας για περαιτέρω θερμική κατεργασία και στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την συμπίεση και πυροσσωμάτωση κόνης βολφραμίου για την παραγωγή νηματιδίων ηλεκτρικών λυχνιών. Στην δεκαετία του 1920, άρχισε να εφαρμόζεται για παραγωγή σκληρομετάλλων (καρβίδια βολφραμίου) και την μαζική παραγωγή πορώδων ορειχάλκινων δακτυλίων εδράνων. Η μέθοδος της κονιομεταλλουργίας, γνώρισε μεγαλύτερη ανάπτυξη κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με την παραγωγή σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μετάλλων και πολλών άλλων σύνθετων υλικών. Τα τελευταία σαράντα χρόνια η κονιομεταλλουργία συνεχώς εξελίσσεται λόγω της διαπίστωσης των πολλών πλεονεκτημάτων που έχει συγκριτικά με άλλες μεθόδους κατεργασίας [1].



Σχήμα 1.1: Κατεργασίες κονιομεταλλουργίας

Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων διαφόρων μεγεθών και γεωμετριών
- Δυνατότητα κατεργασίας πολλών υλικών όπως βολφράμιο, μολυβδένιο, ταντάλιο, καρβίδια βολφραμίου κτλ. με χαμηλό κόστος σε σχέση με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας
- Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε υλικά όπως ταχυχάλυβες, υπερκράματα, τιτάνιο και βηρύλλιο
- Υψηλή ακρίβεια ανοχών και καλή ποιότητα επιφανείας
- Μικρή απώλεια υλικού
- Εξοικονόμηση ενέργειας

Μειονεκτήματα

- Μεγάλο αρχικό κόστος εξοπλισμού

  Υψηλό κόστος κόνης (σχεδόν διπλάσιο από αυτού του στερεού για σίδηρο και χαλκό)

Σχήμα 1.2: Τυπικά προϊόντα κονιομεταλλουργίας

1.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Η παρασκευή μειγμάτων διαφόρων μετάλλων, τάξης μεγέθους 40 μm με ορισμένη κανονική ή μη κανονική μορφή και κοκκομετρική ανάλυση, γίνεται κυρίως με τη:

- Χημική μέθοδος κονιοποίησης (με αναγωγή των οξειδίων ή με ηλεκτρόλυση αλάτων των μετάλλων)

- Μηχανική μέθοδος (με θραύση ή με ψεκασμό τηγμένου μετάλλου)

Η πιο διαδεδομένη είναι η κονιοποίηση με ψεκασμό τηγμένου μετάλλου, διότι επιτρέπει το σωστό έλεγχο των χημικών ιδιοτήτων της κόνης, της καθαρότητας, του μεγέθους και το σχήμα των κόκκων. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει κόνη καλής ποιότητας και χαμηλού κόστους.

Για τη σωστή αναλογία του μείγματος διαφόρων συστατικών των κόνεων γίνεται το ζύγισμα και η ανάμειξη τους με ένα λιπαντικό σε κατάλληλες συσκευές ώστε να παραχθεί ένα ομοιογενές μείγμα.

Στην περίπτωση των κεραμικών υπεραγώγιμων υλικών υψηλών θερμοκρασιών διακρίνονται:

(α) Αντίδραση στερεάς κατάστασης που αποτελεί και την πιο διαδεδομένη μέθοδο παρασκευής υπεραγώγιμων οξειδίων

(β) Μέθοδος συγκαθίζησης

(γ) Τεχνική Sol-Gel

(δ) Μέθοδος εκρηκτικής αντίδρασης [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 ΜΕΤΑΛΛΑ

Τα μέταλλα είναι μια μεγάλη κατηγορία χημικών στοιχείων που εμφανίζουν ορισμένες κοινές ιδιότητες, όπως είναι η λάμψη, η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Τα περισσότερα μέταλλα έχουν μεγάλη πυκνότητα και είναι σκληρά και ανθεκτικά. Τα πιο συνηθισμένα μέταλλα είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, το αλουμίνιο, το νάτριο, το ασβέστιο, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο, το τιτάνιο και το ουράνιο.

Χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ναυπηγική, αεροναυπηγική, ρομποτική, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, σε κοπτικά εργαλεία. Συχνά χρησιμοποιούνται κράματα μετάλλων για καλύτερες μηχανικές, θερμικές, χημικές ιδιότητες ανάλογα με τη χρήση [2].

2.1.1 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)

Ο χαλκός ανήκει στην κατηγορία των μετάλλων, είναι όλκιμος και ελατός. Το χρώμα του είναι κοκκινωπό. Στη φύση ανευρίσκεται αυτοφυής, ωστόσο στις μέρες τα κοιτάσματα αυτοφυούς χαλκού είναι ή περιορισμένα ή οικονομικά μη εκμεταλλεύσιμα.

Τα κυριότερα ορυκτά του χαλκού είναι ο χαλκοπυρίτης, ο χαλκοσίνης, ο βορνίτης, ο κυπρίτης, ο μαλαχίτης και ο αζουρίτης.

Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος για την κατασκευή σκευών, εργαλείων και όπλων και εκτιμάται ότι έγινε γνωστός περίπου το 9000 π.Χ.

Είναι μαλακός, πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τις κυριότερες ιδιότητες του χαλκού. Λόγω της ιδιότητας του όταν είναι τηγμένος να απορροφά ατμοσφαιρικό αέρα, τον οποίο αποβάλλει ψυχόμενος, δεν μπορούν να κατασκευαστούν χυτά αντικείμενα από χαλκό.

Πίνακας 2.1 :Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του Χαλκού

Πυκνότητα συμπαγούς υλικού	8,94 g/cm^3
Μέτρο Ελαστικότητας	110.3 GPa
Μέτρο Διάτμησης	48 GPa
Όριο Συμπιεστότητας	140 GPa
Λόγος Poisson	0.36
Όριο Διαρροής	100-500 MPa
Όριο Θραύσης	200-700 MPa
Θερμοκρασία Τήξης	1085^0 C

Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών, από τον οποίο κατασκευάζονται καλώδια, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ηλεκτρομαγνήτες. Επίσης, χρησιμοποιείται στην κατασκευή κτιρίων για στέγες και σωληνώσεις. Είναι βασικό συστατικό στην κατασκευή νομισμάτων (κερμάτων) .

Τα κυριότερα κράματά του είναι ο ορείχαλκος και ο μπρούντζος [3, 4].

2.1.2 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (Al)

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των μετάλλων, αργυρόλευκου χρώματος. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο στον πλανήτη.

Έχει μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση, γιατί όταν εκτεθεί στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό οριακό στρώμα οξειδίου, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωση του. Ο Πίνακας 2.2 μας δείχνει τις κυριότερες ιδιότητες του αλουμινίου. Έχει χαμηλή πυκνότητα, και χρησιμοποιείται

σε πολλά κράματα. Είναι εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διάφορων ενώσεων του.

Πίνακας 2.2: Οι σημαντικότερες ιδιότητες του Αλουμινίου

Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού	2,7 g/cm^3
Μέτρο Ελαστικότητας	50-100 GPa
Μέτρο Διάτμησης	26 GPa
Όριο Συμπιεστότητα	76 GPa
Όριο Διαρροής	40-300 MPa
Όριο Θραύσης	80-400 MPa
Λόγος Poisson	0.35
Θερμοκρασία Τήξης	660 ^oC

Έχει υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις , και χαμηλό ειδικό βάρος. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων μετάλλων ή και κεραμικών βελτιώνονται πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες.

Χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική, στη αυτοκινητοβιομηχανία, στη βιομηχανία αθλητικών ειδών και τη ναυπηγική. Επίσης χρησιμοποιείται για την κατασκευή των κουτιών για ποτά, του αλουμινόχαρτου και άλλων εργαλείων της κουζίνας [5].

2.2 ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Ο όρος κεραμικά, πρωτοχρησιμοποιήθηκε στην αρχαία Ελλάδα, και δηλώνει θερμικά κατεργασμένο υλικό που προέρχεται από αργιλικές πρώτες ύλες. Τα πρώτα κεραμικά

αντικείμενα που κατασκεύασε ο άνθρωπος είχαν τη μορφή αγγείων και τούβλων. Τα υλικά είναι κατά κύριο λόγο οξείδια των οποίων η συνοχή εξασφαλίζεται μέσω ιοντικών ή ομοιοπολικών δεσμών.

Οι κεραμικές κατασκευές είναι οι μακροβιότερες και οι μεγαλύτερες κατασκευές του ανθρώπου, όπως η πυραμίδα της Γκίζας, ο Παρθενώνας και το Σινικό Τείχος.

Κατά τον μεσαίωνα και την αναγέννηση, πυριτικά κεραμικά όπως οι ψαμμίτες, οι πορσελάνες και τα αλουμινοπυριτικά γυαλιά βρήκαν εφαρμογή στην υαλουργία και την κατασκευή βιτρό. Στην βιομηχανική εποχή, τα παραπάνω υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως πυρίμαχα, λειαντικά και μονωτικά.

Την δεκαετία του 1950, καθαρά οξείδια, μείγματα οξειδίων και βιτροκεραμικών χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες για πυρηνικές, οπτικές και μαγνητικές εφαρμογές. Κατασκευάστηκαν πυκνωτές και μέρη εργαλειομηχανών που δέχονται υψηλές μηχανικές και θερμικές φορτίσεις, από κεραμικά υλικά.

Από το 1970, μη οξυγονούχα κεραμικά (νιτρίδια, καρβίδια, βορίδια) και κεραμικοί μονοκρύσταλλοι, χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική, την οπτική, τη βιοιατρική και χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτη ύλη για σκληρές επιστρώσεις, σύνηθη παρασκευή με μεθόδους κονιομεταλλουργίας.

Στον όρο κεραμικά συμπεριλαμβάνονται, εκτός από τα παραπάνω, και διάφορα ορυκτά, πετρώματα, το τσιμέντο, το σκυρόδεμα και ανθρακούχα υλικά.

Τα τελευταία δέκα χρόνια, η εξέλιξη των κεραμικών ήταν ραγδαία, με αποτέλεσμα τα αντικαταστήσουν τα μέταλλα σε πολλές εφαρμογές. Κοπτικά εργαλεία από Sialon ή συμπαγή αλουμίνα παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες κοπής από τα καλύτερα μεταλλικά εργαλεία. Τα προηγμένα κεραμικά εμφανίζουν υψηλή αντιτριβική αντοχή, γι’ αυτό και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αιχμηρών άκρων γεωργικών εργαλείων. Λόγω της αδράνειας και της συμβατότητας με τους ανθρώπινους ιστούς χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τεχνητών συνδέσμων. Είναι υλικά που παρουσιάζουν υψηλά σημεία τήξης, γι’ αυτό χρησιμοποιούνται ως εναλλάκτες, αεροτουρμπίνες, κινητήρες, εξατμίσεις, μπουζί αυτοκινήτου κ.λ.π [6].

Πλεονεκτήματα κεραμικών σε σύγκριση με τα μέταλλα

- Σχετικά χαμηλή πυκνότητα
- Υψηλό σημείο τήξης
- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας
- Χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Καλή αντίσταση σε θλίψη
- Πολύ υψηλή σκληρότητα
- Πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική αντίσταση συμπεριφορά

Μειονεκτήματα κεραμικών σε σύγκριση με τα μέταλλα

- Μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό
- Εύθραυστα
- Υψηλό κόστος παραγωγής (ορισμένα από αυτά)
- Εύκολη διάδοση ρωγμών
- Μεγάλη επίδραση της μικροδομής, των δευτερευουσών φάσεων και του πορώδους στην αντοχή σε θραύση και στις φυσικές ιδιότητες
- Μικρή αντοχή σε κόπωση, σε λυγισμό και σε κρούση
- Έλλειψη ειδικών μεθόδων μη καταστροφικών δοκιμών για τον έλεγχό τους

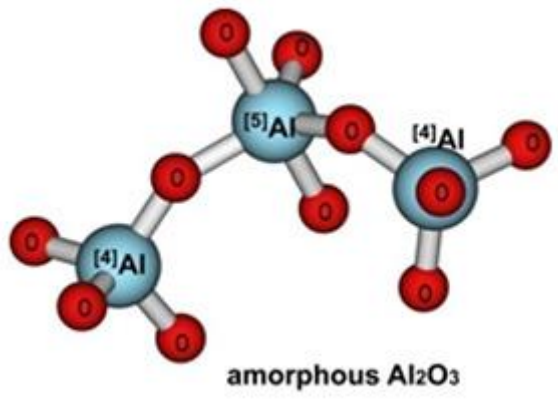
2.2.1 ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΡΓΙΛΙΟΥ (Al_2O_3)

Το οξείδιο του αργιλίου, ή αλουμίνα είναι μια ανόργανη χημική ένωση του οξυγόνου και του αργιλίου. Μπορεί να είναι ένυδρη ή άνυδρη. Η αλουμίνα είναι ένα από τα πιο σκληρά κεραμικά υλικά, αρκετά διαδεδομένο και οικονομικό. Ο κρύσταλλος του οξειδίου του αλουμινίου χαρακτηρίζεται από ισχυρούς ιοντικούς δεσμούς.

Σαν υλικό είναι σκληρό και δύσκαμπτο, πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και μονωτής του ηλεκτρικού ρεύματος, γι' αυτό χρησιμοποιείται για ηλεκτρική ή θερμική μόνωση, για εργαλεία κοπής, και για την κατασκευή laser YAG, στην οδοντιατρική και την προσθετική ιατρική. Ο Πίνακας 2.3 αναφέρει τις σημαντικότερες ιδιότητες της αλουμίνας. Σε μίγμα με άλλα οξείδια (πχ. μουλλίτη, σπινέλιο), χρησιμοποιείται στην κατασκευή πυρίμαχων.

Πίνακας 2.3: Οι κυριότερες ιδιότητες της Αλουμίνας

Πυκνότητα	3,96 g/cm^3
Μοριακό Βάρος	101,961 g/mol
Όριο Θραύσης σε Εφελκυσμό (MPa)	300
Όριο Κάμψης (MPa)	400
Μέτρο Διάτμησης (GPa)	150
Σκληρότητα Knoop	2100
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	350
Αντοχή σε Θλίψη (MPa)	3000
Θερμοκρασία Τήξης (ºC)	2050



Σχήμα 2.1: Κρυσταλλική δομή της Αλουμίνας

Το οξείδιο του αργιλίου παράγεται με επεξεργασία Βωξίτη, ενώ απαντάται και ως Κορούνδιο. Αποτελεί ενδιάμεση ουσία για την παραγωγή αλουμινίου, το οποίο προκύπτει με ηλεκτρόλυση του οξειδίου [6].

2.2.2 ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ (TiC)

Το καρβίδιο του Τιτανίου είναι εξαιρετικά σκληρό πυρίμαχο κεραμικό υλικό, χρώματος γκρι-μαύρο, με μεγάλη αντοχή στην φθορά, την διάβρωση και την οξείδωση.

Σχήμα 2.2: Κρυσταλλική δομή του Καρβιδίου του Τιτανίου

Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει τις κυριότερες ιδιότητές του. Χρησιμοποιείται κυρίως, σε κοπτικά εργαλεία, ως επένδυση, βελτιώνοντας έτσι τις ιδιότητες τους. Επίσης, σε πολλές εφαρμογές

χρησιμοποιείται σε ποσοστό 6-30% μαζί με άλλες κόνες, σε αποτέλεσμα την βελτίωση του τελικού προϊόντος στις μηχανικές και χημικές ιδιότητες.

Πίνακας 2.4: Οι σημαντικότερες ιδιότητες του Καρβιδίου του Τιτανίου

Πυκνότητα συμπαγούς υλικού	4,93 g/cm^3
Μοριακό βάρος	59,9 g/mol
Μέτρο Ελαστικότητας	440 GPa
Μέτρο Διάτμησης	150 GPa
Όριο Συμπιεστότητας	220 GPa
Όριο Θράυσης σε Εφελκυσμό	120-200 MPa
Όριο Θραύσης σε Θλίψη	4 GPa

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

3.1. ΤΑΣΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Τάση ονομάζεται η δύναμη που εφαρμόζεται πάνω σε μια επιφάνεια υλικού ανά μονάδα επιφάνειας.

$$\sigma(Pa) = \frac{F(N)}{E(m^2)}. \tag{3.1}$$

Στο υλικό που εφαρμόζεται η τάση παραμορφώνεται ή αλλάζει μορφή. Στις παραμορφώσεις συνήθως συναντάμε τους ακόλουθους: απλή διατμητική, ογκομετρική και μονοαξονική έκταση.

Για μικρές τάσεις, το υλικό μετά την αποφόρτιση, επιστρέφει στην αρχική του μορφή και μέγεθος . Το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, όπου ισχύει ο νόμος του Hooke

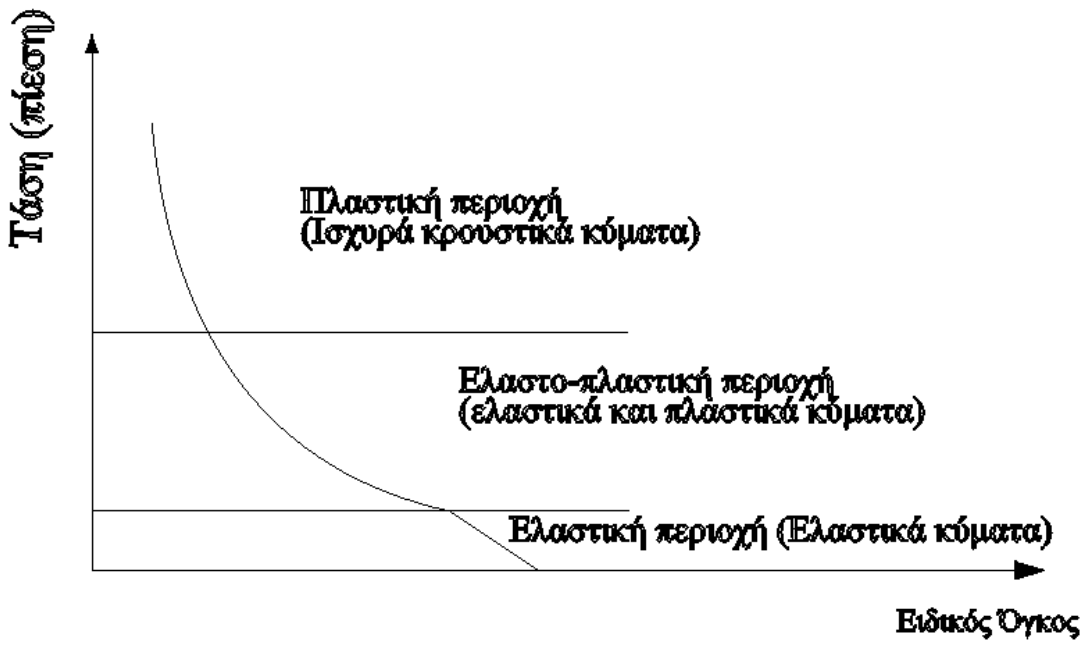
$$\sigma = \varepsilon * \mathrm{E} \tag{3.2}$$

Όπου, E= μέτρο ελαστικότητας (Pa), ε είναι η παραμόρφωση

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{lo}, \tag{3.3}$$

Όταν εφαρμόζουμε τάσεις μεγαλύτερες από την τάση διαρροής του υλικού (σ_{Δ}), τότε το υλικό έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση και δεν μπορεί να επιστρέψει στην αρχική κατάσταση μετά την αποφόρτιση.

Το σχήμα 3.1, είναι ένα διάγραμμα που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της τάσης και του ειδικού όγκου (αντίστροφο της πυκνότητας) για ένα στερεό. Στην ελαστική περιοχή υπάρχουν, ελαστικά τασικά κύματα. Στην ελαστικοπλαστική περιοχή υπάρχουν, ελαστικά και πλαστικά τασικά κύματα και στην πλαστική περιοχή υπάρχουν πλαστικά και κρουστικά κύματα [7].



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Πίεσης- Ειδικού Όγκου

3.1.1 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Το ελαστικό κύμα είναι μια διαταραχή χαμηλής πίεσης, που διαδίδεται από σωματίδιο σε σωματίδιο μέσα στο υλικό. Το υλικό, λόγω της χαμηλής πίεσης επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Υπάρχουν δύο τύποι ελαστικών κυμάτων:

- Το διαμήκες, που προκαλεί συμπίεση του υλικού
- Το εγκάρσιο, που προκαλεί διάτμηση και μεταβάλλεται μόνο η μορφή του υλικού

Η ταχύτητα ενός διαμήκους κύματος (C_L) είναι √3 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος (C_S) (αναλογία Poisson). $C_L = \sqrt{3}C_S$

$$C_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3G}}{\rho}} \tag{3.4}$$

K είναι το μέτρο διόγκωσης, G είναι το μέτρο διάτμησης και ρ η πυκνότητα

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{3.5}$$

Τα υγρά και τα αέρια δεν παρουσιάζουν ιδιότητες διάτμησης, άρα δεν υπάρχουν εγκάρσια κύματα.

Στην διάδοση ενός ελαστικού κύματος σε ένα υλικό, η εσωτερική τριβή είναι η απώλεια ενέργειας που εμφανίζεται λόγο της συμπίεσης και της θερμότητας. Αποτέλεσμα της εσωτερικής τριβής είναι η μείωση της πίεσης του κύματος συναρτήσει της απόστασης που διανύει το κύμα και τελικά χάνεται [7]

3.1.2 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Πλαστικό κύμα δημιουργείται όταν, η ένταση της τάσης του υλικού υπερβεί το όριο ελαστικότητας του. Σε αυτή την περίπτωση, γίνεται διάσπαση του παλμού σε ένα ελαστικό και ένα πλαστικό κύμα, με τα σωματίδια του υλικού να δέχονται μόνιμη παραμόρφωση.

Τα πλαστικά κύματα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

α) Τα πλαστικά κύματα που διαδίδονται σε κυλίνδρους, ράβδους και σύρματα, δηλ. διαστασιολογικά το μέσο διάδοσης χαρακτηρίζεται μόνο από το μήκος, με τις άλλες διαστάσεις να θεωρούνται αμελητέες. Εφαρμόζουν *μονοαξονική εντατική κατάσταση*.

β) Καθώς οι πλευρικές διαστάσεις αυξάνονται, οι οριακές συνθήκες αλλάζουν και στην περίπτωση που γίνουν άπειρες οι πλευρικές παραμορφώσεις, κάθετες στη διάδοση του κύματος, γίνονται μηδενικές. Τότε έχουμε *μονοαξονική παραμορφωσιακή κατάσταση*.

γ) Τα πλαστικά εγκάρσια κύματα, που προκαλούν πλαστική παραμόρφωση κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος [7]

Η αντοχή ενός υλικού εξαρτάται από την παραμόρφωση (ε) και τον ρυθμό παραμόρφωσης (dε)

Στην πλαστική παραμόρφωση η τάση, προσεγγίζεται καλύτερα από την εξίσωση:

$$\sigma = \sigma_o + k\varepsilon^n \tag{3.6}$$

Το k είναι σταθερά και ισούται με την τιμή της τάσης όταν ε = 1.

Το n, όπου 0<n<1, είναι ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης (strain-hardening coefficient ή exponent) και είναι η κλίση της γραμμής ($\log\sigma - \log\varepsilon$).

Η εξάρτηση από την ταχύτητα παραμόρφωσης δείχνει ότι, αυξανομένου του ρυθμού παραμόρφωσης, η καμπύλη σ-ε μετατοπίζεται προς υψηλότερες τάσεις και η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma = \sigma_o + k\varepsilon^n (de)^m \tag{3.7}$$

όπου m είναι ο εκθέτης ευαισθησίας του υλικού από το dε, 0<m<1

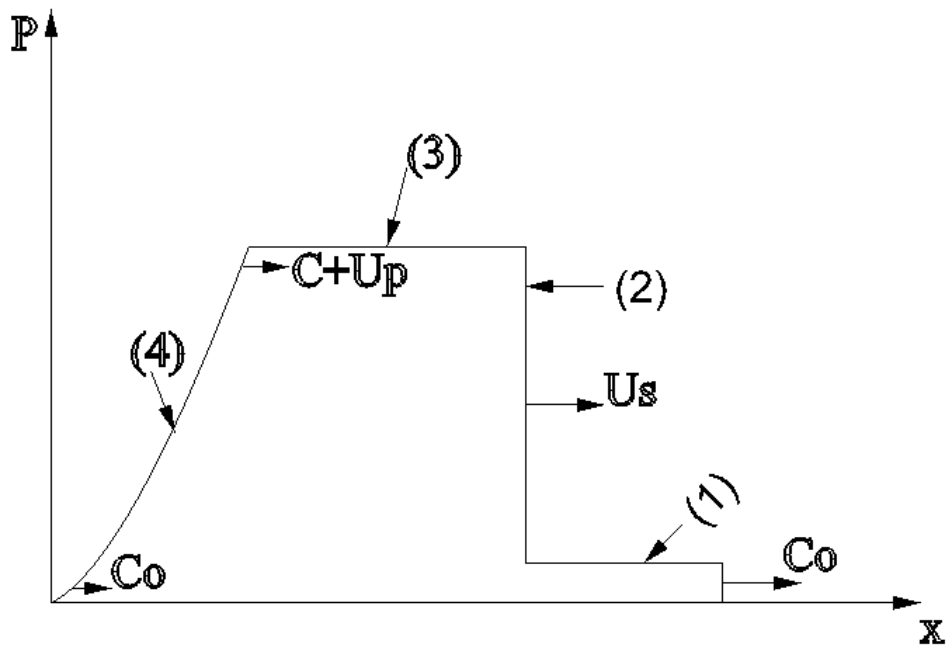
Η ταχύτητα του πλαστικού κύματος (διάδοση μέσα σε σύρμα) δίνεται από την εξίσωση:

$$V_p = \left(\frac{\frac{d\sigma}{d\varepsilon}}{\rho} \right)^{0.5} \tag{3.8}$$

dσ/dε είναι η κλίση της καμπύλης σ-ε στην πλαστική περιοχή [7]

3.1.3 ΚΡΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Μια διαταραχή πολύ υψηλής πιέσεως που κινείται μέσα σ' ένα υλικό προκαλούν κρουστικό κύμα. Στην περίπτωση μιας κρούσης, η διαταραχή είναι ασυνεχείς και όχι συνεχείς και ομαλή (βλέπε Σχήμα 3.2). Οι πιέσεις που εμφανίζονται είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες των ελαστικών κυμάτων. Όταν εφαρμόζονται σε ένα υλικό κρουστικές πιέσεις με τάσεις μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας, στο τέλος της αποφόρτισης το υλικό δεν επιστρέφει στην αρχική του μορφή.



Σχήμα 3.2: Ιδεατή μορφή κρουστικών κυμάτων σχηματισμένη από υψηλή ταχύτητα κρούσης μεταλλικού βλήματος (1) Ελαστικό τασικό κύμα, (2) Κρουστικό μέτωπο, (3) Μήκος παλμού, (4) Αραίωση

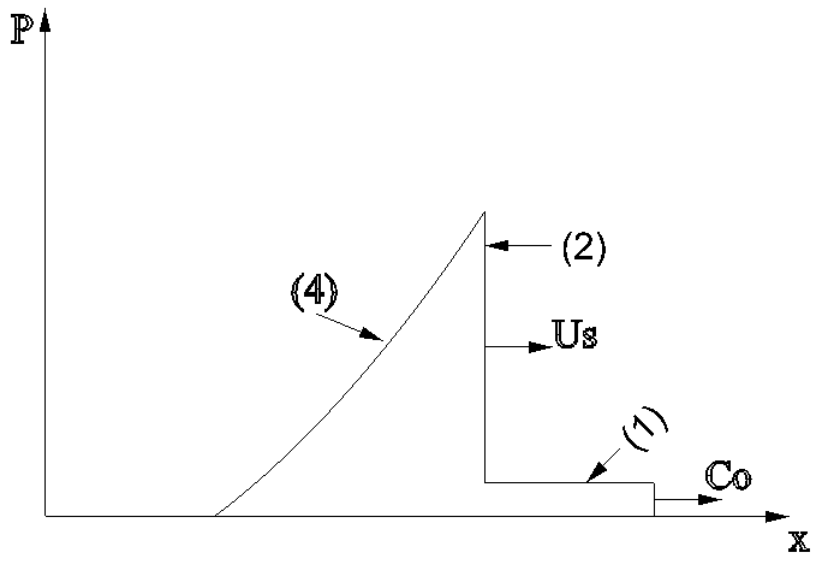
Το ιδεατό κρουστικό κύμα αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

α) το επίπεδο κατακόρυφο κρουστικό μέτωπο, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλής υδροστατικής πίεσης

β) η περιοχή χαλάρωσης-αραίωσης, όπου η πίεση μηδενίζεται

Σε χαμηλές πιέσεις τμήμα του κρουστικού κύματος προηγείται του κρουστικού μετώπου και χαρακτηρίζεται ως ελαστικό τασικό κύμα, εντάσεως ίσης με το όριο ελαστικότητας του υλικού (όριο ελαστικότητας, Hugoniot).

Η διάρκεια του παλμού εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται για τη διαδρομή του κύματος διαμέσου του υλικού. Στην περίπτωση όμως της εκτόνωσης της εκρηκτικής ύλης η διάρκεια του παλμού μηδενίζεται. Το κρουστικό κύμα που δημιουργείται από υψηλής ταχύτητας κρούση μεταλλικού βλήματος, έχει σχήμα τραπεζοειδές (Σχήμα 3.2). Στην εκτόνωση εκρηκτικής ύλης ο τασικός παλμός παίρνει σχήμα τριγωνοειδές (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Ιδεατή μορφή κρουστικών κυμάτων σχηματισμένη από επαφή με το προς καταπόνηση υλικό (1) Ελαστικό τασικό κύμα, (2) Κρουστικό μέτωπο, (3) Μήκος παλμού, (4) Αραίωση

3.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.2.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι νόμοι διατήρησης, οι Hugoniot και οι εξισώσεις Raleigh μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε υλικό. Οι καταστατικές εξισώσεις (EOS, Equation of State) έχουν μια χαρακτηριστική επίδραση στη φύση των κρουστικών φαινομένων.

Η θερμοδυναμική διεργασία που υποβάλλεται το υλικό, θεωρείται αδιαβατική και η αποφόρτιση από τις συνθήκες υψηλής πίεσης θεωρείται ισεντροπική διεργασία.

$$T = \left[\frac{\partial e}{\partial S} \right]_V \tag{3.9}$$

$$P = -\left[\frac{\partial e}{\partial S}\right]_S \tag{3.10}$$

όπου T η θερμοκρασία, P η πίεση. Η εξίσωση 2.11, αποτελεί τον 1° θερμοδυναμικό νόμο.

Οι θερμοχωρητικότητες υπό σταθερό όγκο και πίεση δίνονται από τις εξισώσεις 3.11 και 3.12.

$$C_V = \left[\frac{\partial S}{\partial T}\right]_v \tag{3.11}$$

και

$$C_P = T\left[\frac{\partial S}{\partial T}\right]_P \tag{3.12}$$

Οι συμπιεστότητες υπό σταθερή εντροπία και θερμοκρασία δίνονται από τις εξισώσεις:

$$K_S = -\frac{1}{V}\left[\frac{\partial V}{\partial P}\right]_S \tag{3.13}$$

και

$$K_T = -\frac{1}{V}\left[\frac{\partial V}{\partial P}\right]_T \tag{3.14}$$

Ο συντελεστής της θερμικής διαστολής δίνεται από την εξίσωση:

$$\beta = \frac{1}{V}\left[\frac{\partial V}{\partial T}\right]_P \tag{3.15}$$

Λόγω της θερμοδυναμικής, ισχύει:

$$\frac{K_S}{K_T} = 1 - \frac{\beta^2 VT}{C_P K_T} = \frac{C_V}{C_P} \tag{3.16}$$

Από τις πέντε ιδιότητες μόνο τρεις είναι ανεξάρτητες, και συνήθως προτιμούνται οι C_P, K_T, και β, διότι είναι πιο εύκολο να βρεθούν οι πίνακες υλικών με αυτές τις ιδιότητες. Εξαιρετικά σπουδαίος είναι οι ακόλουθοι παράμετροι:

Ο αδιαβατικός εκθέτης γ:

$$\gamma = \frac{V}{P}\left[\frac{\partial^2 e}{\partial V^2}\right]_S = \frac{1}{PK_S} = \frac{a^2}{PV} = -\frac{V}{P}\left[\frac{\partial P}{\partial V}\right]_S \tag{3.17}$$

α η ταχύτητα του ήχου. Για ένα ιδανικό αέριο, το γ μειώνεται και βρίσκεται από την εξίσωση

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \tag{3.18}$$

η παράμετρος Gruneisen Γ ορίζεται ως:

$$\Gamma = -\frac{V}{T}\frac{d^2 e}{dVdS} = -\frac{V}{T}\left[\frac{dT}{dV}\right]_S = \frac{V}{C_V}\left[\frac{dP}{dV}\right]_V \tag{3.19}$$

[Βιβλιογραφία 1, 11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

4.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Η μέθοδος της στατικής συμπίεσης κόνεων συνήθως πραγματοποιείται, σε μεταλλικές άκαμπτες μήτρες με ειδικές μηχανικές ή υδραυλικές πρέσες με χαμηλές ογκομετρικές ταχύτητες συμπίεσης, R' < 10 $\sec^{-1}$.

$$R' = \frac{1}{V}\left(\frac{dV}{dt}\right) \tag{4.1}$$

V= όγκος του συμπιέσματος σε μια χρονική στιγμή t

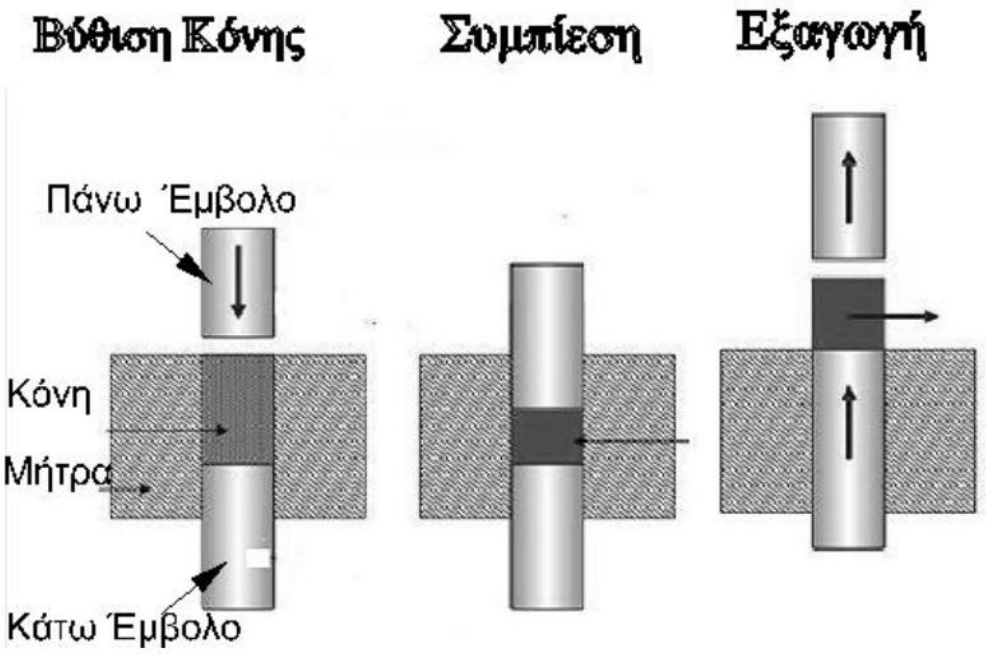
Μετά την συμπίεση, η φαινομενική πυκνότητα μπορεί να φτάσει το 90% της πυκνότητας του στερεού υλικού, με μέγιστο ύψος συμπιεσμάτων 10-13 cm. Η επίτευξη μικρού και ομοιόμορφου πορώδους δεν εξαρτάται μόνο από το επιβαλλόμενο φορτίο, αλλά και από την ίση κατανομή των διατμητικών τάσεων μέσα σε όλο το συμπίεσμα. Στην περίπτωση των σύνθετων γεωμετρικών αντικειμένων απαιτούν:

- προσεκτική σχεδίαση των εργαλείων
- διαφορετικές κινήσεις κατά την συμπίεση, ώστε να εξασφαλίζεται

ομοιόμορφη πυκνότητα σε όλο το συμπίεσμα [1].

4.1.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Στην στατική μονοαξονική συμπίεση η κόνη ή το μείγμα των κόνεων τοποθετείται μέσα σε κατάλληλες μήτρες, όπου συμπιέζεται με την χρήση πρεσών, για την παραγωγή ομοιογενούς συμπιέσματος (βλέπε Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Στατική μονοαξονική συμπίεση

Η διαδικασία της συμπίεσης πραγματοποιείται στις ακόλουθες φάσεις:

α) Μεταβατική φάση, όπου γίνεται η διακίνηση, ανακατάταξη και σύμπλεξη των κόκκων των κόνεων μεταξύ τους.

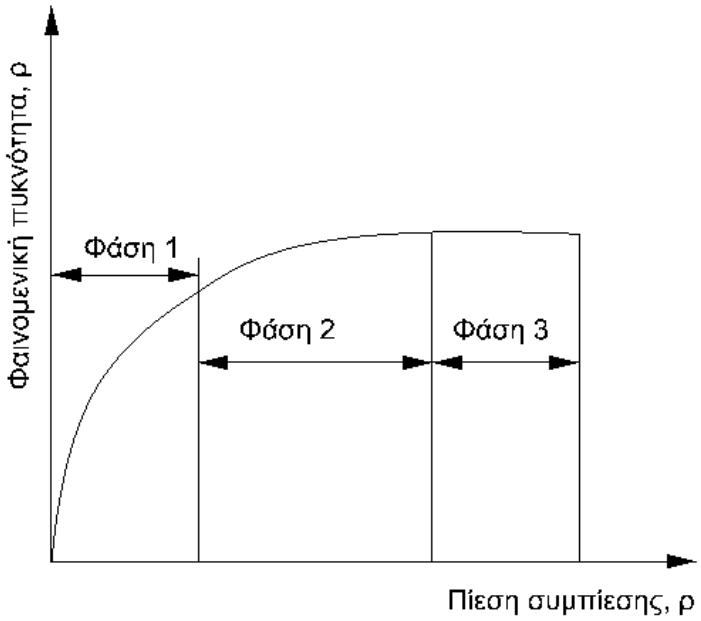
β) Πλαστική παραμόρφωση των κόκκων, όπου ο κενός χώρος μεταξύ των κόκκων μειώνεται. Η πλαστική παραμόρφωση κατά την συμπίεση περιγράφεται με σχετική ακρίβεια από το τύπο

$$\ln\left(\frac{\rho_o}{\rho_o - \rho}\right) = \mathrm{K}_1 p + K_2 \qquad (4.2)$$

όπου ρ_o είναι η πυκνότητα των κόκκων (πυκνότητα του στερεού υλικού), ρ είναι η φαινομενική πυκνότητα του συμπιέσματος, p είναι η πίεση συμπίεσης και K_1, K_2 σταθερές.

γ) Ψυχρή κατεργασία με ή χωρίς μοριακή θραύση

Το Σχήμα 3.5, απεικονίζει το διάγραμμα μεταξύ της επιβαλλόμενης πίεσης και της κόνης του συμπιέσματος για την συμπίεση, σ' όλες τις φάσεις της συμπίεσης [1].



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα στατικής συμπίεσης κόνης, **Φάση 1:** Μεταβατική φάση, **Φάση 2:** Πλαστική παραμόρφωση κόκκων, **Φάση 3:** Ψυχρή κατεργασία με ή χωρίς μοριακή θραύση

4.1.2 ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

Η πυροσυσσωμάτωση είναι μια θερμική κατεργασία, η οποία γίνεται μετά την συμπίεση της κόνης. Η πύρωση του συμπιέσματος γίνεται μέσα σε κλίβανο με προστατευτική ατμόσφαιρα (αναγωγική ατμόσφαιρα υδρογόνου ή CO) σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης (1300°-1500° C).

Στο τέλος της διεργασίας παρατηρείται ισχυροποίηση των μεταλλουργικών συνδέσεων μεταξύ των κόκκων της κόνης και μικρή αύξηση της φαινομενικής πυκνότητας [1].

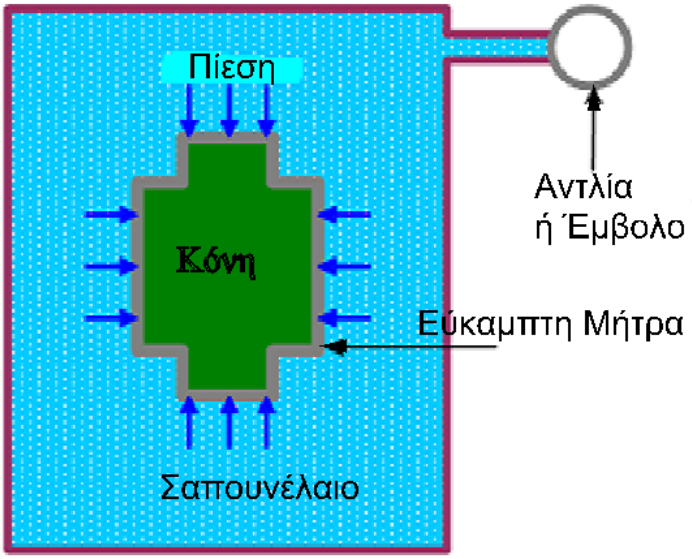
4.1.3 ΙΣΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Άλλη μέθοδος στατικής συμπίεσης κόνεων είναι, η ισοστατική συμπίεση. Στην μέθοδο αυτή η κόνη τοποθετείται και ασφαλίζεται σε μια εύκαμπτη μήτρα, ώστε να εξασφαλίζεται η στεγάνωσή της. Γύρω από την μήτρα εφαρμόζεται υδροστατική πίεση.

Οι παραλλαγές της κατεργασίας είναι :

- Ψυχρή Ισοστατική συμπίεση (CIP)
- Θερμή Ισοστατική συμπίεση (HIP)

Στην CIP, η πίεση εφαρμόζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με μέσο διάδοσης της πίεσης ένα υγρό (π.χ. σαπουνέλαιο) και η συμπίεση πραγματοποιείται από ένα έμβολο ή ένα σύστημα αντλιών (βλέπε Σχήμα 4.3). Οι πιέσεις κυμαίνονται συνήθως 70-100 MPa. Επιπλέον με την μέθοδο αυτή παράγονται πιο σύνθετα και μεγάλα αντικείμενα σε σχέση με την συμβατική συμπίεση σε μήτρα [1]



Σχήμα 4.3: Ψυχρή Ισοστατική Συμπίεση Κόνης

Στην HIP, η πίεση εφαρμόζεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από του περιβάλλοντος. Η επίτευξη της πλήρους θεωρητικής φαινομενικής πυκνότητας του συμπιέσματος επιτυγχάνεται με μια ταυτόχρονη συμπίεση και πυροσυσσωμάτωση σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (π.χ. αργό) μέσα σε ένα δοχείο πίεσης εφοδιασμένο με θερμαντικά στοιχεία, όπως μολυβδαίνιο, νικελοχρώμιο. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι στη συμπίεση η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη σε σχέση με της πυροσυσσωμάτωσης, με αποτέλεσμα τον καλύτερο έλεγχο πολλών χαρακτηριστικών της δομής του υλικού, όπως η αύξηση των κόκκων σε ταχυχάλυβες [1]

4.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Η δυναμική συμπίεση κόνεων αποτελεί εφαρμογή των κρουστικών κυμάτων για συμπίεση κεραμικών και μεταλλικών κόνεων στην κατασκευή συμπαγών υλικών και πραγματοποιείται για ογκομετρική ταχύτητα συμπίεσης R' >$10\,\mathrm{sec}^{-1}$.

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεταλλικές και κεραμικές κόνες, και χρησιμοποιείται στην κατασκευή απλών γεωμετριών όπως συμπαγών συμπιεσμάτων με τη μορφή δίσκων, πλακών, κυλίνδρων, σωλήνων και κώνων.

Καθώς το κρουστικό κύμα διαδίδεται μέσο του πορώδους, η συμπίεση επιτυγχάνεται με ένα ή και τους δύο παρακάτω παράγοντες:

- Πλαστική παραμόρφωση και κρούση υψηλής ταχύτητας των σωματιδίων, γέμισμα των διακένων, θραύση των επιφανειών, που οδηγεί σε θέρμανση και τήξη του υλικού της επιφάνειας των σωματιδίων και επακολουθεί η συγκόλληση (κυρίως για μέταλλα)
- Θραύση των σωματιδίων, γέμισμα των διακένων, σχηματισμός νέων διεπιφανειών, θέρμανση της επιφάνειας των σωματιδίων, που οδηγεί σε μερική τήξη και συγκόλληση ή σύνδεση λόγω διάχυσης στερεάς κατάστασης (κυρίως για κεραμικά)

Η δυναμική συμπίεση κόνεων άρχισε να εφαρμόζεται το 1950, και ο λόγος που προτιμάται είναι:

- Ομοιόμορφη πυκνότητα υλικού
- Βελτιωμένη αντοχή
- Χαμηλότερες δυνάμεις εξόλκευσης από τις μήτρες
- Αυξημένος ρυθμός παραγωγής

Οι δυο κύριες μέθοδοι δυναμικής συμπίεσης είναι:

1) Μονοαξονική Συμπίεση (Μεταλλικές κόνες)
2) Ισοδυναμική Συμπίεση

Η μονοαξονική δυναμική συμπίεση κόνης σε μεταλλική μήτρα χρησιμοποιεί πνευματικές ή μηχανικές πρέσσες με κρουστικές ταχύτητες εμβόλου 18 m/sec, με την ογκομετρική ταχύτητα συμπίεσης R' να είναι 10-100 sec^{-1}. Το συμπίεσμα από κόνη σιδήρου, αποκτά φαινόμενη πυκνότητα μεγαλύτερη του 90%, και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή και χαμηλότερη ηλεκτρική αντίσταση από συμπιέσματα που παράγονται με μονοαξονική στατική συμπίεση. Βαλλιστικές πρέσες μονοαξονικής συμπίεσης με R' 100-500 sec^{-1} έχουν φτάσει την πυκνότητα της κόνης του τιτανίου μεγαλύτερη των 95% της φαινομενικής πυκνότητας. Χρησιμοποιείται σε μεταλλικές κόνες γιατί οι πιέσεις που αναπτύσσονται δεν είναι αρκετά μεγάλες για να επιτευχθεί η κρουστική συμπίεση κεραμικών κόνεων.

4.2.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Στην ισοδυναμική δυναμική συμπίεση κόνης, η κρουστική πίεση εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες της μάζας της κόνης, που είναι τοποθετημένη σε μια εύκαμπτη μήτρα στο δοχείο πίεσης. Η εύκαμπτη μήτρα μπορεί να υφίσταται ένα από τις κάτωθι μεθόδους:

- Κρουστική ισοδυναμική συμπίεση

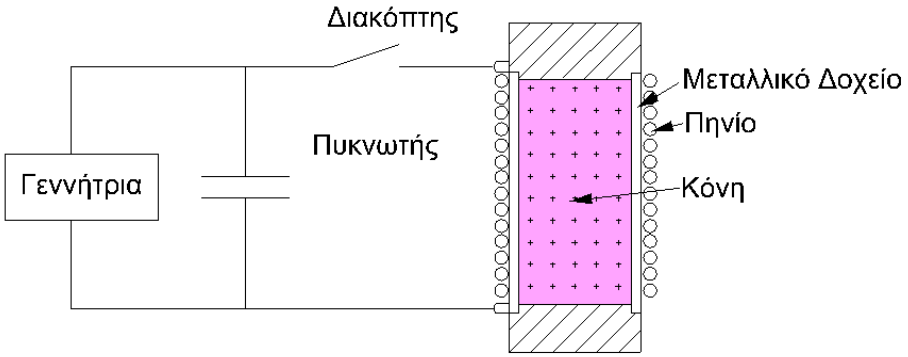
- Ηλεκτρομαγνητική Ισοδυναμική συμπίεση
- Εκρηκτική Ισοδυναμική συμπίεση

4.2.1.1 ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Την κρουστική ισοδυναμική συμπίεση, η μήτρα υφίστανται την κρουστική πίεση από μια υδροδυναμική πρέσα με R'=10-100 sec^{-1}. Η οδήγηση του εμβόλου για την συμπίεση γίνεται με εκτόνωση μικρής ποσότητας εκρηκτικής ύλης βραδείας εκτόνωσης. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην συμπίεση κεραμικών υλικών. Πειραματικά αποτελέσματα για την συμπίεση κόνης σιδήρου έδειξαν ότι για την επίτευξη μιας φαινόμενης πυκνότητας του συμπιέσματος απαιτούνται μεγαλύτερες πιέσεις στην ισοδυναμική συμπίεση από την αντίστοιχη ισοστατική [7].

4.2.1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Στην ηλεκτρομαγνητική ισοδυναμική συμπίεση, το απαραίτητο φορτίο για την συμπίεση προέρχεται από ένα μεγάλης έντασης μαγνητικό πεδίο, που παράγεται από την εκφόρτιση ενός πυκνωτή μέσω ενός πηνίου (βλέπε Σχήμα 4.4). Η αποτελεσματικότητα της διαμόρφωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αγωγιμότητα του κατεργάσιμου υλικού [1].



Σχήμα 4.4: Αρχή λειτουργίας της Ηλεκτρομαγνητικής Ισοδυναμικής Συμπίεσης

4.3 ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Η χρήση των εκρηκτικών υλών για τη μορφοποίηση μετάλλων πραγματοποιείται επιτυχώς για πάνω από 100 χρόνια, και ιδιαιτέρως μετά τη δεκαετία του 60', κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία [12].Η εκτόνωση ισχυρών εκρηκτικών υλικών μπορεί να προκαλέσει υψηλές κρουστικές πιέσεις έως 900 GPa, χρονικής διάρκειας λίγων μικροδευτερολέπτων. Το ακριβές μέγεθος και η διάρκεια του παλμού εξαρτώνται από τον τύπο και το ποσό του εκρηκτικού υλικού.

Στη δεκαετία του 60', όπου γίνονταν οι πρώτες προσπάθειες συμπίεσης κόνεων με εκρηκτικές ύλες χρησιμοποιούσαν μονές πρέσες ή διπλά πιστόνια, που επιτυγχάνονταν με τη έκρηξη. Κύριο μειονέκτημα ήταν η δυσκολία ανάκτησης του συμπιέσματος από την μεταλλική μήτρα, εξαιτίας της μη σωστής ευθυγράμμισης των πιστονιών σε σχέση με τον άξονα της μήτρας και της χρονικής διαφοράς της εκτόνωσης της έκρηξης. Λόγο του παραπάνω προβλήματος, η μέθοδος διαφοροποιήθηκε και μετατράπηκε από άμεση σε έμμεση μέθοδος εκρηκτικής συμπίεσης, με ένα μεταλλικό σωλήνα όπου στο εσωτερικό του περιέχει την κόνη, και στο εξωτερικό του περιβάλλεται από την εκρηκτική ύλη . Το ύψος της εκρηκτικής ύλης είναι λίγο μεγαλύτερο από του μεταλλικού σωλήνα. Μετά την εκτόνωση της έκρηξης, το κρουστικό κύμα διαδίδεται αξονικά του μεταλλικού σωλήνα, με αποτέλεσμα να συμπιέζεται με ακτινική διεύθυνση [7].

Στην εκρηκτική συμπίεση, η εκρηκτική ενέργεια μεταφέρεται στις επιφάνειες των σωματιδίων με αποτέλεσμα την τοπική πλαστική παραμόρφωση, τη θέρμανση και την τοπική τήξη ενός μικρού μέρους του υλικού στην επιφάνεια των κόκκων. Έπειτα πραγματοποιούνται οι θραύσεις των κόκκων (στα σκληρά και ψαθυρά υλικά), καθαρισμός και έκθεση νέων επιφανειών με αποτέλεσμα την μερική τήξη και συγκόλληση ή ακόμα και την ενδοκρύσταλλική σύνδεση στερεάς κατάστασης. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας το υλικό να λειώνει επιφανειακά, ενώ το εσωτερικό παραμένει σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία. Η εκρηκτική ύλη λειτουργεί σαν μια πανίσχυρη πρέσα που κινείται με πολύ υψηλή ταχύτητα, αναγκάζοντας την συμπίεση των κόκκων. Η επιφάνεια των κόκκων λειώνει, μετά από λίγο στερεοποιούνται και συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας συμπαγή στερεά. Για υλικά όπως κράματα, κεραμικά και πολυκρυσταλλικό διαμάντι, η εκρηκτική συμπίεση είναι η καλύτερη μέθοδος.

Στην εκρηκτική συμπίεση το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απελευθερώνεται στα όρια των κόκκων και η συμπύκνωση γίνεται κυρίως λόγω της πίεσης και λιγότερο εξαιτίας της θερμοκρασίας. Γι’ αυτό η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως ψυχρή κατεργασία. Μεγάλη ποικιλία

υλικών μπορούν να συμπιεστούν και να διατηρήσουν τις φυσικές τους ιδιότητες. Πχ. Τα κεραμικά υλικά μπορούν να συμπυκνωθούν μέχρι 85-95% της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας τους. Τα σύνθετα κεραμικά και μεταλλικά υλικά μπορούν να συμπιεστούν πλήρως σε μεταλλική μήτρα.

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική μέθοδος για την συμπύκνωση πλαστικών, κεραμικών και μεταλλικών κόνεων, καθώς και συνδυασμούς τους. Επίσης η μέθοδος παρουσιάζει ενδιαφέρον και για την συμπίεση κεραμικών με ισχυρούς δεσμούς, γιατί η εσωτερική τους ισχύη παραμένει ανεπηρέαστη.

Η εκρηκτική συμπίεση, σε σχέση σε τις συμβατικές μεθόδους είναι αρκετά οικονομικότερη, γιατί δεν έχουμε το κόστος των ακριβών μηχανημάτων, ούτε τον περιορισμό του μέγεθους των προϊόντων. Επίσης έχουμε και πολύ γρηγορότερους χρόνους κατεργασίας. Η συμπίεσης συνηθίζεται στο σίδηρο (Fe), νικέλιο (Ni), χαλκό (Cu).

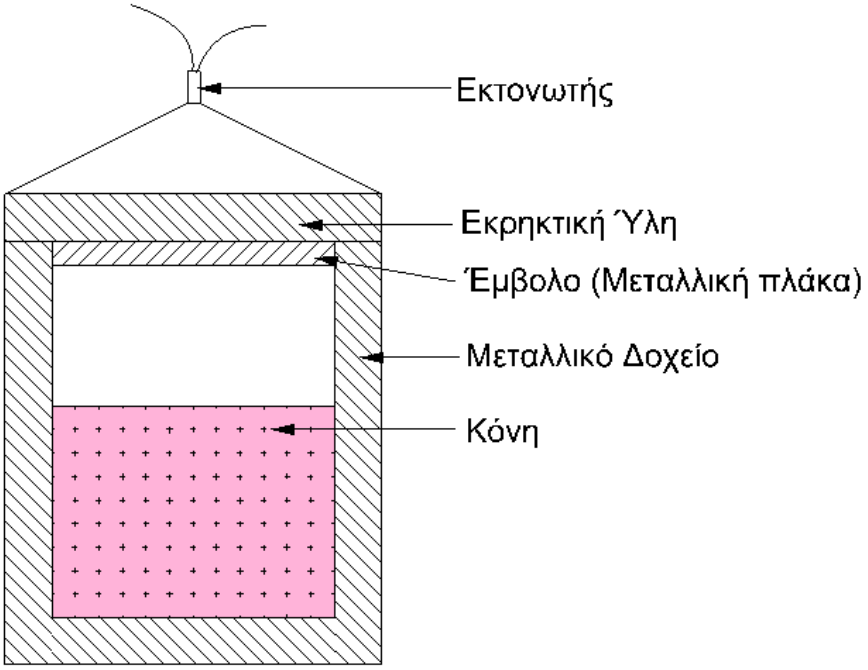
Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί και για μορφοποίηση υπεραγώγιμων προϊόντων συμπαγούς μορφής . Η εκτόνωση της εκρηκτικής ύλης οδηγεί σε κρουστικά κύματα μεγάλης πίεσης, η οποία προκαλεί και ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από τα όρια των προς συμπίεση κόκκων. Η τοπική αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, οδηγεί σε θραύση, καθώς και σύνδεση των υπεραγώγιμων κόκκων και η δραστική μείωση του πορώδους με αποτέλεσμα την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού [7].

4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

4.4.1 ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Σε μεγάλες ογκομετρικές ταχύτητες συμπίεσης ($R'=10^3$-10^4 sec^{-1}), χρησιμοποιείται η εκρηκτική μονοαξονική συμπίεση, όπου σε ειδικές πρέσες, η μεταλλική πλάκα επιταχύνεται με εκτόνωση εκρηκτικής ύλης και προσπίπτει με κρουστική ταχύτητα στην κόνη (βλέπε Σχήμα 4.5). Οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι τις τάξεις των 100 GPa και παράγονται συμπιέσματα των οποίων η φαινόμενη πυκνότητα και σκληρότητα είναι μεγαλύτερες στα δυο άκρα του δοκιμίου (στις επιφάνειες επαφής με το έμβολο και την πλάκα στερέωσης). Αυτό οφείλεται σε φαινόμενα

διάδοσης, ανάκλασης και απορρόφησης των κρουστικών κυμάτων και καταστροφής του πορώδους μέσα στο συμπίεσμα, καθώς και στις ανακλάσεις των κρουστικών κυμάτων στα τοιχώματα του μεταλλικού δοχείου, οπού είναι τοποθετημένη η κόνη [1].

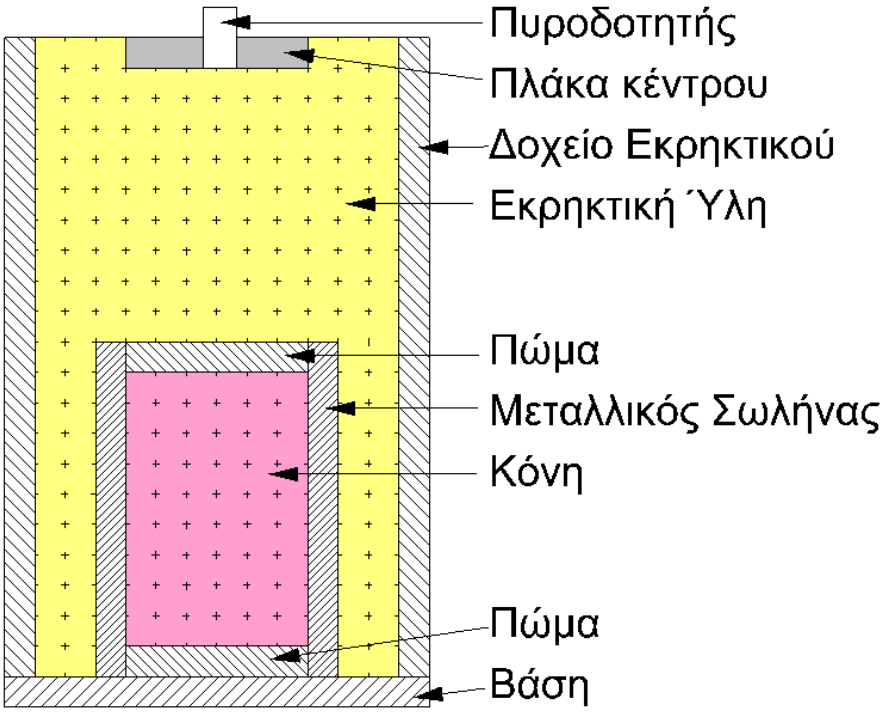


Σχήμα 4.5: Αρχή Λειτουργίας της εκρηκτικής μονοαξονικής συμπίεσης

4.4.2 ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Για την εκρηκτική ισοδυναμική συμπίεση χρησιμοποιούνται κεραμικές και μεταλλικές κόνες με συνήθη γεωμετρία την κυλινδρική. Οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι της τάξης των 10^3-10^4 sec^{-1}. Ο μεταλλικός κοίλος σωλήνας, στον οποίον εμπεριέχεται μέσα η κόνη, περιβάλλεται από την εκρηκτική ύλη. Τα κρουστικά κύματα που παράγονται διαδίδονται κατά μήκος του μεταλλικού σωλήνα, με αποτέλεσμα την κατάρρευση του και την συμπίεση της κόνης. Ο κρουστικό παλμός από το εκρηκτικό προκαλεί απότομη επιτάχυνση των τοιχωμάτων του σωλήνα προς τον άξονά του.

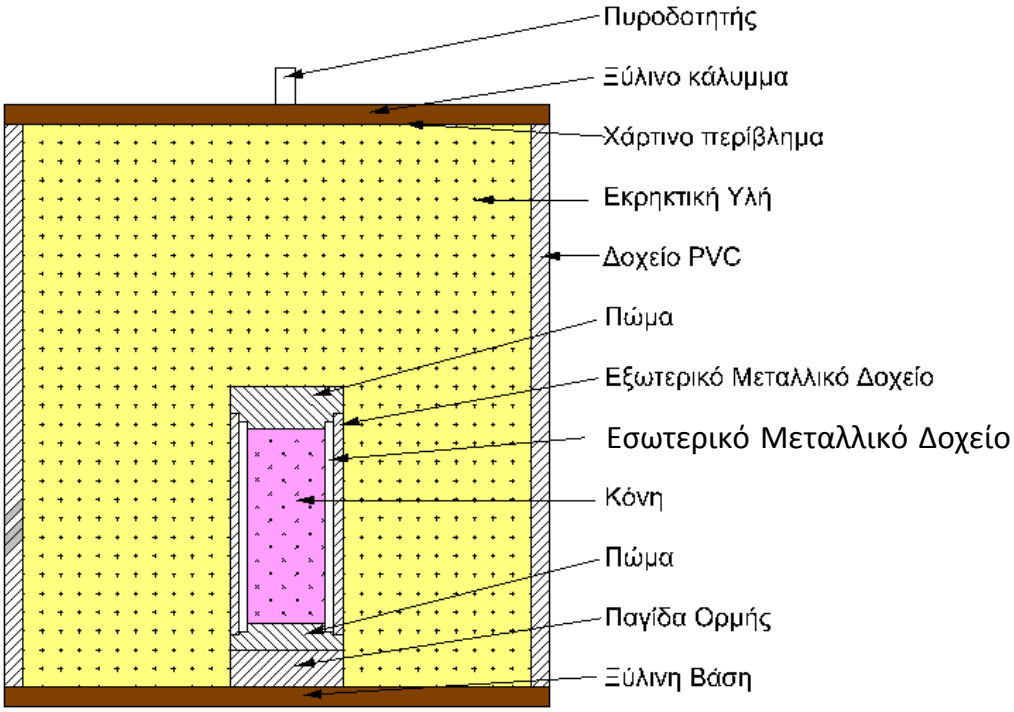
Τα σωματίδια της κόνης, που βρίσκονται σε επαφή με τα τοιχώματα, θα επιταχυνθούν προς το κέντρο, προκαλώντας κρούσεις με τα γειτονικά σωματίδια. Αυτό δημιουργεί ενδοσωματιδιακή διάτμηση (shearing) και θραύσεις των κόκκων. Οι καινούργιες επιφάνειες συγκολλούνται μεταξύ τους και μειώνονται τα διάκενα των κόκκων. Η κινούμενη μάζα του υποδοχέα και τα συμπιεσμένα σωματίδια της κόνης επιβραδύνονται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα και της απορρόφησης ενέργειας από την κατάρρευση των διακένων και τη συγκόλληση των κόκκων. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η μάζα του συμπιέσματος τόσο μειώνεται η ταχύτητά του. Η διεργασία της συμπίεσης τελειώνει όταν η ταχύτητα του σωλήνα και της κόνης μηδενιστεί. Η μέθοδος ονομάζεται εκρηκτική συμπίεση μονού σωλήνα (single tube), (βλέπε Σχήμα 4.6) [1].



Σχήμα 4.6: Αρχή λειτουργίας της εκρηκτικής ισοδυναμικής συμπίεσης μονού σωλήνα

Στην εκρηκτική συμπίεση διπλού σωλήνα (double tube), η διάταξη αποτελείται από ένα επιπλέον σωλήνα, σε σχέση με την μέθοδο της συμπίεσης του μονού σωλήνα, τον εξωτερικό. Ο εξωτερικός έρχεται σε επαφή με το εκρηκτικό και τον εσωτερικό σωλήνα (βλέπε Σχήμα 4.7). Την στιγμή της έκρηξης ο εξωτερικός σωλήνας επιταχύνεται στον εσωτερικό με αποτέλεσμα την

συμπίεση της κόνης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η χρήση εκρηκτικών μικρών ταχύτητων εκτόνωσης, τα οποία μειώνουν την εμφάνιση ρωγμών. Χρησιμοποιείται για την συμπίεση κόνεων με μεγάλη σκληρότητα όπως κράματα νικελίου, τιτανίου και αλουμινίου-λιθίου [7, 10].



Σχήμα 4.7: Αρχή λειτουργίας της εκρηκτικής ισοδυναμικής συμπίεσης διπλού σωλήνα

Μεγάλη ακρίβεια απαιτείται στην χρησιμοποιούμενη ποσότητα του εκρηκτικού.

Μικρή ποσότητα έχει σαν αποτέλεσμα τη συμπίεση της κόνης μόνο στην επιφάνεια επαφής της με το μεταλλικό δοχείο, διότι στα φορτία επικρατούν φαινόμενα απορρόφησης του τασικού παλμού με αποτέλεσμα την μη συμπίεση στην κεντρική περιοχή του σωλήνα.

Μεγαλύτερη ποσότητα δημιουργεί μεγάλο αριθμό ακτινικών ρωγμών ή ακόμα και την θραύση του δοκιμίου. Στην περίπτωση αυτή η κόνη διέρχεται σε δύο φάσεις:

- Στην πρώτη γίνεται ανακατάταξη της κόνης και η καταστροφή των διακένων του συμπιέσματος, ώστε στο τέλος της φάσης αυτής το χωρίς πόρους συμπαγές συμπίεσμα συμπεριφέρεται σαν συμπαγή ράβδος.

- Στην δεύτερη φάση, οι κόκκοι του συμπιέσματος δεν μπορούν να μετακινηθούν και το συμπίεσμα υπόκειται σε ελαστική θλίψη, με την ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται να ελευθερώνεται, καθώς η πίεση ελαττώνεται.

Με την μέθοδο της εκρηκτικής ισοδυναμικής συμπίεσης, επιτυγχάνονται συμπιέσματα με αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό, κατά 30%, σε σύγκριση με στατικές μεθόδους [7].

5. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ

5.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ

Οι εκρηκτικές ύλες αποτελούνται από δύο ή περισσότερες χημικές ουσίες:

- την καύσιμη ύλη, δηλ. ουσία ελλιπής σε οξυγόνο (κυρίως ανθρακούχος)

- την οξειδωτική ουσία όπου συνήθως είναι κάποιο νιτρικό άλας (π.χ. NH_4NO_3, KNO_3, $NaNO_3$), με αποτέλεσμα η εκρηκτική ύλη να είναι αυτάρκης σε οξυγόνο.

Οι εκρηκτικές ύλες αποτελούνται από άτομα άνθρακα (C), υδρογόνου (H), οξυγόνου (O), και αζώτου (N) με προσθήκες άλλων στοιχειών. Μερικές εκρηκτικές ύλες όπως το PETN, το RDX και το TNT αποτελούνται από μια μόνο χημική ουσία, η οποία παρέχει και το κατάλληλο οξυγόνο για την αντίδραση. Επίσης υπάρχουν και εκρηκτικές ύλες οι οποίες περιέχουν και αργίλιο (Al), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) κτλ. στον πίνακα 5.1 μας δίνονται πληροφορίες με τις πιο συνηθισμένες ουσίες και στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την παραγωγή εκρηκτικών υλών [13].

Πίνακας 5.1: Οι κυριότερες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή των εκρηκτικών υλών

Χημική ουσία	**Χημική σύσταση**	**Ρόλος στην παρασκευή εκρηκτικών υλών**
Νιτρογλυκόλη (EGDN)	$C_2H_4(NO_3)_2$	Εκρηκτική ουσία
Νιτροκυτταρίνη	$[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n$	Εκρηκτική ουσία
Νιτρογλυκερίνη	$C_3H_5(N0_3)_2$	Εκρηκτική ουσία
Τρινιτροτολουόλιο (TNT)	$C_7H_5(NO_2)_3$	Εκρηκτική ουσία
Πεντρίτης (PETN)	$C_5H_8(N0_3)_4$	Εκρηκτική ουσία

Στυφνικός μόλυβδος	$C_6HN_30_8Pb$	Εκρηκτική ουσία
Κυκλωνίτης (RDX)	$C_3H_6N_6O_6$	Εκρηκτική ουσία
Νιτρικό αμμώνιο	NH_4NO_3	Φορέας οξυγόνου
Νιτρικό κάλιο	KNO_3	Φορέας οξυγόνου
Νιτρικό νάτριο	$NaNO_3$	Φορέας οξυγόνου
Νιτρικό ασβέστιο	$Ca(N0_3)_2$	Φορέας οξυγόνου
Πετρέλαιο	$(CH_3)_2\,(CH_2)_n$	Καύσιμο
Παραφίνη	C_9H_{2n+2}	Καύσιμο
Άνθρακας	C	Καύσιμο
Θείο	S	Καύσιμο
Οξείδιο του ψευδαργύρου	ZnO	Ουδέτερη ουσία
Ανθρακικό ασβέστιο	$CaC0_3$	Ουδέτερη ουσία
Νερό	H_2O	Ουδέτερη ουσία

5.2 ΕΝΑΥΣΗ-ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ

Έναυση ονομάζεται ο τρόπος με τον οποίο προκαλείται η έναρξη της εκρήξεως σε μια εκρηκτική ύλη υπό συνθήκες απόλυτου έλεγχου. Η έναυση προκαλείται με:

1) Θερμική παρέμβαση (φλόγα, διέλευση ρεύματος σε ηλεκτρική αντίσταση, τριβή)

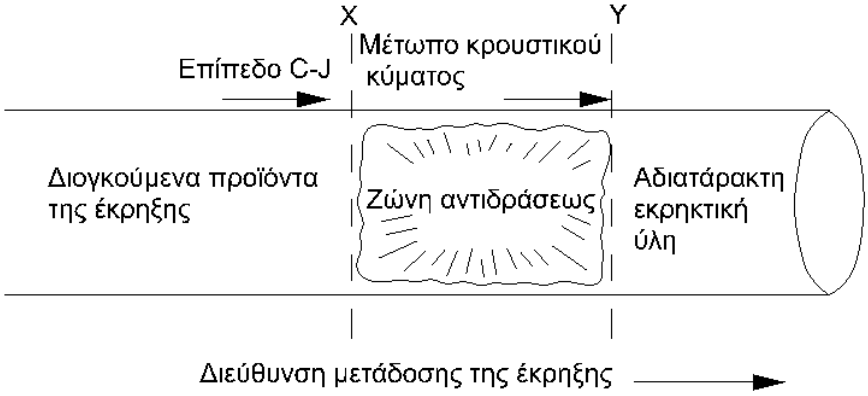
2) Κρουστική παρέμβαση (π.χ. κρούση)

Αυτό γίνεται λόγω του ότι μερικές εκρηκτικές ύλες απαιτούν ασθενή πηγή ενέργειας για να εναυφθούν, όπως μια κρούση, και άλλες ένα ισχυρό κρουστικό κύμα, που παρέχεται από μια μικρή ποσότητα άλλης εκρηκτικής ύλης. Όσο ισχυρότερο είναι το απαιτούμενο κρουστικό κύμα

για την έναυση, τόσο ασφαλέστερη είναι η υπόψη εκρηκτική ύλη από πλευράς χειρισμών αλλά πιο δαπανηρός ο τρόπος εναύσεώς της [13].

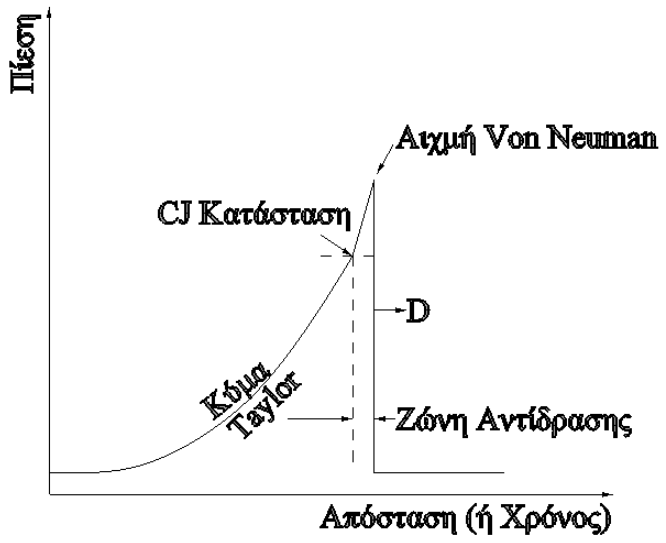
5.3 ΔΟΜΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Το κύμα εκτόνωσης είναι ένας κρουστικός παλμός ενός εκρηκτικού υλικού και η χημική αντίδραση πραγματοποιείται στο κρουστικό μέτωπο. Αυτή η χημική αντίδραση προσθέτει συνεχώς ενέργεια στον κρουστικό παλμό και αντισταθμίζει την ενέργεια που χάνεται, παράγοντας συνεχώς προϊόντα εκτόνωσης σε κατάσταση υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (βλέπε Σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1: Δομή του Εκρηκτικού Κύματος

Όταν η ενέργεια που προστίθεται στο κρουστικό μέτωπο από την χημική αντίδραση είναι σε ισορροπία με την ενέργεια που χάνεται από το έργο και την εκτόνωση των αεριών προϊόντων, το κύμα επιταχύνεται με μια σταθερή ταχύτητα D (ονομαζόμενο ως «εκτόνωση σταθερής κατάστασης»).Το κύμα εκτόνωσης και σταθερής κατάστασης δεν εξασθενεί. Τα μεγέθη διατηρούνται σε όλη τη διαδικασία της εκτόνωσης, μέχρι να καταναλωθεί όλο το εκρηκτικό υλικό [13].



Σχήμα 5.2: Κατανομή της πίεσης μέσα στην περιοχή του εκρηκτικού κύματος

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.2, το μέτωπο του κύματος διαδίδεται με ταχύτητα εκτόνωσης D. Πίσω από το μέτωπο υπάρχει η ζώνη αντίδρασης, πάχους t. Η κορυφή του μετώπου, αποκαλούμενη ως «κορυφή Von Neumann», αποτελεί την αρχή της ζώνης εκρηκτικής αντίδρασης. Στην ζώνη αντίδρασης πραγματοποιείται όλη η χημικά αντίδραση, η χημική ενέργεια (θερμότητα εκτόνωσης) απελευθερώνεται και το στερεό εκρηκτικό υλικό μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα εκτόνωσης. Το τέλος της ζώνης αντίδρασης, ονομάζεται επίπεδο Chapman-Jouget (C-J) και η κατάσταση του είναι χαρακτηριστική του εκάστοτε εκρηκτικού υλικού σε μια δεδομένη αρχική πυκνότητα. Η εξίσωση της ιδανικής πίεσης Chapman-Jouget:

$$P_{CJ} = \frac{\rho_o D^2}{4} \tag{5.1}$$

Δεδομένης της ταχύτητας εκτόνωσης D, και της πυκνότητας του εκρηκτικού υλικού ρ. Πίσω από το επίπεδο C-J, αέρια προϊόντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας εκτονώνονται με έναν τρόπο που διέπεται από τις οριακές συνθήκες. Η μεταφορά της ενέργειας της πυροδοτούμενης εκρηκτικής ύλης σε ένα υλικό πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης των αερίων. Η μείωση της πίεσης λόγω αυτής της εκτόνωσης ονομάζεται κύμα Taylor. Ο κάτωθεν πίνακας μας δίνει της χαρακτηριστικές ιδιότητες ορισμένων ευρέως διαδεδομένων εκρηκτικών υλικών [7].

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των εκρηκτικών υλών

Εκρηκτική Ύλη	Πυκνότητα, ρ (g/cm^3)	Ταχύτητα Εκτόνωσης, D (km/s)	Πίεση C-J, P_{CJ} (kbar)	Θερμότητα Εκτόνωσης, (kcal/g)
Baratol	2,550	4.87	140	0,72
Composition B-3	1,715	7,89	287	1,4
Composition C-4	1,590	8,04	257	1,4
HMX	1,890	9,11	390	1,48
HNAB	1,600	7,31	205	1,42
HNS	1,590	6,80	200	1,36
NG	1,590	7,65	253	1,48
PBX-9404	1,840	8,80	375	1,42
PBX-9407	1,600	7,91	287	1,46
PENTOLITE(50/50)	1,700	7,53	255	1,40
PETN	1,770	8,26	335	1,51
RDX	1,767	8,70	338	1,48
TACOT	1,610	6,53	181	1,35
TATB	1,880	7,76	291	1,08
TETRYL	1,710	7,85	260	1,45
TNT	1,630	6,93	210	1,29

5.4 ΒΡΑΔΥΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΡΗΚΤΙΚΕΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ

Οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται τόσο στην εξόρυξη πετρωμάτων όσο και στην εκρηκτική διαμόρφωση ή συμπίεση, διακρίνονται σε:

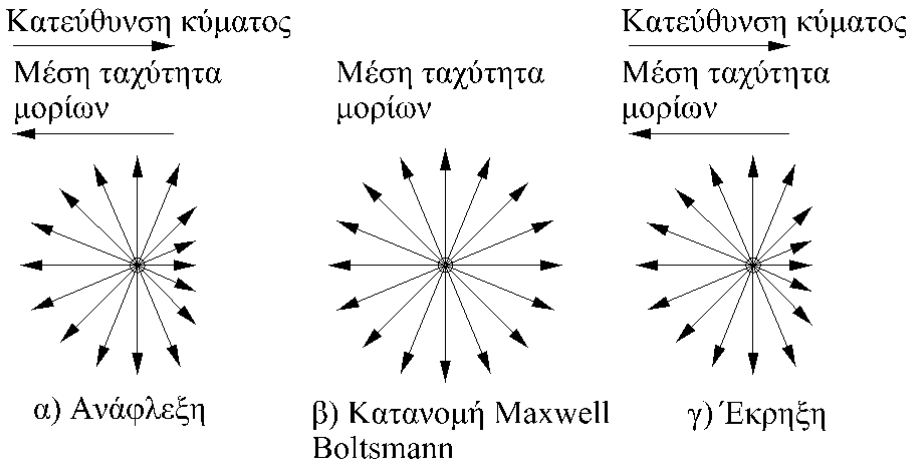
- Βραδυκρουστικές ή ωστικές (low explosive), στις οποίες η διέγερση τους γίνεται με θερμότητα (φλόγα, ερυθροποίηση νήματος ή με τριβή), η οποία προκαλεί την ανάφλεξη τους. Κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι η μαύρη πυρίτιδα (black powder), που πλέον χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές εξορύξεις πετρωμάτων

Σχήμα 5.3: Μαύρη πυρίτιδα

- Διαρρηκτικές (high explosive), στις οποίες η διέγερση προκαλείται με τη διέλευση ενός κρουστικού κύματος και όλη η αντίδραση πραγματοποιείται με υπερηχητική ταχύτητα (3000-8000 m/s) . Οι διαρρηκτικές ύλες διακρίνονται στις:

  α) πρωτογενείς, έναυση με φλόγα πχ. το αζίδιο του μολύβδου

  β) δευτερογενείς, που έχουν ανάγκη κρουστικού κύματος για να γίνει η έναυση πχ. Η νιτρογλυκερίνη, το PETN, το ANFO, το TNT [13]



Σχήμα 5.4: Κίνηση των μορίων στην ζώνη αντίδρασης κατά την **(α)** ανάφλεξη και την **(γ)** έκρηξη σε σύγκριση με ήρεμες συνθήκες **(β).**

5.5 ΙΔΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗ ΕΚΡΗΞΗ

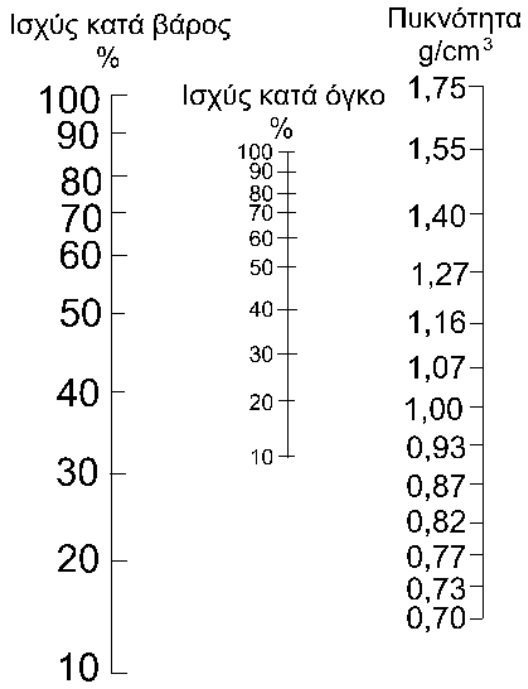
Ιδανική έκρηξη είναι μία έκρηξη στην οποία επιτυγχάνεται ταχύτητα εκρήξεως ίση προς την μέγιστη θεωρητική ταχύτητα αντιδράσεως της υπόψη εκρηκτικής ύλης, θεωρείται σε ότι η όλη αντίδραση έχει ολοκληρωθεί εντός της ζώνης αντιδράσεως.

Μη ιδανική είναι μία έκρηξη στην οποία η ταχύτητα, που επιτυγχάνεται, είναι μικρότερη εκείνης της ιδανικής εκρήξεως [13].

5.6 ΙΣΧΥΣ

Ισχύς είναι η ποσοτικός εκλυόμενη ενέργεια κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης. Η ενέργεια που περιέχει μία εκρηκτική ύλη μπορεί να εκφραστεί κατά μονάδα βάρους ή μονάδα όγκου της εκρηκτικής ύλης.

Η ισχύς κατά βάρος και κατ' όγκο ισχύος εξαρτάται από την πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης που κυμαίνεται μεταξύ 0,80-1,70. Με την βοήθεια του κάτωθεν νομογράμματος γίνεται η μετατροπή της μιας ισχύος στην άλλη, δεδομένης της πυκνότητας [13].



Σχήμα 5.5: Νομόγραμμα μετατροπής της κατά βάρος ισχύος της εκρηκτικής ύλης σε κατά όγκο και αντιστρόφως, δεδομένης της πυκνότητας

5.7 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Κατά την διάρκεια της δυναμικής συμπίεσης, λόγω της διάδοσης του κρουστικού κύματος, τα σωματίδια της κόνης επιταχύνονται στο μεταξύ τους διάκενο με μεγάλη ταχύτητα, και συγκρούονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλες τριβές. Σαν αποτέλεσμα, οι λεπτές επιφανειακές στοιβάδες τήκονται και στη συνέχεια συγκολλούνται μόλις στερεοποιηθούν. Όταν χρησιμοποιούνται ψαθυρά υλικά, οι κόκκοι σπάνε και μειώνονται τα διάκενα μεταξύ τους. Εξαιτίας των υψηλών πιέσεων, μπορεί να δημιουργηθούν διάφορες

πλεγματικές ατέλειες, όπως διαταραχές, διδυμίες κτλ. με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρορωγμών και άλλων ελαττωμάτων.

Τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται κατά την διάδοση των κρουστικών κυμάτων μέσω της κόνης είναι [1]:

- Μικροκινητική ενέργεια (Microkinetic energy), είναι η ενέργεια των σωματιδίων της κόνης που επιταχύνονται στα μεταξύ τους διάκενα, λόγω της διάδοσης του κρουστικού κύματος στο σώμα της κόνης.

- Ενέργεια κατάρρευσης μικροπόρων (void collapse energy), είναι η πλαστική ή βισκοπλαστική κατάρρευση μικροπόρων μεταλλικών κόνεων με συνέπεια την πλήρωση των διακένων μεταξύ των κόκκων.

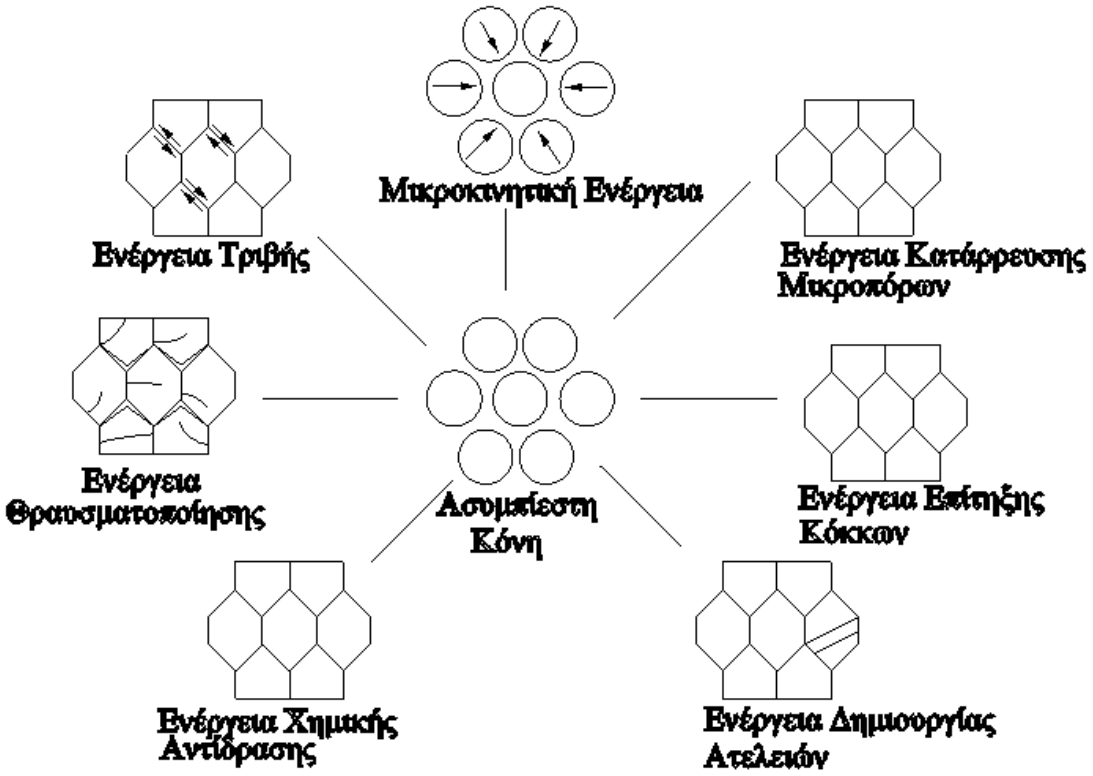
- Ενέργεια επίτηξης κόκκων (melting energy at particle surface), απαιτείται για την τήξη μιας λεπτής επιφανειακής στοιβάδας κόκκων.

- Ενέργεια δημιουργίας ατελειών (defect energy), είναι η ενέργεια δημιουργία πλεγματικών ατελειών, όπως διαταραχές, σημειακές ατέλειες, διδυμίες κτλ.

- Ενέργεια χημικής αντίδρασης (chemical reaction energy), είναι η ενέργεια σχηματισμού χημικών συνθέσεων αντίδρασης και μετασχηματισμού φάσεων στα όρια των κόκκων, λόγω της αναπτυσσόμενης κρουστικής πίεσης και της θερμοκρασίας.

- Ενέργεια θραυσματοποίησης (fragmentation or fracture energy), είναι η ενέργεια που απαιτείται για την θραύση των αρχικών κόκκων ψαθυρών υλικών, πχ. κεραμικών, κατά την κρουστική φόρτιση.

- Ενέργεια τριβής (friction energy), είναι η απελευθέρωση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας στις επιφάνειες επαφής των συμπιεζόμενων κόκκων λόγω τριβής.



Σχήμα 5.6: Κατανομή της ολικής ενέργειας κατά τη διάδοση του κρουστικού κύματος σε κόνη.

5.7.1 ΘΕΡΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο θερμικό μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής συμπίεσης, το οποίο προτάθηκε από τους Schwarz et. al., θεωρούν την εξ' ολοκλήρου μετατροπή της ενέργειας του κρουστικού κύματος σε θερμότητα και ως αποτέλεσμα την τήξη και επαναστερεοποίηση ποσοστού της μάζας του υλικού. Το ποσοστό L του υλικού, που τήκεται κατά την συμπίεση προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$L = \frac{P(V_{op} - V_{os})}{2[C_p(T_f - T_o) + \Delta H_f]} \tag{5.2}$$

όπου P είναι η κρουστική πίεση, V_{op} είναι ο αρχικός όγκος της κόνης, V_{os} είναι ο αρχικός όγκος του συμπαγούς υλικού, C_p είναι ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του υλικού υπό σταθερή πίεση, T_M και T_O οι θερμοκρασίες τήξης και περιβάλλοντος και ΔH_M η λανθάνουσα θερμότητα ή ενθαλπία της τήξης.

Η κρίσιμη χρονική διάρκεια του τασικού παλμού, t_d, προκύπτει από την εξίσωση:

$$t_d = t_s + t_c \tag{5.3}$$

όπου t_s είναι ο χρόνος που απαιτείται για να στερεοποιηθεί το τηγμένο επιφανειακό στρώμα των κόκκων και t_c ο χρόνος απόψυξης του συμπιέσματος, ο οποίος δεν πρέπει να είναι μικρός, έτσι ώστε να αποκτήσει το συμπίεσμα επαρκή δυσθραυστότητα P [1].

5.7.2 ΒΙΣΚΟΠΛΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το βισκοπλαστικό μοντέλο βασίζεται στην ενέργεια κατάρρευσης των διακένων, που προέρχεται από την έντονη πλαστική παραμόρφωση των σωματιδίων. Παίρνεται ως παραδοχή ότι το υλικό της κόνης παρουσιάζει πλαστική ή βισκοπλαστική συμπεριφορά σε μεγάλες παραμορφώσεις. Το μοντέλο περιγράφει επιτυχώς τις μεταλλικές κόνες, και γενικότερα της όλκιμες.

Οι Carroll και Holt ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την περιγραφή της συμπίεσης πορώδων υλικών, βασισμένη στην κατάρρευση μιας κοίλης σφαίρας, η οποία φορτίζεται στην εξωτερική της επιφάνεια με υδροστατική πίεση, P (Σχήμα 5.7 (α)). Η διόγκωση του πορώδους υλικού, θ_o, δηλαδή ο λόγος της πυκνότητας του στερεού υλικού, ρ_s (φαινόμενη πυκνότητα 100%) προς την αρχική πυκνότητα , ρ_{op} του συμπιέσματος.

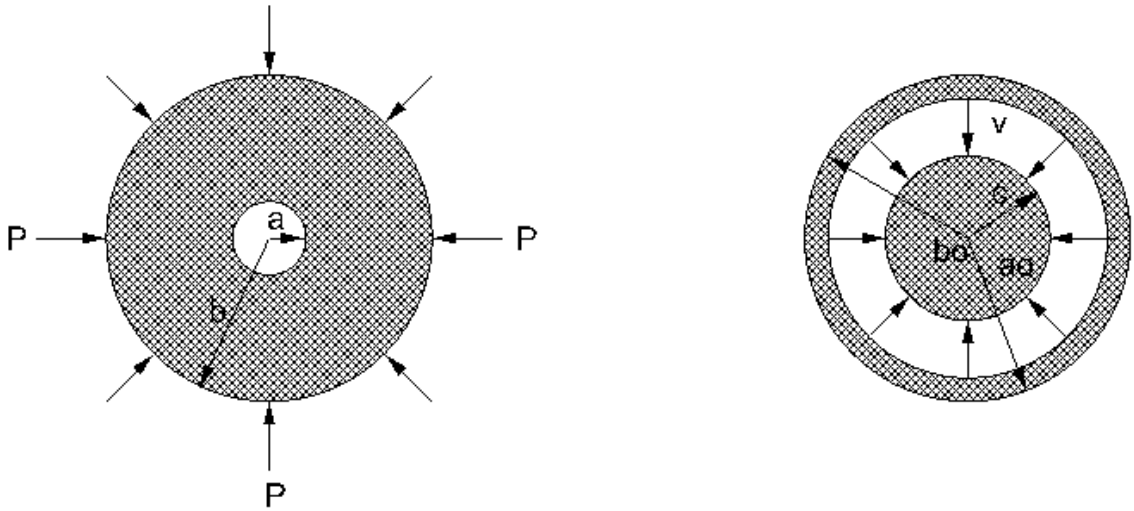
$$\theta_o = \frac{\rho_s}{\rho_{op}} = \frac{b^3}{b^3 - a^3} \tag{5.4}$$

Όπου a είναι η εσωτερική ακτίνα της κοίλης σφαίρας και b η εξωτερικής ακτίνα αντίστοιχα.

Η απαιτούμενη κρουστική πίεση, P για την πλαστική κατάρρευση των μικρο-πόρων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, δίνεται από την εξίσωση:

$$P(T) = 2\int_0^b \left\{ Y\left(1-\frac{T}{T_M}\right) - 6n_M \exp\left[B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_M}\right)\right]\left(\frac{r'}{r}\right)\right\}\frac{dr}{r}$$
$$-\rho_S\left[\left(aa''+2(a')^2\right)\left(1-\frac{a}{b}\right)-\frac{1}{2}(a')^2\left(1-\frac{a^4}{b^4}\right)\right] \qquad (5.5)$$

Όπου Y είναι το όριο διαρροής του υλικού, n_M το ιξώδες του υλικού στη θερμοκρασία τήξης T_M, a' και a" είναι η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της ακτίνας a ως προς το χρόνο.



(α) **(β)**

Σχήμα 5.7: (α)Βισκοπλαστικό μοντέλο κοίλης σφαίρας Carroll-Holt**, (β)** Τροποποιημένο μοντέλο σφαιρικού φλοιού Nesterenko

Το γεωμετρικό μοντέλο Carroll-Holt, τροποποιήθηκε από τον Nesterenko το οποίο περιβάλλεται από ένα σφαιρικό φλοιό, ενώ μεταξύ τους υπάρχει διάκενο. Η εξάλειψη του διακένου γίνεται μέσω της πλαστικής κατάρρευσης του εξωτερικού σφαιρικού φλοιού. Στην περίπτωση των κόνεων η εσωτερική στερεά σφαίρα παραμένει απαραμόρφωτη και το εξωτερικό μέρος των κόκκων παραμορφώνεται πλαστικά. Στον πυρήνα η πλαστική παραμόρφωση είναι σχεδόν αμελητέα [1, 7].

5.8 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Χάρη στη σύγχρονη τεχνολογία είναι εφικτή η μοντελοποίηση της πειραματικής διεργασίας με την χρήση κατάλληλων προγραμμάτων στον υπολογιστή, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν κοντινότερη προσέγγιση στα πειραματικά αποτελέσματα, βάζοντας τα απαιτούμενα δεδομένα. Εκτός από την τελική παραμόρφωση, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις κατανομές τις πίεσης, τις θερμοκρασίας, και της πυκνότητας καθ' όλη τη διάρκεια της έκρηξης, πράγμα που το κάνει πολύ χρήσιμο εργαλείο γιατί από την πειραματική διεργασία είναι αδύνατον να βρεθούν. Ο συνεχής έλεγχος των παραμέτρων και δεδομένων είναι απαραίτητος ώστε να γίνει η καλύτερη προσέγγιση με το πείραμα. Η μοντελοποίηση των μεταλλικών και κεραμικών κόνεων είναι πιο διαδεδομένη στην στατική συμπίεση και λιγότερο στην δυναμική συμπίεση και ιδιαίτερα της εκρηκτικής, καθώς είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι δυναμικές ιδιότητες των κόνεων και οι αντίστοιχες καμπύλες Hugoniot.

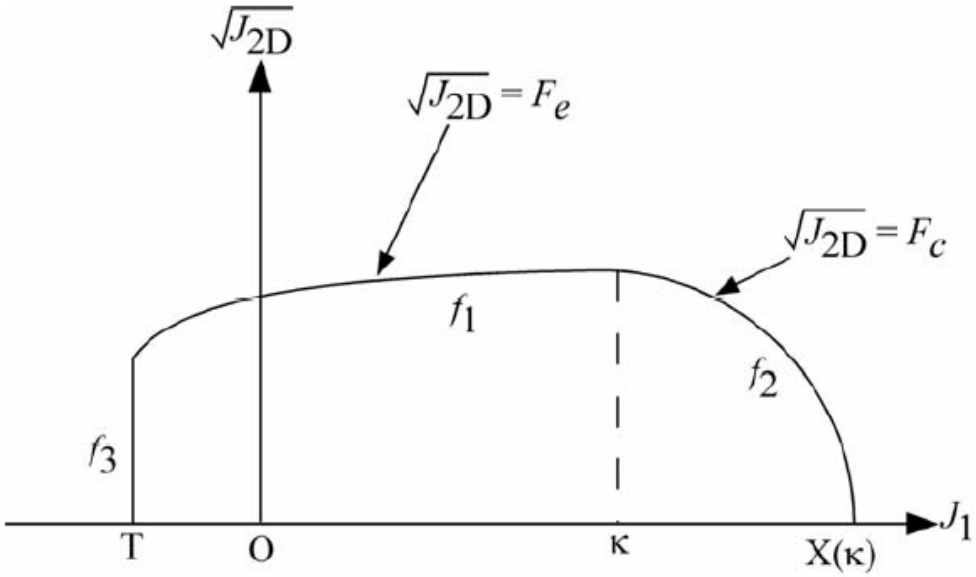
Όσο αναφορά την σχετική προσομοίωση της συμπίεσης, μπορούν να θεωρηθούν:

- η μικρο-μηχανική προσέγγιση όπου εξετάζει την διακριτική φύση των σωματιδίων των κόνεων και το υλικό περιγράφεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι ενδοσωματιδιακές επαφές, το ποσοστό διακένων και η περιοχή επαφής. Η προσέγγιση είναι σφαιρική και δεν μπορεί να εφαρμοστεί για κόνεις που οι κόκκοι τους έχουν δενδρική ή ακανόνιστη μορφή [7].

- η μακρο-μηχανική προσέγγιση είναι βασισμένη στη μηχανική συνεχούς μέσου, η οποία θεωρεί την κόνη ως ομοιογενές συνεχές υλικό που υπόκειται σε μεγάλες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις [7].

5.8.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Το τροποποιημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο Drucker-Prager/cap 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 Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Η επιφάνεια διαρροής του τροποποιημένου ελαστοπλαστικού καταστατικού μοντέλου Drucker-Prager/cap**.**

- η επιφάνεια failure envelope f_1, περιγράφεται από την εξίσωση

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - \min\left(F_e\left(J_1\right), T_{mises}\right) \tag{5.6}$$

Όπου η F_e δίνεται από την εξίσωση

$$F_e\left(J_1\right) \equiv \alpha - \gamma \exp\left(-\beta J_1\right) + \theta J_1 \tag{5.7}$$

και

$$T_{mises} \equiv \left| X(\kappa_n) - L(\kappa_n) \right| \tag{5.8}$$

- η επιφάνεια cap, f_2 ορίζεται από την εξίσωση

$$f_2 = \sqrt{J_{2D}} - F_c(J_1, K) \tag{5.9}$$

Όπου η F_c δίνεται από την εξίσωση

$$F_c(J_1, \kappa) \equiv \frac{1}{R}\sqrt{\left[X(\kappa) - L(\kappa)\right]^2 - \left[J_1 - L(\kappa)\right]^2} \tag{5.10}$$

Το R είναι η αναλογία του πρωτεύοντος προς τον δευτερεύοντα άξονα του τετάρτου της έλλειψης, που καθορίζει τη μορφή της επιφάνειας cap, το Χ(κ) είναι η τομή της επιφάνειας cap με τον άξονα J_1. Η παράμετρος σκλήρυνσης, κ συσχετίζεται με την πλαστική αλλαγή όγκου, $\varepsilon_v^p = \ln(\rho / \rho o)$ μέσου του όγκου σκλήρυνσης, ρ είναι η πυκνότητα στο τρέχων συμπιεσμένο κομμάτι και ρο η αρχική πυκνότητα.

$$\varepsilon_v^p = W\left\{1 - \exp\left[-D\left(X(\kappa) - X_0\right)\right]\right\} \tag{5.11}$$

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

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

$$f_3 \equiv T - J_1 \tag{5.12}$$

όπου Τ, 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 cap και μετά η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση (συμπίεση) αναπτύσσεται βάσει της εξίσωσης κράτυνσης.

Το τροποποιημένο μοντέλο cap 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 ασυμπίεστη κόνη και του D ελέγχει την κλίση της αρχικής καμπύλης φόρτισης κατά την μονοαξονική υδροστατική συμπίεση [1, 7]. Πληροφορίες για την προσαρμογή των πειραματικών μετρήσεων στο μοντέλο cap [14, 16].

5.8.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Στη δυναμική συμπίεση λαμβάνονται υπόψη οι δυναμικές ιδιότητες του υλικού, η ελαστικότητα του υλικού και το καταστατικό μοντέλο να περιλαμβάνει την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας. Τα γνωστότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη δυναμική προσομοίωση είναι του Johnson-Cook και του Steinberg-Guinan.

Για πολύ μεγάλους ρυθμούς παραμορφώσεων (>10^5), χρησιμοποιείται το καταστατικό μοντέλο Steinberg-Guinan. Η τάση διαρροής (yield strength) δίνεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την πίεση, η οποία προκύπτει από μια κατάλληλη αντίστοιχη καταστατική εξίσωση. Το μέτρο διάτμησης G και η τάση διαρροής Y δίνονται από τις εξισώσεις:

$$G = G_O\left[1 + b\frac{P}{n^{1/3}} - h(T - 300)\right] \tag{5.13}$$

και

$$Y = Y_O\left[1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)^n\right]\left[1 + b\frac{P}{n^{1/3}} - h(T - 300)\right] \tag{5.14}$$

Με τον περιορισμό ότι: $Y_0\left[1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)^n\right] \le Y_{\max}$. Όπου n είναι η συμπίεση οριζόμενη ως τον αρχικό σχετικό όγκο V_o προς τον τρέχον V, β και n είναι παράμετροι κράτυνσης

και ε_l είναι η αρχική πλαστική παραμόρφωση . Η πίεση για συμπιεζόμενα υλικά περιγράφεται από την καταστατική εξίσωση Gruneisen ως:

$$p = \frac{\rho_O C^2 \mu \left[1 + (1 - \frac{\gamma_O}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu+1)^2} \right]^2} + (\gamma_O + \alpha\mu)\mathrm{E} \qquad (5.15)$$

Όπου C, S_1, S_2, S_3 είναι οι σταθερές τις εξίσωσης $U_p - U_o$, γ_o η σταθερά Mie-Gruneisen, a διορθωτικός παράγοντας, E η εσωτερική ενέργεια και $\mu = \frac{\rho}{\rho_o} - 1$.

Στον Πίνακα 5.3, δίνονται οι παράμετροι για το καταστατικό μοντέλο διαφόρων υλικών [17].

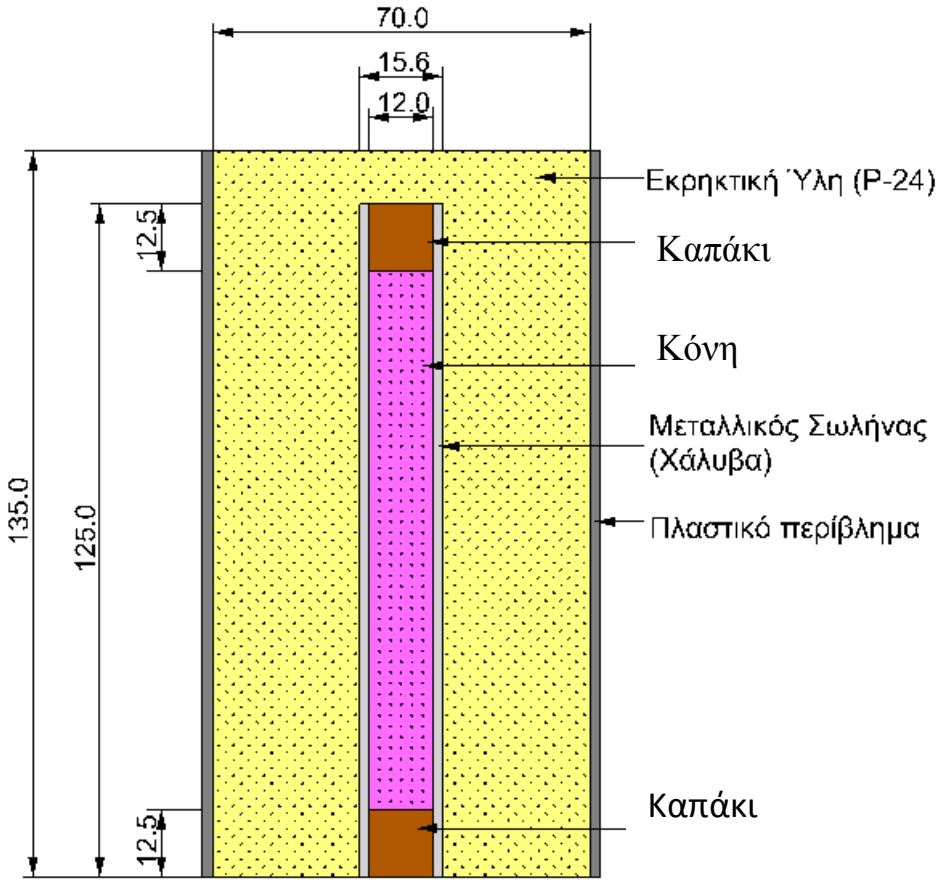
Πίνακας 5.3: Παράμετροι του μοντέλου Steinberg-Guinan για διάφορα υλικά

Υλικό	Go GPa	Y_0 GPa	Y_{max} GPa	β	n	b TPa^{-1}	h KK^{-1}	T_{melt} K	C km/s	S_1	γ_o
Al	27,6	0,29	0,68	125	0,1	65	0,62	1220	5,3	1,34	2,0
Au	28	0,02	0,23	49	0,39	38	0,31	1970	3,1	1,57	2,97
Be	151	0,33	1,23	81	0,22	15,5	0,26	1820	8,0	1,12	1,16
Cu	47,7	0,12	0,64	36	0,45	28	0,38	1790	3,9	1,49	1,99
Mg	16,5	0.19	0,48	1100	0,12	103	0,51	1150	4,5	1,26	1,42
Ni	85,5	0,14	1,2	46	0,53	16	0,33	2330	4,6	1,44	1,93
Steel	77	0,34	2,5	43	0,35	26	0,45	2380	4,6	1,49	2,17
Ti	43,4	0,71	1,45	780	0,07	11,5	0,62	2260	5,2	0,77	1,09

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1 ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Η αξονοσυμμετρική εκρηκτική συμπίεση εφαρμόστηκε για την κατασκευή κυλινδρικών συμπιεσμάτων με μεταλλικό περίβλημα (steel) και πυρήνα κόνης. Στο Σχήμα 6.1 φαίνονται οι γεωμετρικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση πειραμάτων

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα με τις ακόλουθες κόνες:

α) Κόνη Αλουμινίου

β) Κόνη Χαλκού

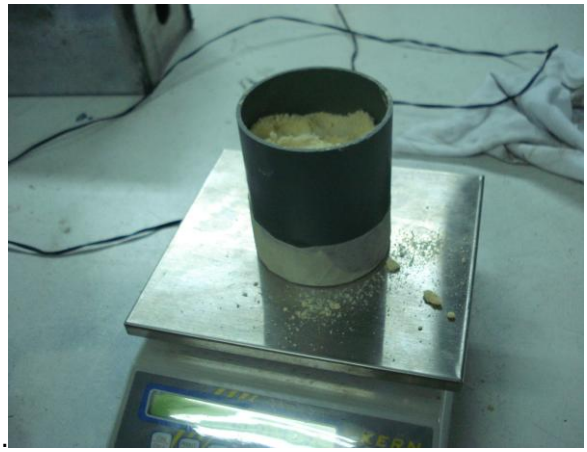
γ) Κόνη Αλουμίνας

δ) Κόνη Καρβιδίου του Τιτανίου με Αλουμίνιο, με αναλογία δύο προς ένα

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

Τοποθέτηση της κόνης μέσα στο σωλήνα του χάλυβα, και συμπίεσης της με τη βοήθεια εμβόλου, για μείωση του πορώδους. Ακριβής ζύγισης όλων των υλικών που λαμβάνουν μέρος στο πείραμα.

Κατόπιν ο σωλήνας του χάλυβα, τοποθετείται στο κέντρο του πλαστικού σωλήνα, και καλύπτεται με την εκρηκτική ύλη. Το σημείο ανάφλεξης βρισκόταν στο κέντρο του εκρηκτικού στρώματος.



Σχήμα 6.2: Ζύγισμα των υλικών στης πειραματικής διάταξης

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν διεργασία στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο, του κτιρίου των κατεργασιών. Στο πάτωμα υπάρχει ειδική μεταλλική βάση για απορρόφηση των κραδασμών, ένα παχύ στρώμα άμμου, επίσης οι τοίχοι περιστοιχίζονται από παχιές λωρίδες πλαστικού για να αποσβένονται σε ένα βαθμό οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την έκρηξη.

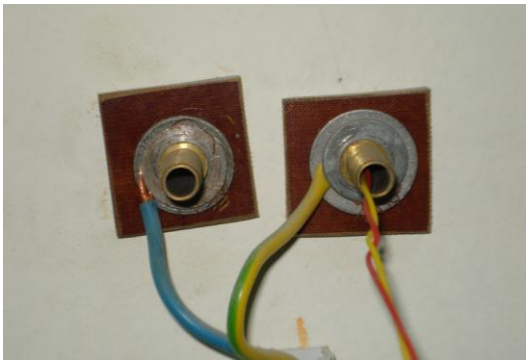
Σχήμα 6.3: Ειδικός διαμορφωμένος χώρος, όπου πραγματοποιήθηκε η έκρηξη

Η έκρηξη πραγματοποιήθηκε πάνω στην ειδική μεταλλική βάση, μέσα στην άμμο. Σακιά με άμμο τοποθετήθηκαν γύρω και πάνω από την πειραματική διάταξη για εγκλώβιση του τασικού παλμού. Έγινε σύνδεση, των ηλεκτρικών καλωδίων, του ηλεκτρικού πυροκροτητή (βλέπε Σχήμα 6.4), με την εκρηκτική ύλη (βλέπε Σχήμα 6.5). Για λόγους ασφαλείας, η απομάκρυνση του προσωπικού από το χώρο της έκρηξης ήταν απαραίτητη και άκρως αναγκαία, γι’ αυτό το λόγο το καλώδιο του πυροκροτητή περάστηκε μέσα από τις ειδικές τρύπες του τοίχου (βλέπε Σχήμα 6.6) και η εκπυρσοκρότηση έγινε έξω από τον χώρο τις έκρηξης και αρκετά μέτρα μακριά.

Αποτέλεσμα της έκρηξης, η κατάρρευση του μεταλλικού σωλήνα και η συμπίεση της κόνης.

Σχήμα 6.4: Ηλεκτρικός πυροκροτητής

Σχήμα 6.5: Τοποθέτηση εκρηκτικής διάταξης γύρω από τσουβάλια άμμου



Σχήμα 6.6: Πέρασμα καλωδίων από τις ειδικές τρύπες του τοίχου

6.3 ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΥΛΗ

Στα πειράματα, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου P-24 σε μορφή κόνης με:

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικές ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης

Ταχύτητα Εκτόνωσης	2400 m/s
Ενεργειακό Περιεχόμενο	4 KJ/g.
Μάζα	430 g
Φαινόμενη Πυκνότητα	0,83 g/cm^3

6.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η αύξηση της πυκνότητας προκαλείται λόγω της έντονης θραύσης των σωματιδίων, της κατάρρευσης των διακένων και της σύνδεσης των ορίων των κόκκων, φαινόμενα που πραγματοποιούνται λόγω της διάδοσης των κρουστικών κυμάτων μέσω του πορώδες υλικού.

Μετά την έκρηξη, γίνανε κοπές σε αρκετά σημεία του εκάστοτε σωλήνα για να βρεθεί η φαινόμενη πυκνότητα και μελετηθεί η δομή της κόνης με τη χρήση μικροσκοπίου, στο υγιές κομμάτι.

6.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Μετά τον τεμαχισμό του χαλύβδινου σωλήνα, παίρνονται μετρήσεις που αφορούν την: - - ολική μάζα (m_{total}) του τεμαχίου

- Εξωτερική (D_{out}) και εσωτερική διάμετρος (D_{in}) του σωλήνα

$$m_{total} = m_{tube} + m_{powder} \tag{6.1}$$

όπου m_{tube}, η μάζα του σωλήνα και m_{powder} η μάζα της κόνης

$$m_{tube} = \rho_{tube} * V_{tube} = \frac{7.85}{1000} * \left[\pi * \left(\frac{D_{out}}{2} \right)^2 * h - \pi * \left(\frac{D_{in}}{2} \right)^2 \right] \tag{6.2}$$

Άρα, $m_{powder} = m_{total} - m_{tube}$ (6.3)

$$\rho_{powder} = \frac{m_{powder}}{V_{powder}} \tag{6.4}$$

το ρ_{powder}, είναι η τελική φαινόμενη πυκνότητα της κόνης

6.5 ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

Ο Χαλύβδινος σωλήνας που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα έχει τις ίδιες διαστάσεις (βλέπε Σχήμα 6.1).Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται ο σωλήνας πριν την εκρηκτική διαμόρφωση.

Σχήμα 6.7: Χαλύβδινος σωλήνας πριν την έκρηξη

6.6 ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΟΝΗΣ (νιφάδες) ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (Al)

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες της κόνης Αλουμινίου (Al)

Θεωρητική Πυκνότητα (συμπαγούς υλικού)	2,7 g/cm^3
Αρχική Πυκνότητα	1,795 g/cm^3
Αρχική σχετική Πυκνότητα	0,665
Τελική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	2,29 g/cm^3
Τελική σχετική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	0,848
Μάζα	20,5 g

Τα καπάκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από αλουμίνιο.

Πίνακας 6.3: Οι διαστάσεις του Χαλύβδινου σωλήνα (στο υγιές κομμάτι), μετά την έκρηξη

Τελική Εξωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	13,53 mm
Τελική Εσωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	9,22 mm

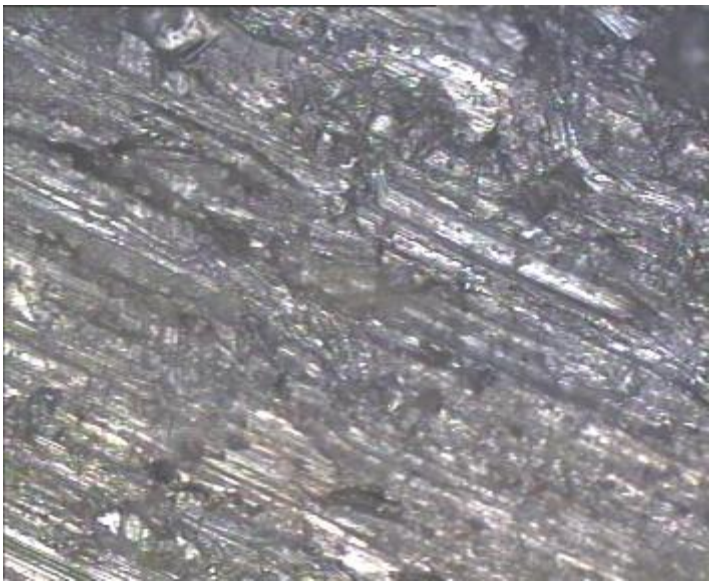
Στην μέτρηση των εξωτερικών και εσωτερικών διαμέτρων έγιναν μόνο το υγιές κομμάτι, δηλαδή δεν μετρήθηκαν τα καπάκια.

Στο Σχήμα 6.8, φαίνεται ο χαλύβδινος σωλήνας, μετά την έκρηξη, με εμφανή την συμπίεση του, σ’ όλο το μήκος του.

Σχήμα 6.8: Χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη

Μετά την έκρηξη, γίνανε κοπές σε πέντε σημεία του σωλήνα (βλέπε Σχήμα 6.9) για να βρεθεί η φαινόμενη πυκνότητα και μελετηθεί η δομή της κόνης με τη χρήση μικροσκοπίου (βλέπε Σχήμα 6.10), στο υγιές κομμάτι. Η συμπίεση της κόνης φαίνεται πετυχημένη.

Σχήμα 6.9: Τομή του Χαλύβδινου σωλήνα



Σχήμα 6.10: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος. Μεγέθυνση 100 φορές

6.7 ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΟΝΗΣ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικές ιδιότητες της κόνης Χαλκού

Θεωρητική Πυκνότητα (συμπαγούς υλικού)	8,94 g/cm^3
Αρχική Πυκνότητα	4,09 g/cm^3
Αρχική Σχετική Πυκνότητα	0,46
Τελική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	8,02 g/cm^3
Τελική Σχετική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	0,897
Μάζα	47,7 g

Τα καπάκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από αλουμίνιο.

Πίνακας 6.5: Οι διαστάσεις του Χαλύβδινου σωλήνα (στο υγιές κομμάτι), μετά την έκρηξη

Τελική Εξωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	12,59 mm
Τελική Εσωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	8,16 mm

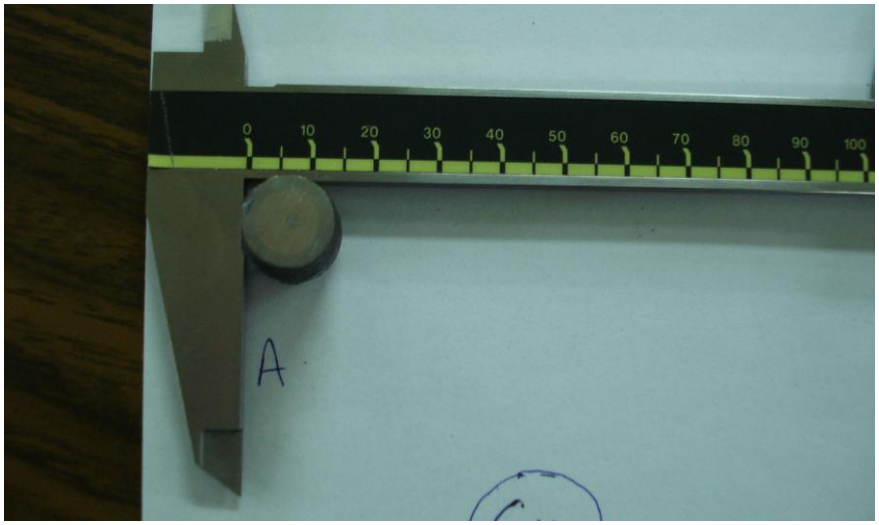
Στην μέτρηση των εξωτερικών και εσωτερικών διαμέτρων έγινε μόνο το υγιές κομμάτι, δηλαδή δεν μετρήθηκαν τα καπάκια.

Στο Σχήματα 6.11 φαίνεται η μορφή του σωλήνα μετά την έκρηξη. Η συμπίεση του είναι εμφανής, καθ' όλο το μήκος του.

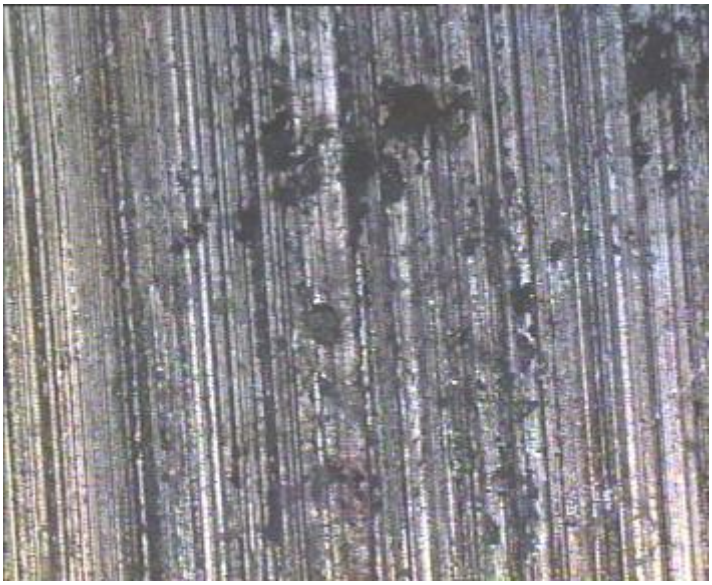
Σχήμα 6.11: Χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη

Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται η τομή του σωλήνα, και στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η τομή του σωλήνα με τη χρήση μικροσκοπίου. Από το Σχήμα 6.13, φαίνεται ότι η συμπίεση της κόνης στο κέντρο ήταν καλή, όμως στο υπάρχουν μικρά διάκενα που κάνουν το τελικό προϊόν της συμπίεσης λιγότερο ανθεκτικό σε μηχανικές παραμορφώσεις. Στο Σχήμα 6.14, η συμπίεση στη διεπιφάνεια ήταν

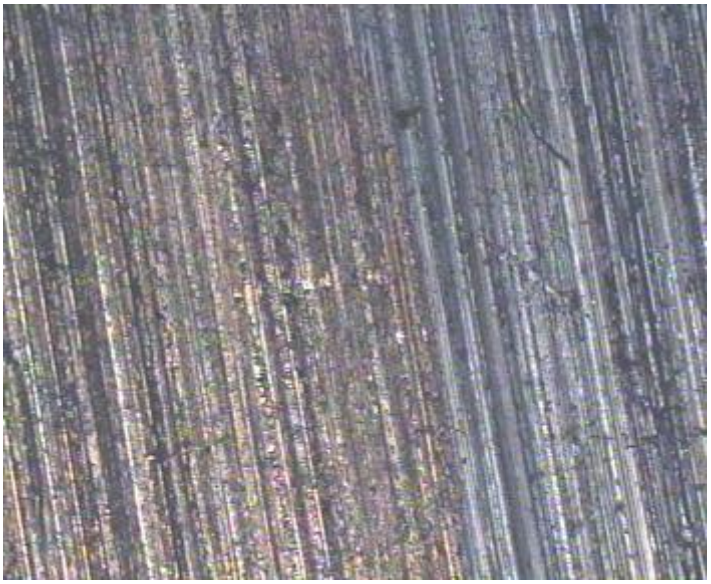
καλύτερη όπως αναμενότανε, αφού στην διεπιφάνεια οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες.



Σχήμα 6.12: Τομή του Χαλύβδινου σωλήνα



Σχήμα 6.13: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος, Μεγέθυνση κατά 100 φορές



Σχήμα 6.14: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος, Μεγέθυνση κατά 50 φορές, Διεπιφάνεια κόνης-σωλήνα

6.8 ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΟΝΗΣ ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ (TiC) ΜΕ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (Al)

Η αναλογία των μαζών είναι δύο μέρη Καρβιδίου του Τιτανίου προς ένα μέρος Αλουμινίου.

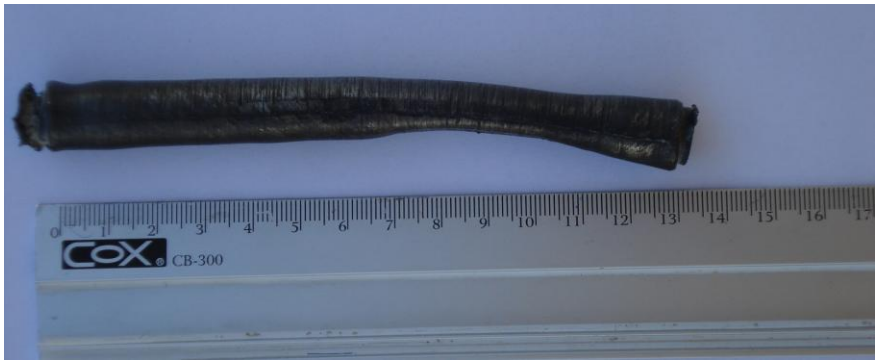
Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικές ιδιότητες της κόνη του Καρβιδίου του Τιτανίου με Αλουμίνιο

Θεωρητική Πυκνότητα του TiC (συμπαγούς υλικού)	4,93 g/cm^3
Θεωρητική Πυκνότητα του Al (συμπαγούς υλικού)	2,7 g/cm^3
Θεωρητική Πυκνότητα του TiC+Al (συμπαγούς υλικού)	3,87 g/cm^3
Αρχική Πυκνότητα του TiC+Al	1,86 g/cm^3
Αρχική Σχετική Πυκνότητα	0,48

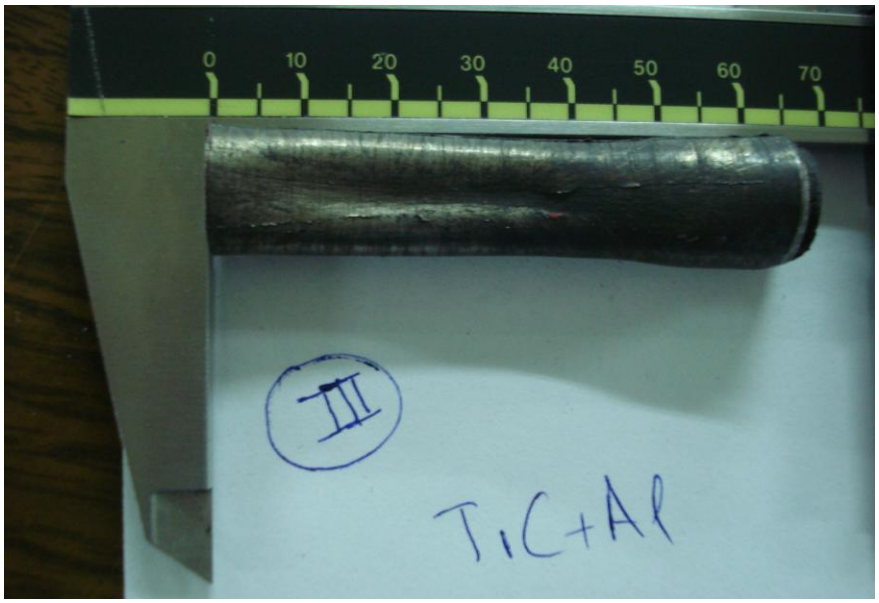
Τελική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	3,305 g/cm^3
Τελική Σχετική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	0,85
Μάζα	21,0 g

Τα καπάκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από πλαστικό.

Στο Σχήματα 6.15 φαίνεται ο χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη, με εμφανή συμπίεση, καθ' όλο το μήκος του. Στον συμπιεσμένο σωλήνα έχει δημιουργηθεί «λαιμός» (βλέπε Σχήμα 6.16), με αποτέλεσμα την αποκοπή του κομματιού εκείνου ως σκάρτο. Οι κοπές για την μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας (βλέπε Σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.15: Χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη



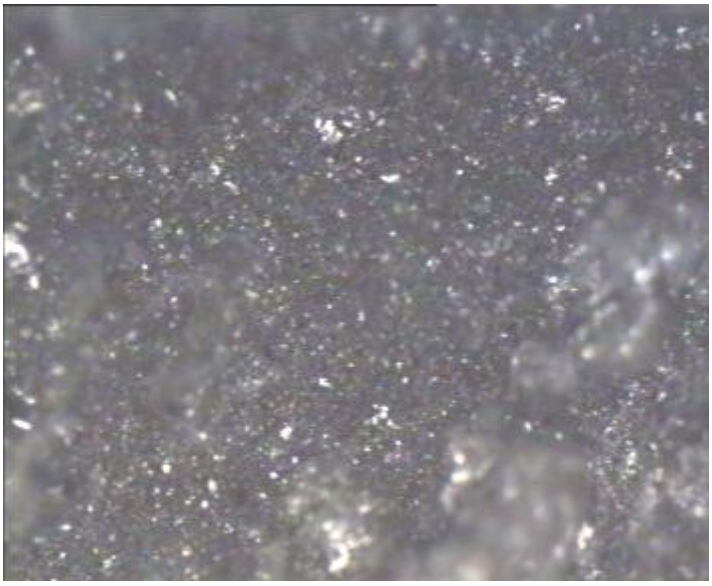
Σχήμα 6.16: «Λαιμός»

Πίνακας 6.7: Οι διαστάσεις του Χαλύβδινου σωλήνα (στο υγιές κομμάτι), μετά την έκρηξη

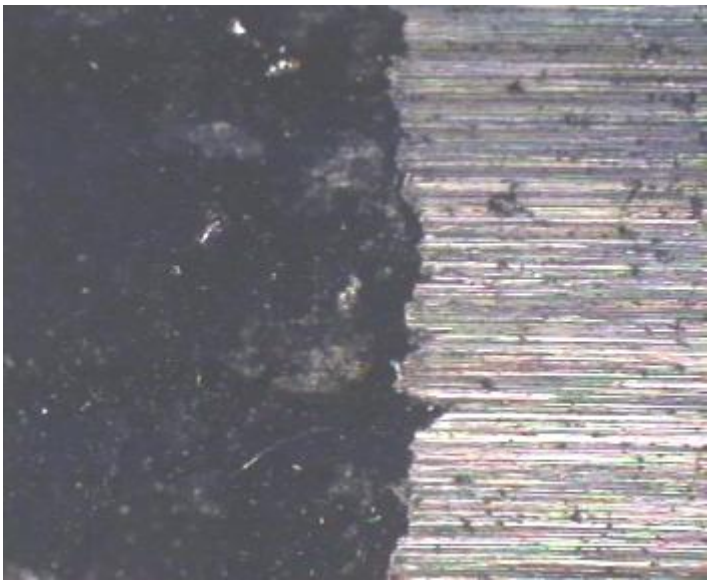
Τελική Εξωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	13,71 mm
Τελική Εσωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	9,197 mm

Σχήμα 6.17: Τομή του χαλύβδινου σωλήνα στο μέσο του σωλήνα, καθ' ύψος

Η μικροσκοπικής ανάλυση (βλέπε Σχήμα 6.18 και Σχήμα 6.19) έγιναν για το υγιές μέρος του σωλήνα, όπου είναι εμφανής οι κόκκοι του Αλουμινίου (ασημένιου χρώματος), σε αντίθεση με του Καρβιδίου του Τιτανίου που είναι χρώματος σκούρο γκρι.



Σχήμα 6.18: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος
Μεγέθυνση φακού 100 φορές



Σχήμα 6.19: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος,
Μεγέθυνση κατά 50 φορές, Διεπιφάνεια κόνης-σωλήνα

6.9 ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΟΝΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ (Al_2O_3)

Πίνακας 6.8: Χαρακτηριστικές ιδιότητες της κόνης της Αλουμίνας

Θεωρητική Πυκνότητα (συμπαγούς υλικό)	3,97 g/cm^3
Αρχική Πυκνότητα	0,808 g/cm^3
Αρχική Σχετική Πυκνότητα	0,203
Τελική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	1,31 g/cm^3
Τελική Σχετική Πυκνότητα (μετά την έκρηξη)	0,33
Μάζα Αρχική	9,2 g
Μάζα Τελική	6,1 g

Όπως φαίνεται από Πίνακα 6.8, υπήρξε διαρροή της κόνης της Αλουμίνας μετά την έκρηξη.

Τα καπάκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από πλαστικό.

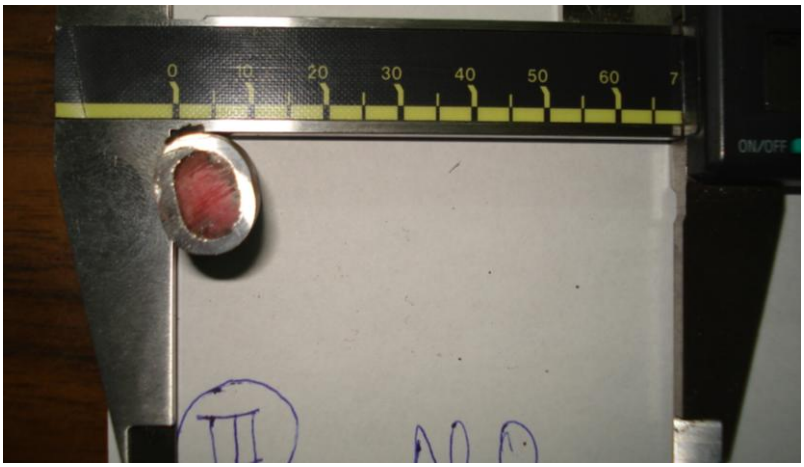
Στο Σχήμα 6.20. φαίνεται ο χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη, με εμφανή την συμπίεση του.

Σχήμα 6.20: Χαλύβδινος σωλήνας μετά την έκρηξη

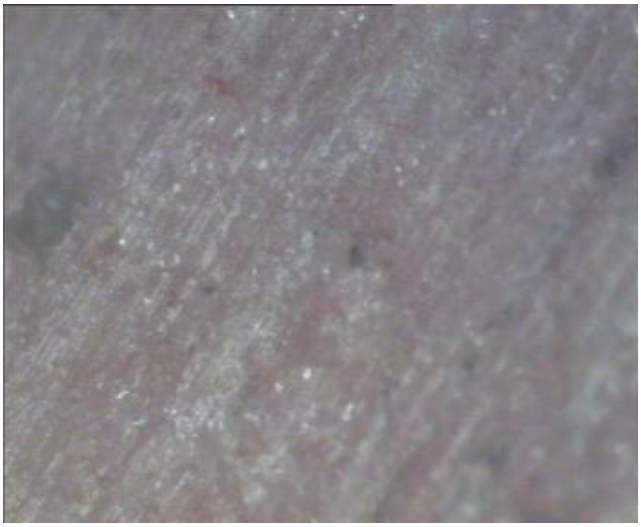
Πίνακας 6.9: Οι διαστάσεις του Χαλύβδινου σωλήνα (στο υγιές κομμάτι), πριν και μετά την έκρηξη

Τελική Εξωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	13,10 mm
Τελική Εσωτερική Διάμετρος (μετά την έκρηξη)	8,63 mm

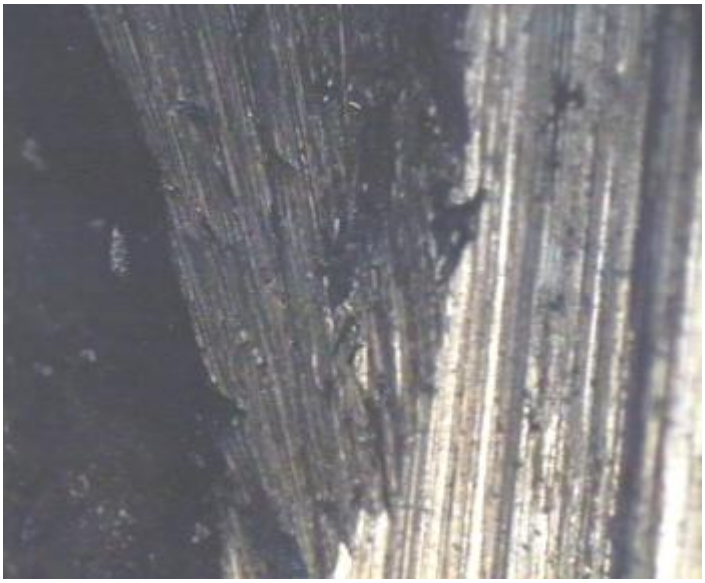
Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται, η τομή του χαλύβδινου σωλήνα, προς μελέτη της τελικής φαινόμενης πυκνότητας της κόνης και στο Σχήμα 6.22 και 6.23 η μικροσκοπική ανάλυση.



Σχήμα 6.21: Τομή του χαλύβδινου σωλήνα στο μέσο του σωλήνα, καθ' ύψος



Σχήμα 6.22: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος
Μεγέθυνση φακού 100 φορές



Σχήμα 6.23: Μικροσκοπική ανάλυση, τομή στο μέσο του σωλήνα, κατά ύψος, Μεγέθυνση κατά 50 φορές, Διεπιφάνεια κόνης-σωλήνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συνήθως στη βιομηχανία ο σχεδιασμός και ο έλεγχος των κατεργασιών γίνεται βάση στην εμπειρία και οι μέθοδοι δοκιμής-σφάλματος εφαρμόζεται συχνά, παρά το κόστος. Με την βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης το κόστος μειώνεται σημαντικά και βοηθάει στην βελτιστοποίηση του προϊόντος. Όμως, η μέθοδος της προσομοίωσης απαιτεί την πλήρη γνώση των μηχανισμών παραμόρφωσης που διαδραματίζονται κατά την εκρηκτική συμπίεση και μεγάλη προσοχή στις διάφορες παραμέτρους.

Για την προσομοίωση στο LS-DYNA, ακολουθείται συνήθως η συγκεκριμένη πορεία.

1) Γεωμετρία. Με την βοήθεια του LS-PREPOST (προεπεξεργαστή) γίνεται η γεωμετρία του αντικειμένου, η οποία μπορεί να γίνει στο DYNA αλλά και σε άλλα CAD προγράμματα (Autocad, Rhino).

2) Πεπερασμένα στοιχεία. Εισάγουμε τα κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία στο αντικείμενο, τα οποία μπορεί να είναι συμπαγή (solid elements) ή και κελύφη (cell elements).

3) Υλικό και οι ιδιότητές του

4) Διεπιφάνειες επαφής

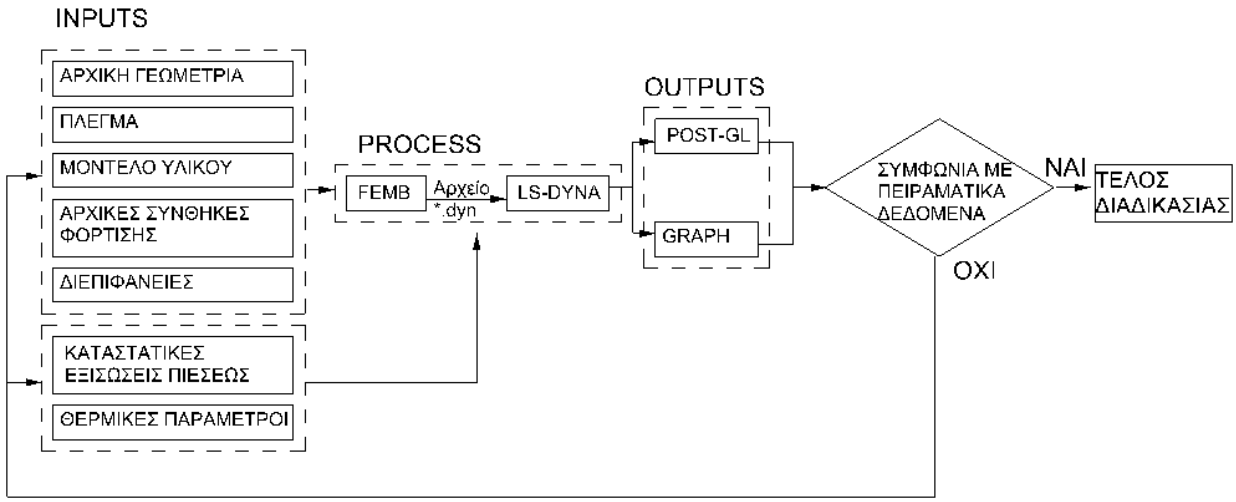
5) Αρχικές συνθήκες φόρτισης

6) Καταστατικές εξισώσεις πίεσης, για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των υλικών στις εκάστοτε παραμορφώσεις

7) Θερμοκρασία. Στην προκειμένη περίπτωση η θερμοκρασία που έγινε το πείραμα

Μόλις οριστούν (βλέπε Σχήμα 7.1): η γεωμετρία, το πλέγμα, το υλικό, οι διεπιφάνειες και οι αρχικές συνθήκες φόρτισης, μέσω του pre-processor (FEMB module), εξάγεται ένα αρχείο *.dyn που χρησιμοποιεί ο solver. Στο *.dyn αρχείο γίνεται η εισαγωγή των θερμικών παραμέτρων και των καταστατικών εξισώσεων πίεσης. Το LS-DYNA (solver) αποτελούν την διαδικασία επίλυσης του συστήματος. Ως έξοδος του LS-DYNA είναι τα αρχεία PostGL και Graph, όπου γίνονται ορατά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αν τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με

την προσομοίωση τότε η διαδικασία έχει λήξει. Σε αντίθετη περίπτωση επιστρέφουμε (loop) στις εισόδους, κάνουμε διόρθωση στις παραμέτρους και ξανατρέχουμε το πρόγραμμα. Η διαδικασία σταματά όταν έχει επιτευχθεί ολική ή έστω μερική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα [20].



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα ροής για προσομοίωση στο LS-DYNA

7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο δομείται στο LS-PrePost. Καταρχάς γίνεται ορισμός των μονάδων μέτρησης, αφού στον κώδικα εισάγονται τα δεδομένα χωρίς διαστάσεις, βλέπε Πίνακα 7.1. [20].

Πίνακας 7.1: Ορισμός μονάδων μέτρησης

	Μονάδα Μέτρησης
Μάζα	gr
Μήκος	mm
Χρόνος	msec
Ταχύτητα	m/sec
Δύναμη	Nt
Πυκνότητα	gr/mm^3
Πίεση	MPa
Θερμοκρασία	K

Προς μείωση του υπολογιστικού χρόνου, και χρήση πυκνότερου πλέγματος ώστε να πλησιάσουμε περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα, έγινε μοντελοποίηση στο ένα τέταρτο της κατασκευής, ορίζοντας επίπεδα συμμετρίας και θέτοντας κατάλληλους περιορισμούς κίνησης και περιστροφής σε αυτά. Ωστόσο για να είναι πιο εμφανή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα κάνουμε χρήση του

FEM/Model and Part/Reflect Model

Όπου φτιάχνει την ανάκλαση του μοντέλου, και γίνεται ορατή η αξονοσυμμετρική όψη στο ένα δεύτερο της κατασκευής.

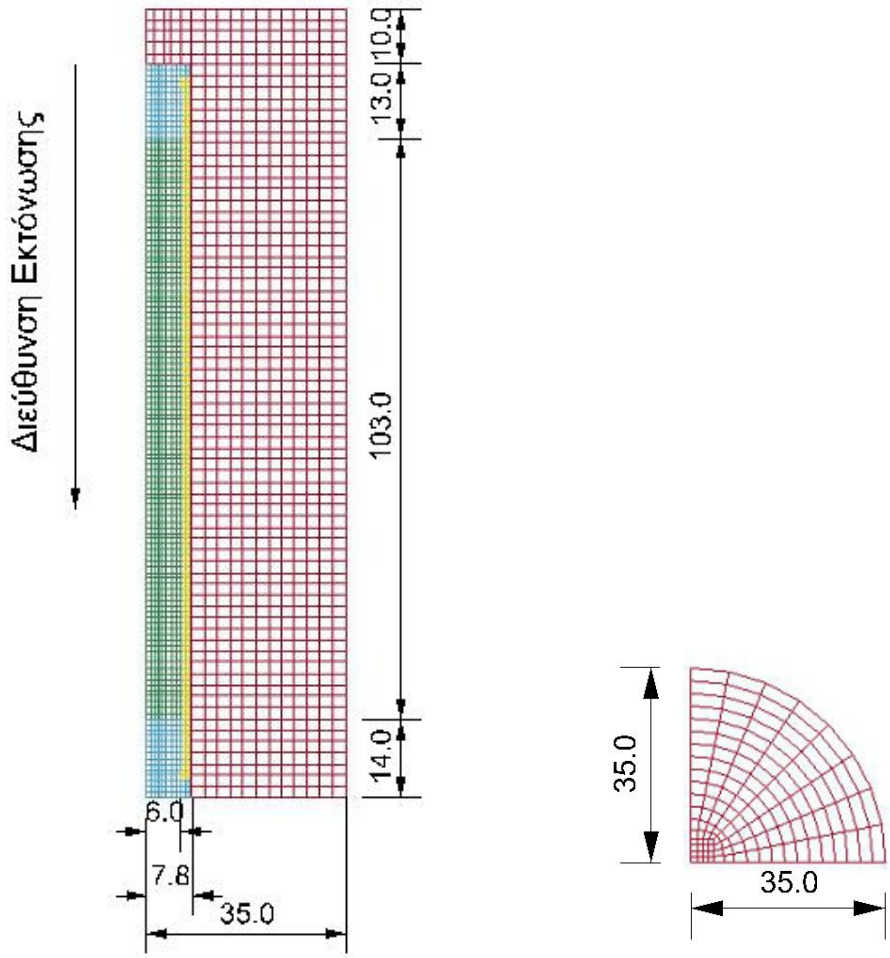
7.2.1 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

FEM/ Elements and Mesh/ Block Mesher/ Butterfly Blocks

Στο μοντέλο, εισήχθηκαν συμπαγή οχτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία, χωρίς να προηγηθεί το βήμα τις γεωμετρίας (διότι στα απλά σχήματα, όπως το μοντέλο μας, είναι προτιμότερο και πιο γρήγορο να μην εισάγουμε την γεωμετρία). Παρόλο που ακολουθήθηκε ίδια πειραματική διάταξη σε όλα τα πειράματα, για την προσομοίωση γίνανε δύο μοντέλα με κάποιες μικροδιαφορές, που ήταν απαραίτητες για να μπορέσουν να τρέξουν. Δηλαδή, στο πείραμα με την Αλουμίνα, επειδή χρησιμοποιήθηκαν καπάκια από πλαστικό, στην προσομοίωση τα πλαστικά καπάκια έπρεπε να γίνουν τελείως χωνευτά, για να αποφθεχθούν οι αρνητικοί όγκοι που θα οδηγούσαν σε λάθος τερματισμό του προγράμματος(error termination). Στα Σχήματα 7.2 α) και β) φαίνονται οι όψεις, σε δύο διαστάσεις, για το μοντέλο Αλουμινίου και Χαλκού ενώ το Σχήμα 7.3 η όψη σε τρεις διαστάσεις πριν την έκρηξη.

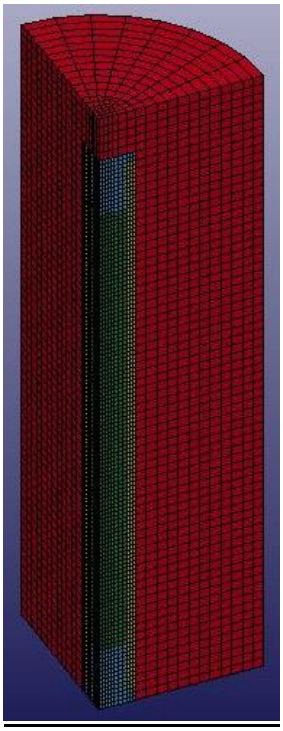
Πίνακας 7.2: Στοιχεία για το 1° μοντέλο (κόνης Al και Cu)

Αριθμός κόμβων	21349
Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων	16240



α) Πρόοψη σε τομή κατά άξονα Χ και Υ β) Κάτοψη

Σχήμα 7.2: Όψεις για το Μοντέλο Αλουμινίου και Χαλκού

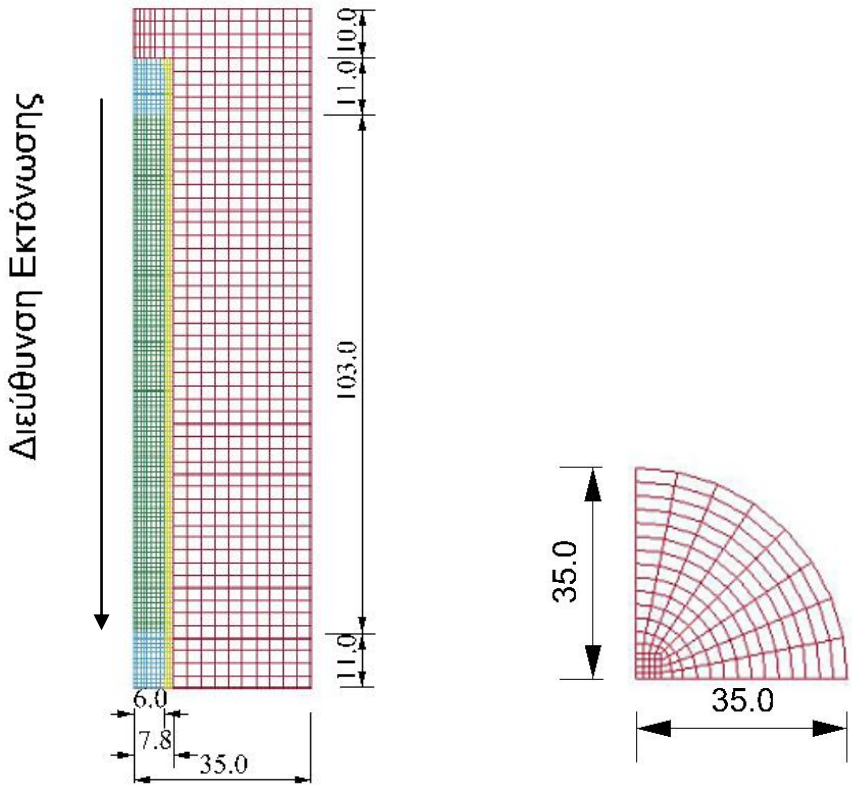


Σχήμα 7.3: Τρισδιάστατη όψη του μοντέλου Αλουμινίου και Χαλκού

Πίνακας 7.3: Στοιχεία για το 2° μοντέλο (κόνης Al_20_3)

Αριθμός κόμβων	17959
Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων	13448

Στα Σχήματα 7.4 α) και β) φαίνονται οι όψεις για το μοντέλο της Αλουμίνας πριν την έκρηξη.



α) Πρόοψη σε τομή κατά άξονα X και Y β) Κάτοψη

Σχήμα 7.4: Όψεις για το Μοντέλο της Αλουμίνας

Ο αριθμός των κόμβων και των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε μετά από αρκετές δοκιμές στο μοντέλο, ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε τις απαραίτητες παραμορφώσεις χωρίς να αυξήσουμε πολύ τον υπολογιστικό χρόνο.

7.2.2 ΥΛΙΚΑ

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ MAT

α) Εκρηκτικό. Το εκρηκτικό υλικό περιγράφεται από τον τύπο υλικού 008-HIGH_EXPLOSIVE_BURN. Το υλικό συνδυάζεται με την εξίσωση Jones-Wilkins-Lee (JWL), όπου εκφράζει την άνοδο και εξασθένιση της πίεσης εκτόνωσης [15].

$$P = A(1-\frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1-\frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega \mathrm{E}}{V} \qquad (7.1)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται για τα προϊόντα εκτόνωσης εκρηκτικών μεγάλης ταχύτητας. Οι σταθερές είναι το A, B,R_1, R_2 και ω, το E είναι η εσωτερικά ενέργεια και V ο σχετικός όγκος. Οι σταθερές προκύπτουν από πειράματα διαστολής χάλκινου κυλίνδρου, ο οποίος γεμίζεται με εκρηκτικό και η ακτινική του διαστολή μελετάται σε σχέση με το χρόνο μέσω κάμερας υψηλής ταχύτητας [21]. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε τις παραμέτρους του PETN υλικού, πυκνότητας 0,88 gr/cm^3, που είναι παρόμοιας σύστασης και χαρακτηριστικών με το P-24 του πειράματος. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι διαφόρων εκρηκτικών υλικών [22].

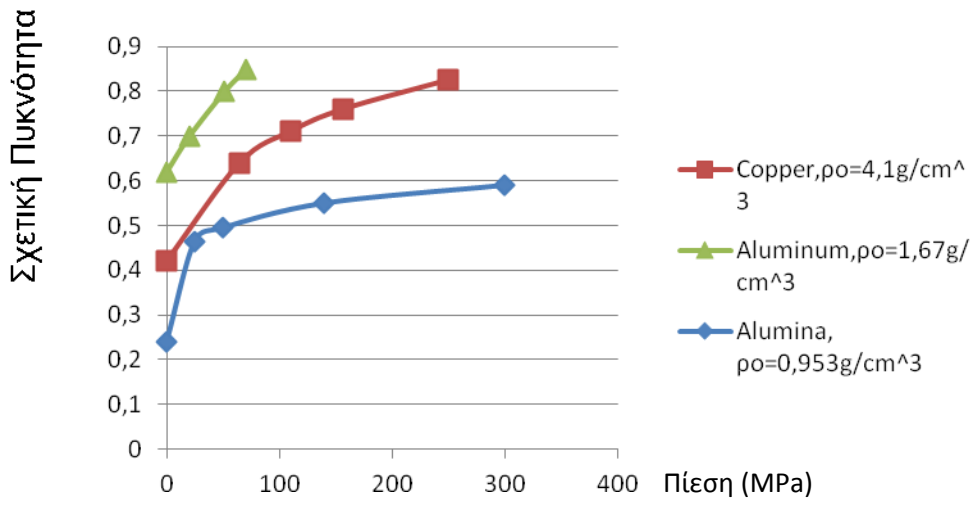
Πίνακας 7.4: Παράμετροι της καταστατικής εξίσωσης JWL για διάφορες εκρηκτικές ύλες

Εκρηκτική Ύλη	ρ (gr/mm^2)	P (GPa)	D (cm/μs)	E_o (GPa cm^3/cm^{3}g)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω
Comp a-3	1,65	30	0,83	8,9	611,3	10,65	4,4	1,2	0,32
Comp b	1,72	29,5	0,798	8,5	524,2	7,68	4,2	1,1	0,34
Comp c-4	1,6	28	0,819	9	609,8	12,95	4,5	1,4	0,25
Pentolite 50/50	1,7	25,5	0,753	8,1	540,9	9,37	4,5	1,1	0,35
PETN	**0,88**	**6,2**	**0,517**	**5,02**	**348,6**	**11,29**	**7**	**2**	**0.24**
PETN	1,77	33,5	0,83	10,1	617,0	16,93	6	1,8	0,28
TNT	1,63	21	0,693	7	371,2	3,23	4,15	0,95	0,3

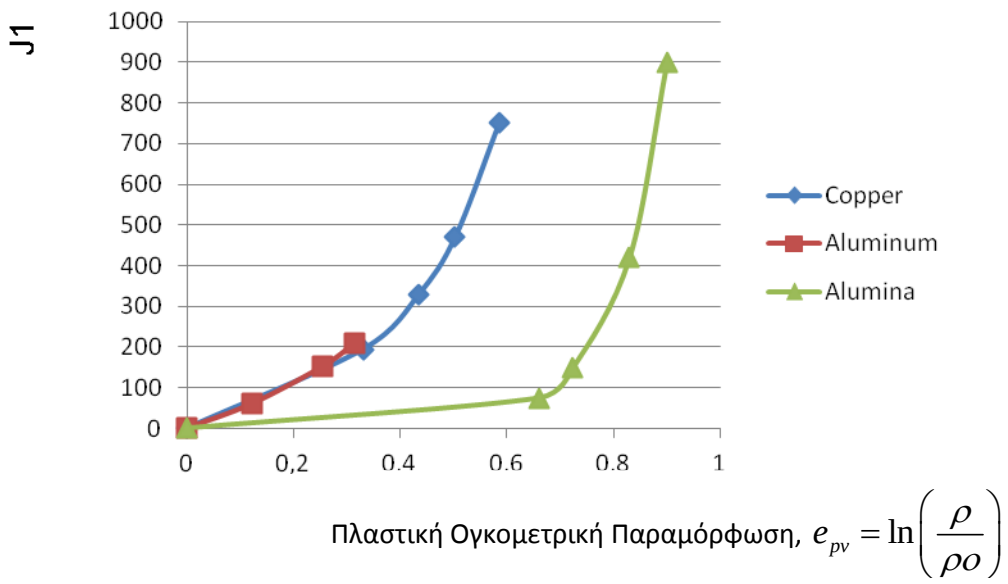
β) Κόνεις

Η κόνες μοντελοποιήθηκαν ως ένα πολύ-επιφανειακό ελαστικοπλαστικό μοντέλο, Drucker-Prager/cap, με τον τύπο, TYPE 25: MAT/GEOLOGIC CAP MODEL του κώδικα, το οποίο είναι ένα μοντέλο πολλαπλών επιφανειών, και χρησιμοποιεί τη μακρομηχανική μοντελοποίηση. Το μέσο της κόνης θεωρείται συνεχές όπου υποβάλλεται σε ελαστικοπλαστικές παραμορφώσεις. Όσο αναφορά τις διάφορες παραμέτρους που πρέπει να οριστούν για το συγκεκριμένο υλικό, είναι βασισμένες σε πειραματικά δεδομένα για ισοστατική τριαξονική και μονοαξονική συμπίεση [14, 16]. Για την αντιστοίχιση πειραματικών δεδομένων με το cap model, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel.

Για να οριστούν οι παράμετροι σκληρότητας του Geologic Cap model, στην Cap επιφάνεια είναι απαραίτητα πειραματικά στοιχεία για ισοστατική μονοαξονική συμπίεση (βλέπε Σχήμα 7.8). το Σχήμα 7.8 προκύπτουν τα πειραματικά αποτελέσματα από το Σχήμα 7.7, το διάγραμμα σχετικής πυκνότητας ανα πίεση.



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα Σχετικής Πυκνότητας και Πίεσης στη Μονοαξονική Ισοστατική Συμπίεση, για το Χαλκό, Αλουμίνιο και Αλουμίνα

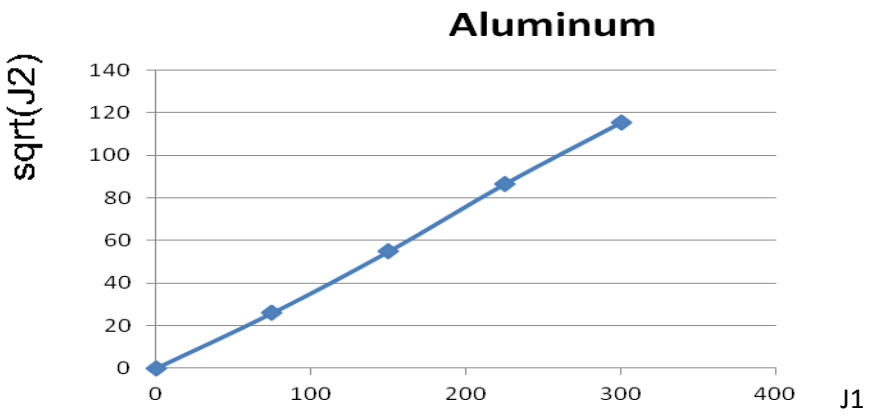


Σχήμα 7.8: Διάγραμμα J1 (stress first invariant), με την ογκομετρική πλαστική παραμόρφωση

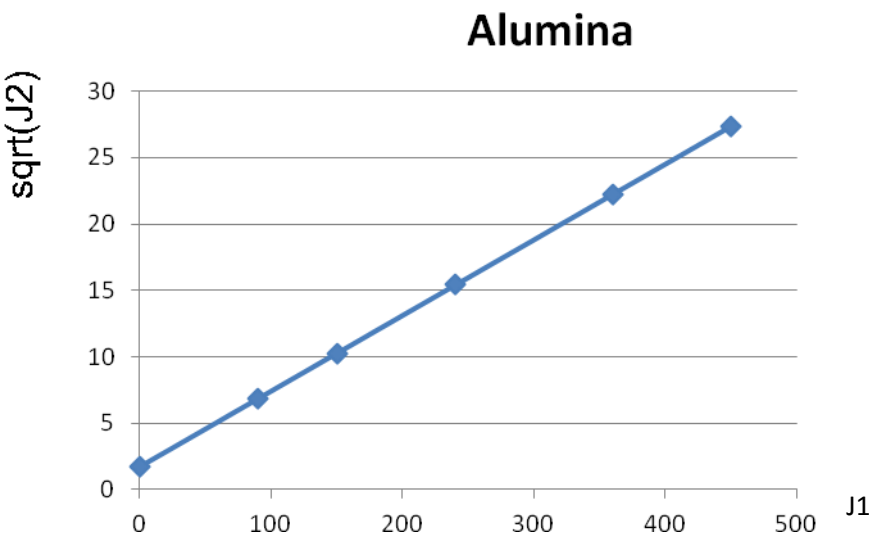
Πίνακας 7.6: Πάραμετροι W και D, για το Αλουμίνιο, Αλουμίνα και Χαλκό

	W	D
Αλουμίνιο	0,465	0,0053
Αλουμίνα	0,87	0,013
Χαλκός	0,61	0,004

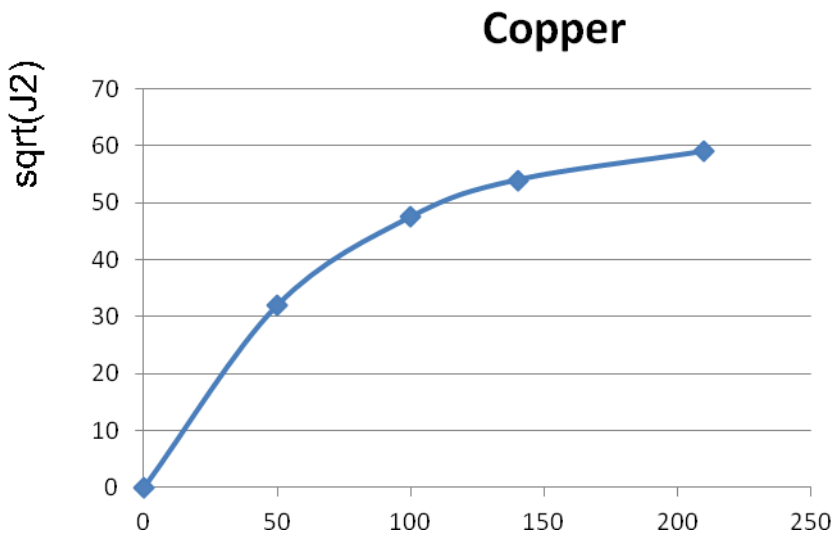
Με την Τριαξονική συμπίεση, βρίσκονται οι παράμετροι α, β,γ και θ (Βλέπε **Κεφάλαιο 3.8.1**), όπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.



Σχήμα 7.9: Διάγραμμα τριαξονικής συμπίεσης για το Αλουμίνιο [27]



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα τριαξονικής συμπίεσης για το την Αλουμίνα [26]



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα τριαξονικής συμπίεσης για το Χαλκό

Πίνακας 7.7: Παράμετροι για την επιφάνεια, Shear failure

	Αλουμίνιο	Αλουμίνα	Χαλκός
Α	0,0	1,73	50,0
Β	0,0	0,0	0,018
Γ	0,0	0,0	50,0
Θ	0,58	0,057	0,051

γ) Μεταλλικός σωλήνας από Χάλυβα.

Ο μεταλλικός σωλήνας λόγο του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης (βλέπε Πίνακα 5.3), μοντελοποιείται με το καταστατικό μοντέλο MAT/ STEINBERG.

γ) Πλαστικά καπάκια.

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ MAT/ ISOTROPIC ELASTIC PLASTIC.

Μοντελοποιήθηκαν ως ισοτροπικό ελαστικοπλαστικό υλικό,

Πίνακας 7.8: Παράμετροι Αλουμινίου για χρήση στο καταστατικό μοντέλο

Πυκνότητα	0.00136 $\frac{gr}{mm^3}$
Συντελεστής Διάτμησης	80 MPa
Συντελεστής Όγκου	8000 MPa
Τάση Διαρροής	28.4 MPa

δ) Καπάκια Αλουμινίου

FEM/ Model and Part/Keyword/ MAT/POWER LAW PLASTICITY

Τα καπάκια του Αλουμινίου μοντελοποιήθηκαν ως ελαστικοπλαστικό υλικό σε ισοτροπική σκλήρυνση, όπου η εξάρτηση της τάσης από την πλαστική παραμόρφωση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma=K\varepsilon^{n} \tag{7.2}$$

Ο ρυθμός παραμόρφωσης ε', λαμβάνεται από το μοντέλο Cowper και Symonds, το οποίο κλιμακώνει την τάση διαρροής σύμφωνα με τον παράγοντα [17]:

$$1+\left(\frac{\varepsilon'}{C}\right)^{1/p} \tag{7.3}$$

C και p παράμετροι

Πίνακας 7.9: Παράμετροι Αλουμινίου για χρήση στο καταστατικό μοντέλο

Μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου			
Μέτρο ελαστικότητας	70 GPa	Παράμετρος, C	6500 sec
Όριο Διαρροής,Y	35 MPa	Παράμετρος, p	4
Λόγος Poisson, ν	0,33		

7.2.3 ΕΠΑΦΗ (CONTACT)

α) Διεπιφάνειες

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ CONTACT/ SURFACE TO SURFACE

Ορισμός των διεπιφανειών, με συντελεστή τριβής 0,2

β) Εσωτερική

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ CONTACT/ INTERIOR

Μεταξύ των κόκκων της εκρηκτικής ύλης και της κόνης των κεραμικών και μεταλλικών υλικών

7.2.4 ΟΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΟΣ ΤΟΙΧΟΣ

Για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου, έγινε η μοντελοποίηση της κατασκευής στο ένα τέταρτο. Γι’ αυτόν τον σκοπό, τέθηκαν όρια περιορισμού της κίνησης ΄ και περιστροφής στους κόμβους. Επίσης, ορίστηκε Rigidwall κατά άξονα z για να γίνεται η ανάκλαση του κρουστικού παλμού, όπως είναι το πάτωμα για το πείραμα.

7.2.5 ΕΚΠΥΡΣΟΚΡΟΤΗΣΗ

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ INITIAL/DETONATION

Το σημείο εκπυρσοκρότησης, τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος της επιφάνειας του εκρηκτικού υλικού, στο κέντρο του.

7.2.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι απαραίτητο στο μοντέλο να ληφθούν υπόψη, εκτός από τις μηχανικές, και οι θερμικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και η μεταφορά θερμότητας από το εκρηκτικό υλικό στην υπόλοιπη κατασκευή και από το ένα υλικό στο άλλο (θερμομηχανική ανάλυση).

FEM/ Model and Part/ Keyword Manager/ CONTROL/THERMAL SOLVER

Η μεταφορά θερμότητας από το ένα υλικό στο άλλο, επιτυγχάνεται με τροποποίηση των διεπιφανειών ολίσθησης σε CONTACT/ THERMAL. Πάρθηκε ως παραδοχή, ότι το 90% του πλαστικού έργου μετατρέπεται σε θερμότητα, προσέγγιση που έχει χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν για προσομοιώσεις συμπίεσης [1]. Τα υλικά μοντελοποιήθηκαν ως θερμικά ισοτροπικά.

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στον Πίνακα 7.10 γίνεται η σύγκριση των εσωτερικών και εξωτερικών διαμέτρων του Χαλύβδινου σωλήνα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης . Στο Σχήμα 7.12 φαίνονται οι τελικές γεωμετρίες για την κόνη:

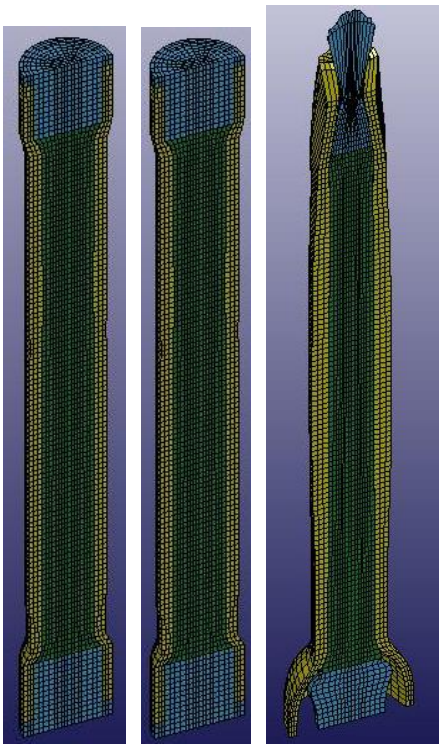
α) Χαλκού

β) Αλουμινίου

γ) Αλουμίνας

Πίνακας 7.10: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα προσομοίωσης

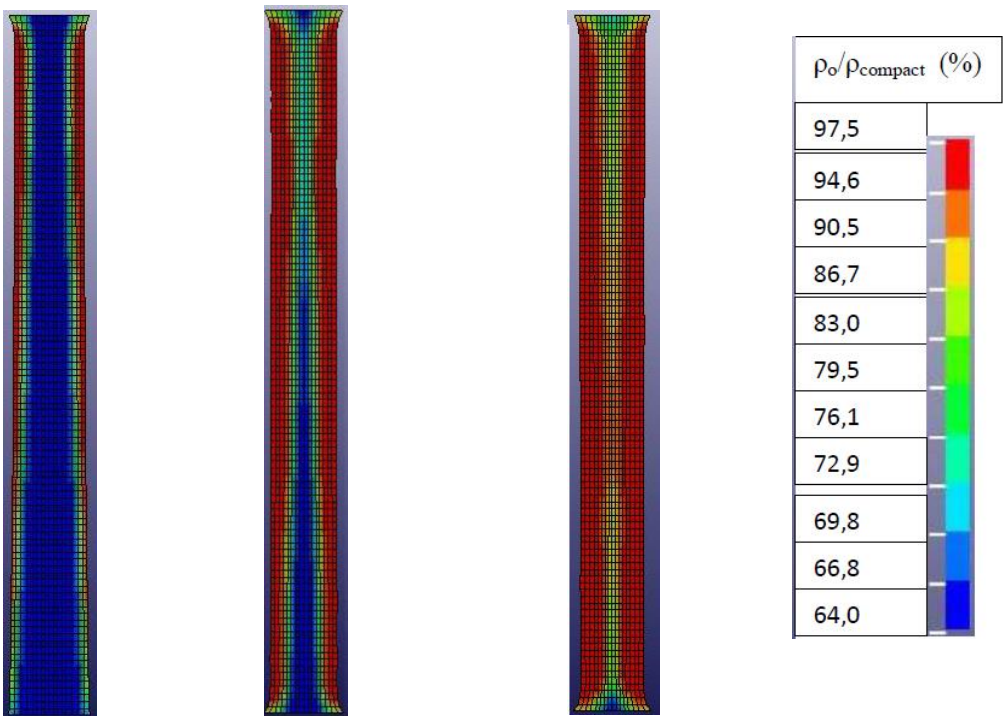
Κόνη	Πειραματικά Αποτελέσματα		Αποτελέσματα Προσομοίωσης	
	Εξωτερική διάμετρος Χάλυβα	Εσωτερική διάμετρος Χάλυβα	Εσωτερική διάμετρος Χάλυβα	Εσωτερική διάμετρος Χάλυβα
Χαλκός	13,56 mm	9,12 mm	12,59 mm	8,16 mm
Αλουμίνιο	13,37 mm	9,63 mm	13,53 mm	9,22 mm
Αλουμίνα	13,10 mm	8,63 mm	13,60 mm	8,06 mm



α) β) γ)

Σχήμα 7.12 Τελικές γεωμετρίες για την κόνη α) Χαλκού, β) Αλουμινίου, γ) Αλουμίνας

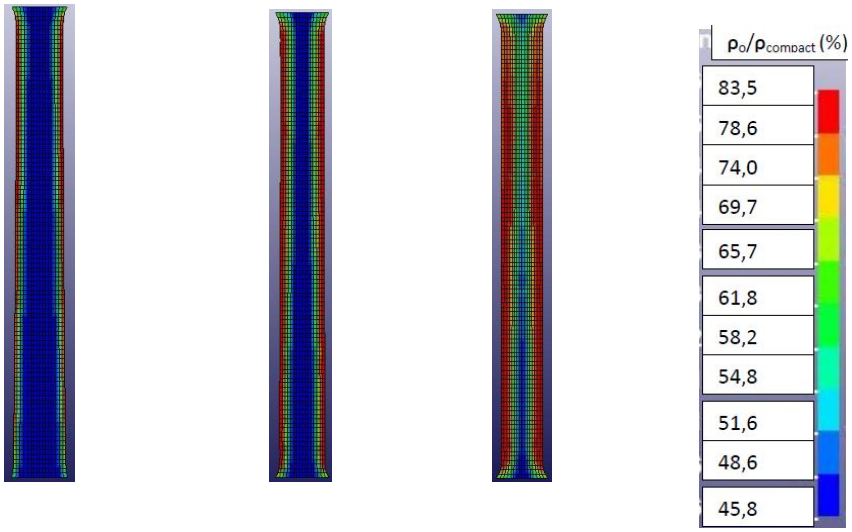
Στο Σχήμα 7.13 φαίνονται οι σχετικές πυκνότητες της κόνης του Αλουμινίου, σε ορισμένες χρονικές στιγμές, με την μέγιστη να φτάνει το 0,975 που εμφανίζεται στην διεπιφάνεια με τον χαλύβδινο σωλήνα, και στο κέντρο οι σχετικές πυκνότητες να είναι αισθητά μικρότερες από 0,946 έως 0,83 κατά το μεγαλύτερο διάστημα, ενώ στην διεπιφάνεια καπακιού κόνης, η συμπίεση είναι ακόμα μικρότερη. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείξανε μέση σχετική πυκνότητα σ' όλη την κόνη της τάξης του 0,848. Άρα, υπάρχει μια αρκετά καλή προσέγγιση πειραματικών αποτελεσμάτων με την προσομοίωση.



t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,070 ms

Σχήμα 7.13: Σχετικές Πυκνότητες για την κόνη Αλουμινίου σε διάφορες χρονικές στιγμές

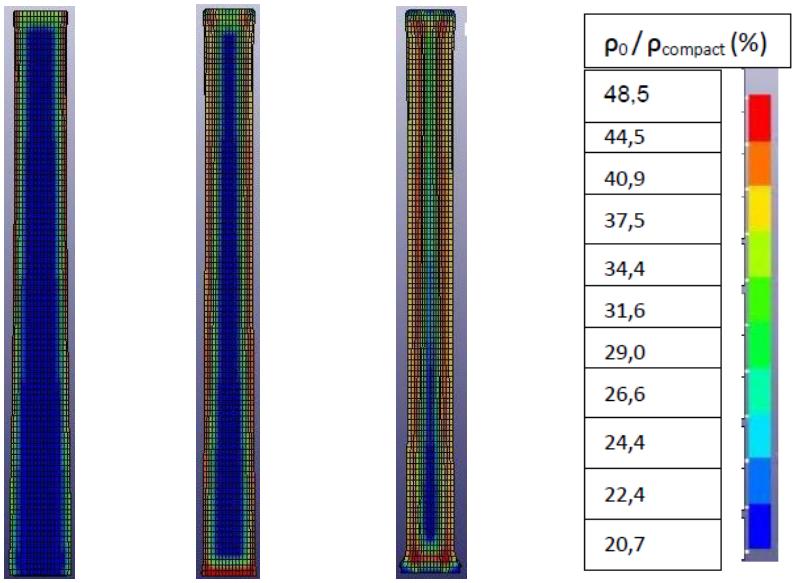
Στο Σχήμα 7.14 φαίνονται οι Σχετικές πυκνότητες της χάλκινης κόνης σε διάφορες χρονικές στιγμές, όπου το μικρότερο πορώδες εμφανίζεται στη διεπιφάνεια σωλήνα με κόνη, και μεγαλύτερο στο κέντρο, πράγμα που αποδεικνύεται και πειραματικά (Σχήμα 6.13), όπου το διάκενο μεταξύ του πορώδους υλικού είναι ορατό με το μικροσκόπιο. Γενικά το πορώδες του πειράματος είναι αρκετά μικρότερο, P=0.103, σε σύγκριση με της μοντελοποίησης. Το πορώδες στο κέντρο είναι της τάξης του P=0.40.



t = 0,036 ms t = 0,052 ms t = 0,070 ms

Σχήμα 7.14. Η διαμόρφωση της Σχετικής πυκνότητας του Χαλκού σε διάφορες χρονικές στιγμές α) t=0,036 ms β) t=0,052 ms, γ) t=0,07 ms

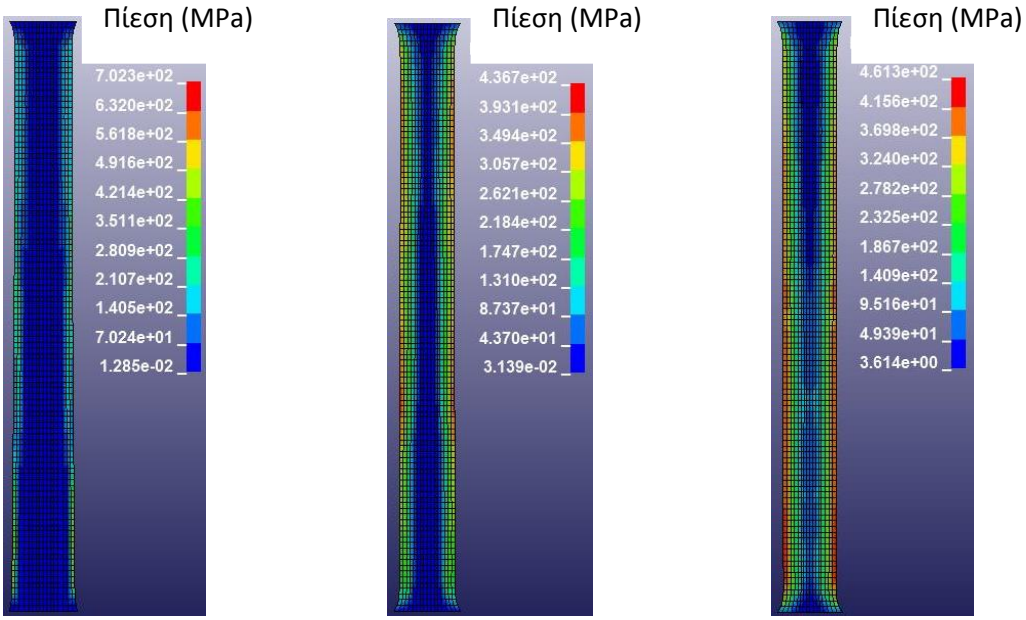
Στο Σχήμα 7.15 φαίνεται η σχετική πυκνότητα της κόνης της Αλουμίνας σε διάφορες χρονικές στιγμές. Όπως και με τις προηγούμενες προσομοιώσεις το μικρότερο πορώδες συναντάται στη διεπιφάνεια κόνης και σωλήνα



t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,07 ms

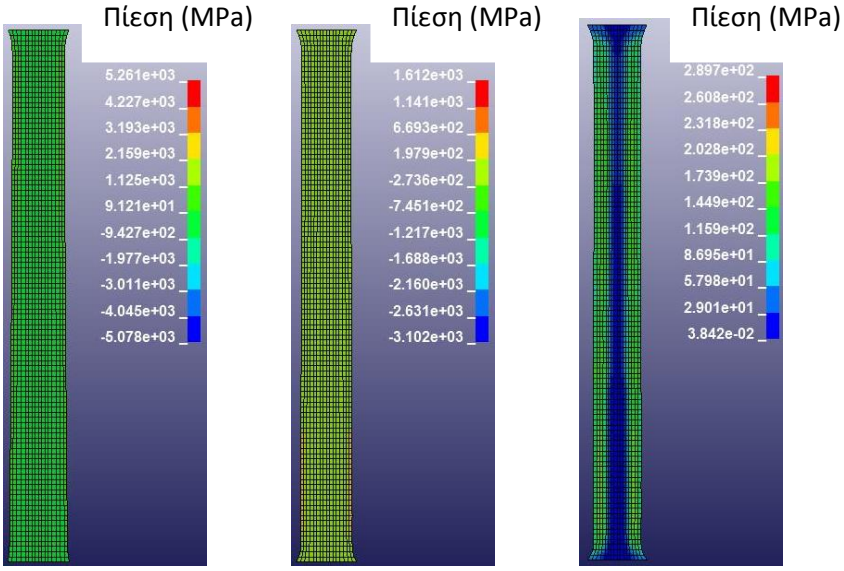
Σχήμα 7.15. Η διαμόρφωση της σχετικής πυκνότητας, σε διάφορες χρονικές στιγμές, για την κόνη της Αλουμίνας

Στα Σχήματα 7.16, 7.17 και 7.18 φαίνονται οι διακυμάνσεις της πίεσης σε ορισμένα χρονικά διαστήματα για τις κόνες Αλουμινίου, Χαλκού και Αλουμίνας. Όπως ήταν αναμενόμενο οι πιέσεις στη διεπιφάνεια σωλήνα και κόνης είναι μεγαλύτερες.



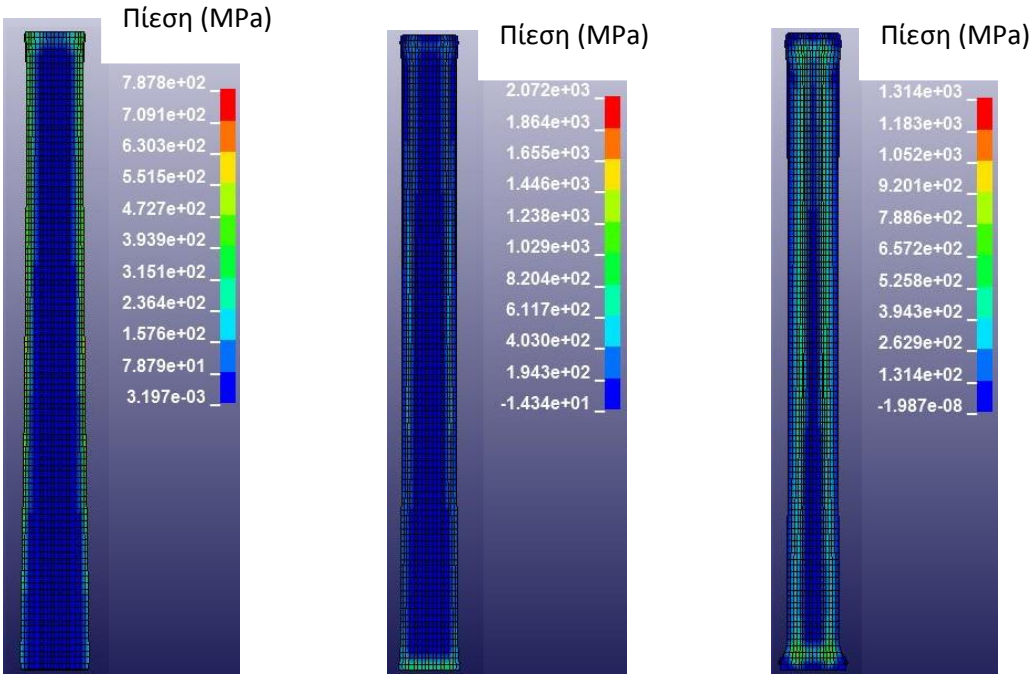
t =0,036 ms t=0,052 ms t=0,070 ms

Σχήμα 7.16. Οι διακυμάνσεις της πίεσης, σε διάφορες χρονικές στιγμές, για την κόνη του Αλουμινίου



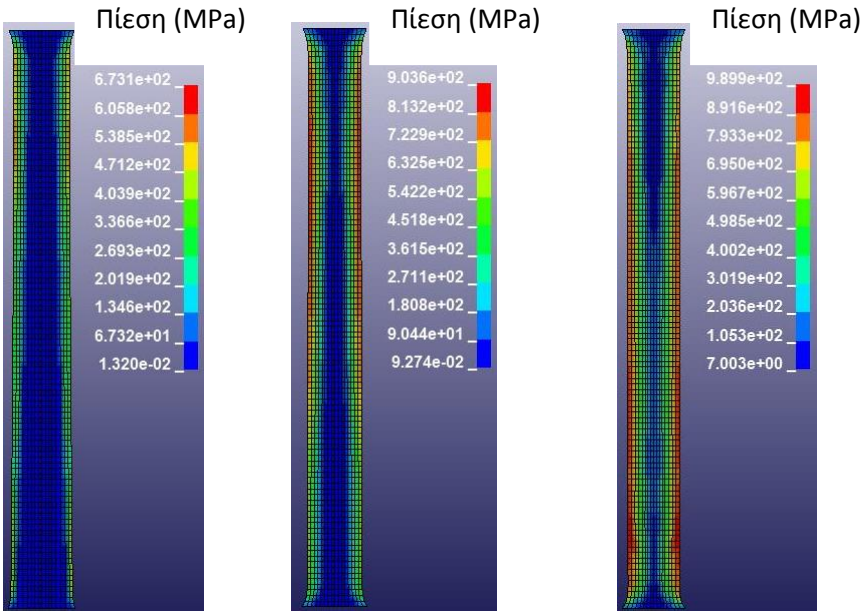
t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,07 ms

Σχήμα 7.17. Οι διακυμάνσεις της πίεσης για την κόνη Χαλκού



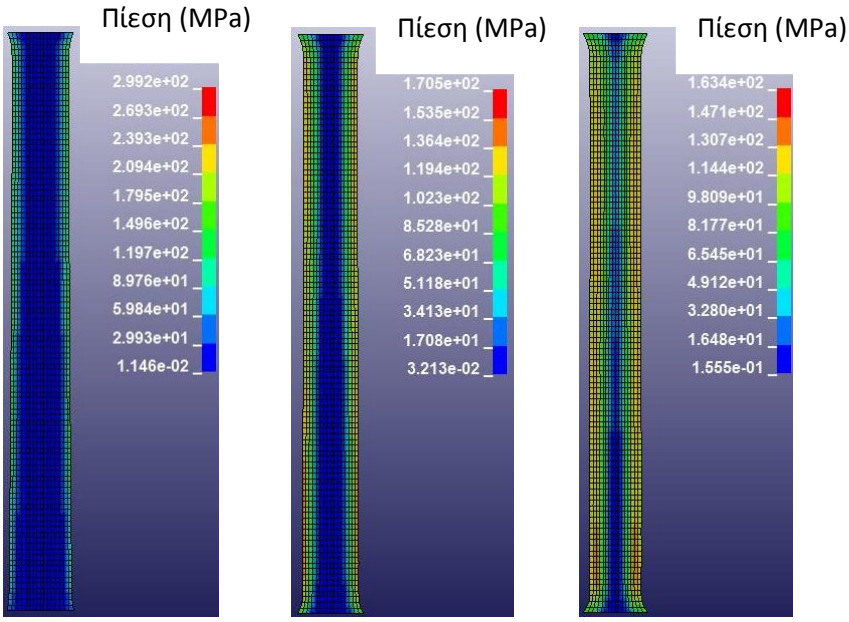
Σχήμα 7.18. Οι διακυμάνσεις της πίεσης για την κόνη Αλουμίνας.

Στα Σχήματα 7.19, 7.20 και 7.21 φαίνονται οι διακυμάνσεις των τάσεων Von Mises για τις κόνες του αλουμινίου, χαλκού και αλουμίνας σε διάφορες χρονικές στιγμές.



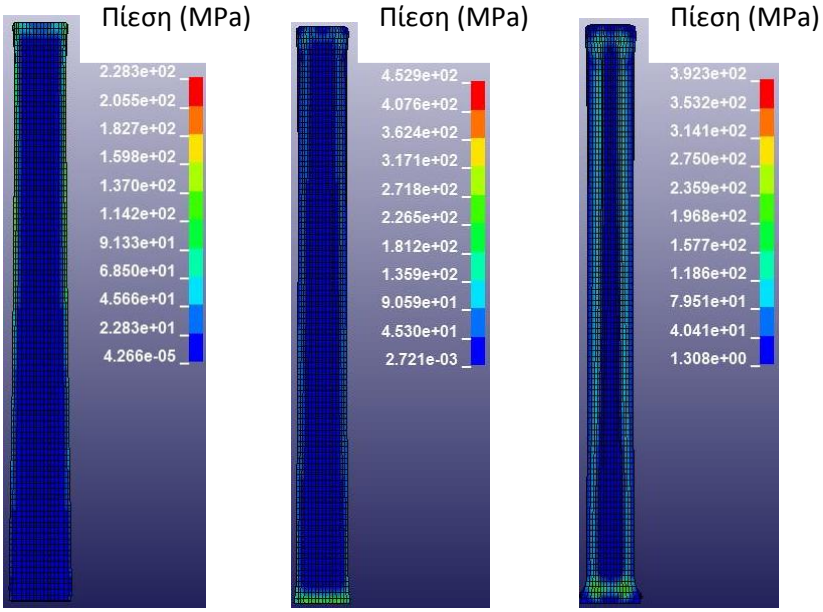
t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,07 ms

Σχήμα 7.19. Οι διακυμάνσεις των τάσεων Von Mises για την κόνη Αλουμινίου.



t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,07 ms

Σχήμα 7.19. Οι διακυμάνσεις των τάσεων Von Mises για την κόνη Χαλκού.



t=0,036 ms t=0,052 ms t=0,07 ms

Σχήμα 7.19. Οι διακυμάνσεις των τάσεων Von Mises για την κόνη Αλουμίνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά το πέρας των πειραμάτων, αναλύσεων, μετρήσεων και των μοντελοποιήσεων, το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι η εκρηκτική συμπίεση κόνεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υγειών δοκιμίων κάτω υπό προϋποθέσεις.

Το είδος του υλικού, μέταλλο ή κεραμικό, παίζει μεγάλο ρόλο στο τελικό πορώδες, με το χαλκό και το αλουμίνιο και το κράμα Καρβιδίου του Τιτανίου να επιτυγχάνουν αρκετά μικρότερο πορώδες από της Αλουμίνας.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης είχαν μια απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα άλλοτε μικρή και άλλοτε μεγαλύτερη, πράγμα αναμενόμενο αφού οι ιδανικές συνθήκες που επικράτησαν στη προσομοίωση δεν μπόρεσαν να γίνουν στο πείραμα, όπως ήταν το σημείο έναυση της πυροδότησης και η τέλεια γεωμετρία των υλικών. Επίσης το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των κόνεων, το Dyna το λαμβάνει ως συνεχές υλικό, ενώ στη πραγματικότητα είναι πορώδες. Επιπλέον, υπήρξε μια μικρή απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα μονοαξονικής και τριαξονικής ισοστατική συμπίεσης που λήφθηκαν από την βιβλιογραφία και προσαρμόστηκαν στο cap μοντέλο. Τέλος, το μοντέλο της Αλουμίνας, πειραματικά παρουσίασε διαρροή υλικού, πράγμα που στο Dyna δεν μπορεί να επιτευχθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α.Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: Μη συμβατικές κατεργασίες»

2. http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B1

3. http://en.wikipedia.org/wiki/Copper

4. http://www.wolframalpha.com/input/?i=copper&dataset=

5. http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium

6. Δημήτρης Ι. Παντελής, « Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Αθήνα 2008

7. Ε.Ν. Βοττέα, «Εκρηκτική συμπίεση υπεραγώγιμων κεραμικών υλικών προηγμένης τεχνολογίας: Πειραματική και αριθμητική μοντελοποίηση

8. P. W. Cooper, S.R. Kuroxski, “Introduction to the technology of explosives”, Wiley-VCH, New York, 1996

9. A. Jeffrey, J. Engelbrecht, “Nonlinear waves in solids”, Springer-Verlang, New York, 1994

10. M.A. Meyers, “Dynamic behavior of materials”, J. Wiley eds., New York, 1994

11. L.F. Henderson, “General laws for propagation of shock waves through matter”, Handbook of Shock Waves, Academic Press, 2001

12. D.J. Mynors, B. Zhnag, “Applicationsand capabilities of explosive forming”, j. Mat. Proc. Tech 125-126(2002), I.

13. Χ.Ε. Τσουτρέλης. «Εκρητικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων»

14. Hedi Chtourou, Michel Guillot, Augustin Gakwaya, “Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part1. Experimental material characterization and validation”, May 1997

15. Ls-Dyna, Keyword User’ s Manual, Volume 2, Material Models, May 2007, Version 971

16. L.H. Han, J.A. Elliot, A.C. Bentham, A. Mills, G.E. Amidon, B.C. Hancock, “A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders”

17. D. J. Steinberg, S. G. Cochran, and M. W. Guinan ,“A constitutive model for metals applicable at highstrain rate”, July 1979

18. Α. Γ. Μάμαλης, “Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά”, Αθήνα 2009

19. Α. Γ. Μάμαλης, “Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Δυναμικές Καταπονήσεις”, Αθήνα 2009

20. Ls-Dyna, Keyword User’s Manual, Volume 1, February 2012, Version 971 R6.0.0, Livermore Software Technology Corporation

21. C-Y. Chen, J-H. Shiuan, “The equation of state of detonation products obtained from cylinder expansion test”, Propellants, Expl. Pyrotechnics 19 (1994) 9-14

22. K.H. Warren, “HEMPDS User’s Manual”, Lawrence National Laboratory, 1983.

23. Gautam S. Wagle, Renata S. Engel, Ravi Bollina, and Randall M. German
Statistical Analysis of Modified Drucker-Prager Cap Model Parameters for
Application to Modeling Die Compaction.

24. C.L. Martin;, D.Bouvard, S.Shima, Study of particle rearrangement during powder compaction by the Discrete Element Method

25. Wolfgang Bier, “A Constitutive Model for Metal Powder and its Numerical Treatment using Finite Elements”

26. R. B. Canto, V. Tita, J. de Carvalho and B. de M. Purquerio, “Finite element simulation of ceramic powder isostatic pressing process using
material parameters of a uniaxial compaction”

27. S.C. Lee, K.T. Kim, “A study on the Cap model for metal and ceramic
powder under cold compaction”

28. ANSYS LS-DYNA User’s Guide

29. http://www.dynasupport.com