



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΙΒΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΑΡΡΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων: Γεώργιος Παναγιώτου

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΥΛΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΙΒΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΑΡΡΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων: Γεώργιος Παναγιώτου

Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις.....

Γεώργιος Παναγιώτου, Καθηγητής,..... (Υπογραφή)

Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής, (Υπογραφή)

Μαρία Μενεγάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια, (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Παναγιώτου, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ο οποίος με βοήθησε καθοριστικά με τις συμβουλές και τις υποδείξεις του, τόσο στην συγκέντρωση πληροφοριών όσο και στην διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της παρούσης εργασίας. Οφείλω να αποδώσω στην αφοσίωσή του, τόσο την ποιότητα της διπλωματικής εργασίας όσο και την συντόμευση του χρόνου εκπόνησής της.

Ευχαριστώ, επίσης, το προσωπικό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων, την κυρία Μαρία Μπασάνου, Διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών (ΕΔΙΠ) και τον κύριο Ευστάθιο Τριάντη ως Ειδικό Τεχνικό Εργαστηριακό Προσωπικό (ΕΤΕΠ), για την πολύτιμη βοήθεια τους στην διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως αντικείμενο της την ευαισθησία των εκρηκτικών υλών στην τριβή και ειδικά τον εργαστηριακό προσδιορισμό της ευαισθησίας με την δοκιμή BAM Friction Test.

Διάφοροι μηχανισμοί, όπως η δημιουργία θερμών σημείων και η τριβή, μπορούν να προκαλέσουν την τυχαία έναυση εκρηκτικών υλών, δηλαδή την διέγερση του εκρηκτικού χωρίς την παρουσία κάποιου πυροδότη. Η κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν την ευαισθησία των εκρηκτικών είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος στην έρευνα των εκρηκτικών υλών, ιδίως σε ότι αφορά τον ασφαλή χειρισμό τους.

Οι σημαντικότερες εκτιμήσεις που πρέπει να καθοριστούν για μια εκρηκτική ύλη είναι, η ευαισθησία στην κρούση, η ευαισθησία στην τριβή, η ηλεκτροστατική ευαισθησία και η θερμική ευαισθησία. Ο προσδιορισμός κάθε μία από αυτές τις ευαισθησίες είναι απαραίτητος για την κατηγοριοποίηση των εκρηκτικών ουσιών ως προς την επικινδυνότητα τους.

Υπάρχουν διάφορες δοκιμές ικανές να προσδιορίσουν την ευαισθησία των εκρηκτικών υλών ως προς την τριβή. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας εξετάζεται ο πειραματικός προσδιορισμός της ευαισθησίας στην τριβή με την πρότυπη δοκιμή BAM για διάφορες εκρηκτικές ουσίες, όπως ANFO, BioANFO, PETN, TNT, Μαύρη Πυρίτιδα, Αμμωνίτη, Ζελατινοδυναμίτιδα και Εκρηκτικό Γαλάκτωμα. Οι αρχές της δοκιμής, η συσκευή και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	v
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vi
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Εκρηκτικές ύλες και η σπουδαιότητά τους.....	1
2 Έναυση των εκρηκτικών υλών.....	5
2.1 Θεωρία διέγερσης με τον σχηματισμό ‘θερμών σημείων’ (Hot Spot Theory).....	5
2.1.1 Διέγερση από την ταχεία σύνθλιψη φυσαλίδων και κενών με αέρα.....	7
2.1.2 Διέγερση με τριβή.....	9
2.1.3 Διέγερση με αδιαβατική διάτμηση.....	11
2.1.4 Σχηματισμός θερμών σημείων στις άκρες των ρωγμών και σε διαταραγμένες περιοχές.....	13
2.2 Σύνοψη.....	14
3 Ευαισθησία των εκρηκτικών υλών.....	15
3.1 Κύριες Ευαισθησίες.....	15
3.2 Κατηγοριοποίηση.....	21
4 Προσδιορισμός της ευαισθησίας τριβής.....	22
4.1 Αρχή της δοκιμής BAM Friction Test.....	22
4.2 Περιγραφή της διαδικασίας της δοκιμής.....	23
4.2.1 Ευρωπαϊκές προδιαγραφές – EN13631-3.....	25
4.2.2 Αμερικάνικες πρακτικές – LLNL.....	26
5 Πειραματικός προσδιορισμός της ευαισθησίας της τριβής.....	27
5.1 Η Συσκευή.....	27
5.2 Πειράματα.....	31
5.2.1 Ζελατινοδυναμίτιδα.....	31
5.2.2 TNT.....	31
5.2.3 Αμμωνίτης.....	32
5.2.4 Μαύρη πυρίτιδα.....	33
5.2.5 Πετραμμωνίτης – ANFO.....	34
5.2.6 Bio – ANFO.....	36
5.2.7 Εκρηκτικό γαλάκτωμα.....	36
5.2.8 Πεντρίτης – PETN.....	37
5.2.9 Ζάχαρη.....	37
5.3 Πειραματική διαδικασία.....	38
6 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	41
6.1 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για ANFO.....	41
6.2 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για BioANFO.....	41
6.3 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Μαύρη πυρίτιδα (Black powder).....	42
6.4 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Πεντρίτη (PETN).....	42
6.5 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Αμμωνίτη (Ammonit).....	43
6.6 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για το Εκρηκτικό Γαλάκτωμα (Emulsion explosive).....	44

6.7	Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζάχαρη.....	45
6.8	Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζελατινοδυναμίτιδα (Gelatine – Dynamite)...	45
6.9	Αποτελέσματα δοκιμής BAM για TNT.....	46
7	Συμπεράσματα.....	48
	Βιβλιογραφία.....	49
	Παράρτημα I.....	51
	Άλλες δοκιμές προσδιορισμού της ευαισθησίας στην τριβή.....	51
	UK Mallet friction Test.....	51
	US Bureau of Mines Pendulum Friction Test.....	51
	US Navy Weapons Center, Friction Pendulum Test.....	52
	UK Rotary friction Test.....	53
	Αποτελέσματα δοκιμών.....	54
	Παράρτημα II.....	55
	Τεχνικές προδιαγραφές συσκευής BAM Friction Sensitivity Tester FSKM.....	55

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Τυποποιημένες γομώσεις της στρατιωτικής εκρηκτικής ύλης C4.....	2
Εικόνα 2. Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες.....	3
Εικόνα 3. Εργασία γόμωσης διατρήματος με εκρηκτικές ύλες.....	4
Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας θερμών σημείων και η μετάβαση στην διαδικασία της έκρηξης (Akiki and Menon, 1771).....	6
Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση θερμού σημείου μέσω της συμπίεσης του αερίου σε ένα σφαιρικό κενό ((Akiki and Menon, 1771).....	7
Εικόνα 6. Αναπαράσταση του σχηματισμού θερμών σημείων, εξαιτίας των δυνάμεων τριβής μεταξύ δύο τριβόμενων επιφανειών.....	10
Εικόνα 7. Δημιουργία ζωνών διάτμησης μέσα σε ένα υλικό κατά την αλληλεπίδραση του με διατρητικό σώμα (Hudson, 2012).....	12
Εικόνα 8. α) Η συσκευή της δοκιμής Drophammer. b) λεπτομερές γράφημα της δοκιμής Drophammer.....	16
Εικόνα 9. Συσκευή της δοκιμής BAM Friction test.....	16
Εικόνα 10. Διάταξη ηλεκτροστατικής δοκιμής.....	18
Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής steel sleeve test.....	20
Εικόνα 12: Αποτελέσματα από μια δοκιμή steel sleeve για ένα νέο εκρηκτικό με 8 και 10mm διάμετρο ακροφυσίων.....	20
Εικόνα 13: Εξοπλισμός και συσκευή δοκιμής BAM, Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ.....	23
Εικόνα 14: Σχεδιαστική αναπαράσταση της θέσης της εκρηκτικής ύλης κατά τη δοκιμή. Α) ακίδα διαμέτρου 10mm * 15mm, Β) Δοκιμαζόμενη ουσία, C) Πορσελάνινη πλάκα 25*25*5mm.....	24
Εικόνα 15: Συσκευή BAM Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ. 1-πίνακας τροφοδοσίας (AC-DC), 2-διακόπτης έναρξης, 3-τράπεζα εργασίας, 4-μικρά αντίβαρα, 5-κυρίως αντίβαρα, 6-ακίδα, 7-κινητό φορείο, 8-βραχίονας φόρτισης, 9-βάρος, 10-οθόνη χειρισμού, 11-κύριως διακόπτης.....	27
Εικόνα 16: Βασικά βάρη δοκιμής BAM.....	29
Εικόνα 17: Πορσελάνινη ακίδα και πορσελάνινη πλάκα.....	30
Εικόνα 18: Κουταλάκια δοσολογίας 5,10 και 40mm ³	31
Εικόνα 19. Δείγμα Ζελατοδυναμίτιδα.....	32
Εικόνα 20. Δείγμα TNT.....	32
Εικόνα 21. Δείγμα Αμμωνίτη.....	33
Εικόνα 22. Δείγμα Μαύρης πυρίτιδας.....	34
Εικόνα 23. Δείγμα Πετραμμωνίτη – ANFO.....	35
Εικόνα 24. Δείγμα BioANFO.....	35
Εικόνα 25. Δείγμα Εκρηκτικού γαλακτώματος.....	36
Εικόνα 26. Δείγμα Πεντρίτη – PETN.....	37
Εικόνα 27. Δείγμα Ζάχαρης.....	38
Εικόνα 28: Ειδικό εργαλείο-μετρητής για την μέτρηση ουσιών σε μορφή πάστας.....	39
Εικόνα 29: Υπό δοκιμή δείγμα μορφής πάστας πριν την έναρξη της δοκιμής.....	39
Εικόνα 30: Εκκρεμές της δοκιμής τριβής του US Bureau of Mines (Pendulum Friction Test).....	52
Εικόνα 31: UK Rotary friction test.....	53

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές για κρούση, τριβή και ηλεκτροστατική ευαισθησία ορισμένων εκρηκτικών (Klarotke, 2012).....	18
Πίνακας 2. Κατηγοριοποίηση των Ηνωμένων Εθνών για επικίνδυνες ουσίες (United Nations, 1995).....	19
Πίνακας 3. Απαραίτητες πρότυπες δοκιμές για την κατηγοριοποίηση επικίνδυνων ουσιών (United Nations, 1995).....	21
Πίνακας 4. Φορτίο τριβής ανάλογα με το νούμερο του βάρους και της εγκοπής που τοποθετείται.....	29
Πίνακας 5. Μάζα βασικών βαρών BAM.....	29
Πίνακας 6. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για ANFO.....	41
Πίνακας 7. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για BioANFO.....	42
Πίνακας 8. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Μαύρη Πυρίτιδα.....	42
Πίνακας 9. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Πεντρίτη (PETN).....	43
Πίνακας 10. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Αμμωνίτη.....	44
Πίνακας 11. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Εκρηκτικό Γαλάκτωμα.....	44
Πίνακας 12. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζάχαρη.....	45
Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζελατινοδυναμίτιδα.....	46
Πίνακας 14. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για TNT.....	47
Πίνακας 15. Σύγκριση διάφορων δοκιμών τριβής (Zukas, 1997).....	54

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ευαισθησίας των εκρηκτικών υλικών ως προς την τριβή. Η μελέτη εντριβεί τόσο στο θεωρητικό πλαίσιο γύρω από το οποίο μπορεί να προκληθεί διέγερση των εκρηκτικών υλών υπό την επίδραση της τριβής, όσο και στον πειραματικό προσδιορισμό της ευαισθησίας της τριβής για εκρηκτικές ύλες με την πρότυπη μέθοδο BAM Friction Test. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αποτελούν σημαντική πηγή δεδομένων σχετικά με την ευαισθησία των εκρηκτικών υλών και κατά συνέπεια την ασφαλή χρήση και μεταφορά τους.

1.2 Εκρηκτικές ύλες και η σπουδαιότητά τους

Εκρηκτικές ύλες, ή κοινώς εκρηκτικά, ονομάζονται κάποιες απλές ή σύνθετες ουσίες, οι οποίες περιέχουν μεγάλη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας που κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορεί να απελευθερωθεί απότομα προκαλώντας έκρηξη, δηλαδή έκλυση μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε εξαιρετικά μικρό χρονικό διάστημα υπό μορφή κρουστικού κύματος, παράγοντας αέρια υψηλής πίεσης και πολλαπλάσιου όγκου.

Οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις στρατιωτικές (military) και τις εμπορικές ή βιομηχανικές (commercial ή industrial) εκρηκτικές ύλες.

Οι στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες έχουν ως σκοπό την καταστροφή κατασκευών, εγκαταστάσεων, εξοπλισμού κτλ., όπως για παράδειγμα είναι το TNT, PETN, RDX, C4 κ.α. ή την προώθηση βλημάτων, όπως για παράδειγμα η άκαπνη πυρίτιδα. Επειδή χρησιμοποιούνται σε συνθήκες μάχης, πρέπει να παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία στην κρούση, την τριβή και την θερμότητα, και να έχουν μεγάλη ισχύ ανά μονάδα βάρους. Επίσης, θα πρέπει να μπορούν να παραμένουν αποθηκευμένες για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να αλλοιώνονται. Λόγω των παραπάνω 'ειδικών' χαρακτηριστικών τους, οι στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με τις εμπορικές εκρηκτικές ύλες.

Ορισμένες στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες, όπως για παράδειγμα το TNT και το PETN, χρησιμοποιούνται και σε βιομηχανικές εφαρμογές, π.χ. για την παρασκευή των καψυλλίων και της ακαριαίας θρυαλλίδας (PETN) ή εναυσματικών/ενισχυτικών γομώσεων (μίγμα PETN και TNT), καθώς και για την ευαισθητοποίηση ορισμένων εμπορικών εκρηκτικών υλών, π.χ. της αμμωνίτιδας με TNT.



Εικόνα 1. Τυποποιημένες γομώσεις της στρατιωτικής εκρηκτικής ύλης C4

Οι εμπορικές εκρηκτικές ύλες χρησιμοποιούνται, κυρίως, για την εξόρυξη πετρωμάτων. Οι εκρηκτικές ύλες είναι στερεές ή υγρές (παχύρευστες) και διατίθενται στα εργοτάξια συσκευασμένες σε φυσίγγια διαφόρων διαμέτρων ή χύμα σε σάκους. Ορισμένες στερεές εκρηκτικές ύλες έχουν κοκκώδη μορφή, γεγονός που τους επιτρέπει να ρέουν, καταλαμβάνοντας όλο τον όγκο του διατρήματος που ανοίγεται στο μέτωπο όταν γομώνονται χύμα, όπως συμβαίνει και με τις υγρές, αποφέροντας καλύτερα αποτελέσματα στην έκρηξη. Παρασκευάζονται στα εργοστάσια εκρηκτικών υλών και μεταφέρονται στο εργοτάξιο για άμεση χρήση ή αποθήκευση, ακολουθώντας τις διαδικασίες που προβλέπονται από την νομοθεσία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν οι εκρηκτικές ύλες παρασκευάζονται με την ανάμιξη πρώτων υλών -οι οποίες από μόνες τους δεν είναι εκρηκτικές- μπορούν να παρασκευαστούν, κατόπιν αδείας, και στο εργοτάξιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εκρηκτική ύλη ANFO, η οποία παρασκευάζεται με την ανάμιξη νιτρικού αμμωνίου (οξειδωτικό λίπασμα) και πετρελαίου ντίζελ (καύσιμο) σε αναλογία 94/6 κατά βάρος. (Παναγιώτου, 2015)

Εκείνο που χαρακτηρίζει τις εκρηκτικές ύλες, δεν είναι η ποσότητα της αποδιδόμενης ενέργειας κατά την αντίδραση, αλλά η αναπτυσσόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή η ισχύς της, που είναι τεράστια και οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η χημική αντίδραση της (μέχρι 8000 m/s). Ακριβώς αυτή η ικανότητα της εκρηκτικής ύλης να αποδίδει την ενέργειά της σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε περιορισμένο τμήμα του πετρώματος την καθιστά κατάλληλη για την θραύση του (Τσουτρέλης, 1997).



Εικόνα 2. Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες

Ανάλογα με το είδος της εκρηκτικής ύλης, η αντίδραση της έκρηξης μπορεί να γίνεται με ρυθμό (ταχύτητα έκρηξης – velocity of detonation) που είναι μικρότερος από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο υλικό της εκρηκτικής ύλης, η οποία συνήθως είναι μικρότερη από 1500m/s. Στην περίπτωση αυτή, την αντίδραση την ονομάζουμε κατάκαυση (deflagration) και τις εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής τις ονομάζουμε βραδυδραστικές (Low Explosives-LE). Στην εξόρυξη των πετρωμάτων η μόνη βραδυδραστική εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται είναι η μαύρη πυρίτιδα. Οι βραδυδραστικές εκρηκτικές ύλες διεγείρονται προς έκρηξη με την θερμότητα (φλόγα).

Εάν ο ρυθμός της αντίδρασης είναι μεγαλύτερος από την ταχύτητα του ήχου στο υλικό της εκρηκτικής ύλης, τότε αναφερόμαστε περί εκρηκτικής αντίδρασης (detonation) και τις εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής τις ονομάζουμε διαρρηκτικές (High Explosives-HE). Η ταχύτητα έκρηξης των διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών κυμαίνεται από 1800-8000m/s. Οι εκρηκτικές ύλες της κατηγορίας αυτής διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: α) τις πρωτογενείς (primary HE) οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με την θερμότητα (π.χ. το αζίδιο του μολύβδου) και χρησιμοποιούνται στην γόμωση των καψυλλίων, β) τις δευτερογενείς (secondary HE) οι οποίες διεγείρονται προς έκρηξη με μηχανικό τρόπο (κρουστικό κύμα). (Παναγιώτου, 2015)

Όλες οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη πετρωμάτων, με εξαίρεση την μαύρη πυρίτιδα που έχει περιορισμένη χρήση στην εξόρυξη διακοσμητικών λίθων, ανήκουν στην κατηγορία των δευτερογενών διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών (δυναμίτιδες, αμμωνίτιδες, ANFO, εκρηκτικά γαλακτώματα κ.α.).



Εικόνα 3. Εργασία γόμωσης διατρήματος με εκρηκτικές ύλες

2 Έναυση των εκρηκτικών υλών

Η εμφάνιση των νέων υψηλής-απόδοσης εκρηκτικών υλών απαιτεί την ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνικών, προκειμένου να προβλεφθεί η απόδοση και η ευαισθησία τους. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια κίνηση προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης μη ευαίσθητων εκρηκτικών, τα οποία είναι ενεργειακά υλικά (energetic materials) με μειωμένη ευαισθησία σε τυχαία διέγερση. Με εφαρμογές σε προωθητικές συσκευές, στην εξόρυξη, και την ανάπτυξη των οπλικών συστημάτων, η κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν την ευαισθησία των εκρηκτικών έχει γίνει αντικείμενο ενδιαφέροντος στην έρευνα των ενεργειακών υλικών.

2.1 Θεωρία διέγερσης με τον σχηματισμό 'θερμών σημείων' (Hot Spot Theory)

Η έκρηξη ενός εκρηκτικού γενικά θεωρείται ότι είναι μια θερμική διαδικασία. Ωστόσο, εδώ και πολλά χρόνια επικρατούσε η άποψη ότι η ενέργεια που παρέχεται σε ένα εκρηκτικό υλικό μετά από κρούση ή τριβή δεν ήταν αρκετή για να αυξήσει τη θερμοκρασία του τόσο ώστε να προκαλέσει ανάφλεξη ή έκρηξη. Ως εκ τούτου, οι επιστήμονες συμπεράναν ότι πρέπει να επισυμβεί η συγκέντρωση ενέργειας και η συμπύκνωσή της σε διακριτές περιοχές της μάζας του εκρηκτικού.

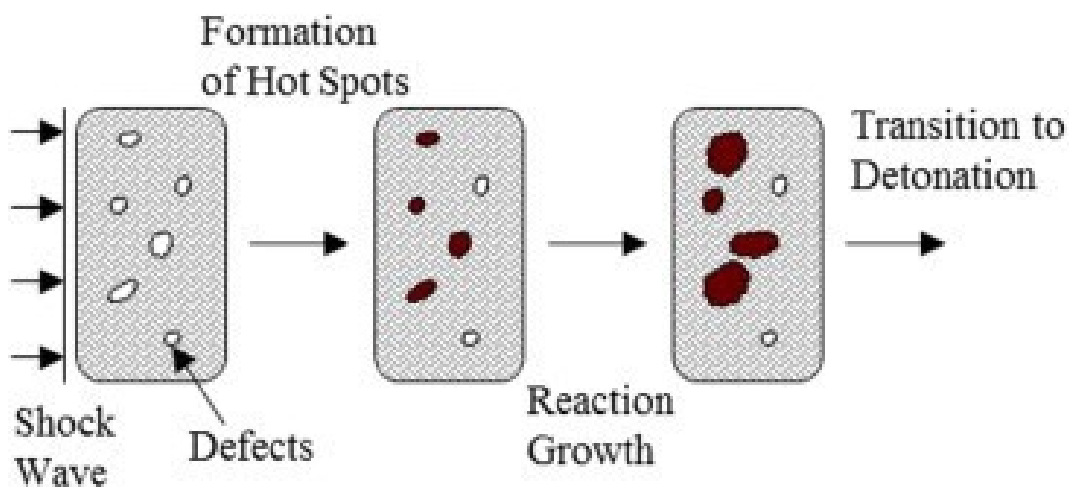
Τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες σχετικά με την διέγερση στερεών εκρηκτικών υλών εξαιτίας της τριβής, με επικρατέστερη την θεωρία περί 'θερμών σημείων' (hot spot theory) των Bowden και Yoffe (1949, 1952). Με βάση αυτή την θεωρία, τα 'θερμά σημεία' μπορούν να δημιουργηθούν κυρίως από: α) αδιαβατική συμπίεση των φυσαλίδων αερίων που παγιδεύονται στο εκρηκτικό, β) τριβή μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών της μάζας των εκρηκτικών ή μεταξύ μεμονωμένων κρυστάλλων του υλικού. Ένας άλλος μηχανισμός που έχει διατυπωθεί είναι ο σχηματισμός ζωνών διάτμησης, που προκαλείται από μία μη ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό ενός κρυστάλλου. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από τις ζώνες διάτμησης μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος υλικού και να αποτελέσει σημείο έναυσης του υλικού. Μερικοί ακόμα μηχανισμοί έχουν διατυπωθεί, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας στις άκρες των ρωγμών και η συσσώρευση διαταραγμένων περιοχών, ωστόσο αυτές οι διαδικασίες έχουν αποδειχθεί ανεπαρκείς από μόνες τους για να αποτελέσουν 'θερμά σημεία', και κατά συνέπεια να οδηγήσουν στην διέγερση του υλικού.

Φαίνεται ότι ο σχηματισμός των 'θερμών σημείων' συμβαίνει με μία ποικιλία διεργασιών εκ των οποίων καμία δεν είναι μεμονωμένα κυρίαρχη. Σύμφωνα με τον Hudson (2012), μία συνολική περιγραφή ενός 'θερμού σημείου' μπορεί να δοθεί ως:

1. μία περιοχή όπου η μηχανική ενέργεια είναι εξαιρετικά συγκεντρωμένη και συμπυκνωμένη
2. ύπαρξη μιας θερμής μάζας γύρω από αυτή την περιοχή
3. η δημιουργία ή η ύπαρξη μιας περιοχής που καταλαμβάνεται από αέριο

4. ροή θερμότητας μεταξύ των περιοχών αυτών
5. χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην διεπαφή του αέριου και του στερεού υλικού

Τα χαρακτηριστικά των θερμών σημείων εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης και την ενέργεια που διατίθεται για την διέγερση της γόμωσης. Έχει υπολογιστεί ότι ένα 'θερμό σημείο' για να είναι σε θέση να προκαλέσει την διέγερση ενός εκρηκτικού θα πρέπει να φθάσει σε θερμοκρασία τουλάχιστον 500°C, και να παραμένει σε αυτή μεταξύ 10μs και 1ms, ενώ το μέγεθός του να είναι μεταξύ 0,1 και 10 μm. Σε ένα μεγαλύτερο 'θερμό σημείο' η θερμοκρασία που παράγεται είναι χαμηλότερη, αφού η θερμική ενέργεια απορροφάται ταχύτερα από το περιβάλλον.



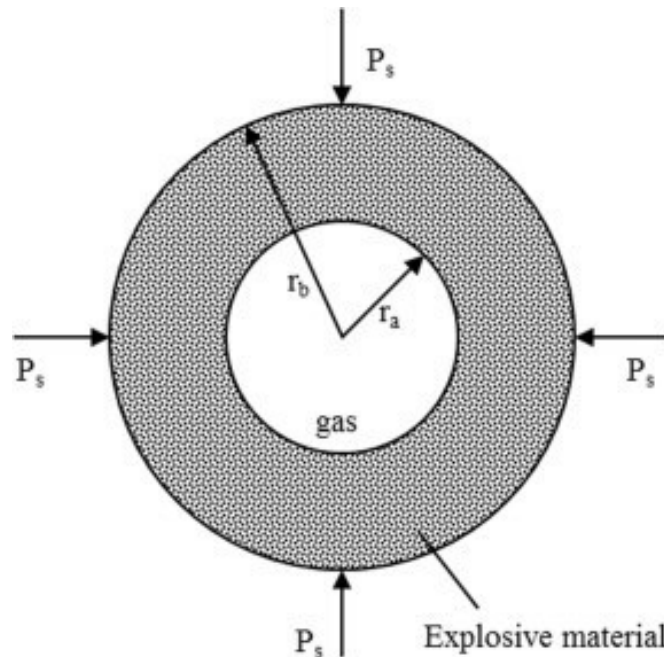
Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας θερμών σημείων και η μετάβαση στην διαδικασία της έκρηξης (Akiki and Menon, 1771)

Το σχηματικό διάγραμμα της εικόνας (4) περιγράφει τη διαδικασία σχηματισμού θερμών σημείων που οδηγεί μετέπειτα στην έκρηξη. Στα πρώτα στάδια της διαδικασίας, τα 'θερμά σημεία' σχηματίζονται λόγω της διέλευσης του εκρηκτικού κύματος και την αλληλεπίδρασή του με την μικροδομή του υλικού. Αυτό μπορεί να προκληθεί από την σύνθλιψη ενός κενού, καθώς και άλλες διαδικασίες θέρμανσης, όπως οι διεργασίες τριβής. Εάν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αρκετά υψηλή για να αναφλεχθεί το υλικό, αρχίζει να συμβαίνει αντίδραση. Σε αυτό το σημείο, η διαδικασία μπορεί είτε να είναι αρκετά ισχυρή και να προκαλέσει μετάβαση σε έκρηξη, ή μπορεί να είναι αδύναμη και να καταστρέψει τα 'θερμά σημεία'.

2.1.1 Διέγερση από την ταχεία σύνθλιψη φυσαλίδων και κενών με αέρα

Σε αμφότερες τις στερεές εκρηκτικές ουσίες όπως το RDX, και τα υγρά εκρηκτικά, όπως η νιτρογλυκερίνη, υπάρχουν μικροσκοπικές φυσαλίδες αερίων και κενά που κάνουν τα υλικά

αυτά ευαίσθητα σε αιφνίδια ταραχή ή κρούση. Αυτές οι φυσαλίδες αερίων και οι ελεύθεροι χώροι γίνονται 'θερμά σημεία' κατά τη διάρκεια της συμπίεσης τους από μια εφαρμοσμένη δύναμη. Η συμπίεση αυξάνει τη θερμοκρασία του παγιδευμένου αερίου σε ένα σημείο, όπου το περιβάλλον υλικό μπορεί να φτάσει τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του.



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση θερμού σημείου μέσω της συμπίεσης του αερίου σε ένα σφαιρικό κενό ((Akiki and Menon, 1771)

Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται με ένα ιδανικό αέριο σε συμπιεζόμενη φυσαλίδα αέρα εξαρτάται από την αρχική πίεση του, όπως αυτή ορίζεται πριν από τη συμπίεση και την τελική του πίεση. Αυτή η θερμοκρασία εκφράζεται με την εξίσωση (1):

Εξίσωση 1:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma-1/\gamma}$$

Όπου: T_1 και T_2 είναι οι αρχικές και τελικές θερμοκρασίες των φυσαλίδων αερίου, τα P_1 και P_2 οι αρχικές και τελικές πιέσεις εντός της φυσαλίδας, και γ η αναλογία των ειδικών θερμοτήτων, όπου γ δίνεται από την εξίσωση 2:

Εξίσωση 2:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Όπου C_p είναι η θερμοχωρητικότητα μιας ουσίας υπό σταθερή πίεση και C_v η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο.

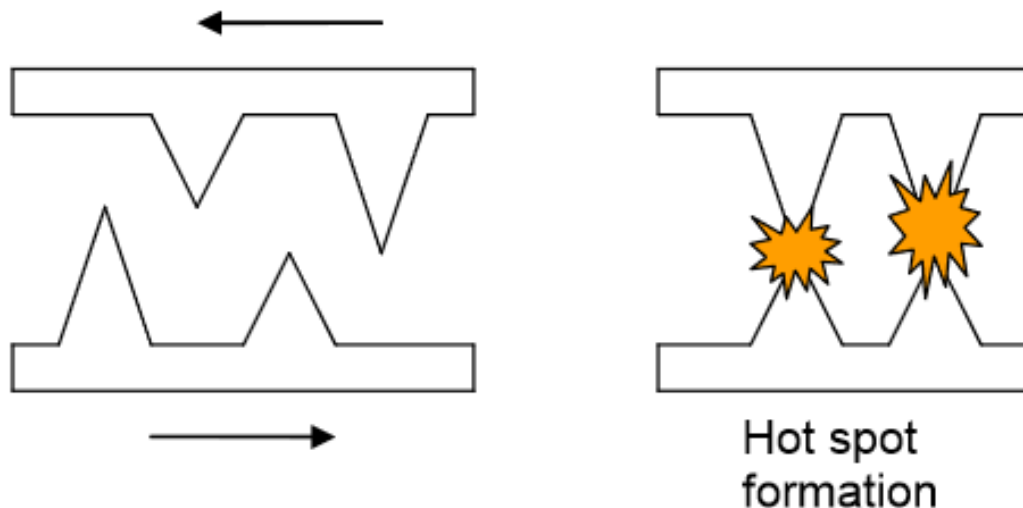
Μπορεί να φανεί από την εξίσωση (1), ότι η τελική θερμοκρασία που επιτυγχάνεται από τη φυσαλίδα αερίου εξαρτάται από την αρχική πίεση στο εσωτερικό της. Μια υψηλότερη αρχική πίεση του αερίου θα οδηγήσει σε μια χαμηλότερη τελική θερμοκρασία. Αυτό έχει συνέπειες για το πως η εκρηκτική ύλη θα συμπεριφερθεί, όταν υποβληθεί σε μια αιφνίδια δυναμική προσβολή. Για παράδειγμα, εάν η νιτρογλυκερίνη υποβληθεί σε ενέργεια κρούσης $5000\text{g}\cdot\text{cm}$ σε μία αρχική πίεση μιας ατμόσφαιρας, θα συμβεί έκρηξη, αλλά αν η αρχική πίεση φυσαλίδας ανυψωθεί σε 20-30 ατμόσφαιρες δεν παρατηρείται κάποια έκρηξη του υλικού κάτω από την ίδια ενέργεια κρούσης (Bowden and Yoffe, 1952). Οι Chaudhary και Field απέδειξαν ότι οι φυσαλίδες αερίων με διάμετρο που κυμαίνεται από το 1mm έως 50μm, όταν συμπιεστούν από μία σχετικά μικρή ενέργεια κρούσης, των 0,1 GPa, είναι σε θέση να προκαλέσουν διέγερση σε εκρηκτικές ύλες, συμπεριλαμβανομένου του PETN. Προκειμένου να διαπιστώσουν τη σημασία της μεταφοράς θερμότητας από την σύνθλιψη της φυσαλίδας στην μάζα του εκρηκτικού, ένας κρύσταλλος αζωτούχου μόλυβδου επικαλύφθηκε με στρώση πάχους 300nm από χρυσό ή ασήμι. Διαπιστώθηκε ότι αυτό μείωσε σημαντικά την πιθανότητα έναυσης του εκρηκτικού όταν η φυσαλίδα συνθλίφθηκε από το κρουστικό κύμα. Κατέληξαν έτσι στο συμπέρασμα ότι η αδιαβατική θέρμανση της φυσαλίδας του αερίου κατά τη διάρκεια της σύνθλιψής της και η μεταφορά θερμότητας ήταν οι κύριες αιτίες του σχηματισμού των 'θερμών σημείων' και της διέγερσης των εκρηκτικών (Hudson, 2012). Σε μια μεταγενέστερη μελέτη οι Field και Bourne χρησιμοποίησαν πλάκες από ένα εκρηκτικό γαλάκτωμα νιτρικού αμμωνίου - νιτρικού νατρίου, οι οποίες είχαν σχεδιαστεί με κυλινδρικές κοιλότητες στο εσωτερικό τους. Αυτές οι πλάκες υποβλήθηκαν σε πιέσεις κρούσης που κυμαίνονται από 0,3 έως 10GPa. Κατά την πρόσκρουση του κρουστικού κύματος ένας πίδακας αερίου (jet) σχηματίστηκε ταξιδεύοντας προς στην ίδια κατεύθυνση με εκείνη του κρουστικού κύματος. Ο πίδακας διέσχισε την κοιλότητα και χτύπησε την απέναντι πλευρά της στέλνοντας ένα κρουστικό κύμα στο περιβάλλον υλικό. Το παγιδευμένο αέριο εντός της κοιλότητας συμπίεστηκε ταχέως και θερμάνθηκε σε θερμοκρασία αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει φωταύγεια, υποδηλώνοντας ότι το παγιδευμένο αέριο έφτασε σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 800°K . Η διάρκεια αυτών των υψηλών θερμοκρασιών ήταν κάτω από 1μs. Όταν ο πίδακας διείσδυσε την απέναντι πλευρά ένα ζευγάρι των δινών που δημιουργήθηκε ταξίδεψε προς την ίδια κατεύθυνση με το προωθούμενο κρουστικό κύμα. Όταν η κοιλότητα κατέρρευσε, παρατηρήθηκε αντίδραση μεταξύ του αερίου που καταλάμβανε την κοιλότητα και το περιβάλλον υλικό (Hudson, 2012). Σε αντίθεση με προηγούμενες θεωρίες του Field, ο κυρίαρχος μηχανισμός διέγερσης θεωρήθηκε ότι προκλήθηκε από τον

σχηματισμό πίδακα και στη συνέχεια την κατάρρευση της κοιλότητας.

Εν κατακλείδι, όταν μια μεγαλύτερη κοιλότητα καταρρέει σχετικά αργά, η αδιαβατική θέρμανση του παγιδευμένου αερίου είναι η κύρια διαδικασία πίσω από το σχηματισμό των θερμών σημείων. Σε υψηλές πιέσεις συμπίεσης, παίζει σημαντικό ρόλο ο σχηματισμός πίδακα (jet) και οι μετέπειτα επιπτώσεις του. Γενικότερα, πρέπει να επισημανθεί ότι οι φυσαλίδες και τα κενά γεμάτα με αέριο έχουν σημαντικό ρόλο στην διέγερση των ενεργητικών υλικών. Αντίθετα, κοιλότητες γεμάτες με διαλύτες είναι λιγότερο ικανές να σχηματίσουν 'θερμά σημεία', δεδομένου ότι δεν μπορούν να φθάσουν αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, επειδή τα υγρά είναι λιγότερο συμπιέσιμα από τον αέρα ή άλλα αέρια.

2.1.2 Διέγερση με τριβή

Ο σχηματισμός 'θερμών σημείων' λόγω της τριβής είναι μια άλλη σημαντική 'πηγή έναυσης' των εκρηκτικών υλών. Όταν δύο επιφάνειες τρίβονται μεταξύ τους -εκτός αν είναι απολύτως λείες- επαφή θα συμβεί στα ανώτερα σημεία των επιφανειών τους. Ως εκ τούτου, η πραγματική έκταση της επαφής μεταξύ των επιφανειών είναι μικρή. Κατά τη διάρκεια της τριβής, θερμότητα θα δημιουργηθεί στις περιοχές αυτές, που οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και τον σχηματισμό 'θερμών σημείων'. Η αρχή αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα (6) η οποία απεικονίζει την κίνηση δύο τραχειών επιφανειών έναντι της άλλης, παράγοντας περιοχές υψηλής θερμοκρασίας όπου η τάση της τριβής συσσωρεύεται.



Εικόνα 6. Αναπαράσταση του σχηματισμού θερμών σημείων, εξαιτίας των δυνάμεων τριβής μεταξύ δύο τριβόμενων επιφανειών

Η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται σε αυτές τις περιοχές εξαρτάται από το υλικό με το χαμηλότερο σημείο τήξεως. Όταν επιτευχθεί η θερμοκρασία αυτή λαμβάνει χώρα τήξη, και τυχόν 'θερμά σημεία' που έχουν σχηματιστεί εξαφανίζονται. Όταν το υλικό αρχίζει να τήκεται, οι δυνάμεις τριβής μειώνονται, οδηγώντας σε μείωση των τοπικών τάσεων και η απαγωγή θερμότητας είναι ταχύτερη μέσω του υγροποιημένου υλικού. Αυτές οι επιδράσεις δρουν στην αναστολή της ανάπτυξης 'θερμών σημείων'. Ωστόσο, εάν η θερμοκρασία αποσύνθεσης του ενεργητικού υλικού είναι χαμηλότερη από το σημείο τήξης του, τότε η τήξη δεν θα έχει σημαντική επίδραση. Αυτό συμβαίνει με πρωτογενή εκρηκτικά όπως το αζίδιο μολύβδου το οποίο αποσυντίθεται πριν την τήξη (θερμοκρασία αποσύνθεσης 190° C, θερμοκρασία ανάφλεξης 320-360°C). Το αντίθετο συμβαίνει στο TNT που έχει σημείο τήξης 80,8° C, πολύ χαμηλότερο από την θερμοκρασία ανάφλεξής του, 300° C. Η θερμική αγωγιμότητα, η σκληρότητα, ο συντελεστής τριβής και το πόσο γρήγορα κινούνται οι επιφάνειες επαφής είναι επίσης σημαντικά στη δημιουργία 'θερμών σημείων'. Η άνοδος της θερμοκρασίας κατά ΔT μεταξύ των επιφανειών επαφής μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3). Μάλιστα, εάν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αρκετά μεγάλη θα συμβεί διέγερση του εκρηκτικού.

Εξίσωση 3:

$$\Delta T = \frac{\mu * W * V}{(4 \alpha * J)} \frac{1}{(k_1 + k_2)}$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής, W είναι το φορτίο μεταξύ των επιφανειών επαφής, V είναι η ταχύτητα των επιφανειών, α είναι η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής, J είναι το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας και k_1 και k_2 οι θερμικές αγωγιμότητες των υλικών επαφής.

Μπορεί να φανεί από την εξίσωση (3) ότι ένας συνδυασμός μιας χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας, υψηλότερης ταχύτητας τριβής και υψηλότερου εφαρμοζόμενου φορτίου δίνει μεγαλύτερη αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Η προσθήκη σωματιδίων άμμου/χαλικιών σε ένα στερεό εκρηκτικό είναι μία πολύ γνωστή μέθοδος για την αύξηση της ευαισθησίας του. Το σημείο τήξης των κόκκων αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Όταν κόκκοι με διαφορετικά σημεία τήξης προστεθούν σε PETN και υποβληθούν σε δοκιμή τριβής, παρατηρείται διέγερση μόνο όταν οι κόκκοι έχουν ένα σημείο τήξεως μεγαλύτερο από 430°C. Η ίδια ελάχιστη θερμοκρασία τήξης παρατηρείται για πειράματα με RDX. Και πάλι η αιτία για το φαινόμενο αυτό είναι η μείωση της τριβής μεταξύ των κόκκων άμμου και των σωματιδίων του εκρηκτικού. Καθώς οι κόκκοι τήκονται, αυξάνει η θερμική αγωγιμότητα και οδηγεί σε αναστολή του σχηματισμού θερμών σημείων. Το μέγεθος και η σκληρότητα των κόκκων έχουν επίσης κάποια επίδραση. Σωματίδια μεγαλύτερα από 100 μ m είναι περισσότερο αποτελεσματικά στην διέγερση εκρηκτικών από μικρότερα

σωματίδια. Για πολύ μικρότερα σωματίδια η ενέργεια κρούσης και τριβής χάνεται λόγω των πολλών σημείων επαφής σε μια ευρύτερη περιοχή που δείχνει ότι η δημιουργία ‘θερμών σημείων’ δεν είναι τόσο αποτελεσματική. Σκληρότερα σωματίδια είναι, επίσης, πιο αποτελεσματικά, δεδομένου ότι είναι λιγότερο πιθανό να σπάσουν και να παραμορφωθούν και έτσι είναι πιο αποτελεσματικά στην συσσώρευση θερμικής ενέργειας. Η διάρκεια του σχηματισμού των ‘θερμών σημείων’ από την τριβή είναι γενικά μεταξύ 1ms και 10μs (Bowden and Yoffe, 1952).

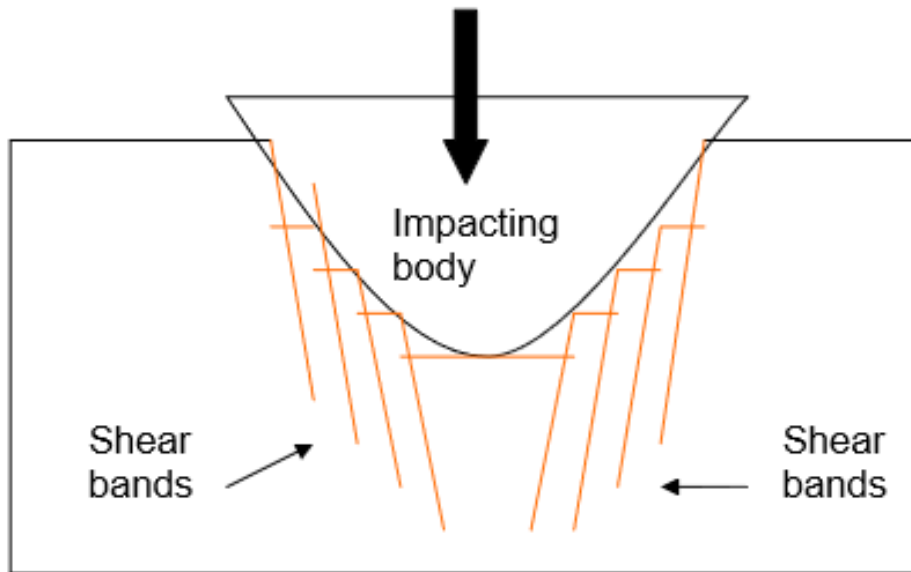
2.1.3 Διέγερση με αδιαβατική διάτμηση

Όταν ένα υλικό υπόκειται σε μια εκδήλωση δυναμικών πιέσεων είναι πολύ πιθανόν να παραμορφωθεί από την επίδραση του κρουστικού κύματος. Η παραμόρφωση δεν είναι γενικά ομοιόμορφη διαμέσου του υλικού, αλλά εντοπίζεται σε λωρίδες που διατρέχουν το υλικό, παραγόμενες από αδιαβατική διάτμηση. Αδιαβατικές ζώνες διάτμησης μπορεί να σχηματιστούν αν πληρούνται δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας από πλαστική διαρροή να είναι μεγαλύτερος από εκείνη που χάνεται με αγωγιμότητα, και κατά συνέπεια να υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας. Δεύτερον, το ποσοστό της θερμικής μαλάκυνσης στη ζώνη διάτμησης να είναι μεγαλύτερο από την ταχύτητα εργοσκλήρυνσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτές τις ζώνες διάτμησης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη για το σχηματισμό θερμών σημείων. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας, ΔT , μπορεί να υπολογιστεί αν πληρούνται οι προϋποθέσεις για την αδιαβατική διάτμηση. Εάν ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας σε μια ζώνη διάτμησης είναι $\sigma * V$, όπου σ είναι η τάση διάτμησης και το V είναι η ταχύτητα της διάτμησης, η άνοδος της θερμοκρασίας μετά από χρόνο t δίδεται από την εξίσωση (4).

Εξίσωση 4:

$$\Delta T = \sigma * V \left(\frac{t}{(\pi * k * \rho * c)} \right)^{(1/2)}$$

Όπου k , ρ και c είναι η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα και ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού αντίστοιχα. Η εικόνα (7) δείχνει τον τρόπο σχηματισμού διατμητικών ζωνών κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης.



Εικόνα 7. Δημιουργία ζωνών διάτμησης μέσα σε ένα υλικό κατά την αλληλεπίδραση του με διατρητικό σώμα (Hudson, 2012)

Μάλιστα, οι Winter και Field έχουν αποδείξει ότι όταν μονοκρύσταλλοι αζιδίου του μολύβδου και αζιδίου του αργύρου βάλλονται από μικρές σφαίρες από αλουμίνιο και γυαλί, είναι δυνατόν να συμβεί έναυση με τον σχηματισμό αδιαβατικών ζωνών διάτμησης. Πειράματα κρούσης με πτώση βάρους για μικρές ποσότητες PETN και HMX τοποθετημένα σε μια ευαίσθητη στη θερμότητα μεμβράνη, έχουν επίσης αποδείξει το σχηματισμό διατμητικών ζωνών κατά την διέγερσή τους. Στα σημεία που επιτεύχθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες, παρουσιάστηκαν καμένες ζώνες υλικού πάνω στην μεμβράνη. Ορισμένες από τις ζώνες παρατηρήθηκαν να διαχωρίζονται, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να επιτυγχάνεται σε αυτά τα σημεία (Hudson, 2012).

2.1.4 Σχηματισμός θερμών σημείων στις άκρες των ρωγμών και σε διαταραγμένες περιοχές

Όταν μια εκρηκτική ύλη επηρεάζεται από ένα ισχυρό κρουστικό κύμα, ρωγμές μπορεί να εμφανιστούν σε αδύναμα σημεία εντός των κρυστάλλων του εκρηκτικού ή στο συνδετικό υλικό μεταξύ των κρυστάλλων. Υψηλές τάσεις μπορεί να παραχθούν στις άκρες αυτών των ρωγμών που οδηγούν σε εντοπισμένη αύξηση της θερμοκρασίας. Η ανάπτυξη των υψηλών θερμοκρασιών στις άκρες των ρωγμών σε πλαστικά παραμορφωμένα υλικά όπως τα μέταλλα και τα πολυμερή είναι γνωστή. Οι Fox και Soria-Ruiz αναφέρουν ότι θερμοκρασίες τουλάχιστον 850° K δημιουργούνται στις άκρες ρωγμών σε αζίδιο του μολύβδου, υποδηλώνοντας ότι αυτή είναι μια δυνατή μέθοδος για την διέγερση ενεργειακών υλικών (Hudson, 2012).

Ωστόσο, υπάρχουν, επίσης, στοιχεία που δείχνουν ότι οι θερμοκρασίες που παράγονται στις άκρες ρωγμών δεν είναι αρκετές για να προκαλέσουν την διέγερση σε ενεργειακά

υλικά. Όταν ο Chaudhri (1972) υπέβαλε μονοκρυστάλλους αζιδίου του μολύβδου σε κρούσεις, για ταχύτητες κρούσης μικρότερες από 75m/s παρατηρήθηκε κατακερματισμός των κρυστάλλων, αλλά δεν παρατηρήθηκε διέγερση αυτών. Επίσης, παρατηρήθηκε ρωγμή υψηλής ταχύτητας, αλλά χωρίς απόδειξη ανάφλεξης στο άκρο της. Ο πιο πιθανός λόγος που δεν είναι εφικτός ο σχηματισμός 'θερμών σημείων' με θέρμανση στις ρωγμές ενεργητικών υλικών είναι ότι η απελευθέρωση της ενέργειας είναι πολύ μικρή για να δώσει το απαιτούμενο μέγεθος για την δημιουργία ενός θερμού σημείου και την απαιτούμενη θερμοκρασία. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις χαμηλές ενέργειες επιφάνειας θραύσης γ , πολλών εκρηκτικών. Τα RDX, HMX και PETN για παράδειγμα έχουν τιμές γ περίπου 0,1 J/m². Ως εκ τούτου, σε ένα καθαρό ομοιογενές εκρηκτικό, είναι απίθανη η διέγερση με θέρμανση στα άκρα ρωγμών, αλλά εάν ένα πολυμερές ή μεταλλικά σωματίδια προστεθούν στο εκρηκτικό, όπως σε ένα PBX, τότε η θέρμανση στα άκρα των ρωγμών μπορεί να αποτελέσει έναν πιθανό μηχανισμό διέγερσης. Σε σύγκριση με τις εκρηκτικές ύλες, πολυμερή, όπως το PMMA και οι χάλυβες έχουν υψηλές τιμές γ και αρκετές εκατοντάδες Joule ανά τετραγωνικό μέτρο. Ενδεικτικά, το PMMA έχει γ μεταξύ 200 και 350 J m⁻². Δεδομένου ότι τα υλικά αυτά απελευθερώνουν μεγαλύτερη ενέργεια κατά τη διάρκεια του σχηματισμού ρωγμών, η θραύση στα ενσωματωμένα σωματίδια προκαλεί ταχεία θέρμανση του περιβάλλοντος εκρηκτικού, γεγονός που οδηγεί σε έκρηξη.

Μέχρι στιγμής, όλοι οι μηχανισμοί θερμών σημείων που συζητήθηκαν συμβαίνουν σε μακροσκοπική κλίμακα. Ο σχηματισμός θερμών σημείων σε διαταραγμένες περιοχές εντός του κρυσταλλικού πλέγματος είναι ικανός να συμβεί, αλλά σε ένα πολύ μικρότερο επίπεδο. Μία θέση διαταραγμένης περιοχής δημιουργεί ένα ασθενές σημείο μέσα στη δομή του κρυσταλλικού πλέγματος, ωστόσο μόνο μία διαταραγμένη περιοχή είναι ανεπαρκής για να προκαλέσει τον σχηματισμό ενός θερμού σημείου. Πιστεύεται ότι πολλές διαταραγμένες περιοχές μαζί δημιουργούν συσσώρευση περιοχών που μπορεί στη συνέχεια να έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό θερμών σημείων. Η ενέργεια εντοπίζεται κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης του κρυσταλλικού πλέγματος. Το κυρίαρχο ζήτημα είναι ότι για να είναι ικανό ένα θερμό σημείο να προκαλέσει διέγερση, πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 μ m, ως εκ τούτου τίθεται το ερώτημα αν η συσσώρευση διαταραγμένων περιοχών μπορεί να δημιουργήσει αρκετά μεγάλα θερμά σημεία. Μελέτες δειγμάτων HMX μετά από κρούση σε μια συσκευή πτώσης βάρους, έδειξαν πως ανάφλεξη συνέβη μόνο μετά από συμπίεση και συμπύκνωση. Η δημιουργία διαταραγμένων περιοχών και η μετακίνηση θα έπρεπε να συμβεί κατά τη διάρκεια των πρώιμων σταδίων της κρούσης και να προκαλέσει ανάφλεξη στις αρχικές στιγμές της συμπίεσης. Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε κάποιο τέτοιο αποτέλεσμα (Hudson, 2012). Ως εκ τούτου, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η διέγερση έγινε εξαιτίας άλλων μεθόδων, όπως ζωνών διάτμησης, και δεν οφείλεται σε διαταραγμένες περιοχές εντός του κρυσταλλικού πλέγματος.

Εν ολίγοις, οι ρωγμές και διαταραγμένες περιοχές μπορούν να δημιουργήσουν θερμά σημεία, αλλά είναι απίθανο να σχηματίσουν "κρίσιμα" θερμά σημεία, επαρκούς μεγέθους και θερμοκρασίας ώστε να προκληθεί διέγερση της εκρηκτικής ύλης.

2.2 Σύνοψη

Η θεωρία των 'θερμών σημείων' προσφέρει μια καλή εξήγηση για τις διαδικασίες πίσω από την διέγερση και την έναυση των ενεργειακών υλικών. Φαίνεται ότι υπάρχουν διάφορες βασικές μέθοδοι σχηματισμού 'θερμών σημείων', που πιθανώς να εμφανιστούν μαζί, αλλά κανένας μηχανισμός δεν φαίνεται να κυριαρχεί στην διαδικασία. Οι διάφοροι μηχανισμοί σχηματισμού φαίνεται να δρουν προσθετικά. Για παράδειγμα, μπορεί να συμβούν διαδικασίες τριβής παράλληλα με αδιαβατική θέρμανση περιοχών γεμάτων με αέρα εντός του υλικού. Θέρμανση στις άκρες των ρωγμών και διαταραγμένες περιοχές δεν φαίνεται γενικά να είναι σε θέση να προκαλέσουν διέγερση/έναυση, λόγω των μικρών ποσοτήτων ενέργειας που απελευθερώνονται από αυτές τις μεθόδους. Η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι μεταξύ δύο και τριών τάξεων μεγέθους πιο χαμηλή.

3 Ευαισθησία των εκρηκτικών υλών

3.1 Κύριες Ευαισθησίες

Τα ενεργειακά υλικά συνήθως διεγείρονται με την χρήση θερμικών διεργασιών. Ωστόσο, το ερέθισμα μιας έκρηξης θα μπορούσε να προέρχεται από μηχανικές ή ηλεκτροστατικές πηγές. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα είδη των ευαισθησιών που μπορεί να επιφέρουν την έναυση μιας εκρηκτικής ύλης. Οι σημαντικότερες εκτιμήσεις σε ότι αφορά την ευαισθησία σε διέγερση που πρέπει να καθοριστούν για ένα εκρηκτικό είναι:

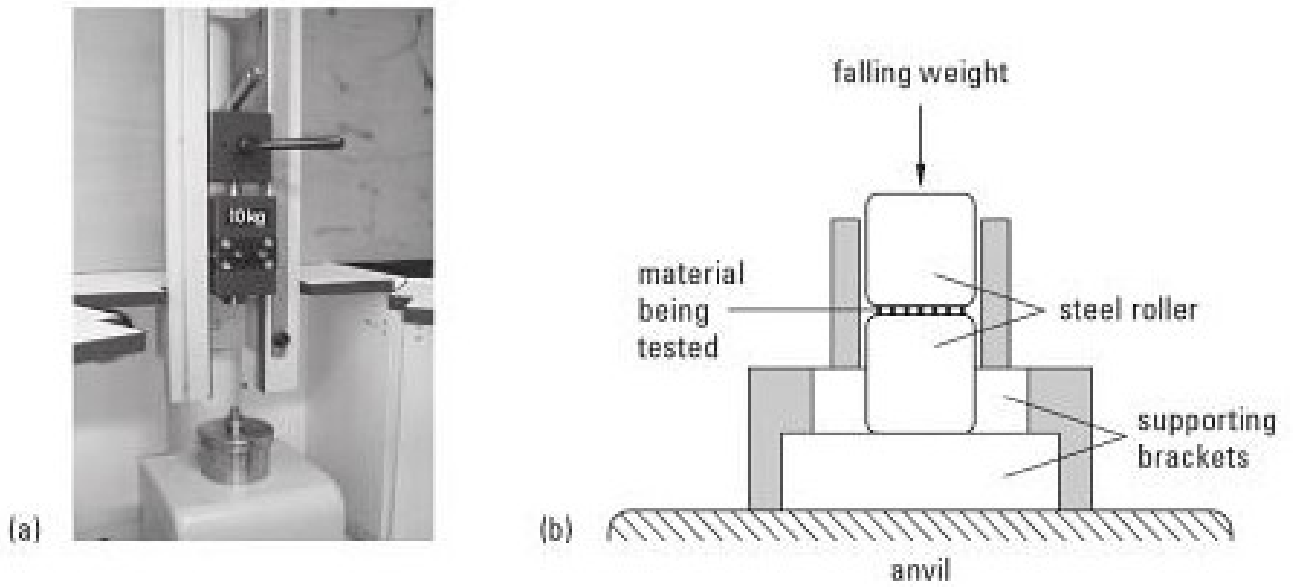
1. Ευαισθησία στην κρούση
2. Ευαισθησία στην τριβή
3. Ηλεκτροστατική ευαισθησία (ESD) και
4. Θερμική ευαισθησία

Ο έλεγχος της ανταπόκρισης των στερεών, υγρών ή κολλωδών ουσιών σε κρούση, τριβή και θερμικά ερεθίσματα είναι απαραίτητος σε διάφορα πρότυπα, όπως της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EN) καθώς και συστάσεων του ΟΗΕ για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων (UN).

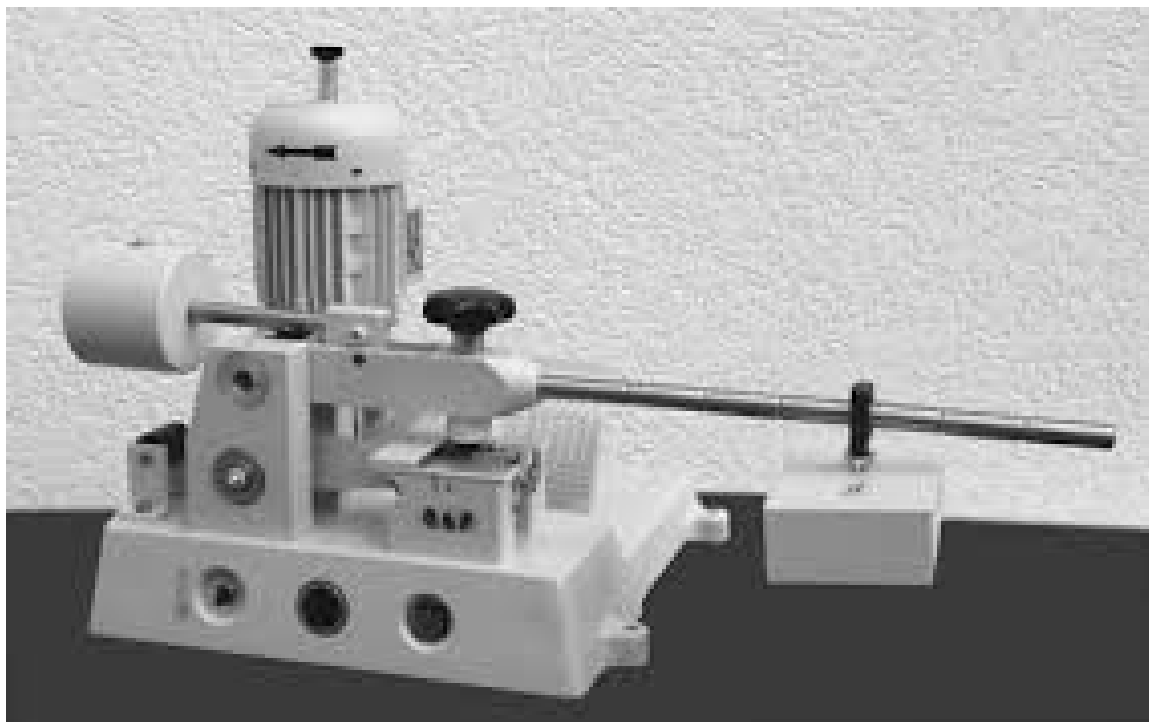
Η **ευαισθησία στην κρούση** των στερεών, υγρών ή ζελατινοποιημένων εκρηκτικών προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της πίπτουσας σφύρας (drophammer). Ο μηχανισμός DropHammer αποτελείται ουσιαστικά από ένα τμήμα χυτού χάλυβα με αντίστοιχη βάση, ένα στρογγυλό αμόνι, την πίπτουσα σφύρα και τον μηχανισμό συγκράτησης και απελευθέρωσης της σφύρας. Το βαρύ κομμάτι χάλυβα είναι απαραίτητο για την προσρόφιση των κρουστικών κυμάτων που προκαλούνται από την πτώση της σφύρας, οι δύο ράβδοι οδηγού συνδέονται με την στήλη με τρία στηρίγματα, ενώ ένας ρυθμιζόμενος κανόνας μέτρων επιτρέπει την ακριβή μέτρηση του ύψους πτώσης. Με την διεξαγωγή του πειράματος, και αλλάζοντας κάθε φορά το βάρος της σφύρας ή την μάζα του δοκιμαζόμενου υλικού, μπορεί να καθοριστεί η ενέργεια κρούσης. Ως ελάχιστη ενέργεια κρούσης καθορίζεται εκείνη που προκάλεσε τουλάχιστον μία διέγερση σε πέντε δοκιμές κάποιου δείγματος, υπό το ίδιο βάρος πτώσης. (εικόνα 8)

Για να καθοριστεί η **ευαισθησία στην τριβή**, χρησιμοποιείται κατάλληλη διάταξη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του BAM friction test (εικόνα 9). Το δείγμα τοποθετείται σε μία τραχιά πορσελάνινη πλάκα (25*25*5mm), η οποία είναι τοποθετημένη στην κινούμενη πλατφόρμα της συσκευής τριβής και επί αυτού ακουμπά μια πορσελάνινη ακίδα. Στην ακίδα ασκείται προκαθορισμένο φορτίο, μεταβαλλόμενο σε κάθε δοκιμή ανάλογα με την ευαισθησία της εκρηκτικής ύλης. Η τριβή που δημιουργείται μεταξύ της κινούμενης πλάκας και της σταθερής ακίδας του μηχανήματος δημιουργεί την διέγερση/έναυση του δείγματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για την ευαισθησία ισχυρών εκρηκτικών όσο για ευαισθησία λιγότερο ισχυρών εκρηκτικών. Ως ελάχιστη δύναμη τριβής καθορίζεται εκείνη κατά την οποία σε τουλάχιστον μία από έξι

διαδοχικές δοκιμές -υπό το ίδιο φορτίο- παρατηρηθεί έκρηξη.



Εικόνα 8. α) Η συσκευή της δοκιμής Drophammer. β) λεπτομερής γράφημα της δοκιμής Drophammer



Εικόνα 9. Συσκευή της δοκιμής BAM Friction test

Η **ηλεκτροστατική εκφόρτιση** είναι μια από τις πιο συχνές και ελάχιστα χαρακτηριζόμενες αιτίες μιας τυχαίας έκρηξης των ενεργειακών υλικών. Είναι, επομένως, επιτακτική η ανάγκη να υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα σχετικά με την ηλεκτροστατική ευαισθησία των ενεργειακών υλικών. Η ηλεκτροστατική ευαισθησία (electrostatic discharge sensitivity, ESD) προσδιορίζεται με τη χρήση μιας συσκευής δοκιμής ESD (εικόνα 10). Διαφορετικές ενέργειες σπινθήρα (συνήθως μεταξύ 0.001 και 20J μπορεί να εφαρμοστούν, με τη χρήση μεταβλητών πυκνωτών χωρητικότητας C (σε Farad, F) και η τάση φόρτισης U (σε Volt, V). Με την βοήθεια των μεταβλητών αυτών η ηλεκτροστατική ευαισθησία μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση (5):

Εξίσωση 5:

$$E = \frac{1}{2} CU^2$$

Αυτή είναι μια ιδιαίτερα σημαντική δοκιμή για τον ασφαλή χειρισμό των εκρηκτικών υλών, καθώς το ανθρώπινο σώμα μπορεί να είναι ηλεκτρικά φορτισμένο (ανάλογα με τον τύπο των ρούχων που φοριούνται, την υγρασία, κ.λπ.), οι οποίες κατά την ηλεκτρική εκκένωση μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό σπινθήρων. Τυπικές τιμές για το ανθρώπινο σώμα είναι:

$$C=0,0001-0,004\mu F$$

$$U=10000V$$

$$E=0,005-0,02J$$

Πρέπει να γίνεται, συνεπώς, πολύ προσεχτικός χειρισμός των εκρηκτικών υλών, ειδικά όταν αυτές παρουσιάζουν σημαντική ηλεκτροστατική ευαισθησία.



Εικόνα 10. Διάταξη ηλεκτροστατικής δοκιμής

Ο πίνακας (1) παρουσιάζει μια σύνοψη των τυπικών τιμών για την κρούση, την τριβή και την ηλεκτροστατική ευαισθησία ορισμένων πρωτογενών και δευτερογενών εκρηκτικών.

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές για κρούση, τριβή και ηλεκτροστατική ευαισθησία ορισμένων εκρηκτικών (Klarotke, 2012)

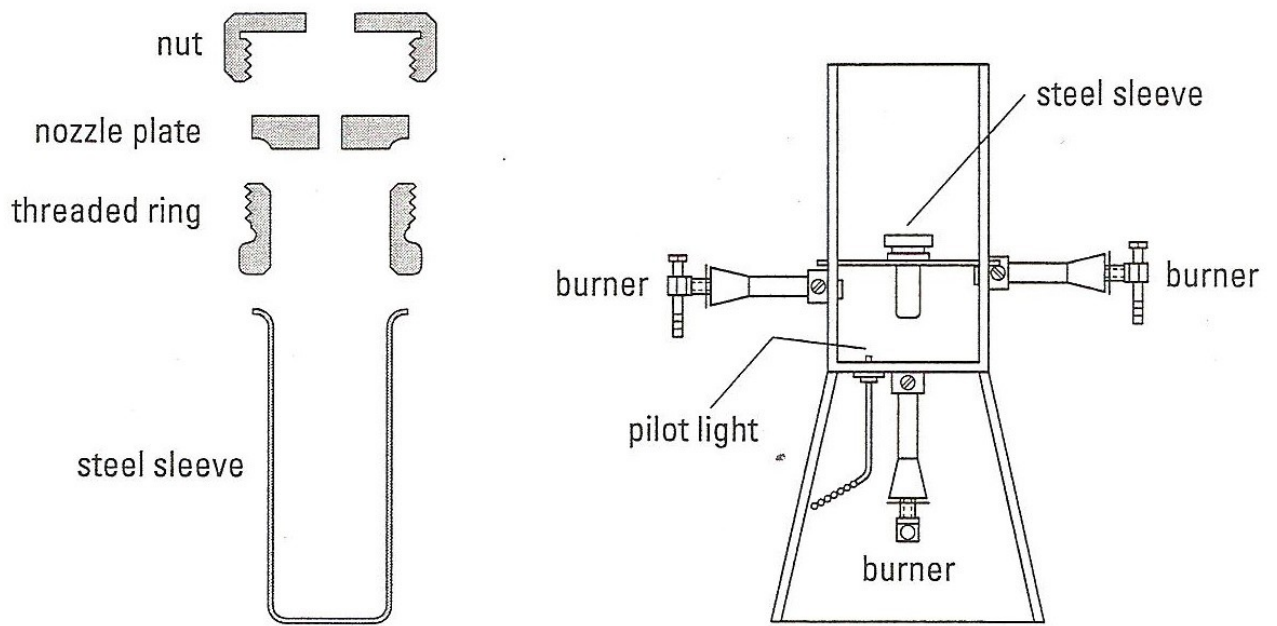
Εκρηκτικά	Ευαισθησία σε κρούση (J)	Ευαισθησία σε τριβή (N)	Ηλεκτροστατική Ευαισθησία (J)
Πρωτογενή εκρηκτικά			
Pb(N ₃) ₂	2,5-4	0,1-1	0,005
Δευτερογενή εκρηκτικά			
TNT	15	>353	0,46-0,57
RDX	7,5	120	0,15-0,20
β-HMX	7,4	120	0,21-0,23
PETN	3	60	0,19
TATB	50	>353	2,5-4,24

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές των Ηνωμένων Εθνών για τη μεταφορά επικίνδυνων / επιβλαβών προϊόντων, οι ουσίες στον πίνακα (2) έχουν ταξινομηθεί με βάση την ευαισθησία τους στην κρούση και την τριβή.

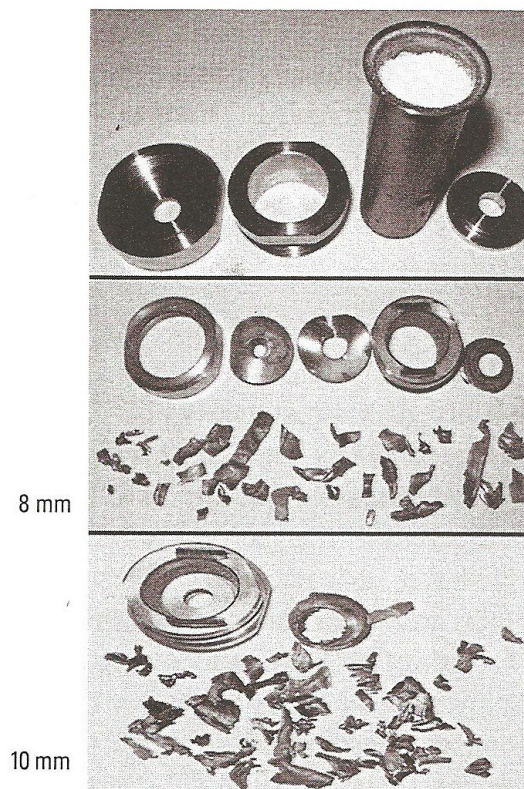
Πίνακας 2. Κατηγοριοποίηση των Ηνωμένων Εθνών για επικίνδυνες ουσίες (United Nations, 1995)

	Ευαισθησία σε κρούση (J)	Ευαισθησία σε τριβή (N)
Μη ευαίσθητα	>40	>360
Μικρή ευαισθησία	35-40	~360
Μερική ευαισθησία	4-35	80-360
Μεγάλη ευαισθησία	<4	10-80
Πολύ μεγάλη ευαισθησία		<10

Για τη διεξοδική ταξινόμηση μιας ουσίας (η οποία είναι απαραίτητη για την ασφαλή χρήση κάθε ουσίας), πρέπει επίσης να καθοριστεί η **θερμική αγωγιμότητα**. Η λεγόμενη δοκιμή steel-sleeve (ή δοκιμή Koenen) χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση της ασφαλούς μεταφοράς των ουσιών. Σε αυτή τη δοκιμή, η ουσία γεμίζει ένα χάλυβα δοχείο (εσωτερικής διαμέτρου: 24 χιλιοστών, μήκους: 75mm, πάχος τοιχώματος: 0,5mm, V = 25mL) μέχρι το ύψος των 15 χιλιοστών κάτω από το άνω άκρο και, στη συνέχεια, το δοχείο κλείνεται με μία πλάκα με ακροφύσια. Τα ακροφύσια έχουν ενσωματωμένα στόμια διαμέτρου 1-20mm. Το χάλυβδινο πλαίσιο είναι συνδεδεμένο με την πλάκα των ακροφυσίων με σπείρωμα με κατάλληλη υποδοχή δύο τμημάτων. Στη συνέχεια θερμαίνεται ταυτόχρονα από τέσσερις καυστήρες (εικόνα 11). Μεταβάλλοντας την διάμετρο του στομίου, μπορεί να προσδιοριστεί η κρίσιμη διάμετρος. Κρίσιμη θεωρείται η διάμετρος κατά την οποία η αύξηση της πίεσης κατά την καύση και την επακόλουθη έκρηξη καταστρέφει το περίβλημα σε τουλάχιστον τέσσερα μικρά θραύσματα (εικόνα 12).



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής steel sleeve test



Εικόνα 12: Αποτελέσματα από μια δοκιμή steel sleeve για ένα νέο εκρηκτικό με 8 και 10mm διάμετρο ακροφυσίων

3.2 Κατηγοριοποίηση

Η παρασκευή νέων ενεργειακών υλικών, απαιτεί διάφορες δοκιμές σταθερότητας, οι οποίες είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν, έτσι ώστε τα υλικά να μπορούν να ταξινομηθούν (IHC interim hazard classification/ προσωρινή ταξινόμηση επικινδυνότητας). Οι απαιτήσεις για «την επιτυχία» των απαραίτητων δοκιμών συνοψίζονται στον πίνακα (3), και περιλαμβάνουν δοκιμές ως προς την ευαισθησία στην κρούση, την τριβή και την θερμική σταθερότητα. Ένα θετικό αποτέλεσμα δοκιμής (+) σημαίνει ότι η ουσία δεν πέρασε τη δοκιμή.

Πίνακας 3. Απαραίτητες πρότυπες δοκιμές για την κατηγοριοποίηση επικίνδυνων ουσιών (United Nations, 1995)

UN test	Test	Συνθήκες	+
UN 3a	Ευαισθησία σε κρούση	5 δοκιμές: θετικό, αν 50% των δοκιμών δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα	$\leq 3,5J$
UN 3b	Ευαισθησία στην τριβή	5 δοκιμές: θετικό, αν 1 στις 5 δοκιμές παρουσιάσει το επιθυμητό αποτέλεσμα	$\leq 184N$ ορατές σπίθες ορατή φλόγα άκουσμα έκρηξης ξεκάθαρος θόρυβος
UN 3c	Θερμική σταθερότητα	75°C, 48h	Ορατή εξέταση: - αλλαγή χρώματος - έκρηξη - ανάφλεξη απώλεια βάρους (εκτός της απορροφούμενης υγρασίας) RADEX: αυτό-θέρμανση το πολύ 3°C
UN 3d	Μικρής κλίμακας δοκιμή καύσης	πριονίδι εμποτισμένο με κηροζίνη, χωρίς περιορισμό	Έκρηξη ή έναυση

4 Προσδιορισμός της ευαισθησίας τριβής

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, τα εκρηκτικά πολύ συχνά υποβάλλονται σε τριβή είτε μεταξύ των σωματιδίων του εκρηκτικού υλικού είτε μεταξύ της εκρηκτικής ύλης και διαφόρων τύπων επιφανειών εργασίας. Υπό κατάλληλες συνθήκες, η τριβή μπορεί να προκαλέσει την έναυση ενός εκρηκτικού υλικού.

Μεταξύ της επιφάνειας δύο υλικών σε σχετική κίνηση, αναπτύσσεται η δύναμη τριβής ολίσθησης (F_{xy}), η οποία είναι ανάλογη με την δύναμη (F) που ασκείται επί των δύο υλικών υλικών (εξίσωση 6).

Εξίσωση 6:

$$F_{xy} = \mu_f * F$$

Όπου F_{xy} είναι η δύναμη τριβής ολίσθησης, F η ασκούμενη δύναμη, και μ_f ο συντελεστής τριβής.

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει τη δύναμη τριβής δαπανάται είτε με τη μορφή της μηχανικής ενέργειας ή ως θερμότητα. Ως αποτέλεσμα της τριβής, τα δύο σώματα σε σχετική κίνηση θερμαίνονται. Δεδομένου ότι η επαφή δύο σωμάτων σε σχετική κίνηση δεν είναι ομαλή σε μικροσκοπική κλίμακα, η διάχυση της μηχανικής ενέργειας με την μορφή θερμότητας θα είναι, κυρίως, συγκεντρωμένη σε συγκεκριμένα σημεία, τα ονομαζόμενα 'θερμά σημεία', όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως.

Κατά τον καθορισμό της ευαισθησίας στην τριβή, η σχετική ταχύτητα των σωμάτων σε κίνηση, ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας διατηρούνται σταθερά, ενώ η κάθετη δύναμη μεταξύ δύο επιφανειών σε επαφή αλλάζει.

Για τον καθορισμό της ευαισθησίας στην τριβή χρησιμοποιείται για τις ανάγκες τις συγκεκριμένης εργασίας η δοκιμή **BAM friction test**. Η συσκευή της μεθόδου απεικονίζεται στην εικόνα (13).

4.1 Αρχή της δοκιμής BAM Friction Test

Η μέθοδος καθορισμού της ευαισθησίας στην τριβή BAM έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Julius Peters του Βερολίνου της Γερμανίας. Η εκρηκτική ύλη τοποθετείται σε τραχεία πλάκα από πορσελάνη και μία πορσελάνινη ακίδα/πέιρος τοποθετείται στην κορυφή του δείγματος του εκρηκτικού. Η τριβή δημιουργείται ανάμεσα στην μικρή, ακίνητη, κυλινδρικού σχήματος πορσελάνινη ακίδα που έχει τραχιά σφαιρική επιφάνεια στο άκρο της και την πλάκα από πορσελάνη που φέρει το δείγμα, με την βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα που θέτει σε παράλληλη κίνηση την πλάκα. Η κάθετη δύναμη που ασκείται μεταξύ της ακίδας/πέιρου και της πλάκας αλλάζει με προσαρμογή διαφορετικών κάθε φορά βαριδίων σε ειδικό άξονα φόρτισης της συσκευής. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται η ευαισθησία τριβής του υλικού, δηλαδή η δύναμη που αν ασκηθεί μπορεί να

προκαλέσει την διέγερση του εκρηκτικού.



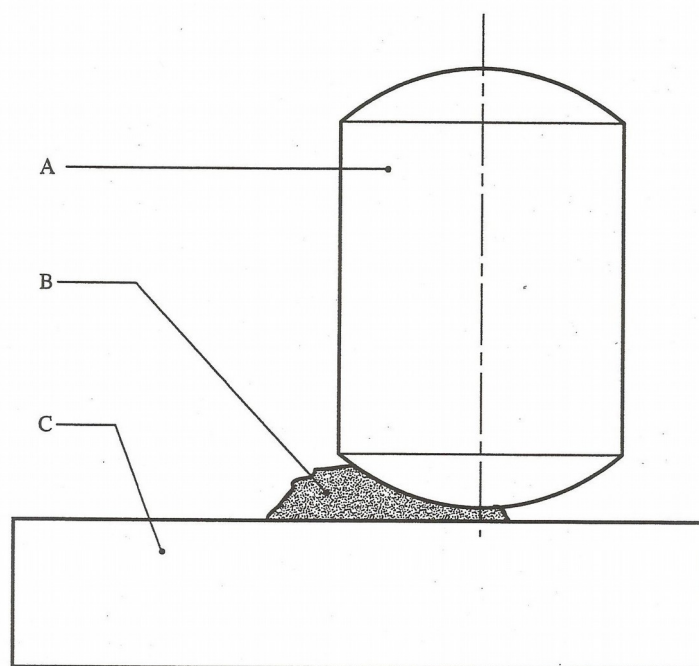
Εικόνα 13: Εξοπλισμός και συσκευή δοκιμής BAM, Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ

4.2 Περιγραφή της διαδικασίας της δοκιμής

Η συσκευή τριβής αποτελείται από μια βάση από χάλυβα, επί της οποίας στερεώνεται η διάταξη. Αυτή περιλαμβάνει ένα σταθερό πορσελάνινο πείρο/ακίδα και μια κινούμενη πορσελάνινη πλάκα. Η πορσελάνινη πλάκα συγκρατείται σε ένα φορείο που κινείται σε δύο οδηγούς. Το φορείο συνδέεται με ένα ηλεκτρικό κινητήρα μέσω μιας συνδετικής ράβδου, ενός έκκεντρου και κατάλληλο σύστημα μετάδοσης κίνησης, έτσι ώστε η πλάκα από πορσελάνη να μετακινείται μόνο μία φορά, προς τα πίσω και προς τα μπροστά κάτω από την πορσελάνινη ακίδα σε μία απόσταση των 10mm.

Περίπου 5-50 mg ξηρού εκρηκτικού τοποθετείται στην πορσελάνινη πλάκα η οποία συνδέεται με το κινούμενο μέρος της συσκευής. Η κυλινδρική πορσελάνινη ακίδα στη συνέχεια χαμηλώνεται στην κορυφή του δείγματος με τη βοήθεια του βραχίονα φόρτισης. Ο βραχίονας φόρτισης φορτώνεται με διαφορετικό συνολικό βάρος σε κάθε επανάληψη της δοκιμής. Υπάρχουν διαφορετικής μάζας βαρίδια, τα οποία ανάλογα με την θέση προσαρμογής τους στο βραχίονα φόρτισης μπορούν να αποδώσουν συνολική δύναμη από 5 έως 360N στην πορσελάνινη ακίδα. Ο βραχίονας έχει 6 διαφορετικές θέσεις για την τοποθέτηση των βαρών σε απόσταση 11cm, 16cm, 21cm, 26cm, 31cm και 36cm από τον

άξονα της πορσελάνινης ακίδας. Θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να εξασφαλιστεί ότι η ακίδα ακουμπά στο δείγμα, και ότι υπάρχει αρκετό υλικό για να βρίσκεται κάτω από την ακίδα κατά την κίνηση της πλάκας (εικόνα 14). Κάθε πλευρά της πορσελάνινης ακίδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μία δοκιμή, ενώ η πορσελάνινη πλάκα, που τοποθετείται η δοκιμαζόμενη ουσία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τρεις με τέσσερις φορές στην κάθε πλευρά της.



*Εικόνα 14: Σχεδιαστική αναπαράσταση της θέσης της εκρηκτικής ύλης κατά τη δοκιμή. A) ακίδα διαμέτρου 10mm * 15mm, B) Δοκιμαζόμενη ουσία, C) Πορσελάνινη πλάκα 25*25*5mm*

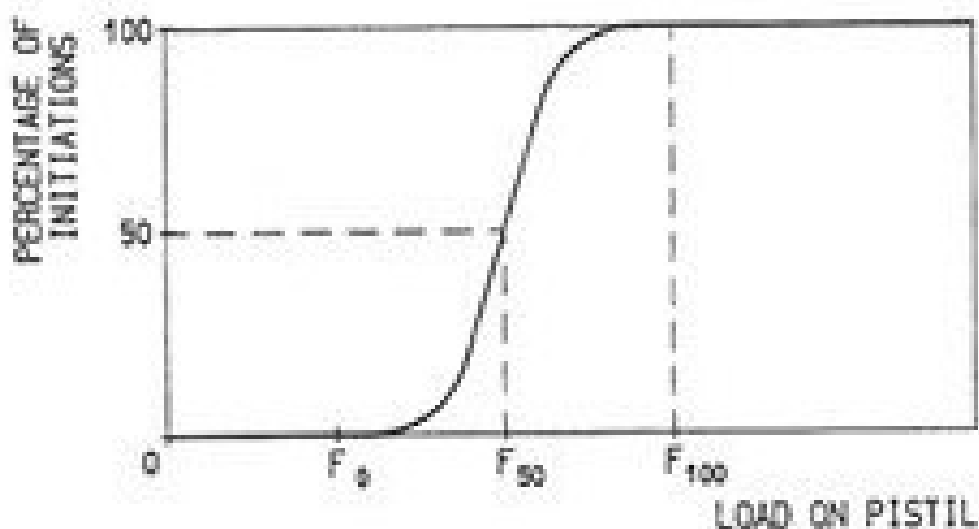
Κανονικά οι περισσότερες ουσίες θα πρέπει να δοκιμάζονται, όπως παραλαμβάνονται (United Nations, 1995). Διαβρεχόμενες ουσίες πρέπει να δοκιμάζονται με το ελάχιστο περιεχόμενο παράγοντα διαβροχής που προβλέπεται για τη μεταφορά τους. Επιπλέον, οι στερεές ουσίες, πλην αυτών που βρίσκονται σε μορφή πάστας ή γαλακτώματος, θα πρέπει να βρίσκονται σε μορφή σκόνης, η οποία περνά από κοσκίνιση (κόσκινο 0,5 χιλιοστών) και το υλικό που περνάει από το κόσκινο χρησιμοποιείται για τη δοκιμή· κοκχώδεις ουσίες θραύονται σε μικρά τεμάχια και κοσκινίζονται σε κόσκινο 0,5 χιλιοστών.

Πλαστικοποιημένες ουσίες και άλλα στερεά, τα οποία δεν είναι εύκολο να θραυστούν, δοκιμάζονται με τη μορφή δίσκων 10 mm³, με ελάχιστη διάμετρο 4mm. Για ουσίες οι οποίες είναι με την μορφή πάστας ή γαλακτώματος χρησιμοποιείται συγκεκριμένη ποσότητα υλικού με την βοήθεια ειδικού ορθογώνιου εργαλείου-δοσομετρητή πάχους 0,5mm, με άνοιγμα 2mm * 10mm. (European Standard, 2004)

4.2.1 Ευρωπαϊκές προδιαγραφές – EN13631-3

Η σειρά των δοκιμών ξεκινά με μία δοκιμή με φορτίο 360N. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής αξιολογούνται μακροσκοπικά και ερμηνεύονται ως «καμία αντίδραση», «αποσύνθεση» (αλλαγή του χρώματος ή οσμή) ή «έκρηξη» (τρίξιμο, πυροδότηση ή φλόγα). Αν στην πρώτη δοκιμή, παρατηρείται το αποτέλεσμα της «έκρηξης», η σειρά δοκιμών συνεχίζεται με δοκιμές με σταδιακά χαμηλότερα φορτία μέχρι να παρατηρηθεί το αποτέλεσμα «αποσύνθεση» ή «καμία αντίδραση». Σε αυτό το επίπεδο φορτίου τριβής η δοκιμή επαναλαμβάνεται συνολικά έξι φορές, αν δεν συμβεί «έκρηξη», διαφορετικά το φορτίο τριβής μειώνεται σε βήματα μέχρι να καθοριστεί το χαμηλότερο φορτίο στο οποίο δεν θα παρατηρηθεί «έκρηξη» σε έξι δοκιμές. Αν στην πρώτη δοκιμή στα 360N το αποτέλεσμα είναι «αποσύνθεση» ή «καμία αντίδραση», πραγματοποιούνται άλλες 5 δοκιμές με το ίδιο βάρος. Εάν και στις έξι δοκιμές στο υψηλότερο φορτίο των 360N, εμφανιστεί το αποτέλεσμα «αποσύνθεση» ή «όχι αντίδραση», η ουσία θεωρείται ότι είναι 'μη ευαίσθητη' στην τριβή. Εάν, αντιθέτως, παρατηρηθεί «έκρηξη» το φορτίο μειώνεται ως ανωτέρω. Ως ελάχιστο φορτίο ορίζεται το χαμηλότερο φορτίο στο οποίο παρατηρήθηκε το αποτέλεσμα «έκρηξη» σε τουλάχιστον μία από έξι δοκιμές.

Εναλλακτικά η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το φορτίο στην πορσελάνινη ακίδα να ποικίλει και με τον τρόπο αυτό να προσδιοριστεί το ποσοστό του αριθμού των εκρήξεων σε κάθε βάρος φορτίου (Suceska, 1995). Έξι διαδοχικές δοκιμές διεξάγονται σε κάθε διαφορετικό βάρος, και δημιουργείται η καμπύλη ευαισθησίας της τριβής. Τα χαρακτηριστικά σημεία στην καμπύλη F_0 , F_{50} , και F_{100} , αναφέρονται ως αποτελέσματα ευαισθησίας στην τριβή (διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1: Εξάρτηση του ποσοστού εναύσεων με τα βασικά βάρη (Suceska, 1995)

4.2.2 Αμερικάνικες πρακτικές – LLNL

Η διαδικασία διεξαγωγής της μεθόδου προσδιορισμού ευαισθησίας της τριβής είναι ουσιαστικά η ίδια. Η διαφορά έγκειται στην παρακολούθηση των αποτελεσμάτων και τον αριθμό των δοκιμών

Βάση των αμερικάνικων πρακτικών μία ουσία θεωρείται ευαίσθητη όταν σε 1 στις 10 δοκιμές παρατηρηθεί το αποτέλεσμα 'έκρηξη'. (Simpson and Foltz, 1996) Η προσαρμογή αυτή έχει γίνει για λόγους αυστηρότητας στον καθορισμό των ευαίσθητων ουσιών και την εξαγωγή ορθότερων αποτελεσμάτων. Επειδή, τα αποτελέσματα των δοκιμών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την οπτική και ακουστική οξύτητα του χειριστή. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορεί να ποικίλουν σημαντικά από παρατηρητή σε παρατηρητή, και ο μεγαλύτερος αριθμός των δοκιμών εξασφαλίζει ορθότερη κατάταξη των ουσιών.

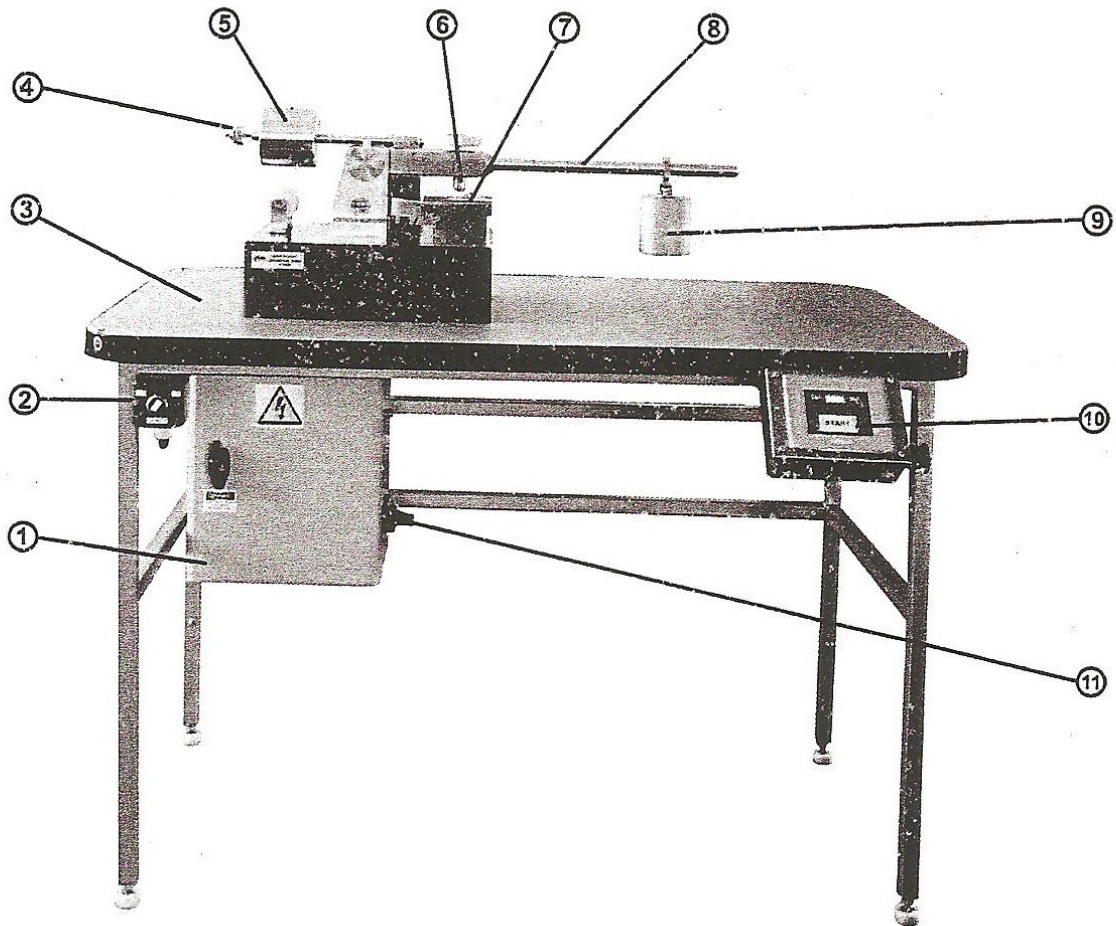
Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων μετά από κάθε δοκιμή χαρακτηρίζεται με το σύστημα OXS, όπου: O=No Go (όταν καμία αντίδραση δεν συνέβη), X=Go (όταν παρατηρείται έκρηξη, σπίθες ή θόρυβος), S=No Go (όταν παρατηρείται καπνός, οσμή ή σημάδια καψίματος).

Σε κάθε περίπτωση η δοκιμή γίνεται σε συνθήκες απόλυτης ησυχίας και χαμηλού φωτισμού ώστε να μπορούν να παρατηρηθούν εύκολα οι αντιδράσεις των εκρηκτικών υλών.

5 Πειραματικός προσδιορισμός της ευαισθησίας της τριβής

5.1 Η Συσκευή

Η εργαστηριακή συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τον πειραματικό προσδιορισμό της ευαισθησίας στην τριβή διαφόρων τύπων εκρηκτικών είναι εγκατεστημένη στο εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είναι κατασκευασμένη από τον οίκο OZM Research s.r.o, Czech Republic και έχει ονομασία τύπου: BAM FRICTION SENSITIVITY TESTER FSKM. Είναι σχεδιασμένη για την αξιολόγηση της ευαισθησίας ισχυρών εκρηκτικών, προωθητικών ουσιών, πυροτεχνημάτων και πρωτογενών εκρηκτικών (εικόνα 15).



Εικόνα 15: Συσκευή BAM Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ. 1-πίνακας τροφοδοσίας (AC-DC), 2-διακόπτης έναρξης, 3-τράπεζα εργασίας, 4-μικρά αντίβαρα, 5-κυρίως αντίβαρα, 6-ακίδα, 7-κινητό φορείο, 8-βραχίονας φόρτισης, 9-βάρος, 10-οθόνη χειρισμού, 11-κύριως διακόπτης

Η συσκευή αποτελείται από μια βάση από χάλυβα επί της οποίας είναι τοποθετημένο το σύστημα μέτρησης. Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από έναν σταθερό πείρο/ακίδα από πορσελάνη και κινητή πλάκα από πορσελάνη. Η πλάκα στερεώνεται σε ένα φορείο ενός μηχανισμού στροφάλου, ο οποίος κινείται πάνω σε δύο οδηγούς. Το φορείο είναι συνδεδεμένο με το μηχανισμό στροφάλου με συνδετήριο άξονα και ένα έκκεντρο λοβό ο οποίος λειτουργεί με την βοήθεια ενός κινητήρα, έτσι ώστε η πλάκα από πορσελάνη να εκτελεί κίνηση 10 χιλιοστών προς τα εμπρός και προς πίσω μόνο μία φορά. Η ακίδα πορσελάνης είναι στερεωμένη σε μια βάση με τσοκ, σε ένα βραχίονα φόρτισης.

Ο βραχίονας φόρτισης είναι εφοδιασμένος με έξι ισαπέχουσες εγκοπές για την προσάρτηση των διαθέσιμων βαρών (στάνταρ ή προαιρετικών). Η ισορροπία επιτυγχάνεται με την προσαρμογή των αντίβαρων. Εννέα πρότυπα βάρη ανάλογα με την διαδικασία προσδιορισμού BAM φαίνονται παρακάτω στην εικόνα (16).

Το βάρος είναι προσαρτημένο στο βραχίονα φόρτισης με ειδικό άγκιστρο, του οποίου η μάζα είναι μέρος του συνολικού βάρους του βάρους φόρτισης. Παρακάτω δίνονται οι τιμές των καθορισμένων βαρών που μπορούν να προσαρμοστούν στο βραχίονα φόρτισης (πίνακας 4).

Το φορτίο αυτό που δημιουργείται υπολογίζεται με βάση την μάζα των εννιά διαφορετικών βαρών από την εξίσωση (7). Η μάζα των βασικών βαρών της δοκιμής BAM δίνεται στον πίνακα (5).

Εξίσωση 7

$$F = \frac{m * g * [a + b + c(n - 1)]}{a}$$

Όπου F είναι το βάρος/φορτίο φόρτισης, m η μάζα των βαρών, g η επιτάχυνση της βαρύτητας (για λόγους απλοποίησης μπορεί να θεωρηθεί πως έχει τιμή $g=10\text{m/s}^2$), a η απόσταση μεταξύ του βραχίονα φόρτισης και του άξονα της ακίδας ($a=14\text{cm}$), b η απόσταση μεταξύ του άξονα της ακίδας και την πρώτης εγκοπής που προσαρμόζονται τα βάρη ($b=11\text{cm}$) και c η απόσταση μεταξύ των εγκοπών (5cm).



Εικόνα 16: Βασικά βάρη δοκιμής BAM

Πίνακας 4. Φορτίο τριβής ανάλογα με το νούμερο του βάρους και της εγκοπής που τοποθετείται

Φορτίο τριβής – Βασικά βάρη BAM (N)						
Νούμερο βάρους	Νούμερο εγκοπής					
	1	2	3	4	5	6
B1	5	6	7	8	9	10
B2	10	12	14	16	18	20
B3	20	24	28	32	36	40
B4	30	36	42	48	54	60
B5	40	48	56	64	72	80
B6	60	72	84	96	108	120
B7	80	96	112	128	144	160
B8	120	144	166	192	216	240
B9	180	216	252	288	324	360

Πίνακας 5. Μάζα βασικών βαρών BAM

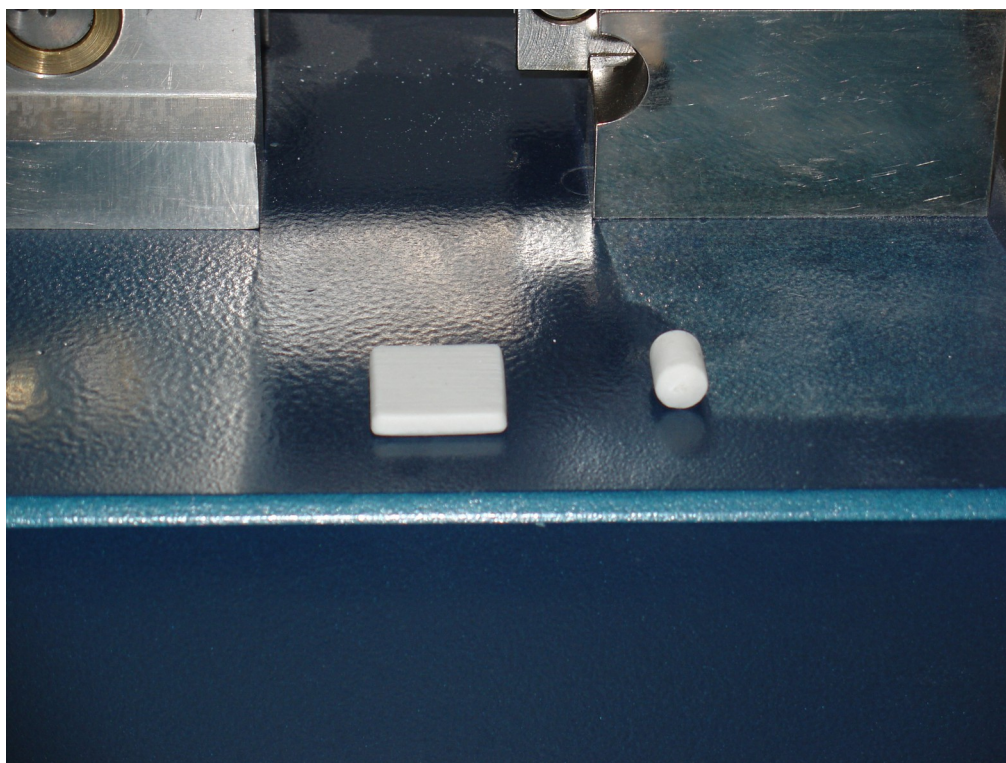
Μάζα βασικών βαρών BAM (kg)									
Αριθμ. βάρους	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Μάζα	0,28	0,56	1,12	1,68	2,24	3,36	4,48	6,72	10,08

Η πορσελάνινη πλάκα έχει διαστάσεις 25*25*5mm και είναι σχεδιασμένη από άσπρη αγυάλιστη πορσελάνη με ξεκάθαρα ορατά σημάδια τραχύτητας (εικόνα 17). Η τραχύτητα των πλευρών της είναι σε πλήρη συμφωνία με τα σχετικά πρότυπα.

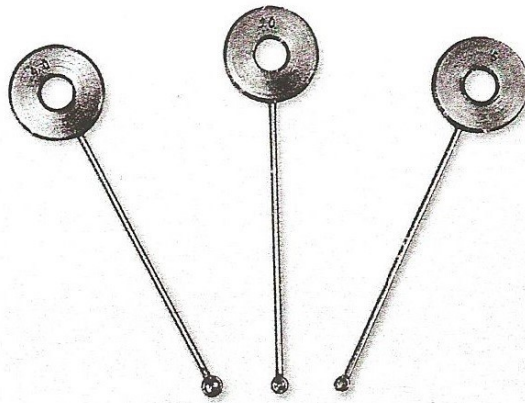
Οι κυλινδρικές πορσελάνινες ακίδες έχουν μήκος 15mm και διάμετρο 10mm. Αποτελούνται από στρογγυλεμένες άκρες με ακτίνα καμπυλότητας 10mm (εικόνα 17).

Κάθε πορσελάνινη ακίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο δύο φορές, μία φορά από το κάθε της άκρο. Κάθε πλευρά της πλάκας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τρία πειράματα. Η ουσία πρέπει, επίσης, να τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη των 5mm από τις άκρες της πλάκας για την σωστή διεξαγωγή του πειράματος.

Η ποσότητα της σκόνης του δείγματος καθορίζεται από ειδικά σχεδιασμένα κυλινδρικού τύπου κουτάλια. Το σετ των κουταλιών δειγματοληψίας εξασφαλίζει ότι το βάρος του δείγματος είναι περίπου 5-50mg, ανάλογα τον τύπο του υλικού (εικόνα 18).



Εικόνα 17: Πορσελάνινη ακίδα και πορσελάνινη πλάκα



Εικόνα 18: Κουταλάκια δοσολογίας 5,10 και 40mm³

5.2 Πειράματα

5.2.1 Ζελατινοδυναμίτιδα

Η δοκιμαζόμενη ζελατινοδυναμίτιδα (εικόνα 19) αποτελεί δείγμα από φυσίγγιο ζελατινοδυναμίτιδας Ergodyn 35E της εταιρείας Nitroerg, Poland. Το Ergodyn 35E είναι εκρηκτικό κατάλληλο για υπόγεια και υπαίθρια εργοτάξια, ενώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνθήκες όπου υπάρχει η πιθανότητα έκρηξης λόγω ύπαρξης σκόνης άνθρακα ή μεθανίου.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προϊόντος η πυκνότητα του είναι 1,4 g/cm³, με ταχύτητα έκρηξης που μπορεί να φτάσει τα 4500 m/s (σε διάτρημα διαμέτρου 32mm), ενώ η ευαισθησία του υλικού στην τριβή είναι μεγαλύτερη των 80N (Nitroerg, 2015)

5.2.2 TNT

Ο συγκεκριμένος τύπος TNT (εικόνα 20) αποτελεί προϊόν της εταιρείας Nitro-Chem και χρησιμοποιείται, κυρίως, για την ενίσχυση εκρηκτικών υλών με βάση το νιτρικό αμμώνιο, όπως είναι ο αμμωνίτης. Το υλικό έχει μέση πυκνότητα 1,49-1,59 g/cm³, η ταχύτητα της έκρηξης έχει προσδιοριστεί περίπου στα 6800 m/s, ενώ η ευαισθησία του σε τριβή έχει προσδιοριστεί μεγαλύτερη των 353N (Nitro-Chem, 2015).



Εικόνα 19. Δείγμα Ζελατοδυναμίτιδα



Εικόνα 20. Δείγμα TNT

5.2.3 Αμμωνίτης

Ο αμμωνίτης είναι εκρηκτικό για χρήση σε διατρήματα μικρής ή μεσαίας διαμέτρου. Χρησιμοποιείται ευρέως σε λατομεία και δημόσια έργα με μαλακά ή λιγότερο σκληρά πετρώματα. Η απουσία νιτρογλυκόλης ή νιτρογλυκερίνης καθιστούν το προϊόν ασφαλές κατά τη χρήση του. Ο αμμωνίτης έχει μικρή αντοχή στην υγρασία και δεν συνίσταται η χρήση του σε υγρές συνθήκες. Η έναυσή του μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν κοινό

πυροκροτητή No.8 (Extraco, 2015).

Ο συγκεκριμένος αμμωνίτης της εταιρείας Extraco (εικόνα 21), είναι κονιώδες εκρηκτικό με κύρια συστατικά το νιτρικό αμμώνιο και το τρινιτροτολουόλιο (TNT). Δεν περιέχει νιτρογλυκερίνη ή νιτρογλυκόλη ή άλλες τοξικές ενώσεις όπως το δινιτροτολουόλιο. Η υψηλή περιεκτικότητα σε τρινιτροτολουόλιο αυξάνει σημαντικά τις εκρηκτικές ιδιότητες του προϊόντος σε σύγκριση με το ANFO.

Η περιεκτικότητα σε TNT είναι περίπου 18%, με πυκνότητα μεταξύ 0,98-1,08 gr/cm³. Η ταχύτητα έκρηξης του υλικού έχει μετρηθεί στα 4200 m/s, ενώ η ευαισθησία του σε τριβή είναι μεγαλύτερη από 360N.



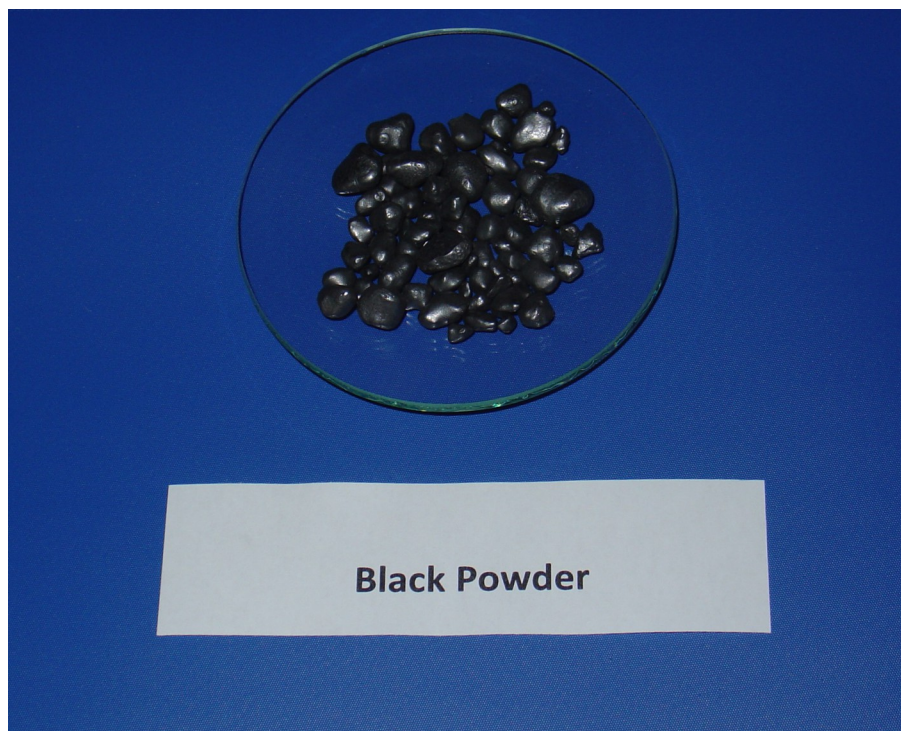
Εικόνα 21. Δείγμα Αμμωνίτη

5.2.4 Μαύρη πυρίτιδα

Η μαύρη πυρίτιδα εξορύξεων εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε λατομεία όπου απαιτείται έκρηξη περιορισμένης ισχύος με αξιοποίηση της ωστικής ενέργειας του εκρηκτικού όπως στην εξόρυξη μαρμάρων, πέτρες κτλ.

Η συγκεκριμένη πυρίτιδα της εταιρείας Extraco (εικόνα 22), είναι μίγμα νιτρικού κάλιου, θείου και ξυλάνθρακα σε κοκκώδη μορφή. Για περισσότερη ευκολία στη χρήση του υλικού, οι κόκκοι στυλβώνονται με ειδική κατεργασία.

Η πυκνότητα του υλικού είναι $0,9 \text{ gr/cm}^3$, με ταχύτητα έκρηξης 400 m/s (υπό περιορισμό σε ατσάλινο σωλήνα διαμέτρου $35\text{-}41 \text{ mm}$). Η ευαισθησία του στην τριβή είναι 360N (Extraco, 2015).

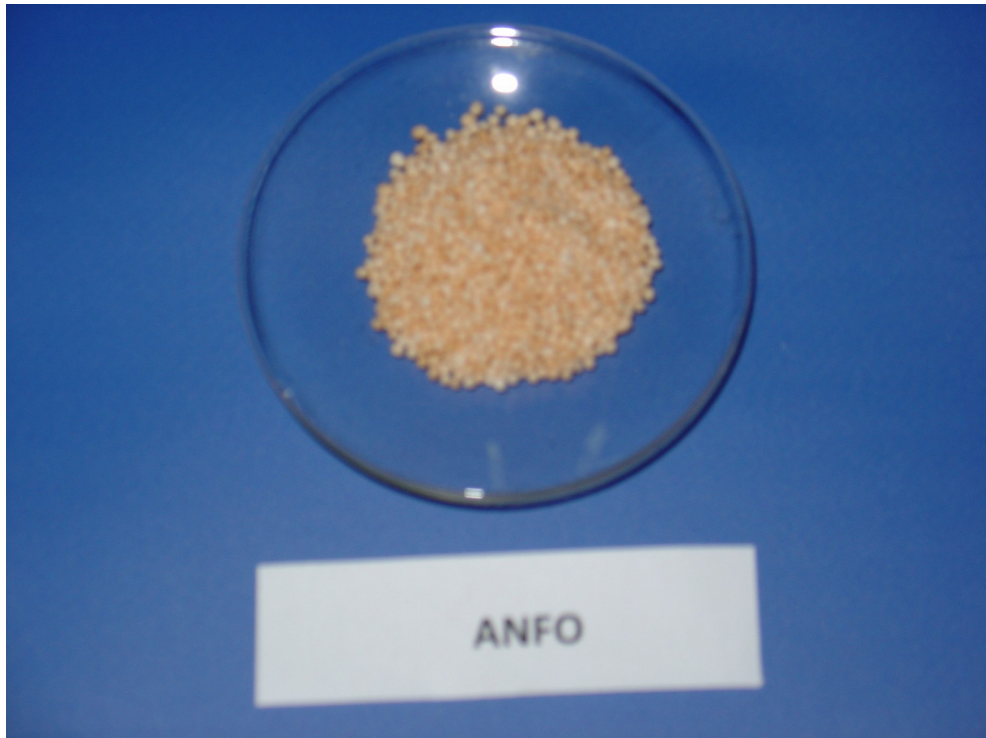


Εικόνα 22. Δείγμα Μαύρης πυρίτιδας

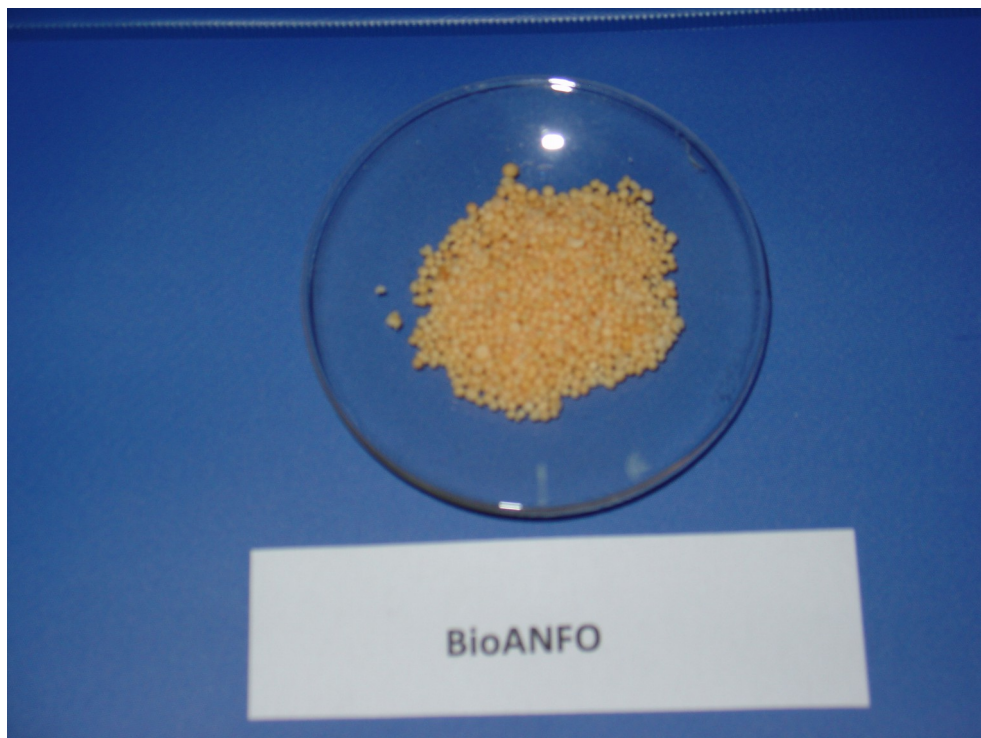
5.2.5 Πετραμμωνίτης – ANFO

Ο πετραμμωνίτης (εικόνα 23) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κύριο εκρηκτικό σε όλες τις εργασίες ανατινάξεων σε μεταλλεία, λατομεία και δημόσια έργα όπου τα πετρώματα είναι μαλακά και τα διατρήματα είναι μεσαίας ή μεγάλης διαμέτρου. Σαν υλικό ρέει ελεύθερα και μπορεί να διοχετευθεί στο διάτρημα απευθείας. Γόμωση υπό πίεση σε οριζόντια, κάθετα ή κεκλιμένα διατρήματα, βελτιώνει την απόδοση του προϊόντος. Ο πετραμμωνίτης έχει πολύ μικρή αντοχή στο νερό και η χρήση του συνίσταται μόνο σε στεγνό έδαφος. Για την έναυση του πετραμμωνίτη απαιτείται η τοποθέτηση ισχυρότερου εκρηκτικού στη βάση του διατρήματος. Στην περίπτωση που αυτό είναι σε μορφή φυσιγγίου, η διάμετρος του πρέπει να είναι όσο το δυνατό παραπλήσια με αυτή του διατρήματος και να έχει μήκος ικανό ώστε να αναπτυχθεί αρχικά ένα σταθερό μέτωπο έκρηξης.

Ο πετραμμωνίτης είναι η εμπορική ονομασία του εκρηκτικού προϊόντος ANFO που παράγει η εταιρεία Extraco. Είναι μίγμα πορώδους νιτρικού αμμωνίου και καύσιμης ύλης (diesel oil). Η πυκνότητα του υλικού είναι $0,8 \text{ gr/cm}^3$, η ταχύτητα έκρηξης του περίπου 3000 m/s και η ευαισθησία του στην τριβή μεγαλύτερη των 360N (Extraco, 2015).



Εικόνα 23. Δείγμα Πετραμμωνίτη – ANFO



Εικόνα 24. Δείγμα BioANFO

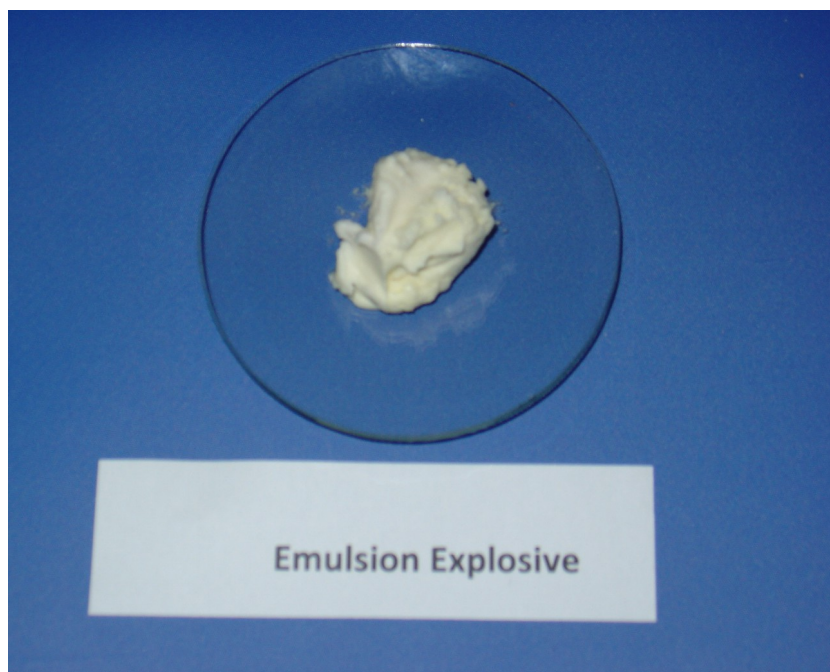
5.2.6 Bio – ANFO

Το Bio-ANFO (εικόνα 24) προορίζεται για την ίδια χρήση με το απλό ANFO. Το συγκεκριμένο προϊόν έχει παραχθεί στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ και αποτελείται από νιτρικό αμμώνιο και βιοκαύσιμο (bio fuel). Το βιοκαύσιμο είναι προϊόν επεξεργασίας χρησιμοποιημένων τηγανέλαιων με μεθανόλη παρουσία υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) ως καταλύτη. Ο παραγόμενος εστέρας, δηλαδή το βιοκαύσιμο έχει ειδικό βάρος $0,873 \text{ g/cm}^3$. Το BioANFO προκύπτει από την ανάμιξη 93,5% νιτρικού αμμωνίου και 6,5% βιοκαυσίμου, για ισοζυγισμένο ως προς το οξυγόνο εκρηκτικό.

Η ταχύτητα έκρηξης του προϊόντος που μετρήθηκε σε γόμωση BioANFO εντός πλαστικού σωλήνα PVC διαμέτρου 72 mm, είναι 2840m/s. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι η ταχύτητα έκρηξης που μετρήθηκε σε γόμωση βιομηχανοποιημένου ANFO υπό τις ίδιες συνθήκες μέτρησης έδωσε ταχύτητα έκρηξης 2755 m/s.

5.2.7 Εκρηκτικό γαλάκτωμα

Το γαλάκτωμα EM-EX της εταιρείας Extraco (εικόνα 25), ανήκει στη νέα γενιά των εκρηκτικών γαλακτωμάτων (emulsion explosives). Παρασκευάζεται από το διάλυμα νιτρικού αμμωνίου, ελαιώδη συστατικά, γαλακτωματοποιητή κ.λπ. Σε ειδικές περιπτώσεις προστίθεται αλουμίνιο για την αύξηση της ισχύος του προϊόντος. Η ευαισθησία του προϊόντος γίνεται με την προσθήκη micro balloons (Extraco, 2015).



Εικόνα 25. Δείγμα Εκρηκτικού γαλακτώματος

Επειδή κανένα συστατικό δεν είναι από μόνο του εκρηκτικό, το EM-EX είναι πιο ασφαλές όσον αφορά τη χρήση του από τα υπόλοιπα είδη εκρηκτικών. Η αντοχή του στο νερό είναι άριστη και κατά την έκρηξη δεν παράγονται τοξικές ενώσεις. Η μοναδική σύνθεση του EM-EX δεν προκαλεί πονοκέφαλο ή άλλες διαταραχές στην υγεία του χρήστη, όπως συμβαίνει με τα νιτρογλυκερινούχα εκρηκτικά

Το EM-EX χρησιμοποιείται σε διατρήματα μικρής ή μεσαίας διαμέτρου και η έναυσή του μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα κοινό πυροκροτητή Νο.8. Οι άριστες εκρηκτικές ιδιότητες, σε συνδυασμό με την αντοχή του στο νερό, το καθιστούν κατάλληλο για χρήση σε όλα τα είδη ανατινάξεων. Ανάλογα με το είδος του πετρώματος και τις ανάγκες της ανατίναξης, το EM-EX είναι μια καλή εναλλακτική λύση έναντι του αμμωνίτη ή της ζελατινοδυναμίτιδας είτε σαν εκρηκτικό έναυσης, είτε σαν κύριο εκρηκτικό στον πυθμένα, είτε σε όλο το μήκος του διατρήματος.

5.2.8 Πεντρίτης – PETN

Ο πεντρίτης που χρησιμοποιήθηκε στις συγκεκριμένες δοκιμές έχει εξαχθεί από τον πυρήνα ακαριαίας θρυαλλίδας (εικόνα 26). Η ταχύτητα εξόρυξης του πεντρίτη είναι περίπου 8400 m/s, ενώ έχει ευαισθησία στην τριβή μεγαλύτερη των 60N.



Εικόνα 26. Δείγμα Πεντρίτη – PETN

5.2.9 Ζάχαρη

Αποτελεί απλή ζάχαρη του εμπορίου για όλες τις χρήσεις (εικόνα 27). Η δοκιμή της γίνεται καθαρά για πειραματικούς λόγους αφού δεν αποτελεί εκρηκτική ύλη.



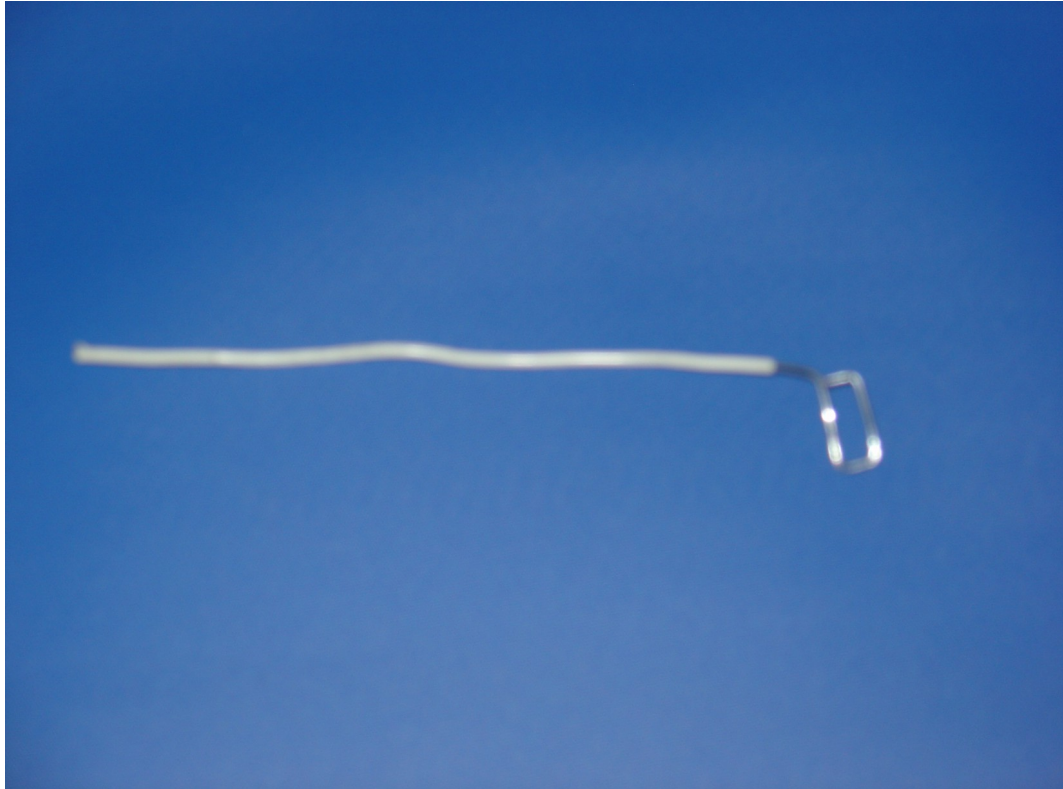
Εικόνα 27. Δείγμα Ζάχαρης

5.3 Πειραματική διαδικασία

Τα πειράματα διεξήχθησαν κάτω από σαφώς ελεγχόμενες συνθήκες, σε θερμοκρασία 22,3°C και 39% υγρασία, όπως απαιτεί το πρότυπο EN 13631-3.

Οι ουσίες, ANFO, BioANFO και μαύρη πυρίτιδα θραύστηκαν και πέρασαν από κόσκινο 0,5mm, όπως απαιτούν οι προδιαγραφές. Ανάλογα με την επικινδυνότητά του, αντίστοιχη ποσότητα εκρηκτικού χρησιμοποιήθηκε για δοκιμή. Ως εκ τούτου, για την δοκιμή του ANFO, Bio-ANFO, αμμωνίτη, και μαύρης πυρίτιδας χρησιμοποιήθηκαν 40mg εκρηκτικού υλικού, ενώ για την δοκιμή του PETN και του TNT -που θεωρούνται πιο επικίνδυνα- χρησιμοποιήθηκαν μόνο 10mg υλικού.

Για το γαλάκτωμα και την ζελατοδυναμίτιδα που έχουν μορφή παχύρευστης πάστας, κατασκευάστηκε ειδικό εργαλείο για την τοποθέτηση του δείγματος επί της πορσελάνινης πλάκας, πάχους 0,5mm και διαστάσεων 2*10mm, ώστε να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές η δοκιμαζόμενη ποσότητα του κάθε υλικού. (εικόνα 28)



Εικόνα 28: Ειδικό εργαλείο-μετρητής για την μέτρηση ουσιών σε μορφή πάστας



Εικόνα 29: Υπό δοκιμή δείγμα μορφής πάστας πριν την έναρξη της δοκιμής

Για τις περισσότερες ουσίες υπάρχουν ήδη βιβλιογραφικές αναφορές, σχετικά με την ευαισθησία τους στην τριβή, οι οποίες ελήφθησαν υπόψιν κατά την πειραματική διαδικασία. Για τον λόγο αυτό, για ουσίες, όπως τα ANFO, Bio-ANFO, μαύρη πυρίτιδα, αμμωνίτης, ζάχαρη ή το Εκρηκτικό Γαλάκτωμα, που θεωρούνται ως αδρανή ή έχουν πολύ μικρή ευαισθησία, η μέτρηση άρχισε από το μεγαλύτερο δυνατό φορτίο 360N. Αντίθετα, για ουσίες, όπως το PETN ή τη ζελατοδυναμίτιδα, που θεωρούνται ευαίσθητες και σίγουρα θα προκαλούσαν αντίδραση για μεγάλα φορτία, η δοκιμή άρχισε σε χαμηλότερα από το προδιαγραφόμενο φορτίο έναρξης της δοκιμής (360N). Στην συνέχεια, ακολουθήθηκε κανονικά η διαδικασία της δοκιμής για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας στην τριβή.

6 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

6.1 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για ANFO

Το ANFO, βάση των τεχνικών του χαρακτηριστικών θεωρείται ουσία σχετικά αδρανής ως προς την ευαισθησία της στην τριβή. Η δοκιμή ξεκίνησε με το μέγιστο φορτίο των 360N. Τα αποτελέσματα επαλήθευσαν την αναμενόμενη αδράνεια της ουσίας ως προς την τριβή, αφού καμία αντίδραση δεν συνέβη σε κάποια από τις έξι δοκιμές (πίνακας 6). Συνεπώς, η ευαισθησία του ANFO στην τριβή είναι >360N.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για ANFO

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40

6.2 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για BioANFO

Το BioANFO, σε αντιστοιχία με το απλό ANFO, παρά τις διαφοροποιήσεις που έχει στην σύνθεση του αναμένεται να έχει παρόμοιες ιδιότητες, και για τον λόγο αυτό μη ευαισθησία στην τριβή. Οι δοκιμές ξεκίνησαν στο μέγιστο φορτίο των 360N, ενώ καμία αντίδραση δεν παρατηρήθηκε σε κάποια από τις έξι δοκιμές (πίνακας 7). Συνεπώς, το BioANFO μπορεί να θεωρηθεί αδρανές ως προς την ευαισθησία του στην τριβή, με ευαισθησία στην τριβή >360N.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για BioANFO

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40

6.3 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Μαύρη πυρίτιδα (Black powder)

Η μαύρη πυρίτιδα, βάση των τεχνικών του χαρακτηριστικών, θεωρείται πως δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην τριβή. Τα πειράματα ξεκίνησαν από το μέγιστο φορτίο των 360N και δεν έδειξαν αντίδραση σε κάποια από τις έξι δοκιμές στο φορτίο αυτό (πίνακας 8). Για τον λόγο αυτό η μαύρη πυρίτιδα θεωρείται αδρανής ως προς την τριβή, με ευαισθησία >360N.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Μαύρη Πυρίτιδα

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40

6.4 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Πεντρίτη (PETN)

Ο πεντρίτης με βάση τα τεχνικά του χαρακτηριστικά έχει εκτιμηθεί πως παρουσιάζει ευαισθησία στην τριβή, με τιμές ευαισθησίας κοντά στα 60N. Για τον λόγο αυτό, οι δοκιμές ξεκίνησαν στο φορτίο των 120N, και όχι σε εκείνο των 360N, όπως συμβαίνει για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας σε μια άγνωστη ουσία, κυρίως για λόγους οικονομίας υλικών. Λόγω της ευαισθησίας της ουσίας και για λόγους ασφαλείας χρησιμοποιήθηκαν

μόνο 10mg δείγματος. Κατά την πρώτη δοκιμή στα 120N παρατηρήθηκε έκρηξη, και κατόπιν οι δοκιμές συνεχίστηκαν, όπως ορίζουν οι προδιαγραφές, έως ότου να μην παρατηρηθεί κάποια αντίδραση σε κάποια εκ των έξι διαδοχικών δοκιμών υπό το ίδιο φορτίο. Το ελάχιστο φορτίο στο οποίο τουλάχιστον μία σε έξι δοκιμές παρουσίασε αντίδραση (έκρηξη) ήταν τα 60N (πίνακας 9). Ο πεντρίτης δηλαδή παρουσιάζει ευαισθησία στην τριβή 60N.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Πεντρίτη (PETN)

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B6	6	120	Έκρηξη	X	10
A2	B5	6	80	Έκρηξη	X	10
B1	B5	5	72	Καμία αντίδραση	O	10
B2	B5	5	72	Έκρηξη	X	10
Γ1	B5	4	64	Καμία αντίδραση	O	10
Γ2	B5	4	64	Έκρηξη	X	10
Δ1	B4	6	60	Καμία αντίδραση	O	10
Δ2	B4	6	60	Έκρηξη	X	10
E1	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10
E2	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10
E3	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10
E4	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10
E5	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10
E6	B5	3	56	Καμία αντίδραση	O	10

6.5 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Αμμωνίτη (Ammonit)

Ο αμμωνίτης με βάση τα τεχνικά του χαρακτηριστικά θεωρείται πως δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην τριβή. Τα πειράματα ξεκίνησαν από το μέγιστο φορτίο των 360N, όπου δεν παρουσιάστηκε αντίδραση σε κάποια από τις έξι δοκιμές που έγιναν υπό το ίδιο φορτίο (πίνακας 10). Για τον λόγο αυτό ο αμμωνίτης θεωρείται αδρανής ως προς την τριβή, με ευαισθησία στην τριβή >360N.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Αμμωνίτη

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40

6.6 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για το Εκρηκτικό Γαλάκτωμα (Emulsion explosive)

Το γαλάκτωμα, βάσει των πολύ καλών ιδιοτήτων που παρουσιάζει και των τεχνικών του χαρακτηριστικών αναμένεται να μην παρουσιάσει ευαισθησία στην τριβή. Οι δοκιμές άρχισαν με το μέγιστο φορτίο των 360N, όπου δεν παρουσιάστηκε αντίδραση σε κάποια από τις έξι δοκιμές υπό αυτό το φορτίο (πίνακας 11). Συνεπώς το γαλάκτωμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως αδρανής ουσία ως προς την ευαισθησία της στην τριβή, με ευαισθησία >360N.

Λόγω της μορφής του γαλακτώματος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη ποσότητα ουσίας, σχηματίζοντας λωρίδα υλικού διαστάσεων 10mm*2mm*0,5mm

Πίνακας 11. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Εκρηκτικό Γαλάκτωμα

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10

6.7 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζάχαρη

Σκοπός της δοκιμής ήταν η δοκιμή της εκρηκτικότητας της ζάχαρης λόγω πιθανής ευαισθησίας της στην τριβή, σύμφωνα με μια βιβλιογραφική αναφορά (Simpson et al, 1996), με την οποία υπήρξε αντίδραση σε 1/10 δοκιμές υπό φορτίο 240N. Η δοκιμή ξεκίνησε υπό το μέγιστο φορτίο των 360N, ωστόσο τα αποτελέσματα δεν είναι έδειξαν κάποια αντίδραση στις έξι διαδοχικές που έγιναν υπό το ίδιο βάρος (πίνακας 12). Συνεπώς, η ζάχαρη είναι αδρανής ως προς στην τριβή, με ευαισθησία >360N.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζάχαρη

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A2	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A3	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A4	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A5	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40
A6	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	40

6.8 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζελατινοδυναμίτιδα (Gelatine – Dynamite)

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εταιρείας Nitroerg για τον συγκεκριμένο τύπο ζελατινοδυναμίτιδας, η ευαισθησία του υλικού σε τριβή είναι 80N. Παρόλα αυτά, οι πειραματικές δοκιμές δεν έδειξαν τα ανάλογα αποτελέσματα. Αρχικά διεξήχθησαν δύο δοκιμαστικές δοκιμές υπό φορτίο 96 και 120N αντίστοιχα που δεν έδειξαν κάποια αντίδραση. Στην συνέχεια για τον ακριβή προσδιορισμό της ευαισθησίας της ουσίας, η δοκιμή άρχισε με το μέγιστο φορτίο των 360N. Στην δεύτερη δοκιμή υπό το ίδιο φορτίο παρατηρήθηκε έκρηξη, και οι δοκιμές συνεχίστηκαν, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, έως ότου να μην παρατηρηθεί αντίδραση σε κάποια από τις έξι διαδοχικές δοκιμές υπό το ίδιο φορτίο. Το φορτίο που παρατηρήθηκε αντίδραση σε τουλάχιστον μία από τις δοκιμές, είναι αυτό των 144N (πίνακας 13). Συνεπώς, η ζελατινοδυναμίτιδα παρουσιάζει ευαισθησία στην τριβή 144N.

Λόγω της μορφής πάστας που έχει η ζελατινοδυναμίτιδα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη ποσότητα ουσίας, σχηματίζοντας λωρίδα υλικού διαστάσεων 10mm*2mm*0,5mm

Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για Ζελατινοδυναμίτιδα

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B6	4	96	Καμία αντίδραση	O	10
B1	B6	6	120	Καμία αντίδραση	O	10
Γ1	B9	6	360	Καμία αντίδραση	O	10
Γ2	B9	6	360	Έκρηξη	X	10
Δ1	B8	6	240	Έκρηξη	X	10
E1	B8	3	168	Έκρηξη	X	10
Z1	B8	2	144	Καμία αντίδραση	O	10
Z2	B8	2	144	Έκρηξη	X	10
H1	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10
H2	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10
H3	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10
H4	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10
H5	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10
H6	B7	4	128	Καμία αντίδραση	O	10

6.9 Αποτελέσματα δοκιμής BAM για TNT

Το TNT σύμφωνα με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζει ευαισθησία στην τριβή 353N. Η δοκιμή ξεκίνησε με το μέγιστο φορτίο των 360N, όπου και παρουσιάστηκε η αντίδραση της έκρηξης. Τελικώς, το φορτίο όπου παρουσιάστηκε αντίδραση σε τουλάχιστον μία δοκιμή ήταν αυτό των 324N (πίνακας 14).* Συνεπώς, το TNT παρουσιάζει ευαισθησία στην τριβή 324N.

*Τα βάρη της συγκεκριμένης συσκευής δοκιμής δεν επιτρέπουν τον ακριβέστερο προσδιορισμό της ευαισθησίας στην τριβή, αφού δεν είναι δυνατή η δοκιμή υπό φορτίο μεταξύ των 324-360N.

Πίνακας 14. Αποτελέσματα δοκιμής BAM για TNT

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός Βάρους	Εγκοπή βραχίονα φόρτωσης	Φορτίο (N)	Αντίδραση		Ποσότητα εκρηκτικού (mg)
				Ευρωπαϊκές προδιαγραφές	Σύστ. OXS	
A1	B9	6	360	Έκρηξη	X	10
B1	B9	5	324	Έκρηξη	X	10
Γ1	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10
Γ2	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10
Γ3	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10
Γ4	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10
Γ5	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10
Γ6	B9	4	288	Καμία αντίδραση	O	10

7 Συμπεράσματα

Η επικινδυνότητα των εκρηκτικών υλικών, τόσο κατά την παρασκευή τους όσο και κατά την μεταφορά και την χρήση τους, είναι πρωταρχικής σημασίας για κάθε δραστηριότητα που τις αφορά. Ανάλογα με το είδος της εκρηκτικής ύλης, είναι πιθανό να συμβεί διέγερση αυτής δίχως την παρουσία κάποιου μέσου έναυσης. Συνεπώς, ο έγκυρος προσδιορισμός των ευαισθησιών κάθε ουσίας είναι απαραίτητος.

Η δοκιμή BAM Friction Test αποτελεί μια πρότυπη δοκιμή μικρής κλίμακας για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας στην τριβή, για πλήθος εκρηκτικών ουσιών. Είναι μια εύκολη και γρήγορη στον χειρισμό δοκιμή, που προϋποθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό, ο οποίος καταλαμβάνει μικρό χώρο, καθώς και ορισμένες βασικές γνώσεις για την λειτουργία της συσκευής από την πλευρά του χειριστή. Η προετοιμασία και η δοκιμή κάθε δείγματος διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά) και οι δοκιμές μπορούν να διεξαχθούν με μεγάλη αποδοτικότητα για μεγάλο εύρος δειγμάτων.

Οι προδιαγραφές της δοκιμής, όπου η ευαισθησία κάθε ουσίας προσδιορίζεται ύστερα από έξι διαδοχικές ‘αποτυχημένες’ δοκιμές υπό συγκεκριμένο φορτίο, καθιστούν τα αποτελέσματα αρκετά αξιόπιστα. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας, καθώς προσδιορίζονται από μακροσκοπική παρατήρηση από τον εκάστοτε χειριστή. Είναι, λοιπόν, στην διακριτική αντίληψη του κάθε χειριστή, να χαρακτηρίσει κάποια αντίδραση ως έκρηξη ή μη. Αν και υπάρχουν σαφώς αποδεκτά στοιχεία που καθιστούν κάποια αντίδραση ως έκρηξη ή μη, μπορεί να υπάρξει σημαντική επιρροή από τις συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών.

Οι δοκιμές πρέπει να διεξάγονται σε κλειστό χώρο, θερμοκρασίας περίπου 20° και υγρασίας 10-80%, σε περιβάλλον απόλυτης ησυχίας και με χαμηλό φωτισμό για να φανεί τυχόν λάμψη της εκρηκτικής ουσίας ή να ακουστεί τυχόν έκρηξη του δείγματος κατά την δοκιμή. Η δοκιμή των ουσιών προϋποθέτει, επίσης, απαιτούμενη κοκκομετρία του δείγματος, καθώς και συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος για κάθε δοκιμή.

Βιβλιογραφία

- Akiki Michel, Menon Suresh, *A model for hot spot formation in shocked energetic materials*, Combustion and Flame Volume 162, Issue 5, May 2015, Pages 1759–1771
- Bowden F.P., Yoffe A. D., *Initiation and growth of explosion in liquids and solids*, Cambridge, Cambridge University Press 1952
- Bowden, F.P., Yoffe, A.D. *Hot spots and the initiation of explosion*, in "Proc. 3rd Symp. on Combustion, Flame and Explosion Phenomena", pp. 551-560, publ. Baltimore, MD, The Williams and Wilkins Company 1949
- Chaudhri M. M., *Combustion and Flame*, vol. 19, p. 419-425, 1972
- European Standard, *Explosives for civil uses – High explosives – part 3: Determination of sensitiveness to friction of explosives*, EN 13631-3, English version, August 2004
- Extraco SA Greece, επίσημη ιστοσελίδα, <http://www.extraco.gr/> ,(πρόσβαση 25 Ιουνίου 2015)
- *FSKM BAM Friction Sensitivity Tester for Friction Sensitivity Test, user's manual*, OZM research, August 2009
- Hudson R. J., *‘Investigating the factors influencing RDX shock sensitivity’*, Ph.D THESIS, Cranfield University, February 2012
- Klapotke M. Thomas, *Chemistry of High-Energy Materials*, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston 2012
- Nitro-Chem Poland, επίσημη ιστοσελίδα, <http://www.nitrochem.com.pl/> , (πρόσβαση 25 Ιουνίου 2015)
- Nitroerg Poland, επίσημη ιστοσελίδα, <http://www.nitroerg.pl/> , (πρόσβαση 25 Ιουνίου 2015)
- Παναγιώτου Γεώργιος, *‘Εξόρυξη πετρωμάτων II, Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες’*, σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών (πρόσβαση Ιούνιος 2015)
- Simpson L. Richard, Foltz M. Frances, *LLNL Small-scale Friction Sensitivity (BAM) Test* , Lawrence Livermore National Laboratory, June 1996
- Suceska Muhamed, *The Methods for Explosives*, Springer-Verlag New York 1995
- Τσουτρέλης, Χ. *Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων*, Τόμος 1, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997

- United Nations, *Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria*, New York and Geneva 1995
- Zukas A. Jonas, Walters William P., *Explosive Effects and Applications*, Springer-Verlag New York 1997

Παράρτημα I

Άλλες δοκιμές προσδιορισμού της ευαισθησίας στην τριβή

UK Mallet friction Test

Σε αυτή τη δοκιμή ένας χειριστής χειρίζεται ένα ξύλινο σφυρί ανάμεσα στα πόδια του με στόχο να δώσει ένα δυνατό χτύπημα σε μια γραμμή εκρηκτικού υλικού σε μορφή σκόνης που έχει τοποθετηθεί σε μια επιφάνεια - στόχο. Το ξύλινο σφυρί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκληθεί κρούση σε ξύλινες ή πέτρινες επιφάνειες - στόχους, ή μπορεί να φέρει ένθεμα από χάλυβα ή ορείχαλκο και να χτυπά σε στόχους από αλουμίνιο, ορείχαλκο ή χάλυβα. Η δοκιμή διεξάγεται σε δέκα διαφορετικά «ίχνη», ή γραμμές της εκρηκτικής σκόνης, με τον έναν χειριστή να χειρίζεται το σφυρί και με δεύτερο χειριστή να παρατηρεί την πορεία της δοκιμής και να καθορίζει αν συνέβη κάποια αντίδραση ή όχι από την δημιουργία φλόγας, καπνού ή τον κρότο έκρηξης (Zukas, 1997).

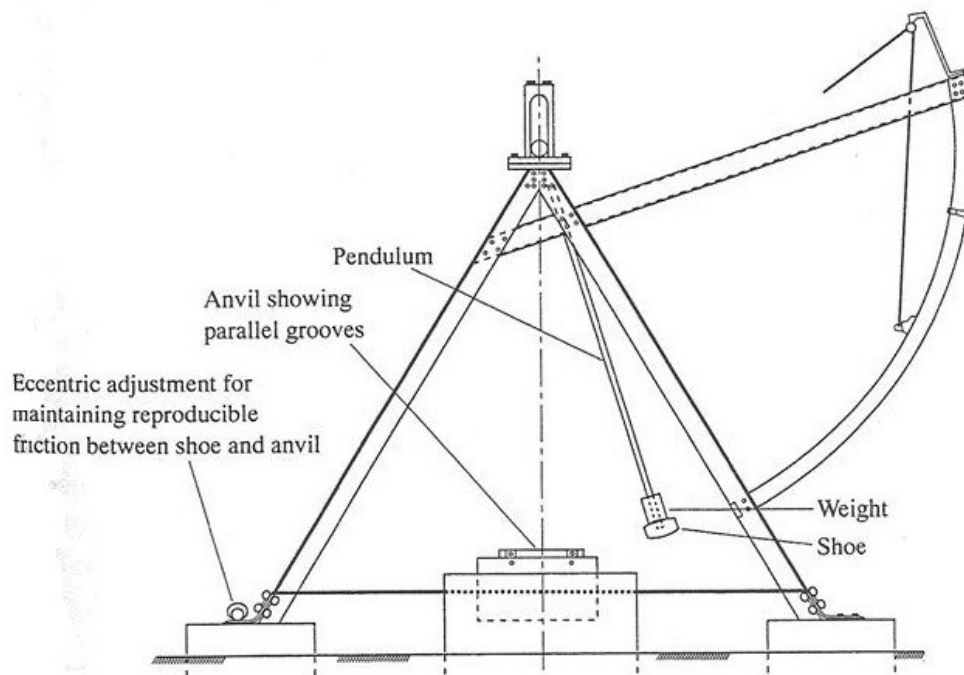
Αναμφίβολα, η δοκιμή αυτή είναι μια πολύ απλή, ακατέργαστη δοκιμή, αλλά χρησιμοποιούταν στο Ηνωμένο Βασίλειο για αρκετά χρόνια και συνεχίζεται να χρησιμοποιείται ως μια γρήγορη δοκιμή ελέγχου και καθορισμού της ευαισθησίας ενός υλικού, επειδή τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και αναπαραγώγιμα. Αναπαριστά, επίσης, ρεαλιστικά το είδος των ερεθισμάτων που μπορεί να δεχθεί ένα λεπτομερές υλικό, εάν η χρήση αυτού γίνεται χωρίς προσοχή κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του. Ο πίνακας (15) δείχνει πως τα αποτελέσματα της δοκιμής δεν διαφέρουν αισθητά από τα αποτελέσματα μιας εξελιγμένης μηχανής τριβής. Ο λόγος είναι πιθανώς πως όλες οι δοκιμές παράγουν μια τροποποιημένη μορφή κρούσης, μεταξύ της οποίας οι διαδικασίες καταγραφής και ανάλυσης των δεδομένων δεν μπορούν εύκολα να διακριθούν.

US Bureau of Mines Pendulum Friction Test

Η μηχανή της δοκιμής αποτελείται από ένα σταθερό χαλύβδινο αμόνι και ένα εκκρεμές, με ένα άκαμπτο βραχίονα εφοδιασμένο με ειδικό πέδιλο/κεφαλή από χάλυβα ή συνθετικό υλικό (εικόνα 30). Ο βραχίονας του εκκρεμούς ρυθμίζεται έτσι ώστε να προκαλέσει ένα δυνατό χτύπημα στην επιφάνεια του αμονίου, πάνω στο οποίο τοποθετείται η δοκιμαζόμενη ουσία, καθώς ταλαντεύεται στο τόξο του.

Το αμόνι αποτελείται από μαλακή χαλύβδινη πλάκα (σκληρότητας Rockwell B71) 83mm * 305mm με τρεις παράλληλες αυλακώσεις. Κάθε αυλάκωση έχει μήκος 59mm και 3mm βάθος σε απόσταση περίπου 10mm μεταξύ τους. Σκοπός τους είναι να αποτραπεί η διαφυγή της σκόνης της υπό δοκιμή εκρηκτικής ύλης από την περιοχή της σύγκρουσης/τριβής, λόγω της επίδρασης από το πέδιλο τριβής. Ο βραχίονας έχει μήκος 2m και ανυψώνεται σε ύψος 1,5m, όπου και απελευθερώνεται. Η ακτίνα καμπυλότητας του πέδλου του βραχίονα είναι 327mm. Το αμόνι και το πέδιλο του βραχίονα προσαρμόζονται ώστε ο βραχίονας να ταλαντεύεται 18 ± 1 φορές πριν επέλθει σε ηρεμία

χωρίς την παρουσία δείγματος. Η μάζα του δοκιμαζόμενου δείγματος πρέπει να είναι 7 ± 1 g, τα οποία διασκορπίζονται ομοιόμορφα μέσα και γύρω των αυλακώσεων πάνω στο αμόνι (Zukas, 1997). Οι πρώτες δοκιμές πραγματοποιούνται με το χαλύβδινο πέδιλο και αν δεν υπάρξει η παρατήρηση κάποιας αντίδρασης σε 10 δοκιμές, δεν πραγματοποιούνται περαιτέρω δοκιμές. Αν παρατηρηθεί αντίδραση σε μία από τις δοκιμές χρησιμοποιώντας το χαλύβδινο πέδιλο, η δοκιμή ξαναγίνεται αυτή την φορά με το πέδιλο από συνθετικό υλικό. Αν τα αποτελέσματα με το πέδιλο από συνθετικό υλικό χαρακτηριστούν όχι περισσότερο από 'ελαφρύ τοπικό τρίξιμο', το υλικό θεωρείται ότι έχει 'περάσει' την δοκιμή και μπορεί επιτυχώς να χρησιμοποιηθεί ως δευτερογενές εκρηκτικό.



Εικόνα 30: Εκκρεμές της δοκιμής τριβής του US Bureau of Mines (Pendulum Friction Test)

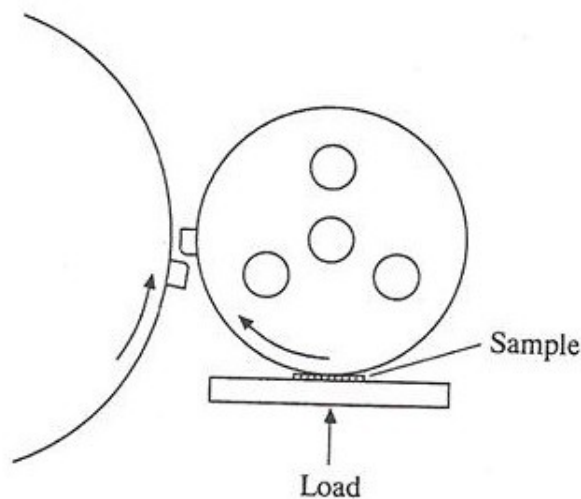
US Navy Weapons Center, Friction Pendulum Test

Ο εξοπλισμός της δοκιμής είναι παρόμοιος με αυτόν της Bureau of Mines. Σε αυτήν την περίπτωση στο τέλος του βραχίονα υπάρχει μία διάταξη τροχών. Η διάταξη αυτή έχει βάρος 1,8kg και μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα από δοκιμή σε δοκιμή, ώστε να μειωθεί η τοπική φθορά του αλληλοεπιδρώμενου τροχού. Η διάταξη διαθέτει, επίσης, βαθμονομημένο εγκατεστημένο έκκεντρο, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί, ώστε να αποδώσει διαφορετικό βάρος πτώσης στον βραχίονα. Η δοκιμαζόμενη πλάκα ή το αμόνι τοποθετείται σε δύο οριζόντιους άξονες. Το εκκρεμές και το αμόνι ρυθμίζονται σχετικά στο κατακόρυφο επίπεδο. Πριν την διεξαγωγή του πειράματος το εκκρεμές ελέγχεται, ώστε το σημείο κρούσης με την πλάκα δοκιμής, να συμβεί 2° (μοίρες) πριν το κατώτερο νεκρό σημείο της πλάκας, καθώς και να είναι ικανό να ταλαντευτεί σε ολόκληρο το τόξο του φερόμενο σε επαφή με όλη την ποσότητα του δείγματος (25mg). Το δείγμα απλώνεται

σε μια περιοχή των 3mm * 6mm και ο βραχίονας απελευθερώνεται από προκαθορισμένο ύψος. Τα αποτελέσματα καταγράφονται παρατηρώντας πιθανή έκρηξη, φλόγα, ανάφλεξη ή καπνό (Zukas, 1997).

UK Rotary friction Test

Η συγκεκριμένη μέθοδος αντικατέστησε την δοκιμή UK Mallet Friction Test. Δεν αποτελείται από στοιχεία που επιφέρουν κρούση και μοιράζεται τις ίδιες αρχές με την δοκιμή BAM. Όπως φαίνεται στην εικόνα (31), το δείγμα υποβάλλεται σε τριβή από ένα ειδικά προσαρμοσμένο τροχό, με συγκεκριμένη τραχύτητα και κάτω από καθορισμένο φορτίο μεταξύ αυτού και της πλάκας που είναι τοποθετημένο το δείγμα του εκρηκτικού. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο σφόνδυλο, προσδίδει μια ώθηση στο τροχό προκαλώντας την περιστροφή του, η οποία παράγει υψηλές δυνάμεις διάτμησης στο δείγμα. Η ταχύτητα του σφονδύλου προσαρμόζεται χρησιμοποιώντας ένα ποτενσιόμετρο και η πίεση μεταξύ του τροχού και της σταθερής πλάκας ρυθμίζεται με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή αέρος από ένα έμβολο πεπιεσμένου αέρα. Πενήντα ξεχωριστά δείγματα του υλικού υπό δοκιμή υποβάλλονται σε ανάλυση τύπου Bruceton Staircase, ώστε να καθοριστεί μια μέση τιμή για την γωνιακή ταχύτητα του σφονδύλου για το κάθε δοκιμαζόμενο υλικό. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε «Αριθμούς τριβής» σε σχέση με εκείνο του RDX. Ο αριθμός τριβής του RDX είναι 3.0 (αριθμός τριβής αναφοράς)



Εικόνα 31: UK Rotary friction test

Κάθε τροχός χρησιμοποιείται για έξι δοκιμές. Η σταθερή πλάκα μετατοπίζεται κατά τον άξονα του τροχού, έτσι ώστε να επιτρέψει στις τέσσερις ίσες πλευρές της πλάκας να χρησιμοποιηθούν δύο φορές η καθεμία, δίνοντας οκτώ δοκιμές ανά πλάκα. Τα δείγματα των εκρηκτικών υλών έχουν όγκο περίπου τα 15 mm³ και παρασκευάζονται με άλεση σε ένα δεδομένο φάσμα μεγέθους των σωματιδίων και στη συνέχεια τοποθετούνται σε ένα

αχρησιμοποίητο τμήμα της πλάκας. Το αεροστατικό έμβολο ενεργοποιείται για να δώσει μία πίεση φόρτισης 267 kPa (40 psi). Η ταχύτητα του σφονδύλου ρυθμίζεται και ο τροχός τριβής περιστρέφεται, μέχρις ότου σταματήσει από τον όνυχα (Zukas, 1997).

Για κάθε υλικό, 50 δείγματα υποβάλλονται σε δοκιμή κατά την ανάλυση τύπου Bruceton Staircase χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα για την ταχύτητα του τροχού, με μια αύξηση της τάξης του 0,1 στις 100 στροφές ανά λεπτό (rpm). Το ανώτερο όριο είναι 398 rpm.

Αποτελέσματα δοκιμών

Ο πίνακας (15) δείχνει μερικά συγκριτικά αποτελέσματα των δοκιμών τριβής από διαφορετικές μεθόδους δοκιμών. Τα δεδομένα είναι εξαιρετικά σταθερά. Τα πειράματα στο Ηνωμένο Βασίλειο για υψηλής εκρηκτικότητας ύλες μέσω της δοκιμή UK Rotary Friction Test, δίνουν μια ξεκάθαρη εικόνα για τις διαφορές μεταξύ διαφόρων τύπων εκρηκτικών υλών και των υλών χαμηλής εκρηκτικότητας. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που έχει γίνει στην δοκιμή UK Rotary friction test, τα υλικά με αριθμό τριβής μεγαλύτερη του 6 θεωρείται ότι είναι «αδρανή» στην τριβή, αυτά με αριθμό τριβής μεταξύ 3 και 6 θεωρούνται «ευαίσθητα», και εκείνα με αριθμό τριβής μικρότερη του 3 θεωρούνται «πολύ ευαίσθητα».

Πίνακας 15. Σύγκριση διάφορων δοκιμών τριβής (Zukas, 1997)

Εκρηκτικά	US friction pendulum (P=pass, F=fail)		UK Mallet Test (τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σαν ποσοστό εναύσεων: 0-24≡0; 25-75≡50; 75-100≡100)			BAM Test	UK Rotary Friction Test
	Πέδιλο από ίνες	Χαλύβδινο πέδιλο	Ξύλο/ξύλο	Ξύλο/ πέτρα	Χάλυβας/ χάλυβας	Φορτίο (N)	Αριθμός τριβής
Expl. D	P	P					
TNT	P	P	0	0	0		6,0
Comp. B	P	P	0	0	50-100	360	
Tetryl	P	F	0	50	50-100	120	
RDX	P	F	0	50	50-100		3,0
HMX			0	50-100	50-100	60	1,5
PETN	P	F	0	100	50-100		1,3
PbStyphate			100	100	100		0,17
PbAz			100	100	100		0,07

Παράρτημα II

Τεχνικές προδιαγραφές συσκευής BAM Friction Sensitivity Tester FSKM

Ισχύς: 230 VAC, 50 Hz

Τάση: 36 VDC

Ονομαστική κατανάλωση ισχύος: 100 VA το πολύ

Λειτουργικό περιβάλλον: 0° C ... 50° C, υγρασία μέχρι 80%

Διάταξη ασφαλείας του πίνακα αφής: IP60

Κινητήρας: τριφασικό μοτέρ σταθερού βήματος

Ονομαστική τάση εισόδου: 36 VDC

Ονομαστική ροπή: 4 Nm

Διάταξη ασφαλείας: IP56

Διαστάσεις και βάρος:

Διαστάσεις: 65 * 120 * 110 cm (26 * 48 * 44 in)

Βάρος: περίπου 130 kg (287 lbs)

Διακύμανση:

a) Σύνολο τυποποιημένων βαριδίων BAM

Φορτίο τριβής: 5-360 N

Μάζα βαριδίων (ενσωματωμένου το άγκιστρο): 0,28-10,08 kg

b) Μικρό σύνολο βαριδίων για πρωτογενή εκρηκτικά (4 κομμάτια) – προαιρετικά

Φορτίο τριβής: 0,5-5,0 N

Μάζα βαριδίων: 28,2-141,3 g