

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА
Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студента _____ Лісовський Валерій Валерійович _____
(ПІБ)
академічної групи _____ 184М-17-1 _____
(шифр)
спеціальності _____ 184 Гірництво _____
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____ Будівельні геотехнології та геомеханіка _____
за освітньо-професійною програмою _____ Будівельні геотехнології та геомеханіка _____
(офіційна назва)
на тему Вивчення впливу лазерного моноімпульсу на процес ініціювання первинних вибухових речовин _____
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Соболев В.В			
розділів:	Соболев В.В			
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУЗЬКИХ ПУЧКІВ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ	Соболев В.В			
ПРЕЦИЗИЙНІСТЬ ПІДРИВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ	Соболев В.В			
МЕХАНІЗМИ ЛАЗЕРНОГО ІНІЦІЮВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН	Соболев В.В			
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СВІТЛО-ЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН	Соболев В.В			
Рецензент	Хоменко О.Є.			
Нормоконтролер	Максимова Е.О.			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
будівництва, геотехніки і геомеханіки

_____ Гапеев С.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 2018 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню магістра

студенту Лісовський В.В. академічної групи 184М-17-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 184 Гірництво

спеціалізації Будівельні геотехнології та геомеханіка

за освітньо-професійною програмою Будівельні геотехнології та геомеханіка
(офіційна назва)

на тему Вивчення впливу лазерного моноімпульсу на процес ініціювання первинних вибухових речовин

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 04.12.2018 р. №2062-л

Розділ	Зміст	Термін виконання
1	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУЗЬКИХ ПУЧКІВ НА ПРОЦЕС ІНІЦЮВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ	05.09.2018 03.10.2018
2	ПРЕЦИЗИЙНІСТЬ ПІДРИВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ	03.10.2018 29.10.2018
3	МЕХАНІЗМИ ЛАЗЕРНОГО ІНІЦЮВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН	29.10.2018 30.11.2018
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СВІТЛО-ЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН	30.11.2018 14.12.2018

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Соболев В.В.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 05.09.2018

Дата подання до екзаменаційної комісії 21.12.2018

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Лісовський В.В.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 59 сторінок, 13 рис, 7 табл., 2 додатки, 50 джерел літератури.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси та параметри ініціювання вибухових речовин лазерним випромінюванням.

Предмет дослідження – енергетичні характеристики лазерного випромінювання що збуджують детонацію вибухових речовин.

Мета роботи - встановлення закономірностей впливу лазерного випромінювання на фізико хімічні перетворення світло чутливих вибухових речовин.

Використовувалися аналітичні методи оцінки параметрів запалювання штатних вибухових речовин (ВР) і світлочутливих вибухових композитів (СВР). Застосовувалися фізико-хімічні методи контролю параметрів. В роботі використані фізичні основи поглинання і розсіювання світла.

Показано, що в основі процесу запалювання СВР лежить осередковий механізм, суть якого зводиться до розігрівання оптичних мікронеоднорідностей в полі лазерного випромінювання.

Чутливість СВР залежить від радіусу лазерного пучка: чим менше радіус, тим більше густина енергії запалювання. Цей результат співпадає з даними відомих робіт, присвячених дослідженню розмірного ефекту – залежність порогу ініціювання від розміру опромінюваної зони. При збільшенні вмісту зв'язки густина енергії запалювання зменшується, досягаючи мінімального значення, а потім зростає при подальшому збільшенні концентрації полімеру.

Встановлено, що індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання; закономірність впливу інертних домішок на час запалювання СВР, які є ефективними уловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання; вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

Найважливішими чинниками, що визначають розвиток процесу запалювання СВР лазерним моноімпульсом, є освітленість в об'ємі СВР і хвилі розвантаження, що розповсюджуються з боку вільної поверхні.

Рекомендовано, що при синтезі світлочутливих ВР не слід прагнути використовувати високочисті вихідні матеріали, оскільки при цьому зменшується концентрація мікронеоднорідностей, а, отже, знижується вірогідність ініціювання лазерним імпульсом із заданою енергією.

Ключові слова: лазер, випромінювання, вибухова речовина, запалювання, детонація

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУЗЬКИХ ПУЧКІВ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ.....	8
1.1 Методика вимірювань та розрахунків.....	8
1.2 Результати експериментальних досліджень.....	15
Висновки.....	20
2 ПРЕЦИЗІЙНІСТЬ ПІДРИВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕ- ЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ.....	22
2.1 Вплив домішок інертних матеріалів (на прикладі вуглецевих конденса- них фаз) на підривні характеристики світлочутливих вибухових речовин	25
Висновки.....	32
3 МЕХАНІЗМИ ЛАЗЕРНОГО ІНІЦІЮВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУ- ХОВИХ РЕЧОВИН	28
3.1 Оптичні мікронеоднорідності як центри поглинання енергії лазерного ім- пульсу.....	28
Висновки.....	33
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СВІТЛОЧУТЛИ- ВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧО- ВИН.....	34
4.1 Вплив концентрації зв'язуючого матеріалу на чутливість до лазерного моноімпульсу.....	34
4.2 Вплив поверхневої густини світлочутливої вибухової речовини на чутли- вість до лазерного моноімпульсу.....	41
4.3 Залежність чутливості до лазерного випромінювання від дисперсності речовини.....	42

4.4. Фізична модель поведінки фотона у дифузійно-розсіючому середовищі з великою густиною розсіювачів та невеликими поглинаючими властивостями.....	44
Висновки.....	47
ВИСНОВОК.....	49
Перелік літератури.....	51
Додаток 1. Відгук наукового керівника.....	58
Додаток 2. Рецензія.....	59

ВСТУП

Актуальність теми. Лазерне ініціювання забезпечує високий рівень надійності та безпеки виконання підривних робіт у космічній та, машинобудівельній галузях, у наукових дослідженнях [1-8]. Але особливо велика увага приділяється удосконаленню технології підривних робіт при видобуванні рудних і нерудних корисних копалин. Особистість цих робіт полягає у використанні великих мас вибухових речовин, підвищенні безпеки робіт, економічної ефективності, у використанні сучасних відносно безпечних та надійних систем ініціювання зарядів вибухових речовин, зниженні собівартості видобутку сировини і кінцевого продукту [9-11].

Розробка засобів ініціювання нового покоління, що сприяють управлінню процесом підривання енергією лазерного випромінювання в наноосекундному інтервалі, дасть можливість вести підривні роботи на якісно новому рівні, що дозволяє прецизійно, послідовно і програмно керувати передачею лазерної енергії не тільки безпосередньо світловодами, але й на відстані через повітряну атмосферу. Детонатори лазерної системи неможливо задіяти несанкціоновано так як збудження детонації можливе тільки від лазерного імпульсу.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи - встановлення закономірностей впливу лазерного випромінювання на фізико хімічні перетворення світло чутливих вибухових речовин.

Завдання досліджень:

1. Вимірювання часу затримки запалювання СВР відносно початку дії лазерного випромінювання
2. Вимірювання залежності порогової густини енергії ініціювання СВР від діаметру лазерного пучка
3. Вивчення впливу поверхневої густини маси СВР на чутливість до лазерного імпульсу

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси та параметри ініціювання вибухових речовин лазерним випромінюванням.

Предмет дослідження – енергетичні характеристики лазерного випромінювання що збуджують детонацію вибухових речовин.

Методи дослідження. В роботі були проведені лабораторно експериментальні методи дослідження хімічних реакцій вибухових речовин. За допомогою аналізатора лазерного пучка, двухканального цифрового осцилографу, фотодіодів та квантового генератору були виміряні параметри запалювання ВР і СВР, фізичні основи поглинання і розсіювання світла.

Наукові результати.

Чутливість СВР залежить від радіусу лазерного пучка: чим менше радіус, тим більше густина енергії запалювання. Цей результат співпадає з даними відомих робіт, присвячених дослідженню розмірного ефекту – залежність порогу ініціювання від розміру опромінюваної зони. При збільшенні вмісту зв'язки густина енергії запалювання зменшується, досягаючи мінімального значення, а потім зростає при подальшому збільшенні концентрації полімеру.

Встановлено, що індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання; закономірність впливу інертних домішок на час запалювання СВР, які є ефективними уловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання; вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Експериментально встановлено що затримка ініціювання залежить від природи вибухової речовини, тривалості дії, густини та потужності лазерного випромінювання.
- Збільшення концентрації поглинаючих мікронеоднорідностей підвищує вірогідність ініціювання ВР.

– Експериментально встановлена залежність густини енергії ініціювання від поверхневої густини маси світлочутливих ВР показує, що із збільшенням густини маси зменшується густина енергії ініціювання, а з певних значень стає мінімальною і далі не змінюється.

Рекомендації: при синтезі світлочутливих ВР не слід прагнути використовувати високочисті вихідні матеріали, оскільки при цьому зменшується концентрація мікронеоднорідностей, а, отже, знижується вірогідність ініціювання лазерним імпульсом із заданою енергією.

Практичне значення. одержаних результатів полягає в розробці технології створення нового класу первинних ВР з надзвичайно високою чутливістю до лазерного випромінювання, але при механічних та теплових впливах з рівнем чутливості, який не перевищує чутливість ТЕНа.

Найбільше очікуваним ефектом у разі застосування світлочутливих ВР та лазерних систем є підривні роботи у гірничо-металургійній галузі, машинобудуванні, інструментальному виробництві [12-27], у фізичних експериментах [28-31] і таке інше.

РОЗДІЛ 1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУЗЬКИХ ПУЧКІВ НА ПРОЦЕС ІНІЦІУВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ

1.1. Методика вимірювань та розрахунків

Експериментальний пристрій (рис. 1.1, схема на рис. 1.2) створений на базі твердотілого оптичного квантового генератору CFR 200–10 Pulsed Nd:YAG Laser System фірми Big Sky Laser (США). Довжина хвилі випромінювання 1,064 мкм, вертикальна поляризація, максимальна енергія в імпульсі 200 мДж. Лазер працює в імпульсно-періодичному режимі з регулюванням у діапазоні $1,7 \cdot 10^{-2}$ –10 Гц частотою. Частота спалаху лампи накачки постійна і дорівнює 10 Гц. Поява першого модульованого імпульсу здійснюється після генерації 20 імпульсів, вихід на стабільний режим роботи лазера відбувається після десяти модульованих імпульсів. Діаметр вихідного пучка 6 мм, розбіжність при енергії в імпульсі, що складає 85,5% від максимальної величини, дорівнює 2,8 мрад.

На рис. 1.1 і 1.2 під цифрою 1 – лазер (Nd:YAG). Лазерний діод 2 и діафрагма 15 використовувалися для юстування оптичного тракту. За допомогою призми 4 лазерний промінь направлявся на вибухову речовину 11, що була нанесена як покриття діаметром 5 мм на скляну пластину 10. Досліджуємий зразок із СВР і скляної пластини 10, закріплювався до пластини з алюмінію 9 завтовшки 8 мм, що мала отвір діаметром 8 мм для проходження лазерного випромінювання. Лінза 7 використовувалася для регулювання необхідної величини діаметра лазерного пучка. Фотодіод 12 реєстрував запалювання СВР. Світлофільтри 5 використовувалися для вимірювань енергії лазерного випромінювання, що падає на зразок, при фіксованій відстані від СВР до лінзи. Для визначення цієї енергії застосовувався вимірювач

енергії імпульсного лазерного випромінювання ИЭЛ–300, що має вимірювальну головку прохідного типу 6.

Для вимірювання часу затримки запалювання СВР відносно початку дії лазерного імпульсу використовувалися фотодіоди 12 і 13, що працювали у спектральних діапазонах 0,4 – 1,2 мкм і 0,8 – 1,4 мкм відповідно. У процесі експериментів з'ясувалося, що затримку вибуху СВР можна реєструвати одним фотодіодом 12 (результати у розд. 2).

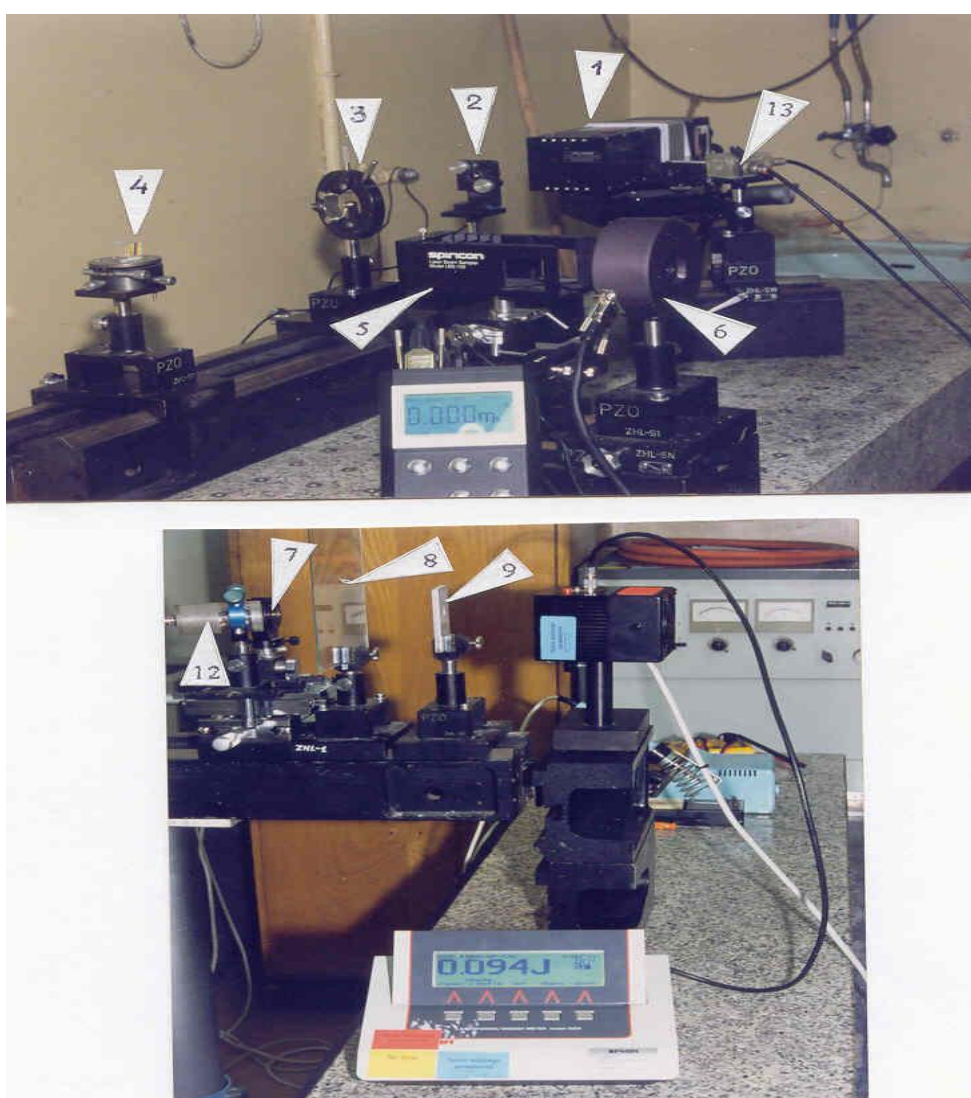


Рис. 1.1. Загальний вигляд стаціонарного експериментального пристрою

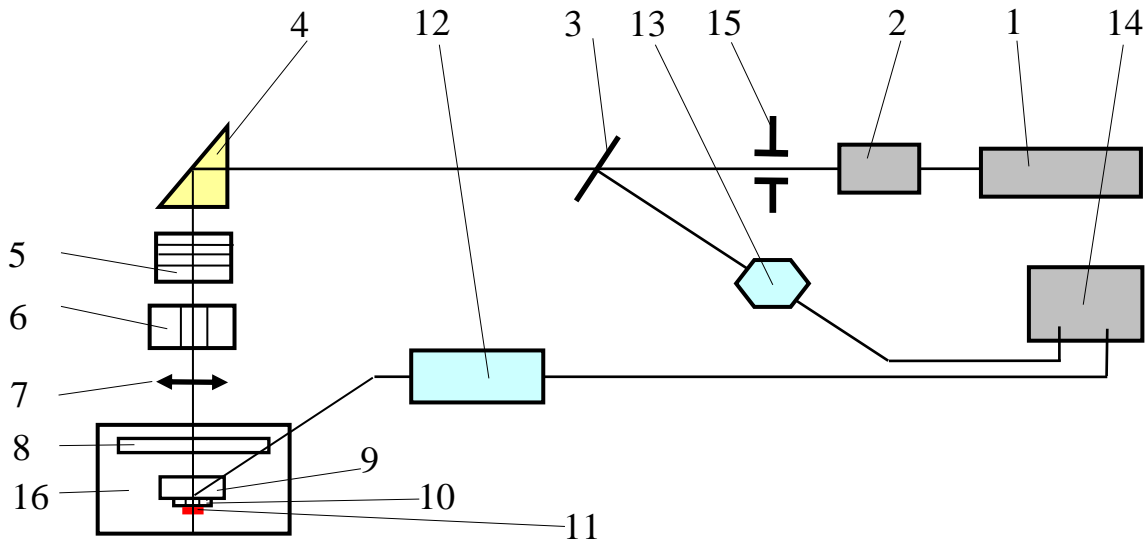


Рис. 1.2. Принципова схема стаціонарного експериментального пристрою оптичного квантового генератору

1 – лазер CFR 200–10 Pulsed Nd:YAG Laser System; 2 – лазерний діод; 3 – дзеркало; 4 – оптична призма; 5 – світлофільтри; 6 – вимірювальна головка вимірювача лазерної енергії ІЭЛ-300; 7 – лінза; 8 – скляна пластина-екран; 9 – алюмінієва пластина; 10 – пластина із скла; 11 – СВР; 12 – фотодіод для реєстрації продуктів вибуху; 13 – фотодіод для реєстрації лазерного імпульсу; 14 – осцилограф; 15 – діфрагма

Використовувався 2-х канальний цифровий осцилограф TDS–350 фірми Tektronix (США). Максимальна частота вхідного сигналу (аналогового) 200 МГц. Максимальна частота – 1 ГГц. Мінімальний час розгортки – 2,5 нс/поділ.

З рисунка 1.4 видно, що тривалість лазерного імпульсу на висоті інтенсивності становить $Dt = 10,997$ нс; форма імпульсу практично не змінювалася від "пострілу до пострілу".

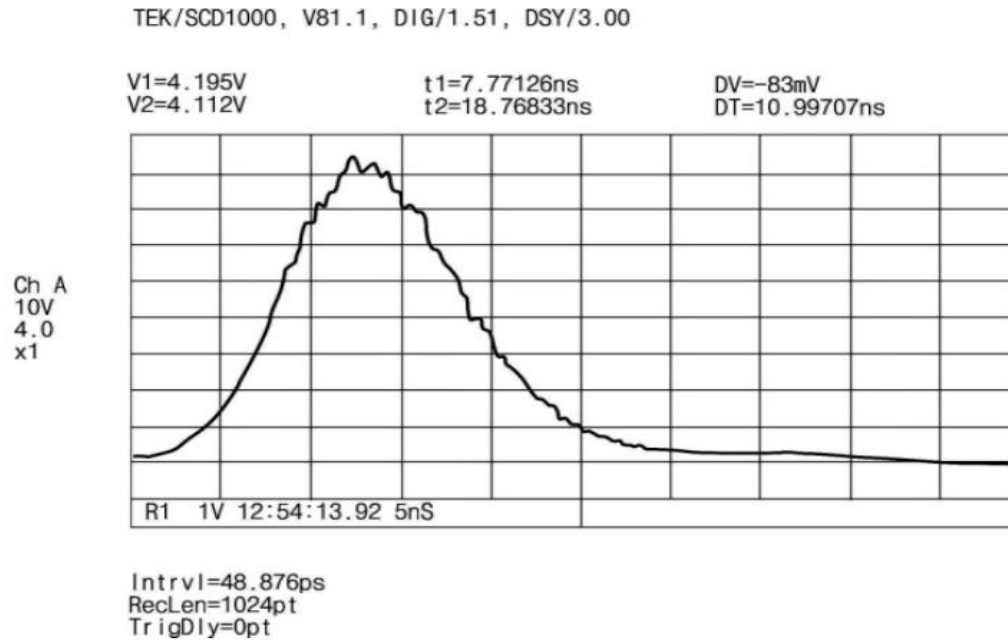


Рис. 1.3. Форма лазерного моноімпульсу

Для визначення функції розподілу густини енергії в лазерному пучку використовувалася методика що основана на експериментальному визначенні діаметрів відбитків, які виникають при лазерному випромінюванні на матеріал.

Розподіл енергії в лазерному пучку визначався за допомогою аналізатора лазерного пучка Silicon Camera Model LBA-100A фірми Spiricon (рис. 1.4). У аналізатор входять камери високого розділення Pulnix TM-745, що безпосередньо реєструють випромінювання, та мікропроцесорні системи, що аналізують розподіл енергії і відображають результати на моніторі.

В зв'язку з тим, що при змінюванні енергії в лазерному імпульсі змінюється й діаметр плями опромінювання (абсолютне значення щільності енергії, що на границі пучка, залишається незмінною) розроблена методика вимірювання діаметра лазерної плями по відбитках, що виникають при лазерній дії на матеріал. При цьому, у матеріалі протікають фазові перетворення, що спостерігаються візуально чи за допомогою мікроскопа.



Рис. 1.4. Загальний вигляд аналізатора Silicon Camera Model LBA–100A

В зв'язку з тим, що при змінюванні енергії в лазерному імпульсі змінюється й діаметр плями опромінювання (абсолютне значення щільності енергії, що на границі пучка, залишається незмінною) розроблена методика вимірювання діаметра лазерної плями по відбитках, що виникають при лазерній дії на матеріал. При цьому, у матеріалі протікають фазові перетворення, що спостерігаються візуально чи за допомогою мікроскопа.

Фазовий перехід має пороговий характер, тобто здійснюється при впливу лазерного випромінювання з енергією, густина якої перевищує певну порогову величину E^* . В цьому випадку на поверхні матеріалу одержують контрастні відбитки, що можуть бути виміряні з достатньо великою точністю. В якості такого матеріалу використовують засвічений і проявлений звичайний фотопапір, рис. 1.5



Діаметр відбитка 0,9 мм



Діаметр відбитків плями 1,4 мм

Рис. 1.5. Відбитки лазерного променя на поверхні активного шару фотопаперу

Основне припущення, що було прийнято в даній методиці таке: функція розподілу інтенсивності випромінювання поперек перерізу пучка не змінюється від імпульсу до імпульсу. Ця вимога виконується при стабільній роботі ОКГ, що генерує імпульси з однаковою енергією. Змінювання щільності енергії випромінювання здійснюється за допомогою калібровочних світлофільтрів.

Розподіл щільності енергії по перерізу пучка наближено будемо шукати у наступному виді

$$E(r) = E_0\omega(r), \quad (1.1)$$

де E_0 – щільність енергії у центрі пучка; r – радіус кільця шириною dr , на якому здійснюють пошук величини $E(r)$.

Представлення функції щільності енергії у виді (1.1) передбачує радіальну симетрію функції розподілу.

Проведемо нормування цієї функції на повну енергію у імпульсі W

$$W = 2\pi E_0 \int_0^{\infty} \omega(r)rdr. \quad (1.2)$$

Поділив (1.1) на (1.2), одержимо

$$E(r)/W = \omega(r)/2\pi k,$$

$$\text{де } k = \int_0^{\infty} \omega(r)rdr.$$

Змінюючи пропускання лазерного тракту слід чекати одержання серії відбитків, радіуси яких можна виміряти за допомогою мікроскопа. Межа відбитків відповідає пороговій енергії змінювання забарвлення E^* . Після цього використовують результати вимірювань для запису рівнянь у такому виді:

$$E^*(r)/W_i = \omega(r_i)/2\pi k, \quad i=1, \dots, n, \quad (1.3)$$

де n – кількість вимірювань; W_i – енергія випромінювання, при якій радіс відбитку дорівнює r_i .

Після того, як була побудована залежність $W(r)$ методом екстраполяції знаходять енергію $W(0)$, при якій радіус відбитка дорівнює нулю. Після визначення цієї величини визначають порогову енергію фазового перетворення матеріалу покриття на фотопапері:

$$E^*/W(0) = \omega(0)/2\pi k = 1/2\pi k. \quad (1.4)$$

Розділяючи послідовно рівняння системи (1.3) на рівняння (1.4), одержимо

$$\omega(r_i) = W(0)/W_i, \quad i=1, \dots, n.$$

Знання функції розподілу $\omega(r)$ вирішує поставлену задачу. Для визначення щільності енергії у центрі пучка E_0 , а також E^* необхідно шляхом графічного інтегрування знайти величину k .

Щільності енергії у центрі пучка E_0 розраховується за формулою

$$E_0 = W/(2\pi k).$$

В якості характеристики чутливості може бути обраною середня щільність енергії лазерного імпульсу $E_{cp} = 4W/\pi d_*^2$ (d_* – діаметр відбитку), або щільності енергії у центрі пучка E_0 .

1.2. Результати експериментальних досліджень.

Відома порівняно невелика кількість досліджень, що присвячені вивченню залежності критичної (порогової) густини енергії ініціювання – E_k від діаметра лазерного пучка d , тобто від розміру опромінюваної області (розмірний ефект). Вперше розмірний ефект був знайдений для азиду свинцю.

Величина E_k практично не залежить від діаметра пучка, якщо $d > d_0$, де d_0 – значення діаметру, при якому змінюється характер залежності. Для первинної ВР азиду свинцю $d_0 \cong 0,1$ мм, для вторинної – ТЕНа дисперсністю 5500 см²/г – близько $0,6$ мм і зменшується при збільшенні дисперсності. Критична густина енергії ініціювання (для широких пучків) при підриві азиду свинцю близька до $0,4$ Дж/см², для ТЕНа – ≈ 53 Дж/см². Вказана залежність критичної густини енергії від діаметра променя практично зберігається при переході від довжини хвилі $1,06$ мкм (неодимовий лазер) до $0,63$ мкм (рубіновий лазер), що узгоджується з результатами вимірювання коефіцієнта відбиття ВР на цих довжинах хвиль, які виявилися приблизно рівними 80% для азиду свинцю і ТЕНа.

В роботі [33] показано, що існування розмірного ефекту не дозволяє провести зіставлення наявних даних для різних конденсованих середовищ у зв'язку з тим, що досліди проведені при різних значеннях діаметра пучка.

Встановлено, що коректне порівняння результатів можна здійснювати, використовуючи узагальнену залежність

$$\frac{E_{кр}}{E_{кр}^0} = 1 + \frac{1}{(d/d_{кр})^3}, \quad (1.5)$$

де $E_{кр}^0$ – мінімальне (асимптотичне) значення критичної густини енергії, відповідної $d \rightarrow \infty$, $d_{кр}$ – критичний діаметр детонації, що характеризує здібності вибухової речовини до високошвидкісного хімічного перетворення.

Найбільш повно розмірний ефект досліджено в наших роботах [34,35] на прикладі азиду свинцю, пропресованого тиском $\approx 2 \cdot 10^9$ Па. Коефіцієнт відбиття зразків ВР дорівнював $R \cong 88\%$. В експериментах використовувався одномодовий одночастотний ОКГ на неодимовому склі, що складається із задаючого генератора, передпідсилювача і двох ідентичних підсилювальних каскадів. Це продиктовано тим, що багатомодові генератори через наявність складної просторової структури світлового пучка не дозволяють вирішити поставлену задачу достатньо коректно. Загальна енергія випромінювання ОКГ складала 0,5 Дж. Тривалість імпульсу на напіввисоті інтенсивності густини енергії випромінювання в дальній зоні добре описувалася розподілом Гауса.

На рис. 1.6 та рис. 1.7 представлені результати вимірювань залежності порогової густини енергії ініціювання E_k азиду свинцю і затримки запалювання τ від діаметра опромінюваної зони. Видно, що при зменшенні діаметра пучка критична енергія ініціювання азиду свинцю зменшується, але з $d \sim 4 \cdot 10^{-3}$ см, спостерігається виположення цієї кривої, тобто $W_k \rightarrow W_{\min}$ при $d \rightarrow 0$. З другого боку, спостерігається насичення на поверхні азиду, не перевищував $8 \cdot 10^{-2}$ рад. Одержана мінімальна критична енергія W_{\min} дорівнює 6 мкДж при $d_0 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ см, що є рекордно низьким параметром. Статистичний розкид величин $E_{кр}$, $W_{кр}$ не залежить від площі опромінювача. Ця обставина і визначає дану особливість ініціювання азиду свинцю.

Підвищення оптичної міцності середовищ при зменшенні розмірів лазерного пучка (зони взаємодії) пов'язано із зменшенням числа поглинаючих мікронеоднорідностей "небезпечної" величини, що супроводжується різким збільшенням статистичного розкиду експериментальних даних. В даному ж випадку середовище є дифузійно-розсіючим, тому ініціювання відбувається на деякій глибині, де встигає сформуватися ореол розсіювання.

Продовженням досліджень [34,35] є результати, що одержані у даній роботі

при використанні первинних світлочутливих вибухових речовин (СВР), табл. 1.1. Для ініціювання використовувалася центральна частина випромінювання, що була сформована діафрагмою з вирізаним у центрі кругом. Зображення проектувалося за допомогою лінзи на поверхню зразка СВР. Площина зображення знаходилася по відбитку на фотоплівці, якість границь і розмір яких оцінювалися за допомогою мікроскопа.

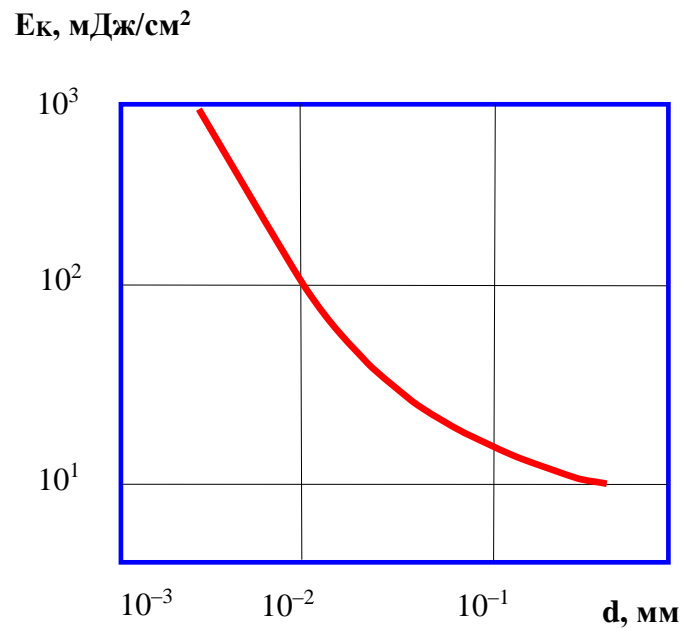


Рис. 1.6. Залежність порогової густини енергії ініціювання E_k від діаметру лазерного пучка

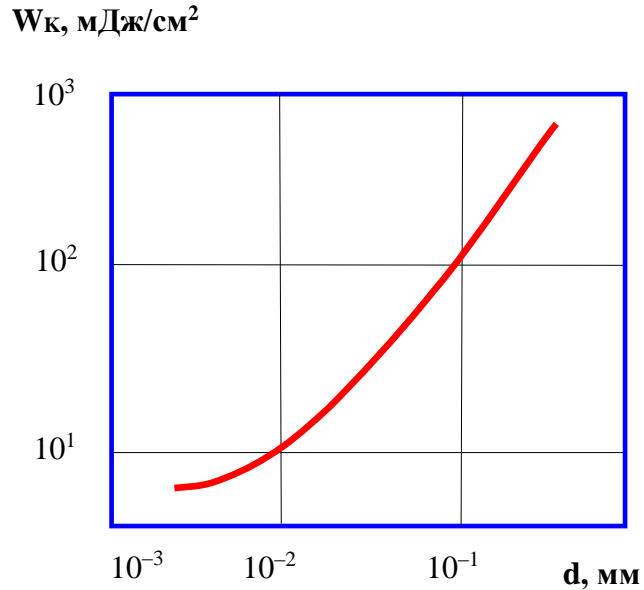


Рис. 1.7. Залежність критичної енергії ініціювання W_k від діаметру лазерного пучка

Світлочутливі заряди ВР виготовлялися у вигляді плівок, що наносилися на поверхню металу. Випробувалися зразки найчутливішої СВР до лазерного випромінювання – ртутної солі 5-гідразинотетразолу в інертній матриці (полімеру) полі-5-винил-2-метилтетразол. Уведення полімеру дозволяє уникнути агрегації субмікронних частинок СВР і не впливає на детонаційні його характеристики.

Таблиця 1.1

Параметри світлочутливих ініціюючих вибухових речовин (СВР)

СВР	Швидкість детонації, м/с	Густина, г/см ³	Мінімальна енергія запалювання, Дж/см ²
ВС-2	6500	3,0	$2,3 \cdot 10^{-3}$
ВС-6	7700	1,95	–
ВС-7	7600	4,6	$5,0 \cdot 10^{-3}$
ВС-16	5100	1,1	$1,2 \cdot 10^{-2}$
ВС-17	6700	1,5	$4 \cdot 10^{-2}$
ВС-24	4500	3,8	$7 \cdot 10^{-1}$

В табл. 1.2 наведені дані, що відображають залежності чутливості СВР від

режиму генерації лазерного випромінювання. В табл. 1.3 показані експериментальні результати впливу розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість СВР при тривалості імпульсу 30 нс.

Таблиця 1.2

Залежність чутливості ртутної солі 5-гідразинотетразолу
в інертній матриці полімеру від тривалості імпульсу

Тривалість імпульсу, нс	Діаметр зони опромінювання (d), мм	Енергія ініціювання (E_k), мДж	Щільність енергії ініціювання (W_k), мДж/см ²
30	0,48	$1,8 \cdot 10^{-2}$	10,14
$30 \cdot 10^3$	1,02	2,52	308,4

Як видно з табл. 1.2 збільшення тривалості лазерного імпульсу приводе до зростання щільності енергії ініціювання.

Досліджена СВР має більш низький поріг ініціювання, ніж заряди азиду свинцю (при однакових умовах проведення експериментів).

Аналіз результатів, що одержані у даній роботі (з урахуванням даних інших авторів при вивченні властивостей стандартних ВР при випромінюванні на довжині хвилі CO₂ лазера, неодимового і рубінового лазерів) свідчить про наступне:

– велика частина випромінювання на довжині хвилі неодимового і рубінового лазерів відбивається від зразків ВР, а на довжині хвилі CO₂ лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) ситуація зворотна.

– випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм ослабляється в значно більшому ступені, ніж випромінювання з довжинами хвиль 1,06 мкм і 0,69 мкм. Варіація даних для k_λ , одержаних в різних експериментах, свідчить про важливу роль процесів розсіювання випромінювання в зразках ВР, які залежать від чистоти, густини та дисперсності матеріалу.

Таблиця 1.3

Вплив розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість

ртутної солі 5-гідразинотетразолу в інертній матриці полімеру

Діаметр лазерного луча (d), мм	Критична енергія ініціювання (E_k), мДж	Критична щільність енергії ініціювання (W_k), мДж/см ²
0,48	$1,8 \cdot 10^{-2}$	10,14
3,18	0,6	7,48
9,52	1,8	2,57

Для встановлення механізму запалювання вибухових речовин представляються важливими такі результати: по-перше, можна зробити висновок, що розсіювання світла в таких матеріалах відбувається в основному на гранях мікронеоднорідностей речовини. По-друге, при синтезі ВР не слід прагнути використовувати високочисті вихідні матеріали, оскільки при цьому зменшується концентрація мікронеоднорідностей, а, отже, знижується вірогідність ініціювання лазерним імпульсом із заданою енергією.

Висновки

1. Знайдена функціональна незалежність розмірного ефекту від режиму генерації лазерного випромінювання;
2. Підвищення оптичної міцності середовищ при зменшенні розмірів лазерного пучка (зони взаємодії) пов'язано із зменшенням числа поглинаючих мікронеоднорідностей "небезпечної" величини, що супроводжується різким збільшенням статистичного розкиду експериментальних даних. В даному випадку середовище є дифузно-розсіючим, тому ініціювання відбувається на деякій глибині, де встигає сформуватися ореол розсіювання;
3. Густина енергії і енергія ініціювання азиду свинцю цугом лазерних імпульсів значно перевищує відповідні величини для моноімпульсної дії;
4. Залежність $E_k(d)$ і $W_k(d)$ для обох видів генерації лазера подібні один одному. Ставляє особливий інтерес, оскільки свідчить про його єдину природу в тому чи іншому випадку. Іншими словами, функція розподілу освітленості в об'ємі ВР не залежить від густини потужності лазерного випромінювання;

5. Ініціювання високочутливих ВР має дуже велику залежність від світлового режиму в об'ємі СВР.

РОЗДІЛ 2

ПРЕЦИЗІЙНІСТЬ ПІДРИВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ

Первинні ініціюючі вибухові речовини (ІВР) відрізняються від бризантних ВР тим, що характеризуються дуже малим часом збільшення швидкості вибухового перетворення від початку збудження до стаціонарної детонації. Період прискорення процесу у деяких стандартних ІВР практично відсутній (азид свинцю) і цей процес не залежить від розмірів заряду й відразу протікає у формі детонації.

При розробці оптичного детонатора дуже важливими є результати дослідження затримки спалаху світлочутливих ВР під час дії лазерного випромінювання.

Перші дослідження, виконані в роботі [36], присвячені вивченню затримки спалаху азиду свинцю. Експерименти показали, що поблизу порогу ініціювання час затримки $\tau \approx 0,5$ мкс і швидко знижується при зростанні густини енергії лазерного випромінювання E . При трьох-, чотирикратному перевищенні E_k затримки стають менше тривалості імпульсу випромінювання, що збуджує вибух.

Важливим для розробки оптичних детонаторів представляються вимірювання затримки спалаху, проведені паралель з вивченням розмірного ефекту. Встановлено, що затримки спалаху азиду свинцю практично не залежать від розміру опромінюваної поверхні. Таким чином, температура осередків розігрівання, що викликають ініціювання, в першому наближенні, постійна. Тому, можна зробити висновок, що вони реалізуються в умовах однакової освітленості.

Проведені дослідження залежності часу затримки запалювання від густини енергії випромінювання світлочутливих ВР, в тому числі із використанням у якості зразків ртутної солі 5-гідразинотетразолу в інертній матриці полімеру, табл. 2.1. Вирішував цю задачу при використанні дії випромінювання ОКГ, що працює в режимі вільної генерації ($\tau_i \approx 30$ мкс).

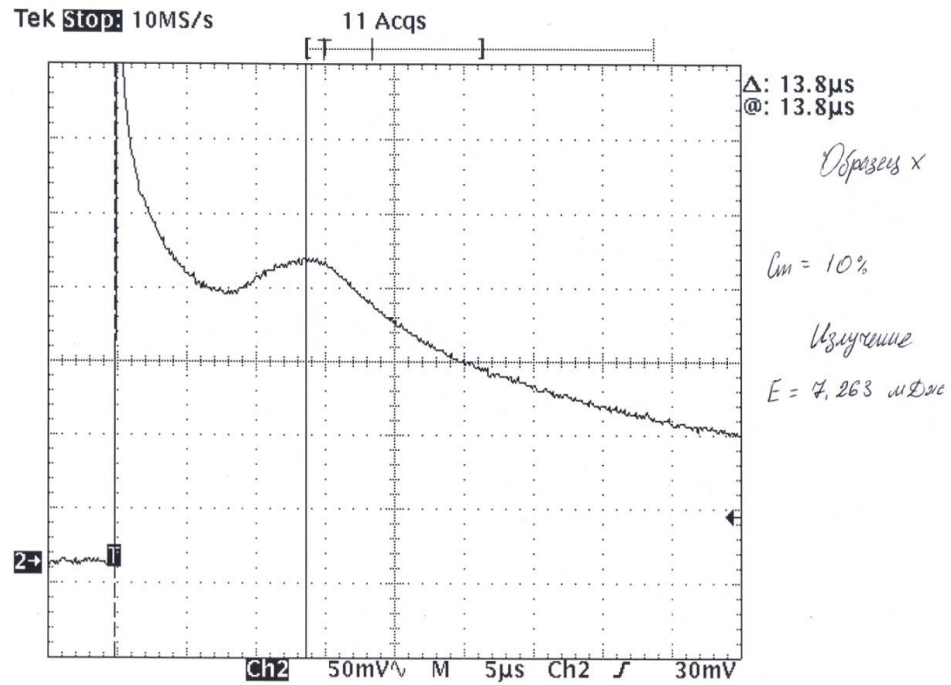
Таблиця 2.1

Залежність часу затримки спалаху ртутної солі 5-гідразинотетразолу в інертній матриці полімеру від густини енергії лазерного випромінювання в режимі вільної генерації

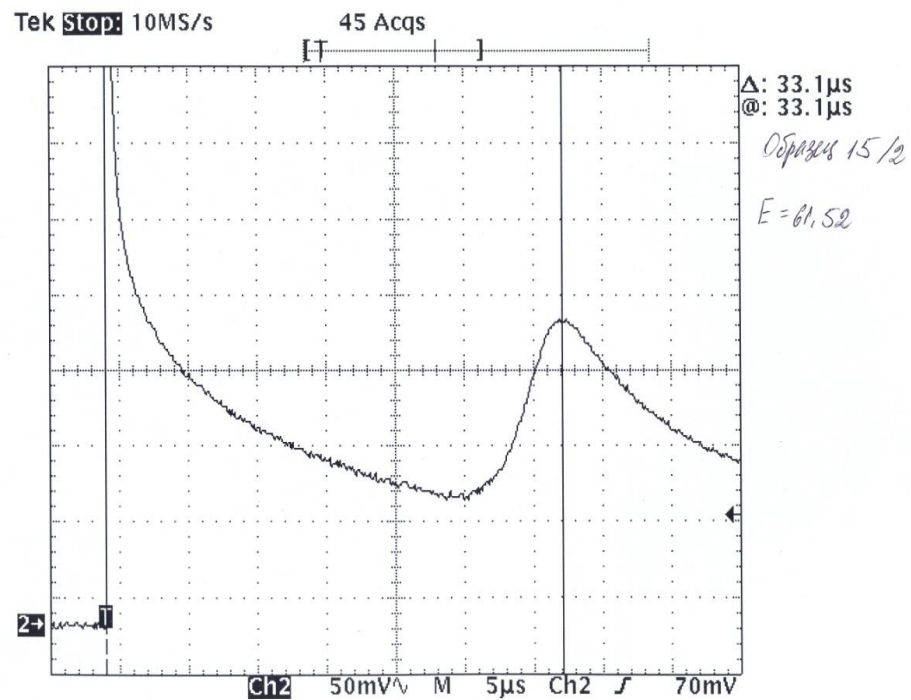
Щільність енергії випромінювання, Дж/см ²	Час затримки спалаху, мкс
0,26	15
0,35	14,5
1,10	11,5
3,6	1,0

Час затримки спалаху, відлічуваний від початку генерації, навіть поблизу порогу ініціювання, був завжди менше тривалості цугу світлових імпульсів, і із збільшенням енергії падаючого випромінювання в цілому спостерігалася тенденція до його зниження. Результати експериментів з використанням таких СВР, як ВС16 і ВС7, свідчать про те, що порядок часу затримки спалаху при однаковій енергії випромінювання однаковий.

При визначенні часу затримки вибуху відносно лазерного імпульсу в режимі модуляції добротності резонатора було встановлено, що вимірювання можна проводити за допомогою одного фотодіода (див. у рис. 4), який реєструє як лазерний імпульс, так і світловий імпульс від продуктів вибуху. Типова осцилограма приведена на рис. 2.1. Перший пік відповідає лазерному імпульсу, а другий, що виникає під час розрядження фотодіода крізь вхідну RC мережу осцилографа, відповідає максимуму світлового випромінювання, що йде від продуктів вибуху. При використанні двоканальної схеми реєстрації за допомогою двох фотодіодів результати були таким аналогічними.



a



б

Рис. 2.1. Осцилограма реєстрації часу затримки СВР відносно лазерного імпульсу:
 а, б – діаметр пучка 0,9 мм та 1,4 мм відповідно до рис. 1.5

Залежності затримки часу запалювання зразків СВР відносно початку дії лазерного імпульсу від густини світлової енергії (при масовій концентрації полімеру 15 % и 20 %) проявляють більшу затримку часу запалювання у тому випадку, якщо вміст полімеру менший. На перший погляд усе повинно бути навпаки. Тобто, чим більший вміст ВР у складі СВР, тим меншим повинен бути час "запалення" СВР. Відзначений факт є свідком того, що індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання.

У сукупності приведені результати якісно відповідають картині, одержаній для азиду свинцю в роботі [37], а тому природа запалювання ВР єдина.

2.1. Вплив домішок інертних матеріалів (на прикладі алотропних форм вуглецю) на підривні характеристики світлочутливих вибухових речовин

Досліджувався вплив сажі з розміром частинок до 1 мкм та наноалмазів детонаційного синтезу з розмірами частинок до 100 нм на поріг ініціювання СВР, що вміщував 90% перхлората гідразинотетразолртуті(II) і 10% прозорого полімеру. Імпульсне ініціювання СВР здійснювалося неодимовим лазером у імпульсному режимі генерації. Зразки виготовлювали діаметром 4,0 мм товщиною 1,5–2,0 мм. У табл. 2.2 наведені одержані результати. У всіх випадках результатом ініціювання була детонація.

Видно, що сажа збільшує поріг ініціювання СВР, що може бути пов'язано з дисипацією поглиненої сажею лазерної енергії з поверхні зразку СВР. Інша картина спостерігається при уведенні наноалмазів: мінімальна енергія ініціювання зменшується від 0,5% до 3%; подальше збільшення кількості наноалмазів знижує чутливість СВР до лазерного випромінювання. Одержаний результат можна пояснити

зростанням у об'ємі СВР освітленості за рахунок покращення умов формування очагів ініціювання. Збільшення порогу енергії ініціювання СВР з 5% наноалмазів пов'язано з негативним впливом розбавлення світлочутливого ВР інертною домішкою.

Час затримки ініціювання перхлората гідразинотетразолртуті (II) і 10% прозорого полімеру з домішками наноалмазів показаний у табл. 2.3.

Таблиця 2.2

Запалювання перхлората гідразинотетразолртуті(II) і 10% прозорого полімеру лазерним моноімпульсом

Домішки у зразках СВР (90% перхлората гідразинотетразолртуті (II) і 10% прозорого полімеру)	Мінімальна енергія ініціювання, E_k , мкДж
–	310
1% сажі	2000
0,5% наноалмазів	260
1% наноалмазів	200
3% наноалмазів	190
5% наноалмазів	340

Таблиця 2.3

Час затримки ініціювання СВР

Зразок СВР	Енергія ініціювання, E_k , мкДж	Час затримки ініціювання, мкс	Загальний час процесу вибуху, мкс
без домішок	340	11-12	100
5% наноалмазів	340	50	150

Уведення 5% наноалмазів помітно збільшило час затримки ініціювання. Одержаний результат можна пояснити тим, що наноалмази є ефективними ловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання. Вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

Висновки

1. Вперше встановлена залежність часу затримки спалаху ртутної солі 5-гідразинотетразолу в інертній матриці полімеру від густини енергії лазерного випромінювання в режимі вільної генерації;
2. Час затримки спалаху, відлічуваний від початку генерації, навіть поблизу порогу ініціювання, був завжди менше тривалості цугу світлових імпульсів, а із збільшенням енергії падаючого випромінювання спостерігалася тенденція до його зниження
3. Вперше встановлено, що індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання
4. Вперше встановлена закономірність впливу інертних домішок на час запалювання СВР, які є ефективними уловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання; вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

РОЗДІЛ 3

МЕХАНІЗМИ ЛАЗЕРНОГО ІНІЦІУВАННЯ СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

Збудження вибуху зарядів ВР під дією зовнішнього початкового імпульсу зводиться незалежно від виду прикладеної енергії до утворення "гарячих" точок, в яких відбувається інтенсивне термічне розкладання молекул ВР. Утворення "гарячих" точок у СВР під впливом лазерного випромінювання можна представити такими можливими механізмами як світловий удар, розігрівання приповерхневого шару ВР, електричне ініціювання, розігрівання оптичними мікронеоднорідностями. Приведемо оцінки дії кожного з цих механізмів.

1. Світловий удар. Лазерне випромінювання, що падає на поверхню СВР, чинить світловий тиск P , величина якого може бути розрахована по формулі [38]

$$P = \frac{(1 + R_\lambda) E_q}{c t_q}, \quad (3.1)$$

де E_q – густина енергії лазерного випромінювання, R_λ – коефіцієнт відбиття, c – швидкість світла.

Для оцінки тиску з боку випромінювання скористаємося даними роботи [39], яка присвячена дослідженню процесу запалення ініціюючої вибухової речовини (азиду срібла): $E_q = 2,0 \cdot 10^{-2}$ Дж/см², $t_q = 30$ нс, $R_\lambda \approx 0,8$. Згідно з (3.1) одержимо $P \approx 15$ Па. Такий тиск, природно не може бути причиною підриву не тільки азиду срібла і відомих ініціюючих ВР, але і світлочутливих ВР.

2. Розігрівання приповерхневого шару ВР. В результаті дифузійного відбиття світла на поверхні зразка ВР освітленість може перевищувати густину енергії в ла-

зерному пучку в $F = (1 + R_\lambda)$ разів. Для оцінки ступеня розігрівання приповерхневого шару ВР будемо вважати, що випромінювання поглинається в шарі $1/k_\lambda$, а розтіканням тепла за рахунок теплопровідності нехтуватимемо. В цьому випадку ступінь розігрівання можна оцінити з формули

$$\Delta T = \frac{E_q \cdot F \cdot k_\lambda}{c\rho}, \quad (3.2)$$

де c – масова теплоємність, Дж/(г·К).

Скористаємося числовими даними, що приведені у роботі [39]: $\rho = 4,1$ г/см³, $c = 0,42$ Дж/(г·К), $k_\lambda = 10^2$ см⁻¹).

Тоді

$$\Delta T = \frac{3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1} \cdot 1,8}{0,42 \text{ Дж/(г} \cdot \text{К)} \cdot 4,1 \text{ г/см}^3} \approx 2,1 \text{ К}$$

Очевидно, що таке розігрівання не може бути причиною хімічного перетворення азиду срібла, а також інших ініціювальних високочутливих ВР. Математична модель запалення ВР в результаті розігрівання приповерхневого шару ВР (без урахування газодинамічного руху речовини) розроблена в роботі [40].

3. Електричне ініціювання ВР. При вивченні взаємодії лазерного випромінювання з речовиною був встановлений ефект електричного пробою газів і діелектриків. Відомі ВР, як правило, є діелектриками або напівпровідниками [41]. Для їх пробою необхідно прикласти значне електричне поле (наприклад, електрична міцність в статичному полі азидів має порядок 10^5 В/см).

Оцінимо величину напруженості електричного поля, що виникає при дії на азид срібла лазерного імпульсу з густиною енергії, рівної критичної густини енергії запалювання. Зв'язок напруженості поля з параметрами випромінювання має вигляд:

$$E = \sqrt{\frac{4\pi E_q}{c t_q}}. \quad (3.3)$$

Замінімо літери у (3.3) числовими даними. Напруженість електричного поля буде дорівнювати $E = 1,6 \cdot 10^4$ В/см. Ця величина набагато менше пробійної напруженості електричного поля. Окрім цього, слід помітити, що у високочастотних полях пробій діелектриків відбувається при напруженості поля, яка на декілька порядків перевищує пробійні значення в статичних полях.

Таким чином, ініціювання ВР шляхом електричного пробою є маловірогідним.

4. Розігрівання оптичними мікронеоднорідностями. В даний час самою обгрунтованою гіпотезою запалення ВР лазерним імпульсом є гіпотеза запалення в осередках, що утворюються при поглинанні випромінювання оптичними мікронеоднорідностями. Ними можуть бути структурні неоднорідності (вакансії, скупчення дислокацій і т.п.), чужорідні включення, хімічні домішки. Наприклад, азид свинцю містить свинцеві зародки об'ємна густина і розміри яких збільшуються при опромінюванні потоком електронів, термічному і фотохімічному розкладанні [42]. Якщо використати гіпотезу осередкового запалювання, то можна пояснити низькі пороги запалювання деяких ВР. Проте інтерпретація результатів запалення азидів срібла, свинцю [36,39], а також монокристалів β -азиду свинцю [43] неможлива в рамках даної гіпотези.

Розглянемо включення металевого срібла в азиді срібла. Вважатимемо, що включення має форму сфери з радіусом $r_0 = 10^{-5}$ см, величина якого відповідає максимуму перерізу поглинання випромінювання [44] $\sigma_a = 1,2\sigma_r$, де σ_r – геометричний переріз частинки. При тривалості лазерної дії $t_q = 30$ нс і заданій густині енергії включення даного розміру нагріваються найбільш ефективно в порівнянні з включеннями інших розмірів. Це обумовлено тим, що при $r_0 < 10^{-5}$ см переріз поглинання

мікронеоднорідності зменшується згідно із законом близькому до кубічного, а при $r_0 > 10^{-5}$ см приблизно постійно, але зростає маса включення.

Визначемо температуру розігрівання ΔT з урахуванням припущення рівності об'ємних теплоємностей включення й матриці

$$c \cdot \rho = c_1 \cdot \rho_1.$$

$$\Delta T = \frac{3 \sigma_a E_q}{\pi c \rho (2r_0 + \delta)^2 r_0}, \quad \delta = \sqrt{12} \alpha, \quad (3.4)$$

де α — температуропровідність матриці: $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} = 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{с}$.

Для отримання оцінки верхньої границі ΔT у формулу (3.4) підставимо значення $(c \cdot \rho)$ для азиду срібла ($1,72 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{К}$), оскільки воно менше аналогічного значення для срібла ($2,52 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{К}$). В результаті одержимо

$$\delta = \sqrt{12 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{с} \cdot 30 \cdot 10^{-9} \text{ с}} \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

$$\Delta T = \frac{3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2}{1,72 \text{ Дж/(см}^3 \cdot \text{К)} \cdot (3,9 \cdot 10^{-5} \text{ см})^2} \approx 275 \text{ К}$$

Розігрівання до таких температур явно недостатнє для ініціювання вибухового розкладання AgN_6 .

Таким чином, механізм запалювання, заснований на розігріванні оптичних мікронеоднорідностей, не може бути універсальним для всіх ВР.

3.1. Оптичні мікронеоднорідності як центри поглинання енергії лазерного імпульсу

Деякі закономірності взаємодії лазерного випромінювання з прозорими діелектриками мають місце і при дії світла на вибухові речовини. Особливо це стосується ініціувальних ВР. До цього часу опублікована велика кількість робіт по дії випромінювання на скло, полімери, лужно-галоїдні кристали, кристали рубіна, лейко-сапфіра та інші речовини [45-47].

Одним із типових ефектів, що спостерігається при дії імпульсу лазерного випромінювання на прозорі речовини є руйнування матеріалу з утворенням тріщин і каверн. Встановлено, що за руйнування оптичних матеріалів відповідають дефекти і включення. Навіть в дуже чистих матеріалах оптичні мікронеоднорідності роблять істотно впливають на взаємодію випромінювання з речовиною. Вони і є найбільше імовірні джерела мікроруйнувань.

Наявність в кристалічних решітках діелектрика скупчень вакансій, сторонніх домішок та дислокацій істотно спотворює зонну структуру, що приводить до осередкового розігрівання і руйнування речовини.

Вплив структурних дефектів на руйнування речовини підтверджує той факт, що поріг поверхневого руйнування нижче об'ємного. Структура поверхневого шару речовини звичайно володіє значно більшою густиною дефектів, ніж об'єм кристала [48].

Характерні розміри мікронеоднорідностей і їх поглинаючі характеристики залежать від виду речовини, ступеня її чистоти, фізичного стану і т.д.

Висновки

1. З аналізу одержаних експериментальних даних по лазерному руйнуванню полімерів можна зробити висновок, що показник поглинання оптичних мікронеоднорідностей знаходиться в межах $10^2 - 10^4 \text{ см}^{-1}$, а розміри дефектів поверхневого шару – до $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, розсіюючих центрів від $3 \cdot 10^{-9}$ до $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$. Для визначеності механізму утворення поглинаючих включень вивчалися лужно-галоїдні кристали [49]. Одержані результати досліджень на думку авторів відносяться до будь-якої діелектричної матриці, що містить розчинну домішку.
2. Так, лужно-галоїдні кристали легко розчиняють надлишок металу і погано – галоїдну компоненту. Надлишок металу приводить до появи в кристалі дефектів двох типів: точкових дефектів решітки – так званих F-центрів і макроскопічних металевих включень – колоїдних частинок. Між колоїдами і F-центрами існує рівновага типу рідина-пара: кожній температурі відповідає певна рівноважна концентрація F-центрів, а весь залишок металу зосереджений у вигляді колоїдних частинок. Характерний розмір колоїдів в кристалах звичайно укладається в межах $10^{-6} - 10^{-4} \text{ см}$.
3. Таким чином, дослідженнями встановлено, що механізм запалювання, заснований на розігріванні оптичних мікронеоднорідностей, не може бути універсальним для всіх ВР.
4. Експериментальні дані показують, що прозорі до лазерного випромінювання речовини, у тому числі ВР, є оптично неоднорідними матеріалами, причому, природа мікронеоднорідностей визначається як фізичними особливостями даної речовини, так і способом її приготування.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СВР

4.1. Вплив концентрації зв'язуючого матеріалу на чутливість до лазерного імпульсу

З результатів досліджень, представлених вище, витікає, що одним з найважливіших чинників, що впливають на процес запалювання СВР є багатократне розсіювання випромінювання в об'ємі речовини. Для підтвердження цього висновку проведені принципово нові експериментальні дослідження: вивчено вплив концентрації зв'язуючого матеріалу і товщини зразків ВС на чутливість до дії лазерного моноімпульсу. Проведення таких експериментів стало можливим завдяки розробленій технології отримання високочутливих ВС.



Рис 4.1 Зовнішній вигляд експериментальних зразків ВС-2
(з дозволу М.О.Флюшина)

На прикладі ВС2 досліджено вплив концентрації зв'язки на чутливість до дії лазерного моноімпульсу. В якості зв'язуючого матеріалу використовувалися полімери ПМВТ–3М і ПММ, концентрація яких варіювалася в діапазоні 10–50%.

В першій серії експериментів ініціювання здійснювалося нерозширеним лазерним пучком. Як було показано вище, розподіл густини енергії по радіусу пучка описується розподілом Гауса

$$E(r) = \frac{W}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (4.1)$$

В даний час прийнято використовувати в якості характеристики чутливості ВР середню густину енергії по рівню інтенсивності $\geq 0,8$.

З рівняння (4.1) виходить, що густина лазерної енергії в центрі пучка рівна $E(0) = \frac{W}{2\pi\sigma^2}$. Тоді діаметр пучка \bar{d} по рівню 0,8 можна визначити з рівняння

$$\frac{E(\bar{d})}{E(0)} = 0,8 = \exp\left(\frac{\bar{d}^2}{8\sigma^2}\right). \quad (4.2)$$

Звідси маємо

$$\bar{d} = 2\sqrt{-2\sigma^2 \ln 0,8} \approx 1 \text{ мм}$$

Так само одержуємо, що діаметр пучка по рівню 0,5 дорівнює 1,5 мм.

Середня густина енергії по рівню $\geq 0,8$ визначається наступним чином

$$E_s = \frac{2\pi \int_0^{\bar{d}/2} E(r) r dr}{(\pi \bar{d}^2)/4} = \frac{4W}{\pi \bar{d}^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{\bar{d}^2}{8\sigma^2}\right)\right). \quad (4.3)$$

Вимірюючи повну енергію в імпульсі W , одержуємо середнє значення густини енергії запалювання ВС.

Результати досліджень показані на рис. 4.1. Знаком "-" позначена відмова, а знаком "+" – підрив зразка.

Підставляючи в рівняння (4.3) W , виражене через $E(0)$, одержуємо

$$E_s = E_0 \frac{8\sigma^2}{\bar{d}^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{\bar{d}^2}{8\sigma^2}\right) \right) = 0,89 E(0). \quad (4.4)$$

Звідси $E(0) = 1,12E_s$. Це означає, що у разі потреби виразити чутливість ВС2 щодо максимальної густини енергії в гаусовому пучку, необхідно дані рис. 4.2 помножити на 1,12.

В другій серії експериментів лазерний пучок діаметром на пів висоті інтенсивності 1,5 мм розширювався негативною лінзою до діаметра 4,5 мм, тобто розмір зображення на зразку ВР збільшувався в три рази. В цьому випадку розподіл густини енергії в лазерному пучку описувався формулою (4.1), в якій параметр розподілу $\sigma' = 9\sigma^2$. Перед зразком встановлювалася діафрагма діаметром 4,5 мм, що дозволяло вирізувати центральну частину пучка по рівню інтенсивності 0,5. Як зв'язуючий матеріал використовувалися полімери ПМВТ-3М і ПММ. Діаметр пучка по рівню інтенсивності 0,8 дорівнює

$$\bar{d} = 2 \sqrt{-2\sigma'^2 \ln 0,8} = 2,68 \text{ мм}.$$

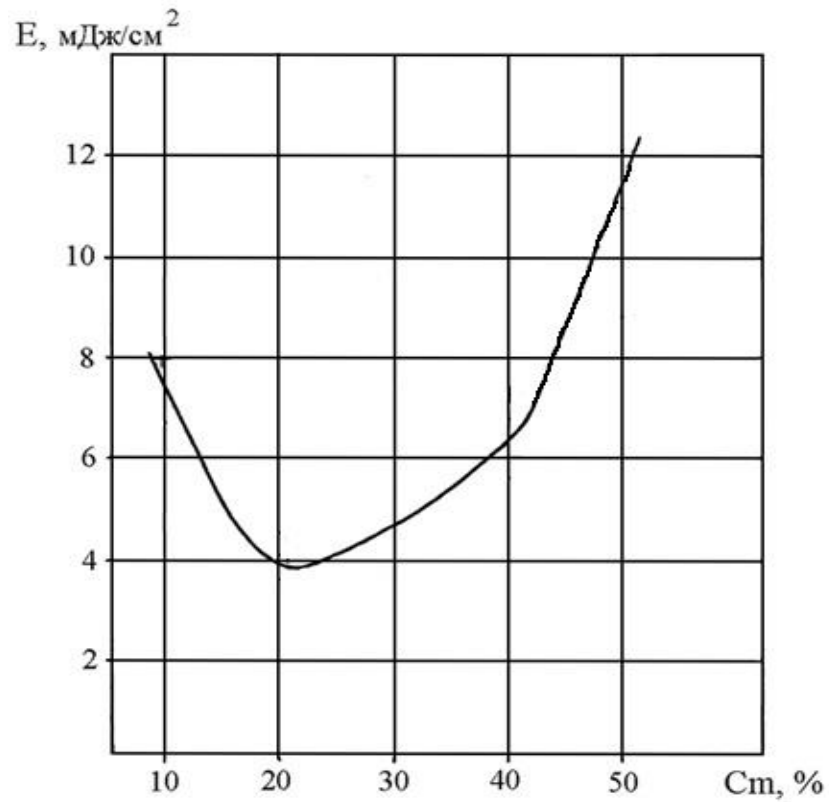


Рис. 4.2. Чутливість до лазерної дії BC2. Зв'язка з ПМВТ-3М, діаметр пучка 1,5 мм

Енергія випромінювання, що пройшло через діафрагму $D = 4,5$ мм, визначається з рівняння (4.1)

$$W_{\text{аен}} = 2\pi \int_0^{D/2} E(r) r dr = W(1 - \exp(-\frac{D^2}{8\sigma'^2})) = 0,39W.$$

Середнє значення по рівню $\geq 0,8$ дорівнює

$$E_s = \frac{W \left(1 - \exp\left(-\frac{\bar{d}^2}{8\sigma'^2}\right) \right)}{(\pi \bar{d}^2 / 4)} = 3,53W.$$

Звідси знаходимо зв'язок характеристики чутливості E_s і експериментально вимірюваної енергії $W_{\text{екс}}$

$$E_s = \frac{3,53}{0,39} W_{\text{екс}}.$$

На рис. 4.3, 4.4 представлені результати експерименту за визначенням E_s залежно від концентрації зв'язки з ПМВТ–3М і ПММ відповідно. Для отримання значення чутливості щодо густини енергії в центрі пучка необхідно ці дані помножити на 1,11.

З представлених результатів виходить, що чутливість СВР залежить від концентрації зв'язуючого матеріалу: при збільшенні вмісту зв'язки густина енергії запалювання зменшується, досягаючи мінімального значення, а потім зростає при подальшому збільшенні концентрації полімеру. Як видно з рис. 4.2, 4.3 при дії лазерного пучка діаметром 4,5 мм мінімум густини енергії запалювання досягається при $c_m \approx 30\%$ і абсолютні значення мінімуму близькі, не дивлячись на те, що в якості зв'язки використовувалися різні полімери (ПМВТ–3М і ПММ).

Чутливість СВР залежить від радіусу лазерного пучка: чим менше радіус, тим більше густина енергії запалювання. Цей результат співпадає з даними згаданих вище робіт, присвячених дослідженню розмірного ефекту – залежність порогу ініціювання від розміру опромінюваної зони.

Разом з представленими закономірностями для всіх СВР, що вивчаються, знайдена залежність чутливості від масової густини (товщина) покриття з СВР. Як приклад на рис. 4.3 показані експериментальні результати по ініціюванню лазерним імпульсом покриття з ВС16. При зменшенні товщини покриття, починаючи з $m_s \sim 60\text{--}70 \text{ мг/см}^2$, чутливість СВР падає. Покриття з густиною маси 20 мг/см^2 не вдавалося ініціювати навіть при дії імпульсом, з густиною енергії в 15 разів перевищуючу критичну для товстих зразків. Причому, при відмові візуально і під мікроскопом не спостерігалось слідів руйнування або часткового розкладання речовини.

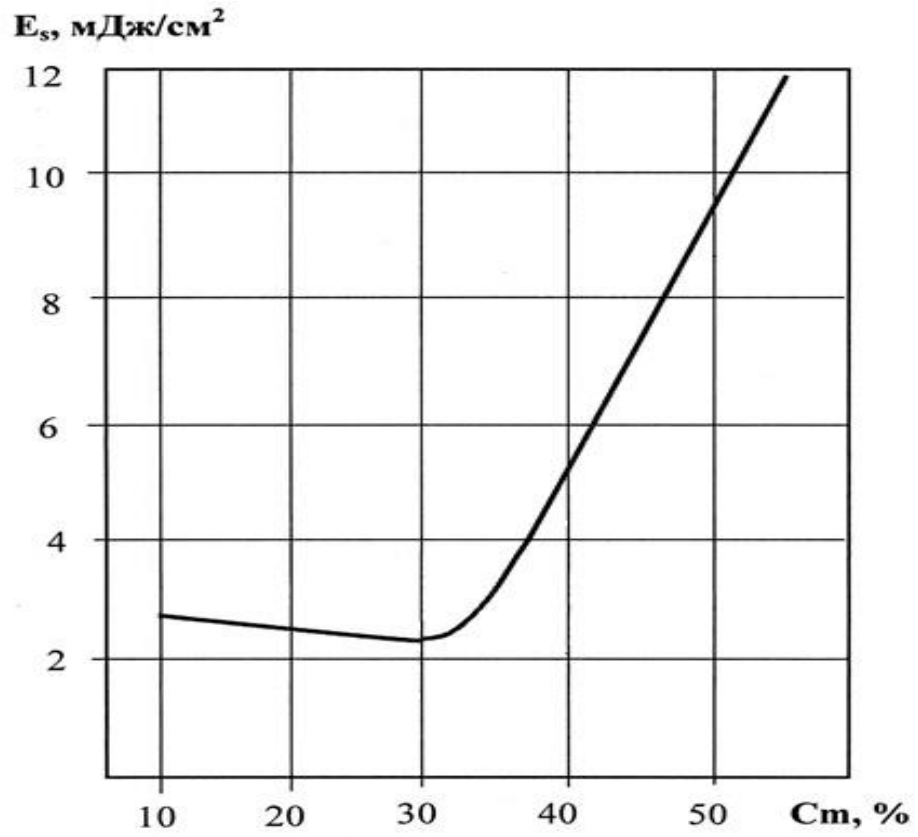


Рис. 4.3. Чутливість до лазерного імпульсу VC2. Зв'язка з ПМВТ-3М, діаметр пучка 4,5 мм

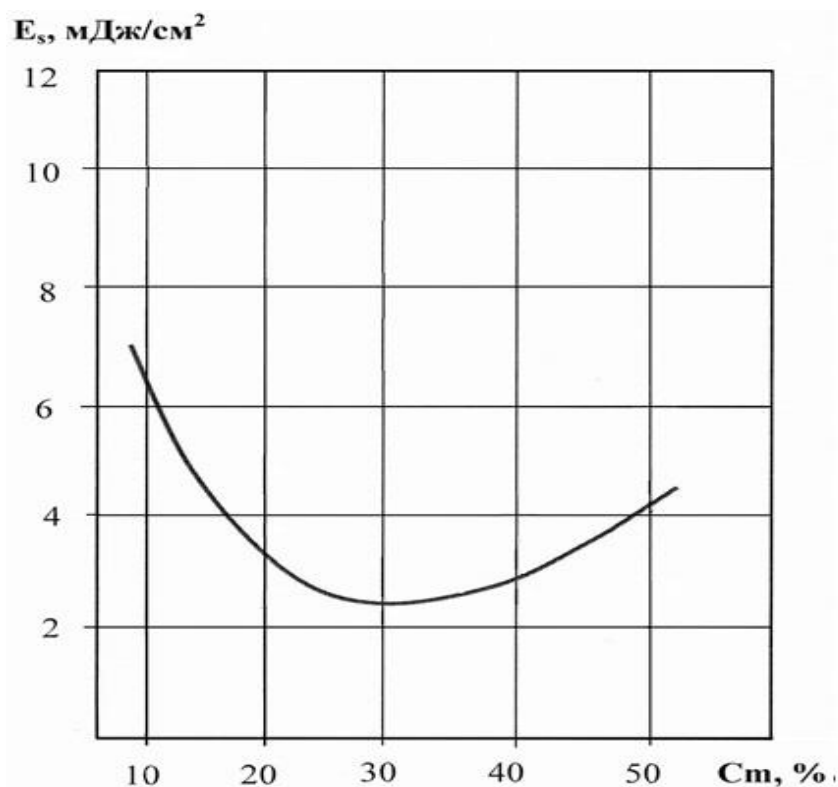


Рис. 4.4. Чутливість до лазерного імпульсу ВС2. Зв'язка з ПММ, діаметр пучка 4,5 мм

Наші експериментальні результати пояснюються на основі загальновідомих уявлень про розповсюдження світла в розсіюючих середовищах. Інтенсивність лазерного випромінювання в центрі променя, що розповсюджується в такому середовищі, падає за рахунок поглинання і розсіяння фотонів. Причому, чим менше діаметр променя, тим ослаблення за рахунок розсіяння сильніше, а, отже, для запалювання ВР потрібна велика енергія лазерного імпульсу. Це і спостерігається в експерименті (рис. 4.2, 4.3).

Розсіяння світла зменшується при збільшенні прозорості зразка. Тому підвищення вмісту полімеру приводить до зростання чутливості, що також узгоджується з результатами експерименту. Причому, чим менше діаметр променя, тим яскравіше виражений цей ефект. При великих значеннях концентрації зв'язки чутливість

СВР падає. Причиною цього явища, на наш погляд, є негативний вплив хімічно нейтрального зв'язуючого матеріалу (полімеру) на процес розповсюдження вибухового перетворення по зразку СВР. Підтвердженням можуть служити результати ініціювання зразків ВС2, що містять 50% зв'язки, для яких спостерігається підрив тільки частини покриття, що потрапило в центр лазерного променя.

4.2. Вплив поверхневої густини маси СВР на чутливість до лазерного імпульсу.

Залежність густини енергії запалювання від поверхневої густини маси, представлена на рис. 4.5, свідчить про важливу роль вільної поверхні зразка СВР у формуванні осередку запалювання. Оскільки тонкі покриття з СВР не ініціюються при опромінюванні лазерними імпульсами з густиною енергії, багатократно перевищуючою критичну і при цьому не спостерігається руйнування або хоча б часткового розкладання ВР, то з цього можна зробити висновок, що збудження з боку поверхні впливають не тільки на процес розвитку горіння з осередку запалювання, але і на формування самого осередку. Роль вільної поверхні може зводиться до єдиного – генерації хвилі розвантаження, що розповсюджується по зразку СВР. Це означає, що осередки запалювання можуть формуватися в об'ємі СВР, на відстанях від вільної поверхні, які перевищують довжину дії хвилі розвантаження за часи індукції процесу осередкового запалювання.

Таким чином, одержані експериментальні результати, показують, що найважливішими чинниками, що визначають розвиток процесу запалювання СВР лазерним моноімпульсом, є освітленість в об'ємі СВР і хвилі розвантаження, що розповсюджуються з боку вільної поверхні.

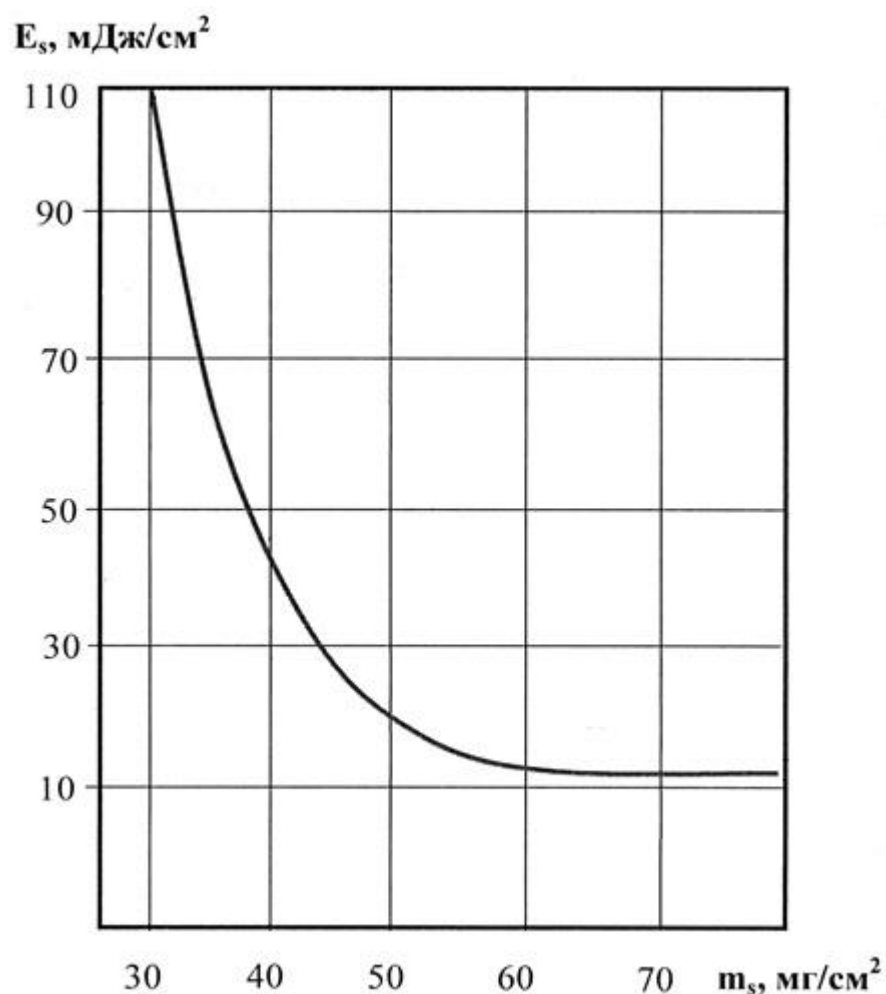


Рис. 4.5. Залежність чутливості ВС16 від товщини зразка

4.3. Залежність чутливості до лазерного випромінювання від дисперсності речовини.

Експериментально встановлено, що запалювання СВР здійснюється в осередках, які утворюються при поглинанні енергії випромінювання оптичними мікро-неоднорідностями, що розташовані в окремих кристалах. У цьому зв'язку вивчення спектральних характеристик СВР у діапазоні довжини хвиль, що є робочими для звичайних лазерів (видимий та ближній ІЧ діапазон; рубіновий лазер – 690 нм; неодимовий лазер – 1060 нм) важливо як з теоретичної, так і практичної точки зору.

Як показано у роботі [50] характер спектрів дозволяє говорити, що прямої залежності імовірності спрацьовування СВР від спектральних характеристик не спостерігається. Таким чином був зроблений висновок, що поріг ініціювання не залежить від характеристик СВР у кристалічному стані. Для остаточного висновку нами проведені дослідження впливу на процес ініціювання СВР лазерним випромінюванням такого фактору як дисперсність частинок СВР.

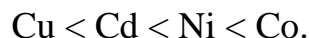
Відомо, що наночастинки часто проявляють незвичайні властивості у порівнянні з властивостями матеріалів, що утворені частинками мікронного розміру. У даному випадку розмірний ефект у значній ступені змінює макроскопічні властивості матеріалів. Висока хімічна активність наночастинок обумовлена високим значенням відношення поверхні частинок до їх об'єму.

Для досліджень були відібрані СВР із ряду комплексних перхлоратів ртуті(II) з гідразинопхідними азолов у якості лігандів. Даний вибір СВР обумовлений високою позитивною ентальпією утворення гідразиноазолів, високою окислювальною спроможністю перхлорат-іона та високим потенціалом іонізації катіона ртуті, що приводе до одержання високоенергоємних сполучень з короткою ділянкою переходу горіння у детонацію.

Екстремально високу чутливість до лазерного моноімпульсу показала сіль 5-гідразинотетразолу з розміром частинок менше 1 мкм. Поріг ініціювання неодимовим лазером (тривалість імпульсу 30 нс) склав 10 мкДж. Механізм ініціювання таких сполук з низьким порогом запалювання лазерним моно імпульсом проведеними дослідженнями не встановлений.

На підставі відомої ролі катіонів-металів (при ініціюванні комплексів) як каталізаторів горіння було запропоновано провести дослідження сприйнятливості до лазерного моноімпульсу комплексних перхлоратів міді(II), кобальту(II), нікелю(II), кадмію(II) з 3(5)-гідразино-аміно-1,2,4-триазолом у якості реакційно спроможного високоентальпійного ліганда. Дисперсність частинок СВР наближалася до нанорозмірів і складала у середньому 0,1 мкм.

Дослідження показали, що значення порогу ініціювання СВР залежить від природи центрального атома і збільшується в ряду комплексних перхлоратів



Знайдений ряд чутливості солей співпадає з рядом окислювальної спроможності катіонів металів, що характеризується сумою їх потенціалів іонізації, табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Залежності критичної енергії ініціювання
від потенціалів іонізації катіона метала (М.Ілюшин та інші)

Досліджені сполучення (СВР)	Критична енергія запалювання E_K , Дж	Потенціал іонізації катіона метала, ($I_1 + I_2$), eВ
[Cu (НАTr) ₂] (ClO ₄) ₂	$1.1 \cdot 10^{-5}$	28,02
[Cd (НАTr) ₂] (ClO ₄) ₂	$5,03 \cdot 10^{-4}$	25,90
[Ni (НАTr) ₂] (ClO ₄) ₂	$5,75 \cdot 10^{-4}$	25,78
[Co (НАTr) ₂] (ClO ₄) ₂	$1,36 \cdot 10^{-3}$	24,92

Роль катіона метала при ініціюванні комплексних солей лазерним моноімпульсом, полягає в окислюванні перхлорат-аніона (ClO₄) до більш реакційноспроможного перхлорат-радикала (ClO₄*), який окислює ліганди до кінцевих продуктів розкладання. Найвищу чутливість до лазерного випромінювання проявляли речовини з найбільшою дисперсністю.

4.4. Фізична модель поведінки фотона у дифузійно-розсіючому середовищі з великою густиною розсіювачів та невеликими поглинаючими властивостями.

Аналіз результатів проведених у даній роботі досліджень показує, що в основі фізичного механізму лазерного ініціювання мають бути уявлення про осередковий характер запалювання. Швидке уведення енергії лазерного імпульсу (час дії порядку одиниць-десятків наносекунд) дозволяє в оптично прозорих вибухових матеріалах створювати "гарячі точки" в місцях розміщення оптичних мікронеоднорід-

ностей, якими можуть бути домішки, структурні неоднорідності речовини (скупчення дислокацій, вакансії і т.п.).

Найпростіші розрахункові оцінки показують, що одних уявлень про осередковий характер запалювання недостатньо для пояснення низькопорогового характеру запалювання СВР. Теоретичні значення критичної густини енергії при різних припущеннях щодо механізму запалювання на порядок перевищують експериментальні дані. На вирішення цього парадоксу і направлена розробка фізичної моделі.

Взаємодія лазерного випромінювання з вибуховими речовинами має більш складніший характер. Встановлено, що пороги запалювання виявилися значно більш низькими в порівнянні з дією джерел світла суцільного спектру, для яких коефіцієнти поглинання ультрафіолетової частини випромінювання на декілька порядків перевищують коефіцієнти поглинання випромінювання лазерів на неодимовому чи рубіновому склі. Цей факт, покладений в основу фізичної моделі лазерного запалювання, враховує процеси дисипації світлової енергії за рахунок хвиль розвантаження напружено-деформованого стану поверхневого шару СВР.

Найважливішим, на наш погляд, є врахування особливостей освітленості в об'ємі СВР. Річ у тому, що вибухові речовини є слабко поглинаючими матеріалами з великою густиною розсіювачів, тобто процеси розсіювання лазерного випромінювання грають визначаючу роль у встановленні динамічної картини освітленості в матеріалі. Основним чинником розсіювання світла є границі розділу кристал СВР – повітря. Різниця у показниках кристалів СВР і повітря складає понад 0,5. Зменшення цієї різниці веде до більш глибокого проникнення фотонів в об'єм вибухової речовини, що зменшує дію хвиль розрідження на процес лазерного запалювання. Для підтвердження цього припущення були проведені принципово нові експериментальні дослідження, суть яких зводиться до наступного. Була розроблена нова технологія виготовлення вибухових сполук, що ґрунтується на застосуванні зв'язки – розчину прозорого до лазерного випромінювання полімеру у швидко випаровую-

чих розріджувачах, наприклад, хлороформу. Це дозволило замінити повітряні прошарки на полімерні. Крім цього, такі вибухові сполуки можна наносити у вигляді покриття на різні матеріали.

Експериментальні дослідження залежностей критичних енергій запалювання від концентрації полімеру та товщини зразку вибухової сполуки показали, що дійсно процеси розсіювання фотонів у середовищах з великою густиною розсіювачів відіграють велику роль у процесі запалювання світлочутливих сполук лазерним імпульсом. Збільшення концентрації полімеру веде до збільшення чутливості СВР. Зменшення товщини зразку СВР не дозволяє отримати таке ж освітлення, що реалізується при товстих зразках, а також ці зразки піддаються діям хвиль розрідження. У наших дослідженнях пори в зразках ВР заповнювалися розчином полімерного матеріалу, показник заломлення якого близький до коефіцієнта заломлення кристалів. В останньому випадку поріг запалювання був знижений в 2-3 рази.

Таким чином, запропонована фізична модель поведінки фотонів в розсіючому середовищі дозволяє пояснити розмірний ефект – залежність густини енергії ініціювання від радіусу лазерного пучка. Стосовно проблеми створення оптичного детонатора це означає, що зменшення діаметра світловода веде до втрат енергії за рахунок розсіювання світла в об'ємі ВР. Тому рішення задачі освітленості грає ключову роль. Слід врахувати, що в результаті багатократних процесів розсіювання світла на гранях кристалів об'ємна освітленість може зрости в багато разів, що сприяє розігріванню оптичних мікронеоднорідностей, властивих будь-якому оптично прозорому діелектрику.

Висновки

1. Дисипація світлової енергії за рахунок хвиль розвантаження напружено-деформованого стану поверхневого шару СВР;
2. Зародження "гарячих точок" в оптично прозорих вибухових речовинах за рахунок швидкого уведення енергії лазерного імпульсу (одиниць-десятків наносекунд);
3. Зниження порогів запалювання СВР короткими лазерними імпульсами;
4. Багатократне зростання об'ємної освітленості СВР;
5. Розмірний ефект – залежність густини енергії ініціювання від радіусу лазерного пучка;
6. Закономірності процесів розсіювання фотонів у середовищах з великою густиною розсіювачів;
7. Залежності запалювання СВР від показників заломлення речовини, що заповнює поруватий простір СВР;
8. Залежність критичної енергії ініціювання СВР від потенціалів іонізації катіона метала.
9. Осередкове запалювання світлочутливих вибухових речовин здійснюється в умовах багатократного розсіювання фотонів на гранях кристалів ВР, яке значно підвищує об'ємну освітленість, а, отже, і ефективність введення енергії лазерного імпульсу в мікронеоднорідності речовини;
10. Підвищення освітленості в глибині ВР є найефективнішим способом зниження порогу запалювання вибухових речовин, що використовуються в оптичних детонаторах.
11. Чутливість СВР залежить від концентрації зв'язуючого матеріалу (полімеру): при збільшенні вмісту зв'язки густина енергії запалювання зменшується, досягаючи мінімального значення, а потім зростає при подальшому збільшенні концентрації полімеру;
12. Чутливість СВР залежить від радіусу лазерного пучка: чим менше радіус, тим

- більше густина енергії запалювання;
13. Для всіх СВР знайдена залежність чутливості від масової густини (товщина) покриття: при зменшенні товщини покриття, починаючи з $m_s \sim 60\text{--}70 \text{ мг/см}^2$, чутливість СВР падає; покриття з густиною маси 20 мг/см^2 не вдавалося ініціювати навіть при дії імпульсом, з густиною енергії в 15 разів перевищуючу критичну для товстих зразків;
 14. Найважливішими чинниками, що визначають розвиток процесу запалювання СВР лазерним моноімпульсом, є освітленість в об'ємі СВР і хвилі розвантаження, що розповсюджуються з боку вільної поверхні;
 15. Встановлена залежність критичної енергії ініціювання СВР від потенціалів іонізації катіона метала;
 16. Вперше встановлена роль катіона метала при ініціюванні комплексних солей лазерним моноімпульсом, яка полягає в окислюванні перхлорат-аніона (ClO_4) до більш реакційноспроможного перхлорат-радикала (ClO_4^*), який окислює ліганди до кінцевих продуктів розкладання;
 17. СВР, що були досліджені, можна віднести до класу нових первинних ініціюючих енергоємних світлочутливих вибухових речовин.

ВИСНОВОК

Наукові, практичні результати і їх оцінка зводяться до наступного:

- збільшення швидкості енерговведення знижує поріг ініціювання, отже, в ОПСІН слід використовувати короткі лазерні імпульси;
- підвищення початкової температури ВР не впливає на поріг ініціювання;
- більшість ІВР характеризується великими (60-80%) коефіцієнтами дифузного відбиття і є слабопоглинаючими матеріалами на довжинах хвиль 0,69, 1,06 мкм;
- введення в заряди ІВР поглинаючих домішок не сприяє підвищенню їх чутливості;
- параметри ініціювання ІВР випромінюванням 1,06 і 0,69 мкм приблизно рівні, оскільки близькі їх оптичні характеристики;
- при ініціюванні СВР лазерним випромінюванням виявляється розмірний ефект – залежність порогу ініціювання від розміру і геометрії зони дії, який не залежить від довжини хвилі випромінювання, тривалості і потужності дії, модової структури імпульсу;
- при зменшенні діаметра пучка статистичний розкид порогу ініціювання ВР не змінюється (на відміну від порогу оптичного пробою прозорих діелектриків);
- збільшення концентрації поглинаючих випромінювання мікронеоднорідностей підвищує вірогідність ініціювання ВР;
- затримка ініціювання залежить від природи ВР, тривалості дії, густини потужності лазерного випромінювання;
- розмірний ефект, статистичні особливості ініціювання базуються на уявленнях про дифузійне розсіювання випромінювання в середовищі ВР, однак, теоретичні моделі цього процесу не розроблені;
- гіпотеза про осередкове розігрівання оптичних мікронеоднорідностей, які

властиві всім прозорим для світла діелектрикам, у тому числі і кристалам вибухових речовин (гіпотеза була доповнена уявленнями про багатократне розсіювання фотонів в об'ємі вибухових речовин, які є середовищем з щільною упаковкою розсіювачів);

- багатократне розсіювання на порядок збільшує об'ємну освітленість, а це означає, що розігрівання оптичних мікронеоднорідностей буде достатнє для осередкового запалювання світлочутливих ВР;
- встановлена залежність критичної енергії ініціювання СВР від потенціалів іонізації катіона метала;
- вперше встановлена роль катіона метала при ініціюванні комплексних солей лазерним моноімпульсом, яка полягає в окислюванні перхлорат-аніона (ClO_4) до більш реакційноспроможного перхлорат-радикала (ClO_4^*), який окислює ліганди до кінцевих продуктів розкладання;
- вперше сформульована фізична модель запалювання лазерним імпульсом світлочутливих ВР, на основі якої можлива розробка фізико-математичної моделі й методики розрахунку основних параметрів оптичного детонатора для оптичних систем ініціювання вибухових зарядів.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chernaj, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A., Zhitnik, N.E. The method of obtaining mechanical loading pulses based on a laser initiation of explosion of explosive coatings// *Fizika Goreniya i Vzryva* Volume 30, Issue 2, March 1994, Pages 106-111
2. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A., Zhitnik, N.E. Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coating // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 30, Issue 2, March 1994, Pages 239-242
3. Chernaj, A.V., Sobolev, V.V. Laser method of profiled detonation wave generation for explosion treatment of materials // *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov* Issue 5, September 1995, Pages 120-123
4. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A., Zhitnev, N.E., Petrova, N.A. On the mechanism of ignition of energetic materials by a laser pulse // *Chemical Physics Reports* Volume 15, Issue 3, 1996, Pages 457-462
5. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Chernaj, V.A., Ilyushin, M.A., Dlugashek, A. Laser initiation of charges on the basis of di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazol)-copper (II) perchlorate // *Fizika Goreniya i Vzryva*. Volume 39, Issue 3, 2003, Pages 105-110
6. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Chernaj, V.A., Ilyushin, M.A., Dlugashek, Laser ignition of explosive compositions based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-copper(II) perchlorate // *Combustion, Explosion and Shock Waves* Volume 39, Issue 3, May 2003, Pages 335-339
7. Sobolev V., Shiman L.N., Nalisko N.N. Kirichenko A.L. Computational modeling in research of ignition mechanism of explosives by laser radiation // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, – 2017,–.
8. Sobolev V., Bilan N., Kirichenko O. Mechanism of additional noxious fumes formation when conducting blasting operations in rock mass// *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*.. Published by CRC Press/Balkema, The

Netherlands, 2014. - 521 p. - P. 471-477. ISBN: 978-1-138-02699-5 (Hbk), ISBN: 978-1-315-74031-7

9. Соболев В.В., Ищенко Б.С., Куливар В.В., Романова А.С. Физико-технические особенности оптической системы инициирования зарядов взрывчатых веществ // Перспективи розвитку будівельних технологій [Текст]: матеріали 11-ї міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 26–27 квітня 2017 р. – Д.: Національний гірничий університет, 2017. – 135 с. – Укр. та рос. – С. 126-128.

10. Соболев В.В., Ищенко Б.С., Куливар В.В., Романова А.С. Способ возбуждения плоских детонационных волн в тонкослойных зарядах взрывчатых веществ // Перспективи розвитку будівельних технологій: матеріали 11-ї міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 26–27 квітня 2017 р.– Д.: Національний гірничий університет, 2017. – 135 с. – Укр. та рос. – С. 112-114

11/ Соболев В.В., Кириченко А.Л., Соляник О.В. Оценка давления на стенки зарядной камеры с учетом изоэнтропы продуктов детонации ВВ и ударной адиабаты породы // Материалы XI Междунар. Научно-технич. конференции «Разработка, использование и экологическая безопасность современных гранулированных и эмульсионных взрывчатых веществ» Кременчуг-Свалява, 01-07 февраля 2015 г. – Кременчуг:КрНУ, 2015. – С. 7-9

12. Sobolev, V.V., Didyk, R.P., Slobodskoi, V.Ya., Merezhko, Yu.I., Skidanenko, A.I. Dynamic effects in the production of diamond from solid-solution carbon // Combustion, Explosion, and Shock Waves Volume 19, Issue 5, September 1983, Pages 658-659

13. Gubenko, S.I., Slobodskoi, V.Ya., Sobolev, V.V. Diffusion Interaction of cast iron with steel in forging, explosion treatment and thermal cycling // Physics and chemistry of materials treatment. Volume 20, Issue 3, May 1986, Pages 267-271

14. Sobolev, V.V., Slobodskoi, S.Y., Selyukov, S.N., Udov, A.A. Some transformations of chaoite into other carbon phases. // *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva* Volume 115, Issue 2, 1986, Pages 218-221
15. Sobolev, V.V. Diamond crystallization in nature // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 23, Issue 1, January 1987, Pages 83-86
16. Gubenko, S.I., Slobodskoi, V.Ya., Sobolev, V.V., Udov, A.A. Investigation of a medium for diamond crystallization // *Russian metallurgy. Metally* Issue 6, 1989, Pages 173-175
17. Slobodskoi, V.Ya., Sobolev, V.V., Gubenko, S.I., Udov, A.A. Increasing the reactivity of catalysts for diamond synthesis // *Physics and chemistry of materials treatment* Volume 24, Issue 2, March 1990, Pages 197-200
18. Slobodskoi, V.Ya., Sobolev, V.V., Baranov, P.N. Diamond crystallization mechanisms // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 26, Issue 3, May 1990, Pages 362-365
19. Taran, Yu.N., Slobodskoi, V.Ya., Gubenko, S.I., Sobolev, V.V., Konobritskaya, O.I. Production of bimetallic joints between gray cast iron and steel by forging and explosion with subsequent thermal cycling // *Metal Science and Heat Treatment* Volume 33, Issue 10, October 1991, Pages 777-783
20. Taran, Yu.N., Slobodskoj, V.Ya., Gubenko, S.I., Sobolev, V.V., Konobritskaya, O.I. Obtaining bimetallic compositions grey cast iron-steel under forging and explosion with subsequent thermocycling // *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* Issue 10, October 1991, Pages 36-40
21. Taran, Yu.N., Sobolev, V.V., Slobodskoj, V.Ya., Gubenko, S.I. Formation of diamond inclusions in grey iron at combination of shock-wave treatment and thermal cycling // *Izvestiya AN SSSR: Metally* Issue 3, May 1991, Pages 140-147
22. Sobolev, V.V., Slobodakoj, V.Ya., Sharabura, A.D., Gorbachevskij, D.C., Pozdnyak, O.F. Treatment of Ni-Mn-C composition in pulsed electro-magnetic field // *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov* Issue 3, May 1992, Pages 138-139

23. Sobolev, V.V., Slobodskaya, V.Ya., Gubenko, S.I., Sharabura, A.D., Udov, A.A. Catalyst alloys with metastable structure // Sverkhverdye Materialy Issue 4, July 1992, Pages 16-20.

24. Sobolev, V.V., Bondarenko, E.V. The change in granulometric composition of diamond crystals when treating synthesis products in electromagnetic field // Sverkhverdye Materialy Issue 4, April 1993, Pages 57-58

25. Sobolev, V.V., Taran, Yu.N., Gubenko, S.I. Synthesis of diamond in cast iron // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov. Issue 1, January 1993, Pages 2-6

26. Sobolev, V.V., Taran, Yu.N., Gubenko, S.I. Synthesis of diamond in cast iron // Metal Science and Heat Treatment. Volume 35, Issue 1, January 1993, Pages 3-9

27. Sobolev, V.V., Taran, Y.N., Gubenko, S.I. Shock wave use for diamond synthesis // Journal De Physique. IV : JP Volume 7, Issue 3, August 1997, Pages C3-73 – C3-75.

28. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. (2006) Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements // Journal De Physique. IV: JPVOLUME 134, August 2006, Pages 977-982 8th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading; Dijon; France; 11 September 2006 до 15 September 2006; Код 68460

29. Owsik, J., Sobolev, V.V. Possible reasons of degradation of elements of space vehicle control-systems // Advanced Materials Research Volume 47-50 PART 2, 2008, Pages 1270-1273 Multi-functional Materials and Structures - International Conference on Multifunctional Materials and Structures; Hong Kong, P.R.; China; 28 July 2008 до 31 July 2008; Код 74080

30. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. Formation of chemical elements under super-deep penetration of lead microparticles in ferrous target // Advanced Materials Research Volume 47-50 PART 1, 2008, Pages 25-28 Multi-functional Materials and Structures - International Conference on Multifunctional Materials and Structures; Hong Kong, P.R.; China; 28 July 2008 до 31 July 2008; Код 74080

31. Sobolev V.V., Baskevich A.S., Shiman L.N., Usherenko S.M. Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, – №6. – P. 74-82
32. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. О механизме инициирования ВВ излучением ОКГ // *Физика горения и взрыва*. – 1969. – Т. 5, №4. – С. 475-480.
33. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии / В.Е. Александров, А.В. Долголаптев, В.Б. Иоффе и др. // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – Т. 19, №4. – С.17-20.
34. Чернай А.В. О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом // *Физика горения и взрыва*. – 1996. – Т. 32, №1. – С. 62-69.
35. Laser Ignition of Explosive Compositions Based on di(3-hydrazine-4-amino-1,2,3-triazole)-Coper(II)-Perchlorate / V.V. Sobolev, A.V. Chernay, V.A. Chernay, M.A Ilyshin, A. Dlygashek. // *Combustion Explosion and Shock Waves*. – 2003. – V. 39, №3. – P. 335-339.
36. Александров Е.И., Вознюк А.Г. Инициирование азида свинца лазерным излучением // *Физика горения и взрыва*. – 1978. – Т. 14, №4. – С. 86-91.
37. Александров Е.И., Ципилев В.П. Влияние режима генерации на особенности размерного эффекта при лазерном инициировании прессованного азида свинца // *Физика горения и взрыва*. – 1982. – №6. – С. 60-62.
38. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. О механизме инициирования ВВ излучением ОКГ // *Физика горения и взрыва*. – 1969. – Т. 5, №4. – С. 475-480.
39. Карабанов Ю.Ф., Боболев В.К. Зажигание инициирующих взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением // *Докл. АН СССР*. – 1981. – Т. 256, №5. – С. 1152–1155.
40. Robert J. Harrach. Estimates on the ignition of high explosives by laser pulse // *J. Appl. Phys.* – 1976. – V. 47, №6. – P. 2473-2482.
41. Кук М.А. Наука о промышленных ВВ. – М.: Недра, 1980. – 566 с.
42. Боуден Ф, Иоффе А. Быстрые реакции в твердых телах. – М.: ИЛ, 1962. –

244 с.

43. Hagan J.T., Chaundhri M.M. Low energy Laser initiation of single crystals of lead aside // J. Mat. Sci. – 1981. – V. 16, №9. – P. 2457-2466.

44. Чернай А.В., Кучугурный Ю.П. О поглощении света микровключениями в азиде свинца / Ин-т техн. мех. АН УССР. – Днепропетровск, 1986. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ, №7571-В86.

45. Критические условия инициирования вторичных ВВ при импульсных тепловых воздействиях/ В.Н. Лобанов, Р.Г. Ленский, Ю.И. Плотников и др.// Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.–Черноголовка, 1989.–С.25–27.

46. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением// Физика горения и взрыва.– 1989.–Т.25, №1.–С.3–9.

47. Карабанов Ю.Ф., Карпухин И.А. Общие закономерности инициирования систем окислитель–горючее при механических и лазерных импульсных воздействиях // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.–Черноголовка, 1992.–С.59–60.

484. Поверхностное разрушение кристаллов рубина лазерным излучением // Ю.К. Данилейко, А.А. Маненков, А.М. Прохоров и др. // ЖЭТФ. – 1970. – Т. 58, №1. – С. 31-36.

49. Маненков А.А., Нечитайло В.С., Цаприлов А.С. Анализ механизма лазерного разрушения прозрачных полимеров, связанного с их вязкоупругими свойствами // Квантовая электроника. – 1981. – Т.8, №4. – С. 838-842.

50. Применение субмикронных светочувствительных инициирующих взрывчатых веществ в лазерных системах инициирования/М.А. Илюшин, И.В. Целинский, И.А. Угрюмов, А.Ю. Жилин, А.В. Чернай // Научн. тр./ НГУ. – 2003. – №18. – С. 8–17.

Відгук керівника дипломної роботи магістра
На тему «ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО МОНОІМПУЛЬСУ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮ-
ВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН»
студента групи 184м-17-1
Лісовського Валерія Валерійовича

Мета роботи - встановлення закономірностей впливу лазерного випромінювання на фізико-хімічні перетворення світлочутливих вибухових речовин.

Тема диплома є актуальною тому, що ефективність роботи лазерної системи ініціювання залежить головним чином від фізико-хімічних характеристик світлочутливих вибухових речовин (СВР), величини порогової енергії збудження детонації СВР, прецизійності та надійності спрацьовування оптичного детонатора.

Тема дипломної роботи має безпосередній зв'язок з об'єктом діяльності магістра фахом 7.090303 «Шахтне і підземне будівництво».

Магістр Лісовський В.В. приймав участь у проведенні експериментальних досліджень залежності енергетичних параметрів ініціювання детонації від характеристик лазерного випромінювання та вихідних фізико-технічних даних зарядів світлочутливих вибухових речовин: від концентрації речовини полімерної матриці, масової щільності СВР, залежності чутливості енергонасичених вибухових композитів від радіусу лазерного пучка

Головним результатом для практики є встановлений фізичний ефект, що складається в тому, що індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання; закономірність впливу інертних домішок на час запалювання СВР, які є ефективними уловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання; вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

Таким чином, для досліджуваних СВР встановлено залежність часу затримки запалювання світлочутливих вибухових композитів від щільності енергії лазерного випромінювання має експотенційний характер, тобто час затримки збільшується з зменшенням щільності енергії.

Слід відмітити чітку структурування матеріалу, що вказує на розуміння загальної проблеми і задовільні знання автора.

Робота виконана на високому технічному рівні, із залученням сучасних методів фізичних досліджень, відповідає встановленим вимогам, що пред'являються до магістерських дипломів.

Ступінь самостійності виконання роботи задовільна.

Робота в цілому заслуговує оцінки «відмінно».

Науковий керівник,
д.т.н., професор кафедри:
будівництва, геотехніки і геомеханіки

Соболев В.В.

Рецензія на магістерську дипломну роботу
«ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО МОНОІМПУЛЬСУ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ПЕРВИННИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН»
студента групи 184м-17-1
Лісовського Валерія Валерійовича

Лазерне ініціювання забезпечує високий рівень надійності та безпеки виконання підривних робіт у космічній та, машинобудівній галузях, у наукових дослідженнях. Але особливо велика увага приділяється удосконаленню технології підривних робіт при видобуванні рудних і нерудних корисних копалин. Особливість цих робіт полягає у використанні великих мас вибухових речовин, підвищенні безпеки робіт, економічної ефективності, у використанні сучасних відносно безпечних та надійних систем ініціювання зарядів вибухових речовин, зниженні собівартості видобутку сировини і кінцевого продукту

Розробка засобів ініціювання для лазерних систем сприяють підвищенню ефективності управління процесом підривання зарядів вибухових речовин. Можливість підняти підривні роботи на якісно новий рівень – прецизійно, послідовно і програмно керувати передачею лазерною енергією може здійснюватися не тільки безпосередньо світловодами, але й на відстані через повітряну атмосферу. Таким чином у всіх випадках головна роль належить світлочутливим первинним вибуховим речовинам.

Мета роботи - встановлення закономірностей впливу лазерного випромінювання на фізико-хімічні перетворення світлочутливих вибухових речовин.

Слід відмітити основні результати роботи, які зводяться до наступного. 1. Чутливість енергонасичених вибухових композитів (СВР) залежить від радіусу лазерного пучка: чим менше радіус, тим більше густина енергії запалювання. Цей результат співпадає з даними відомих робіт, присвячених дослідженню (розмірного ефекту) залежності порогу ініціювання від розміру опромінюваної зони. При збільшенні вмісту зв'язуючої компоненти (полімеру) густина енергії запалювання зменшується, досягаючи мінімального значення, а потім зростає при подальшому збільшенні концентрації полімеру.

2. Індукційний час запалювання СВР визначається часом формування осередків запалювання, а час переходу від горіння до детонації складає порівняно невелику частину від загального часу затримки запалювання; закономірність впливу інертних домішок на час запалювання СВР, які є ефективними уловлювачами радикалів, що утворюються на стадії ініціювання; вони гальмують розвиток цепних реакцій окислення на початкових стадіях розкладання СВР і тому збільшують індуктивний період запалювання.

Цінність роботи полягає у використанні одержаних наукових результатів в технологіях синтезу нових світлочутливих вибухових композицій для оптичних детонаторів з використанням таких фізичних характеристик як час затримки запалювання світлочутливих ВР, вплив розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість первинних ВР та підтвердження прояву розмірного ефекту при лазерному ініціюванні. Ці результати є важливими як з наукової точки зору, так із практичних міркувань.

Вважаю, що дипломна робота заслугоує оцінки "відмінно".

Д-т техн. наук, професор кафедри.
Підземної розробки родовищ Національного
Технічного університету
«Дніпровська політехніка»

Хоменко О.Є.