

COLLECTION OF RESEARCH PAPERS

of the 8th International Research and Practical Conference

**CHEMICAL TECHNOLOGY:
SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

VIII Міжнародної науково-практичної конференції

**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ



Фармак



ISSN 2786-4898

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Шосткинський інститут Сумського державного університету
Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки збройних сил України
Публічне акціонерне товариство «Фармак»
Управління освіти Шосткинської міської ради
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

COLLECTION OF RESEARCH PAPERS

of the 8th International Research and Practical Conference

CHEMICAL TECHNOLOGY: SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

VIII Міжнародної науково-практичної конференції
**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**

(м. Шостка, 27-29 листопада 2024 року)



Суми

Сумський Державний Університет

2024

УДК 66.01

Редакційна колегія:

Головний редактор Закусило Р.В., доцент кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н., доцент.

Заступник головного редактора Павленко О.В., завідувач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н.

Відповідальний секретар Скуба Ю.Г. фахівець кафедри економіки та управління Шосткинського інституту Сумського державного університету.

Члени редакційної колегії:

Кравець В.Г. – професор кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, д.т.н., професор;

Худолей Г.М. – завідувач кафедри системотехніки і інформаційних технологій, к.т.н;

Тур О.М. – доцент кафедри економіки та управління, к.е.н.;

Тимофіїв С.В. – ст. викладач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.х.н.;

Пригара І.О. – ст. викладач кафедри економіки та управління, к.е.н.

Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 27 - 29 листопада 2024 року. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 242 с.

ISSN 2786-4898.

Збірник містить наукові праці учасників VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», що складаються з узагальнених матеріалів науково-дослідних робіт науковців різних галузей виробництв та наукових закладів України.

У збірнику висвітлюються актуальні питання спеціальної хімічної технології і виробництва боєприпасів, утилізації відходів виробництв різних галузей, енергозбереження, моделювання технологічних процесів, соціально-економічні аспекти виробництва та природокористування в умовах війни.

Збірник корисний робітникам хімічної промисловості, науковим співробітникам, аспірантам і студентам спеціальностей хіміко-технологічного та соціально-економічного профілів, фахівцям інформаційних технологій виробництва.

Наукові праці учасників конференції подаються в авторській редакції.

© Шосткинський інститут
Сумського державного університету, 2024
© Сумський державний університет, 2024

PRZEGLĄD METOD BADAWCZYCH WYKORZYSTYWANYCH DO OZNACZANIA WRAŻLIWOŚCI MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH NA FALE UDERZENIOWĄ

J. Borda¹, J. Targosz¹, S. Wojak¹, K. Szydło^{1,2}, S. Waśkiewicz¹

¹Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów, Politechnika Śląska, Gliwice, Poland

²Sieć Badawcza Łukasiewicz-Institut Przemysłu Organicznego, Grupa Badawcza
Technik Wybuchowych, Warsaw, Poland

E-mail: julibor996@student.polsl.pl

Spis skrótów

2,4-DNI - 2,4-dinitroimidazol

ELSGT – Rozszerzona Próba Szczelinowa na Dużą Skalę (ang. *Expanded Large Scale Gap Test*)

IHE - Niewrażliwy materiał wysokoenergetyczny (ang. *Insensitive High Explosive*)

Kompozycja B - Materiał wybuchowy, mieszanina 64% RDX i 36% TNT

LAX112 - 1,4-ditlenek-2,6-diamino-1,2,4,5-tetrazyny

LSGT - Próba Szczelinowa na Dużą Skalę (ang. *Large Scale Gap Test*)

MW - Materiały wybuchowe

NOL - Laboratorium Zbrojeniowe Marynarki Wojennej (ang. *Naval Ordnance Laboratory*)

HMX - 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazacyklooktan (oktogen)

NTO - 3-nitro-1,2,4-triazol-5-on

PBX-9205 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 92% RDX i 8% spoiwa polistyrenowego

PBX-9404 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 94% HMX, 3% nitrocelulozy i 3% spoiwa

PBX-9502 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 95% TATB i 5% spoiwa

PBXN-109 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 64% RDX, 20% aluminium i 16% spoiwa

PBXW-126 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 20% RDX, 20% chloran(VII) amonu, 26% aluminium, 22% NTO, 12% poliuretanu

Pentolit - Materiał wybuchowy, mieszanina 50% tetraazotanu pentaerytrytolu i 50% 2,4,6-trinitrotoluenu

PE8 - Plastyczny materiał wybuchowy, mieszanina 88% RDX i 12% spoiwa

PMMA - Poli(metakrylan metylu)

RDX - 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacykloheksan (heksogen)

ROWANEX 3601 - Materiał wybuchowy, mieszanina 60% TATB, 35% RDX, 5% wosk

SDT - Przejście od inicjowania uderzeniowego do detonacji (ang. *Shock to detonation transition*)

SLSGT - Próba Szczelinowa na Bardzo Dużą Skalę (ang. *Super Large Scale Gap Test*)

SSGT – Próba Szczelinowa na Małą Skalę (ang. *Small Scale Gap Test*)

TATB - 2,4,6-triamino-1,3,5-trinitrobenzen

TMD - Teoretyczna maksymalna gęstość (ang. *Theoretical maximum density*)

TNAZ - 1,3,3-trinitroazetydyna

TNT - 2,4,6-trinitrotoluen (trotyl)

1. Wstęp

Fala uderzeniowa powstająca w wyniku wybuchu jest zaburzeniem ośrodka, w postaci warstwy powietrza, przemieszczającej się od granicy ładunku z prędkością naddźwiękową. Wywołuje ona lokalne zmiany ciśnienia, temperatury, gęstości i prędkości cząstek. Tak gwałtowne zmiany mogą prowadzić do inicjacji kolejnych ładunków wybuchowych, znajdujących się w danym ośrodku [1,2].

Wrażliwość materiałów wybuchowych (MW) na falę uderzeniową jest jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących materiał ze względu na bezpieczeństwo pracy z nim [3]. Wiedza na ten temat pozwala na opracowywanie nowych bezpieczniejszych kompozycji MW, jak również zwiększa przewidywalność ich reakcji pod wpływem działania tego bodźca. Wrażliwość MW na falę uderzeniową stanowi również istotny aspekt w kontekście ich inicjacji uderzeniowej do detonacji (SDT z ang. Shock to Detonation Transition). W wyniku działania fali uderzeniowej w MW powstają gorące punkty (tzw. hot spots), czyli lokalne obszary wysokiej temperatury, które inicjują reakcję chemiczną. Pojawienie się gorących punktów powoduje powstawanie fal ciśnienia, które nakładają się, tworząc dużą pulsację ciśnienia, co w konsekwencji wywołuje eksplozję termiczną po krótkim czasie indukcji [4].

Wymagania dotyczące badania wrażliwości MW na falę uderzeniową oraz ich normy określone są w dokumentach prawnych, takich jak STANAG 4488 - Ed: 2, który dotyczy krajów NATO [5], Dekret 591 stanowiący podstawę zarządzania materiałami niebezpiecznymi w Chinach [6], czy też MIL-STD-1751A wydany przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych [7]. Znanych jest kilka metod wyznaczania tego parametru - próba szczelinowa, test klinowy, czy też metody obliczeniowe, w tym symulacje komputerowe i metody numeryczne.

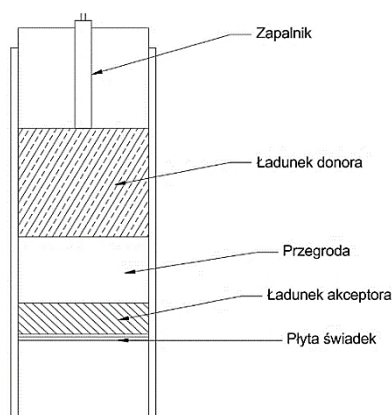
W niniejszej pracy opisano metody pomiaru wrażliwości materiałów wybuchowych na falę uderzeniową, obejmujące zmianę skali, czy też aparatury wykorzystywanej do przeprowadzenia pomiarów. Wprowadzane zmiany mają na celu zwiększenie dokładności i powtarzalności badań oraz umożliwienie ich przeprowadzania na wszelkiego rodzaju nowych MW i ich kompozycji.

2. Metody eksperymentalne wyznaczania wrażliwości MW na falę uderzeniową

2.1. Próba szczelinowa

Metoda ta polega na generowaniu fali uderzeniowej poprzez detonację ładunku MW (donoru), gdzie następuje stłumienie wytworzonej fali przez przegrodę/szczelinę, która wykonana jest z obojętnego materiału, takiego jak aluminium czy poli(metakrylanu metylu) (PMMA). Następnie dochodzi lub nie do zainicjowania ładunku akceptora (badanego materiału). Próbę uznaje się za pozytywną jeżeli akceptor uległ detonacji. Do potwierdzenia zajścia detonacji wykorzystuje się płytę świadka.

Ciśnienie fali uderzeniowej jest regulowane poprzez zmianę grubości (szerokości) przegrody, a ta zależna jest od stosowanego materiału, z którego wykonana jest przegroda. Test powtarza się wielokrotnie, stosując różne grubości przegrody, aż do momentu uzyskania krytycznej grubości dla próbki akceptora, czyli takiej przy której prawdopodobieństwo detonacji wynosi 50%. Krytyczna grubość przegrody jest mierzona, gdy detonacja akceptora zachodzi przy jego ciśnieniu inicjującym [8,9]. Wyniki testu prezentowane są jako zależność między grubością przegrody, a prawdopodobieństwem detonacji, co pozwala na ocenę wrażliwości MW na falę uderzeniową. Schemat aparatury do próby szczelinowej został przedstawiony na Rysunku 1.

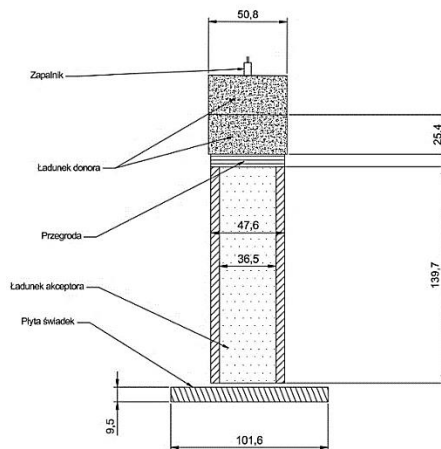


Rysunek 1. Schemat aparatury próby szczelinowej. Opracowany na podstawie [9].

2.1.1 Large Scale Gap Test (LSGT)

Jest to wariant próby szczelinowej nadający się do MW o średnicy krytycznej poniżej 36 mm. Uważany jest on za podstawę, na bazie której opracowano inne metody badania wrażliwości na falę uderzeniową. Do testu używa się standardowego zapalnika #8 lub jego równoważnika, który inicjuje detonację ładunku donora. W wyniku detonacji dochodzi do powstania fali uderzeniowej, która przekazywana jest przez przegrodę do ładunku akceptora, czyli próbki testowej. U podstawy testowanego ładunku znajduje się stalowa płyta świadka, którą wykorzystuje się jako wskaźnik do oceny czy akceptor detonuje podczas testu. Schemat aparatury do przeprowadzenia testu LSGT znajduje się na Rysunku 2.

Cały zestaw testowy montowany jest w kartonowej obudowie, a wszystkie komponenty są umieszczane w odpowiedniej pozycji. Do wycentrowania akceptora służy kartonowy dystans. Do zainicjowania ładunku testowego stosuje się ładunek wykonany z pentolitu. Ładunek dawcy składa się z dwóch sprasowanych cylindrów o gęstości $1,56 \text{ g/cm}^3$. Masa każdego wynosi około 80,3 g. Przegroda między akceptorem, a donorem jest wykonana z zestawów przekładek z PMMA lub octanu celulozy o zmiennej grubości. Standardowe grubości przegrody w LSGT wynoszą: 0,25 mm, 1,27 mm, 2,54 mm, 6,35 mm, 12,7 mm, 19,05 mm, 25,4 mm oraz 38,1 mm. Ładunek testowy może być odlewany, prasowany lub wykonany w taki sposób, aby pasował do bezszwowej rury ze stali miękkiej. Pod akceptorem umieszczana jest stalowa płyta świadka.



Rysunek 2. Schemat aparatury LSGT. Opracowany na podstawie [10].

Najczęstszym sposobem przedstawiania wyników jest zestawienie ciśnienia wywartego na przegrodzie z grubością przegrody, gęstością ładunku lub wartością TMD badanego ładunku akceptora [11,12]. Przykładowe wyniki testów dla różnych MW znajdują się w Tabeli 1.

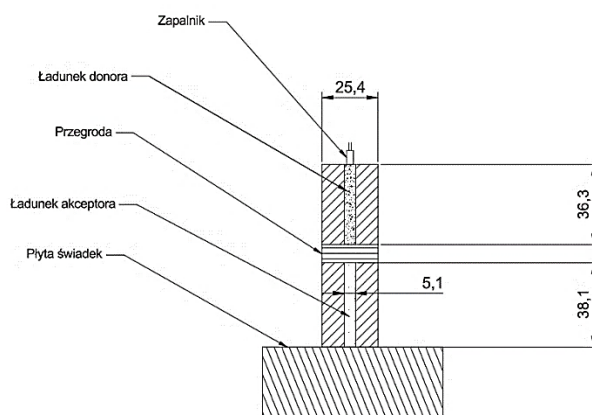
Powyższe informacje dotyczą LSGT opracowanego przez Naval Ordnance Laboratory, jednak test ten jest często modyfikowany tak, aby spełniał wymagania danej grupy badawczej. Przykładem takiej modyfikacji może być zmiana donora fali uderzeniowej na ROWANEX 3601 [13] lub tetryl [14]. Istnieją także inne testy szczelinowe, jak na przykład opracowany w Los Alamos National Laboratory, w którym materiałem donora jest PBX-9205, a w roli przegrody wykorzystano duraluminium [15].

Tabela 1: Przykładowe wyniki dla testów wykonanych przy użyciu metody LSGT.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Procent TMD %	Ciśnienie inicjacji w 50% przypadków GPa	Grubość przegrody mm	Źródło
RDX	1,64	91,0	0,74	82,04	[7]
TATB	1,82	94,6	6,40	19,81	[11]
TNT	1,61	97,3	4,40	33,78	[11]

2.1.2 Small Scale Gap Test (SSGT)

Przeprowadzany jest na materiałach wysokoenergetycznych o średnicy krytycznej wynoszącej poniżej 5 mm. Ładunek donora, jak i materiał badany są zamknięte w mosiężnym cylindrze o grubości ściany 10 mm. Metoda pozwala na wykonanie testu przy użyciu niewielkiej ilości ładunku donora, którym jest RDX sprasowany do gęstości 1,56 g/cm³, w postaci siedmiu porcji, każda o masie 165 mg. Materiał badany jest prasowany do komory akceptora. Do inicjacji ładunku dawcy stosuje się zapalnik #6 lub jego równoważnik. Jako materiał przegrody używane jest PMMA, w tej samej formie jak w teście LSGT, a jej przykładowe grubości wynoszą: 2,54 mm, 3,61 mm, 5,08 mm, 7,62 mm, 10,16 mm, 15,24 mm, 20,32 mm, 25,40 mm. Schemat aparatury do wykonania testu SSGT przedstawiony został na Rysunku 3.



Rysunek 3: Schemat aparatury SSGT. Opracowany na podstawie [16].

Wyniki badań uzyskane w SSGT mogą być porównywane z LSGT poprzez zestawienie ciśnień przy inicjacji w 50% przypadków, jednak należy pamiętać, że korelacja ta nie jest silna i jest ściśle powiązana z wartością TMD, gdzie przestaje być zauważalna przy wartościach ponad 94% dla większości kruszących materiałów wybuchowych oraz ponad 90% dla materiałów uplastycznionych [12, 16]. Modyfikowane wersje tej metody pozwalają na podniesienie limitu średnicy krytycznej do nawet 12,7 mm [17]. Przykładowe wyniki z SSGT przedstawione są w Tabeli 2.

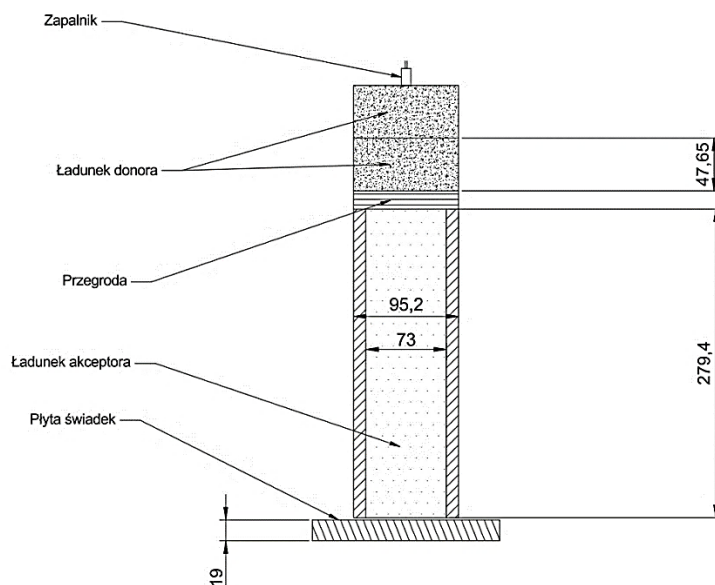
Tabela 2: Przykładowe wyniki dla testów wykonanych przy użyciu metody SSGT.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Procent TMD %	Ciśnienie inicjacji w 50% przypadków GPa	Źródło
RDX	1,63	90,5	1,12	[16]
TATB	1,84	95,1	11,60	[16]
TNT	1,62	98,1	2,90	[16]

Podobnie jak w przypadku LSGT, w tej próbie również stosowane są modyfikacje. Przykładowo, opracowano SSGT z ładunkiem donora, gdzie zastosowano PE8 lub ROWANEX 3601 [17]. Natomiast w chińskich normach używane jest aluminium jako materiał przegrody [18].

2.1.3 Expanded Large Scale Gap Test (ELSGT)

Opracowany został na potrzebę przeprowadzania prób na MW wysoce niewrażliwych na falę uderzeniową. Główną zmianą względem LSGT było zwiększenie wymiarów akceptora dwukrotnie, a donoru mnożąc jego wymiary przez 1,875. Pogrubiono także dwukrotnie płytę świadka. Dzięki temu udało się zwiększyć limit średnicy krytycznej badanego MW do 73 mm. Schemat przedstawiający aparaturę pomiarową ELSGT znajduje się na Rysunku 4.



Rysunek 4. Schemat aparatury ELSGT. Opracowany na podstawie [19].

MW stosowane do wykonania donora i materiał przegrody nie zostały zmienione względem LSGT. W teście ELSGT wykorzystywany jest ładunek donora o masie 1059,3

g, który podzielony jest na dwa cylindry. Przykładowe grubości przegrody dla tego testu wynoszą: 0,254 mm, 0,635 mm, 1,27 mm, 2,54 mm, 5,08 mm, 6,35 mm, 12,7 mm, 25,4 mm, 50,8 mm, 101,6 mm.

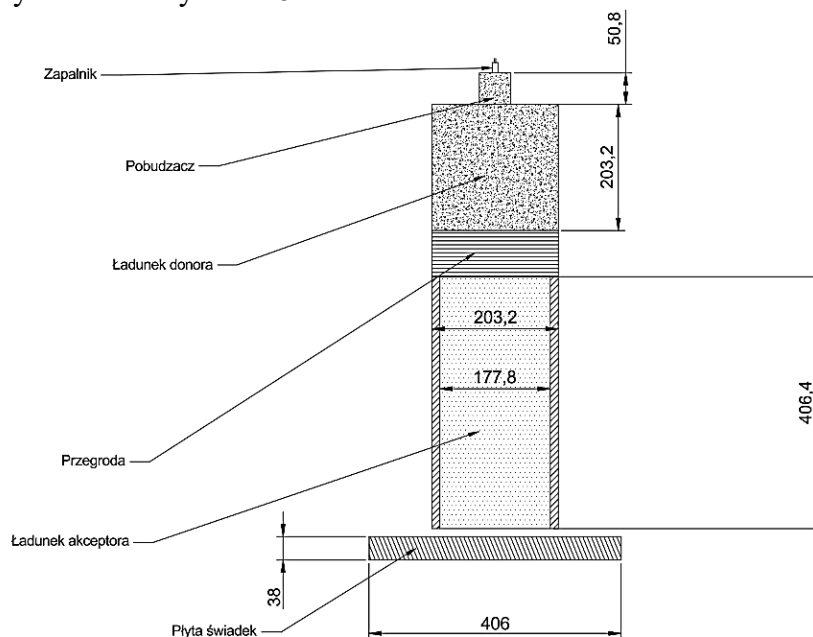
Do inicjacji ładunku dawcy wykorzystywany jest zapalnik J-2 lub jego równoważnik. Dane z tego testu mogą być porównywane względem wyników z LSGT poprzez zestawienie grubości przegrody, przy której nastąpiła inicjacja ładunku w 50% przypadków, ponieważ wykazują one zależność liniową. [7,19]. Przykładowe wyniki pomiarowe testu umieszczone zostały w Tabeli 3.

Tabela 3: Przykładowe wyniki dla testów wykonanych przy użyciu metody ELSGT.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Procent TMD %	Ciśnienie inicjacji w 50% przypadków GPa	Grubość przegrody mm	Źródło
PBXN-109	1,64	98,0	1,20 do 1,47	102,87 do 115,82	[7]
Kompozycja B	1,69	99,3	1,00	124,21	[7]
PBXW-126	1,79	-	5,81	41,66	[7]

2.1.4 Super Large Scale Gap Test (SLSGT)

Umożliwia pomiar próbek MW, których średnica krytyczna sięga do 177,8 mm. Udało się to osiągnąć poprzez zastosowanie konstrukcji zestawu pomiarowego w stalowej rurze o średnicy zewnętrznej 203,2 mm i grubości ściany 8,89 mm. Schemat aparatury przedstawiony został na Rysunku 5.



Rysunek 5: Schemat aparatury SLSGT. Opracowany na podstawie [20].

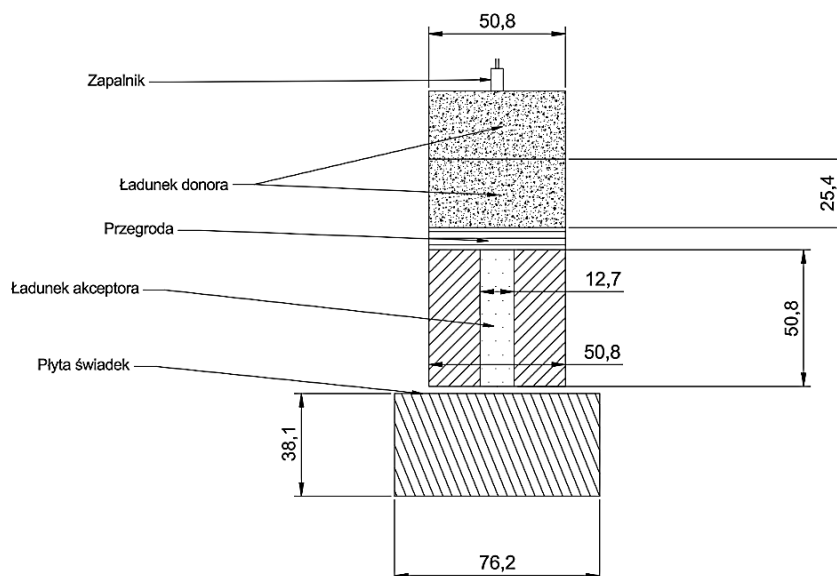
Zmieniony został także ładunek donora, wykorzystując w tej roli Kompozycję B. Właściwy ładunek dawcy, o masie 11,07 kg, inicjowany jest przez pobudzacze o masie 173 g. Do inicjacji pobudzacza stosowany jest zapalnik RP-2 lub jego równoważnik. Grubość przegrody może być regulowana w zakresie od 0,254 mm do 413,766 mm [20]. Przykładowe wyniki z testu SLSGT przedstawione zostały w Tabeli 4.

Tabela 4. Przykładowe wyniki dla testów wykonanych przy użyciu metody SLSGT.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Procent TMD %	Ciśnienie inicjacji w 50% przypadków GPa	Grubość przegrody mm	Źródło
PBXN-109	1,64	98,0	1,31	238,76	[7]
TNT	1,58	95,7	0,75	304,80	[7]
PBXW-126	1,78	-	5,81	104,14	[7]

2.1.5 Insensitive High Explosive (IHE) Gap Test

Stworzony został w celu uzyskania danych pomiarowych o materiałach nadzwyczaj niewrażliwych na falę uderzeniową. Pozwala na pomiary kompozycji MW o średnicy krytycznej do 19 mm. Schemat aparatury znajduje się na poniższym Rysunku 6.



Rysunek 6. Schemat aparatury IHE Gap Test. Opracowany na podstawie [7].

Jako ładunek donora używa się pentolitu, o gęstości 1,56 g/cm³ i w postaci dwóch sprasowanych cylindrów o łącznej masie 160,6 g. W trakcie testu próbka jest poddawana ciśnieniom do 8 GPa w pulsie trwającym kilka mikrosekund. Przykładowe grubości przegrody wynoszą: 0,25 mm, 1,27 mm, 2,54 mm, 6,35 mm, 12,7 mm, 19,05 mm, 25,4 mm, 38,1 mm.

Wykazano liniową korelację wyników z IHE Gap Test względem danych z LSGT poprzez porównanie grubości przegrody. Oba testy umożliwiają uzyskanie takich samych wartości ciśnienia fali uderzeniowej, jednak LSGT zużywa blisko dwudziestokrotnie więcej materiału badanego [7,21]. Przykładowe zestawienie wyników z testu przedstawiono w Tabeli 5.

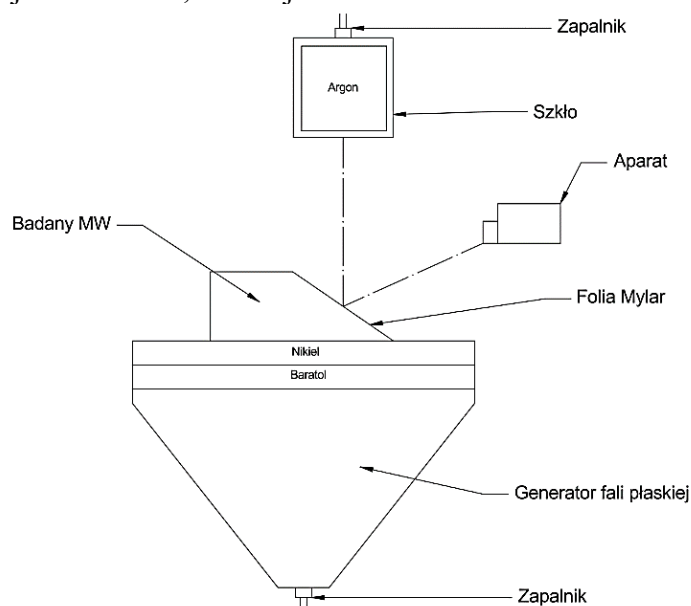
Tabela 5. Przykładowe wyniki dla testów wykonanych przy użyciu metody IHE Gap Test.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Procent TMD %	Ciśnienie inicjacji w 50% przypadków GPa	Grubość przegrody mm	Źródło
HMX	1,81	95,1	1,64	56,64	[7]
TATB	1,84	94,9	6,31	21,59	[7]
TNT	1,55	93,8	2,01	51,56	[7]

2.2. Test klinowy

Test klinowy został przedstawiony w 1961 r. przez Campbella i innych [22]. Zaproponowany przez nich mechanizmu testu stał się podstawą do dalszego rozwoju tej techniki. Celem testu klinowego jest określenie punktu, w którym fala detonacyjna wyprzedza falę uderzeniową w badanym MW. Punkt ten można scharakteryzować poprzez odległość i czas do detonacji.

Test klinowy polega na wprowadzeniu płaskiej fali uderzeniowej za pomocą generatora fali płaskiej do badanego materiału wybuchowego, uformowanego w postaci klinu o charakterystycznym, skośnym kształcie. Najczęściej kliny są przygotowywane poprzez odlewanie badanego materiału wybuchowego do formy wykonanej z PMMA. Przed przystąpieniem do badań kliny powinny zostać prześwietlone, aby sprawdzić ich jednorodność. Wygenerowana fala uderzeniowa przechodzi początkowo przez pobudzac, co powoduje jego inicjację, a następnie przez warstwę tłumiącą, po czym trafia do klinu z badanego MW (Rysunek 7). Jako pobudzacze stosuje się materiały takie jak: Kompozycja B, Baratol lub emulsyjne materiały wybuchowe. Z kolei układ tłumiący wykonuje się z różnych kombinacji materiałów, takich jak PMMA i stal nierdzewna.

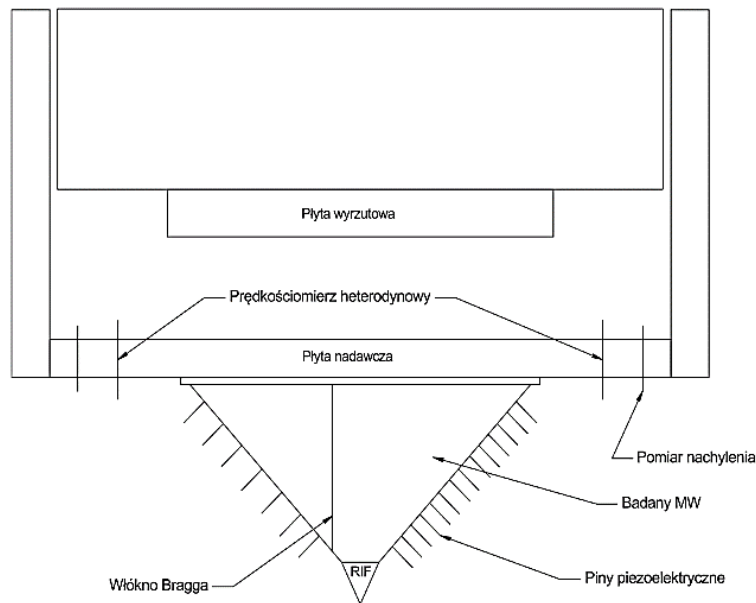


Rysunek 7. Schemat aparatury do testu klinowego. Opracowany na podstawie [22].

Skośna powierzchnia klinu pokryta jest cienką folią Mylar (folia wykonana z poli(tereftalanu etylenu) i pokryta aluminium), która odbija padające na nią światło do

kamery rejestrującej. Ruch wywołany przez dotarcie fali uderzeniowej do MW powoduje przemieszczenie się folii, a tym samym zanik odbijanego przez nią światła. Rejestracja badania za pomocą kamery smugowej pozwala na rejestrowanie kąta odbicia światła z powierzchni klina w momencie, gdy fala detonacyjna osiąga jej powierzchnię. Natomiast zastosowanie kamery kadrującej umożliwia otrzymanie obrazów zachodzących procesów w sekwencji czasowej. Na podstawie uzyskanych danych określa się punkt detekcji detonacji oraz odległość i czas potrzebny do detonacji badanego MW [22].

Jedne z pierwszych modyfikacji testu klinowego polegały na zastąpieniu tłumika wykonanego z metalu, płytką z PMMA i dodatkową warstwą stali nierdzewnej tzw. short-shock test [23] lub wprowadzeniu dodatkowej warstwy tłumiącej z obojętnego materiału np. z PMMA pokrytej aluminium [24]. Kolejne modyfikacje wprowadzały stosowanie klinu MW o innym kształcie, przykładowo w postaci graniastosłupa [25]. Zastosowanie takiego układu pozwalało na rozprzestrzenianie się fali uderzeniowej w materiale o niezmienniej grubości. Współczesne konstrukcje aparatów badawczych opartych na testach klinowych cechują się rosnącym zaawansowaniem technologicznym, obejmującym modyfikacje geometryczne klinów, zastosowanie zróżnicowanych generatorów fal oraz złożone układy rejestracji parametrów pomiarowych [26]. Schemat zmodyfikowanej aparatury do testu klinowego przedstawiono na poniższym Rysunku 8.



Rysunek 8. Schemat zmodyfikowanej aparatury do testu klinowego. Opracowany na podstawie [26].

Wyniki testów klinowych przedstawiane są najczęściej w postaci wykresów, które ukazują zależność między ciśnieniem wejściowym, a odległością do detonacji, dzięki czemu możliwe jest porównanie wrażliwości badanych materiałów. Materiał wybuchowy, który wymaga niższej wartości ciśnienia fali uderzeniowej, by osiągnąć detonację na tej samej odległości, jest bardziej wrażliwy [27]. Dane z pomiarów pozwalają na wyznaczenie grubości krytycznej MW, czyli minimalnej grubości warstwy MW, przy której możliwe jest podtrzymanie detonacji [28], i krzywej Hugoniota, która charakteryzuje miejsca stanów końcowych osiągniętych przez fale uderzeniową z danego stanu początkowego [24]. W poniższych tabelach 6 i 7 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane w teście klinowym.

Tabela 6. Przykładowe wyniki testów klinowych.

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Ciśnienie początkowe GPa	Odległość do detonacji mm	Źródło
2,4-DNI	1,692	9,6	3,63	[27]
LAX112	1,794	9,9	5,06	[27]
TNAZ	1,828	7,8	1,21	[27]
PBX-9404	1,845	3,3	6,6/7,6*	[24]
PBX-9502 (z dodatkami kleju Aralhex)	1,894	9,3	17,4/21,9*	[24]
TNT (sprasowany)	1,636	8,5	5,0/3,2*	[24]

*wyniki różnią się ze względu na zastosowaną metodę obliczeniową

Tabela 7. Przykładowe wyniki testów klinowych w postaci równania krzywej [29].

Badany materiał	Gęstość g/cm ³	Zakres ciśnienia GPa	Odległość do detonacji (x) mm
Baratol	2,610	6,9 < P < 11,8	$\log P = (1,2 \pm 0,03) - (0,30 \pm 0,03) \log x$
HMX1	1,891	4,41 < P < 9,55	$\log P = (1,18 \pm 0,02) - (0,59 \pm 0,03) \log x$
Nitroguanidyna	1,659	13,35 < P < 26,28	$\log P = (1,44 \pm 0,07) - (0,15 \pm 0,08) \log x$

3. Metody obliczeniowe stosowane do oznaczania wrażliwości MW na falę uderzeniową

Metody obliczeniowe wykorzystywane do oznaczania wrażliwości MW na falę uderzeniową obejmują zarówno symulacje komputerowe, jak i modelowanie numeryczne na podstawie danych uzyskanych z badań eksperymentalnych [30].

W teście SSGT wyznacza się ciśnienie potrzebne do zainicjowania detonacji badanego MW. Wyniki z tych badań stanowią podstawę do przewidywania wrażliwości materiałów na falę uderzeniową. Keshavarz i inni opracowali [31] równania empiryczne, które wykorzystują trzy parametry strukturalne materiałów wysokoenergetycznych, takie jak różnica między ilością grup aminowych oraz nitrowych przyłączonych do pierścienia

aromatycznego występujących w związkach aminoaromatycznych, rozkład tlenu pomiędzy węglem oraz wodorem, co prowadzi do tworzenia tlenku węgla i wody, czy obecność grup nitroaminowych lub wiązań α -C-H w związkach nitroaromatycznych. Równanie 1 opisuje zależność, dzięki której można wyliczyć ciśnienie wymagane do inicjacji materiału wybuchowego. Warto zaznaczyć jednak, że można je stosować do materiałów wysokoenergetycznych o wzorze ogólnym $C_aH_bN_cO_d$.

$$P_{x\%TMD} = x_1 + x_2 \left(a + \frac{b}{2} - d \right) + x_3 \frac{E_{\alpha CH}^0}{NN_{O_2}} + x_4 (An_{NH_2} - n_{NO_2})_{czysty} \quad (1)$$

gdzie: $P_{x\%TMD}$ - oznacza ciśnienie wyrażane w kbar potrzebne do inicjacji sprasowanego materiału do x% TMD, parametr $(a+b/2-d)$ wyraża rozkład tlenu pomiędzy węglem i wodorem, wyrażenie $E_{\alpha CH/NO_2}^0$ wskazuje na istnienie wiązań α -C-H w związkach nitroaromatycznych lub grup funkcyjnej N-NO₂, $(An_{NH_2} - n_{NO_2})_{czysty}$ to różnica liczby grup aminowych i nitrowych w związkach aminoaromatycznych, natomiast parametr $x_1 - x_4$ jest dostosowywany na podstawie danych eksperymentalnych z próby szczelinowej [31].

Inna metoda opiera się na korelacji między energią dysocjacji najsłabszego wiązania związków nitrowych, a ich entalpią rozkładu na wiązania kowalencyjne. Model ten zakłada, że wrażliwość na falę uderzeniową jest głównie określana przez zdolność MW do zainicjowania i propagacji reakcji autokatalitycznej w wyniku jego rozkładu. Wrażliwość na falę uderzeniową określa się za pomocą równanie 2:

$$k_p = A e^{\left(\frac{-E^\ddagger}{k_B T} \right)} \quad (2)$$

gdzie E^\ddagger jest energią aktywacji rozkładu, k_B jest stałą Boltzmanna, T jest lokalną temperaturą indukowaną w pobliżu reagujących cząsteczek, natomiast A jest współczynnikiem przedwykładniczym. To równanie podkreśla stosunek $E^\ddagger/k_B T$ jako kluczowy wyznacznik wrażliwości na falę uderzeniową [32].

Do wyznaczania wrażliwości materiałów wybuchowych na falę uderzeniową wykorzystuje się również różnego rodzaju symulacje komputerowe, przykładem czego może być kod CFD, RossSDT, który wykorzystywany jest do modelowania rozprzestrzeniającej się fali uderzeniowej o różnej wartości przez układ. Składa się on z kodu RocSDT, który jest dwuwymiarowy solverem wykorzystywany do generowania danej morfologii badanego związku oraz kodu Eulera, który wykorzystywany jest do modelowania fali uderzeniowej [33].

W praktyce wykorzystuje się wiele oprogramowań w celu walidacji wyników wrażliwości na falę uderzeniową uzyskanych eksperymentalnie. Przykładem takich systemów są między innymi hydrodynamiczny kod wykorzystujący metodę elementów skończonych LS-DYNA [34], kod AUTODYN [35], czy LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [36].

Model inicjacji i propagacji I&G (z ang. Ignition and Growth) w oprogramowaniu LS-DYNA wykorzystuje się do symulacji testu szczelinowego LSGT, gdzie średnica krytyczna odpowiada ciśnieniu 4,5 GPa w środku górnej części badanej próbki (PBXN-109). Ładunek donorowy Pentolit 50/50 miał średnicę 50,8 mm i gęstość około 1,65 g/cm³. Oszacowane ciśnienia na granicy przegroda/akceptor na podstawie symulacji LS-DYNA, funkcji wykładniczych ciśnienia (równanie 3 i 4) dla PMMA i Pentolitu 50/50 jako donoru dopasowanych do badań eksperymentalnych, a także wyników pochodzących z MSIAC (Munitions Safety Information Analysis Centre) przedstawiono w tabeli 8 [34].

$$P = 0,182e^{-0,406gt} \quad (3)$$

$$P = 0,175e^{-0,394gt} \quad (4)$$

Tabela 8: Wyniki ciśnienia na granicy przegroda/akceptor dla układu z PMMA i pentolitu [34].

Grubość szczeliny [mm]	Ciśnienie na podstawie LS-DYNA [GPa]	Ciśnienie na podstawie równania 3 [GPa]	Ciśnienie na podstawie równania 4 [GPa]	Ciśnienie na podstawie MSIAC
36	4,363	4,2	4,237	4,33
38	3,993	3,89	3,916	3,89

4. Podsumowanie

Niniejszy przegląd przedstawia ogólnie omówione metody stosowane do oznaczania wrażliwości MW na falę uderzeniową. W pracy przedstawiono zarówno eksperymentalne, jak i numeryczne metody badawcze, takich jak: próba szczelinowa, test klinowy oraz metody numeryczne czy symulacje komputerowe.

Próba szczelinowa jest powszechnie wykorzystywana do pomiaru wrażliwości na falę uderzeniową. Obejmuje ona wiele wariantów, takich jak LSGT, SSGT, ELSGT, SLSGT lub IHE, gdzie każda próba wykorzystuje inne średnice krytyczne MW i średnice przegrody, a także mogą być przeprowadzane na materiałach wysokoenergetycznych o zróżnicowanej wrażliwości na falę uderzeniową. Zaletą techniki SSGT w porównaniu do LSGT, ELSGT i SLSGT jest potrzeba mniejszej ilości badanego materiału. Dodatkowo w teście SSGT możliwe jest uzyskanie stabilnej propagacji fali detonacyjnej, a w porównaniu z testem klinowym SSGT jest tańsza.

Testy klinowe umożliwiają uzyskanie wielu istotnych wyników związanych z przebiegiem detonacji MW wywołanej falą uderzeniową oraz pozwalają na fotograficzne zobrazowanie tego zjawiska, co ma znaczenie dla całościowej oceny badanego MW.

Jednakże w zestawieniu z wyżej wymienionymi technikami wadą testu klinowego jest skomplikowana, wieloelementowa budowa aparatury stosowanej do badań oraz wymóg formowania MW w określony kształt klinu, co może wiązać się ze zużyciem większej ilości materiału i być problematyczne w przypadku niektórych z nich. Ponadto metoda jest ograniczona pod względem dostarczanych danych, ponieważ zbierane są informacje związane wyłącznie z czołem fali uderzeniowej.

Literatura

1. Juan Pablo Casas-Rodriguez, Juan Camilo Calle, Vicent Robinson, and Alejandro Maranon. Cellular sandwich composites under blast loads. In *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*, pages 391–422. Elsevier, 2016.
2. Peter OK Krehl. *History of shock waves, explosions and impact: a chronological and biographical reference*. Springer Science & Business Media, 2008.
3. JW Forbes, CM Tarver, Garcia Urtiew, et al. The effects of confinement and temperature on the shock sensitivity of solid explosives. Technical report, Citeseer, 1998.

4. William G Proud. Ignition and detonation in energetic materials: An introduction. In *Energetics Science and Technology: An integrated approach*, pages 7–1. IOP Publishing Bristol, UK, 2022.
5. NATO. Stanag 4488 jais (edition 2) – explosive, shock sensitivity tests, nsa/0448(2009)- jais/4488 27 april 2009, 2009.
6. Decree 591 of the state council of china: Regulations on the safe management of hazardous chemicals in china, 1 December 2011.
7. Department of Defense. Safety and performance tests for the qualification of explosives (high explosives, propellants, and pyrotechnics), 2001.
8. Bohoon Kim, Jungsu Park, and Jack J Yoh. Analysis on shock attenuation in gap test configuration for characterizing energetic materials. *Journal of Applied Physics*, 119(14), 2016.
9. SJ Burley, NK Bourne, V Fung, R Hollands, JCF Millett, AM Milne, and A Wood. Advances in the understanding of the large-scale gap test. In *AIP Conference Proceedings*, volume 845, pages 944–947. American Institute of Physics, 2006.
10. DONNA PRICE and IRVING JAFFE. Large scale gap test: interpretation of results for propellants. *ARS Journal*, 31(5):595–599, 1961.
11. Donna Price, AR Clairmont Jr, and JO Erkman. The nol large scale gap test. iii. compilation of unclassified data and supplementary information for interpretation of results. *AD-780429*, 1974.
12. Ernest L Baker, V Pouliquen, M Voisin, and M Andrews. Gap test calculations and correlations. *Insensitive Munitions Energetic Materials Technology Symposium Portland, OR*, 2018.
13. Neil K Bourne, Gary A Cooper, Stephen J Burley, Virgil Fung, and Ron Hollands. Re-calibration of the uk large scale gap test. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials*, 30(3):196–198, 2005.
14. JOHN TOSCANO, IRVING JAFFE, and GEORGE ROBERSON. Large-scale gap test-comparison of tetryl and pentolite donors. *AIAA Journal*, 1(4):964– 965, 1963.
15. Allen L Bowman, S Sommer, and Jerry H Fu. Calibration curves for four standard gap tests. Technical report, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 1990.
16. Donna Price and TP Liddiard Jr. The small scale gap test: calibration and comparison with the large scale gap test. *Naval Ordnance Laboratory, NOLTR*, pages 99–87, 1966.
17. Malcolm D Cook, Andrew Wood, and Christopher Stennett. Development of a new modified small-scale gap test. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2844. AIP Publishing, 2023.
18. Bisheng Tan, Xinpeng Long, Rufang Peng, Hongbo Li, Bo Jin, and Shijin Chu. On the shock sensitivity of explosive compounds with small-scale gap test. *The Journal of Physical Chemistry A*, 115(38):10610–10616, 2011.
19. TP Liddiard and D Price. *The expanded large scale gap test*. Naval Surface Weapons Center, 1987.
20. JG Glenn, Stephen A Aubert, and Michael E Gunger. Development and calibration of a super large scale gap test (slsgt). Technical report, WL-TR-96, 1996.
21. Donna Price. Gap tests and how they grow. *NSWC, AD-P005*, 315, 1986.
22. AW Campbell, WC Davis, JB Ramsay, and JR Travis. Shock initiation of solid explosives. *The physics of fluids*, 4(4):511–521, 1961.

23. James R Asay, Robert Albert Graham, and GK Struab. *Shock waves in condensed matter-1983*. Elsevier, 2012.
24. Jerry J Dick, CA Forest, JB Ramsay, and WL Seitz. The hugoniot and shock sensitivity of a plastic-bonded tatb explosive pbx 9502. *Journal of applied physics*, 63(10):4881–4888, 1988.
25. John B Ramsay. Effect of confinement on failure in 95 tatb/5 kel-f. Technical report, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States), 1985.
27. Thomas Elia, Vincent Chuzeville, Gérard Baudin, Marc Genetier, Alexandre Lefrançois, Antoine Osmont, and Rémi Boulanger. Review of the wedge test and single curve initiation principle applied to aluminized high explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 45(10):1541–1553, 2020.
28. LG Hill, WL Seitz, JF Kramer, DM Murk, and RS Medina. Wedge test data for three new explosives: Lax112, 2, 4-dni, and tnaz. In *AIP Conference Proceedings*, volume 370, pages 803–806. American Institute of Physics, 1996.
29. Oren E Petel, David Mack, Andrew J Higgins, Richard Turcotte, and Sek K Chan. Comparison of the detonation failure mechanism in homogeneous and heterogeneous explosives. In *Proc. 13th Symp. Int. on Detonation*, pages 2–11, 2006.
30. Terry R Gibbs and Alphonse Popolato. *LASL explosive property data*, volume 4. Univ of California Press, 2023.
31. Lucia Figuli, Damjan Cekerevac, Chiara Bedon, and Bohuš Leitner. Numerical analysis of the blast wave propagation due to various explosive charges. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1):8871412, 2020.
32. Mohammad Hossein Keshavarz, Hadi Motamedoshariati, Hamid Reza Pouredal, Masoud Kavosh Tehrani, and Abolfazl Semnani. Prediction of shock sensitivity of explosives based on small-scale gap test. *Journal of hazardous materials*, 145(1-2):109–112, 2007.
33. D Mathieu. Theoretical shock sensitivity index for explosives. *The Journal of Physical Chemistry A*, 116(7):1794–1800, 2012.
34. Ju Zhang, Thomas L Jackson, John D Buckmaster, and Jonathan B Freund. Numerical modeling of shock-to-detonation transition in energetic materials. *Combustion and Flame*, 159(4):1769–1778, 2012.
35. Jing Ping Lu, Ian J Lochert, Merran A Daniel, and Mark D Franson. Shock sensitivity studies for pbxn-109. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 41(3):562–571, 2016.
36. Young-Hun Ko, Seung-Jun Kim, and Hyung-Sik Yang. Assessment for the sympathetic detonation characteristics of underwater shaped charge. *Geosystem Engineering*, 20(5):286–293, 2017.
37. Xiaona Huang, Feng Guo, Kuiguang Yao, Zhipeng Lu, Yu Ma, Yushi Wen, Xiaogan Dai, Ming Li, and Xinping Long. Anisotropic hydrogen bond structures and orientation dependence of shock sensitivity in crystalline 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene (tatb). *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(21):11956–11966, 2020.