

УДК 662.215.4

doi: [10.31474/1999-981X-2018-1-170-177](https://doi.org/10.31474/1999-981X-2018-1-170-177)

В.І. Зазимко
О.Л. Кириченко
В.В. Кулівар
О.В. Скобенко

ВПЛИВ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН НА ПРОЦЕС ОСЕРЕДКОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

Метою роботи є розвиток модельних уявлень про механізм запалення лазерним імпульсом конденсованих вибухових речовин.

Методика досліджень включає експериментальні та теоретичні дослідження із застосуванням аналітичних методів, теорії імовірності, статистичної фізики, математичного моделювання. Використано експериментальну технологію підготовки та виготовлення енергоємних вибухових композитів. У фізичних дослідженнях використовувалися оптична та електронна мікроскопія, електронний парамагнітний резонанс, методи реєстрації затримки запалювання вибухового перетворення.

Результати досліджень. Проаналізовано відомі результати експериментальних досліджень в області впливу дії імпульсного лазерного випромінювання з оптично прозорими діелектриками, в тому числі і вибуховими речовинами. Фізичні особливості утворення руйнувань в матеріалах враховані при моделюванні лазерного запалювання вибухових речовин. Отримали розвиток модельні уявлення про механізм запалювання лазерним імпульсним випромінюванням конденсованих вибухових речовин, у тому числі енергонасичених вибухових композитів – світлочутливих первинних вибухових речовин для засобів ініціювання лазерних систем.

Наукова новизна. Розроблено новий фізичний механізм запалювання бризантних вибухових речовин лазерним імпульсним випромінюванням. Встановлено, що під час лазерної дії відбувається розігрівання оптичних мікронеоднорідностей, теплообмін яких з навколишньою речовиною призводить до запалювання вибухової речовини, якщо до цього моменту часу не сталося утворення мікротріщини. В роботі утворення тріщин розглядається як чинник гасіння процесу запалювання.

Практичне значення. Аналіз результатів експериментальних досліджень і теоретичних оцінок показує, що енергоємні вибухові композиції можуть бути окремим класом первинних вибухових речовин для створення безпечних засобів ініціювання і розробки нових лазерних технологій проведення вибухових робіт.

Ключові слова: лазер, запалювання, осередок, вибухова речовина, руйнування, тріщинуватість, математичне моделювання

Вступ.

За даними експериментальних досліджень вибухові речовини (ВР) є прозорими для лазерного випромінювання [1-5], при цьому типовими ефектами при лазерній дії на прозорі діелектрики являється руйнування матеріалу з утворенням тріщин і каверн, за яке відповідальними вважають різні дефекти (чужорідні вклучення, дефекти кристалічної будови). Оптичні неоднорідності мають суттєвий вплив на процес взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, будучи джерелами мікроруйнувань.

Створення лазерних систем ініціювання передбачає прецизійне запалення ВР, а запізнення переходу хімічних реакцій у детонацію суворо обмежується за часом. Утворення тріщин у такому процесі може негативно впливати на час затримки.

Аналіз основних результатів експериментальних досліджень.

На прикладі кристала рубіна методами розсіяння світла і ультрамікроскопії із застосуванням гелій-неонового лазера [6] встановлено, що розсіювальні області в рубіні є нанорозмірними системами. У інших матеріалах осередок розсіювання має розмір декілька мікрометрів. В результаті аналізу експериментальних даних з лазерного руйнування полімерів встановлено середній показник поглинання випромінювання: $10^4 - 10^5 \text{ м}^{-1}$ [7]. З точки зору механізму осередкового запалювання ВР цікавість представляють оптичні мікронеоднорідності передусім первинні ВР як найбільш чутливі речовин до теплових, механічних, електричних та впливу інших фізичних полів.

Наявність вклучень сажі та металів вивчалася в деяких ВР - тротилі, гексогені, октогені [8]. Автори цієї роботи припускають, що вклучення можуть

утворитися за рахунок попадання атмосферних аерозолів; розмір включень складає 10^{-7} – 10^{-6} м [9]. Дефектність мікроструктури задовільно вивчена для первинних ВР – стифнату свинцю, азидів срібла та свинцю. За даними [10] розмір включень може складати не менше 10^{-7} м. Такі ж розміри включень характерні і для стифнату свинцю, що становлять концентрацію близько $2,5 \cdot 10^{12}$ м⁻³.

Багато публікацій присвячено дослідженням процесу розсіювання світла у кристалах, оптичним неоднорідностям, дефектам, особливостям структури та дефектного стану, механізмів утворення дефектів, фазовим перетворенням, аналітичним методам досліджень, використанню методів спектроскопії: комбінаційного розсіювання, ядерного та магнітного резонансу, електронного парамагнітного резонансу тощо. Відомі роботи Закутайлова К. В. (2013), Акрестиної А. С. (200-2014), Габаїна А. А. (2014), Палатнікова М. М. (2012-2017) та багатьох інших.

Наведені експериментальні дані показують, що зазвичай використовувані прозорі кристали, речовини, у тому числі – ВР, є оптично неоднорідними. Причина неоднорідності визначається як фізичними особливостями цієї речовини, так і способом та умовами його приготування.

Створення світлочутливих енергонасичених композитів – нового класу первинних ВР [1, 11-15] для засобів ініціювання лазерних систем [16-21] стимулювало дослідження фізико-хімічних особливостей і вибухових характеристик ініціюючих ВР, у тому числі робіт по пошуку нових світлочутливих сполук до дії лазерного випромінювання. Необхідність проведення таких досліджень обумовлена головним чином безпечністю застосування первинних ВР на практиці.

Нині лазерне ініціювання вибухових речовин успішно використовується на деяких підприємствах машинобудівного і гірничо-металургійного комплексу, в піроавтоматиці космічних апаратів та інших систем [1, 11]. Вимога практики полягає в створенні максимально безпечної, надійної, прецизійної системи ініціювання, що перевершує за своїми технічними характеристиками відомі світові зразки інших систем. Досягнення подібного результату стане можливим у разі

синтезу первинних ВР, що характеризуються високою світлочутливістю, потужністю, відносною безпекою у поводженні, низькою чутливістю до теплових і різних механічних дій.

Актуальність цього напрямку полягає у фундаментальному характері фізичних процесів, що протікають у ВР під час лазерного нагрівання оптичних мікронеоднорідностей. Одержані нові знання необхідні для обґрунтування математичної моделі осередкового запалювання ВР. На основі експериментальних результатів та модельних уявлень розробляються технології синтезу нових світлочутливих первинних ВР та створюються нові засоби ініціювання ВР.

Методи досліджень.

Включають експериментальні та теоретичні дослідження із застосуванням аналітичних методів, теорії імовірності, статистичної фізики, математичного моделювання. У фізичних дослідженнях використовувалися оптична та електронна мікроскопія, електронний парамагнітний резонанс, методи реєстрації затримки запалювання вибухової речовини.

Мета досліджень.

Розвиток модельних уявлень про механізм запалення лазерним імпульсом конденсованих ВР.

Виклад основного матеріалу.

Поглинання лазерного випромінювання призводить до нагріву мікронеоднорідності, а також довкілля шляхом звичайної теплопровідності. При цьому можна нехтувати тепловим опором на поверхні розділу включення – ВР, оскільки теплове розширення частинки під час дії світлового імпульсу створює на цій поверхні хороший контакт.

Нагрів мікронеоднорідності до температури, яка потрібна для запалювання ВР, очевидно, супроводжується фазовим переходом – плавленням шару ВР, що контактує з включенням, а також плавленням матеріалу включення, якщо відповідна температура фазового переходу нижча за температуру запалювання. Наприклад, температура плавлення свинцевого включення $T_{\text{п}} = 327,3$ °С, тому в умовах лазерного запалювання азиду свинцю такі

включення будуть в розплавленому стані. Вуглецеві включення, очевидно, в тих же умовах не зазнаватимуть фазового перетворення.

З величин теплоти плавлення і теплоємності, узятих за нормальних умов, витікає, що плавлення, наприклад, свинцю потребує такої ж кількості тепла, як нагрівання на 450 К ($\Delta H_m = 23$ кДж/кг, $C_p = 0,13$ кДж/кг [22]), а плавлення тетразену відповідає нагріву на 352 К [4] ($\Delta H = 81,6$ кДж/кг, $C_p = 1,09$ кДж/кг). Тому в першому наближенні можна нехтувати витратами тепла на плавлення матеріалів включення і ВР.

Нагрівання включення лазерним випромінюванням не може супроводжуватися випаром речовини, оскільки відсутня межа розділу рідкої і газоподібної фаз. Тому можливе значне перегрівання рідкої фази ВР вище за точку кипіння.

Розглянуті процеси є не єдиними, здатними вплинути на розвиток осередку запалювання ВР при лазерній дії. Найбільш суттєвим, на наш погляд, являється урахування явища утворення мікротріщин поблизу включення за рахунок термонапруження, що виникає в матриці при нагріванні включення лазерним випромінюванням. Причому, як показано в роботі [4], при описі утворення тріщин, обумовленого дією лазерного імпульсу, можна обмежитися наближенням теорії пружності, оскільки цей процес протікає на початковій стадії пластичної деформації речовини.

Рішення математичної моделі. Оцінимо величину термопружної напруги, яка виникає при лазерному нагріві на прикладі свинцевого включення в азиді свинцю. Для простоти розглянемо включення досить великого розміру, щоб можна було нехтувати втратами тепла в матрицю. Вважаємо, що сферична частинка є рівномірно прогрітою до температури T , а температура матриці дорівнює початковій температурі T_n . При таких припущеннях слід очікувати поширення тріщин в напрямках, нормальних до напрямку максимальних розтягуючих напружень, тобто перпендикулярно до поверхні включення. Тому скористаємося виразом для азимутальних напруг, що розтягують [24].

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E_1 a (T - T_n)}{2(1 - 2\nu_2) + E_1/E_2(1 + \nu_2)} \left(\frac{r_0}{r}\right)^3$$

де E_1, E_2 – модулі пружності, ν_1, ν_2 – к коефіцієнти Пуассона, a_1 – коефіцієнт лінійного розширення. Тут і надалі індекс "1" відповідає включенню, індекс "2" – матриці.

Обговорення результатів.

Оцінки показують, що нагрів свинцевої частинки на ~ 670 К призводить до виникнення в азиді свинцю напруги $3 \cdot 10^7$ Па, порівнянних з характеристиками міцності речовини [25]. У розрахунках використовувалися наступні значення величин: $a_1 = 3,13 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$, $\nu_1 = 0,446$, $E_1 = 1,63 \cdot 10^{10} \text{Па}$ [23], $\nu_2 = 0,3$, $E_2 = 4,9 \cdot 10^{10} \text{Па}$ [25]. Наведені оцінки отримані при $r = r_0$. Очевидно, що нехтування теплообміном між включенням і матрицею призводить до суттєвого завищення значення величини розтягуючої напруги σ_{φ} . Частинки, розміри яких менше розмірів прогрітої зони, необхідно нагрівати до більш високої температури для отримання тих же значень σ_{φ} [24].

Відповідно до кінетичної теорії міцності твердих тіл руйнування речовини є складним кінетичним процесом. Розрив міжатомних зв'язків здійснюється тепловими флуктуаціями, а не дією напруги, як це передбачається в теоріях, що не враховують теплового руху атомів речовини. Проте роль механічної напруги надзвичайно є великою і в системі кінетичних уявлень. За відсутності зовнішнього навантаження флуктуації викликають в різних місцях тіла розрив міжатомних зв'язків. Але ці розриви незабаром ліквідуються за рахунок рекомбінації розірваних зв'язків. Додаток до тіла напруг, що розтягують, призводить до зменшення енергії розпаду і різко послаблює ймовірність рекомбінації, віддаляючи один від одного роз'єднані атоми. Розрив окремих зв'язків призводить до гуртування їх один біля одного і локалізації руйнування шляхом утворення тріщин, порожнин і т.п.

Довговічність твердих тіл під навантаженням визначається кінетичним законом [26]

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

де $\tau_0 \sim 10^{-13}$ с – середній період теплових коливань атомів в конденсованих тілах, U_0 – енергія активації руйнування, γ – структурно-чутливий чинник.

На жаль, скористатися кінетичним законом для визначення моменту руйнування вибухових речовин складно у зв'язку з відсутністю експериментальних даних для величин U_0 , γ . Тому будемо вважати, що утворення тріщин поблизу включення відбувається в той момент, коли максимальна розтягуюча напружка перевищить межу міцності речовини $\sigma_{пр}$. За звичайних умов руйнування швидкість поширення тріщин завжди менше за швидкість пружних хвиль в матеріалі. Це пов'язано з тим, що поширення тріщин відбувається з поглинанням енергії. Швидкість поширення тріщини залежить від швидкості, з якою може передаватися енергія до фронту зростаючої тріщини. У звичайних умовах навантаження, що призводить до руйнування матеріалу, прикладається на досить великій відстані від кінця тріщини, і енергія у такому випадку повинна передаватися до кінця тріщини через матеріал. При лазерному руйнуванні, як показано в роботі [4] на прикладі КСІ, поширення тріщини відбувається з надзвуковою швидкістю. Для цього необхідно, щоб енергія передавалася до кінця тріщини з надзвуковою швидкістю, що можливо при взаємодії матеріалу у кінці тріщини з хмарою випарованої речовини, що розлітається.

Прийнявши швидкість поширення тріщини рівною 10^3 м/с, отримуємо, що час розкриття тріщини розміром ~ 1 мкм складає $\sim 10^{-9}$ с. Це набагато (у 30 разів) менше тривалості лазерної дії.

Очевидно, що подібні процеси повинні мати місце і при лазерному нагріві включення, що знаходиться у вибуховій речовині. Рідка фаза ВР знаходиться в перегрітому стані, тому при утворенні порожнини, а отже, вільної поверхні відбувається швидке випаровування речовини. Це неминуче призведе або до порушення теплового контакту включення

(а, отже, зриву процесу запалювання) за рахунок випаровування прогрітого шару ВР, або випаровування самого поглинаючого центру. Кількість тепла, що необхідна для випаровування, наприклад, ТЕНу відповідає перегріванню на 530 К ($C = 1130$ Дж/(кг·К), $\Delta H_s = 296$ кДж/кг). Наведена величина перегрівання значно нижче температури, при якій можливе запалювання ВР в умовах лазерного нагріву оптичних мікронеоднорідностей.

Такі уявлення про вплив утворення тріщин на процес лазерного запалювання ВР не суперечать експериментальним роботам, присвяченим вивченню оптичного пробою в прозорих діелектриках [4]. У цих роботах показано, що тріщина, яка утворилася, не поглинає енергію лазерного випромінювання, залишаючись тільки джерелом розсіювання випромінювання. Окрім цього, в роботі [27] показано, що опромінення вибухової речовини ТНРС лазерним імпульсним випромінюванням, щільність енергії якого нижча за критичну, призводить до утворення мікротріщин, що залишаються в незмінному стані при повторному опроміненні.

Для уточнення механізму утворення тріщин важливе значення мають результати робіт, в яких досліджувалося утворення тріщин при дії лазерного випромінювання на ВР (у ТЕНі, ТНРС, вторинних ВР) в умовах впливу зовнішнього тиску, на температуру самозаймання і енергію активації октогену [5, 10, 28]. Зокрема, в цитованих роботах досліджувався зв'язок напружки з орієнтацією тріщин за різних умов навантаження зразків. При досить великій стискуючій нарузі тріщини поширюються паралельно напрямку дії зовнішньої сили.

Висновки.

В умовах рівнокомпонентного об'ємного стискування речовини витрати лазерної енергії на ініціювання процесу утворення тріщин зростають.

Запропоновано наступний механізм запалювання бризантних ВР лазерним імпульсним випромінюванням. Під час лазерної дії відбувається розігрівання оптичних мікронеоднорідностей, теплообмін яких з навколишньою речовиною призводить до запалювання ВР, якщо до цього моменту часу не сталося утворення мікротріщини. Іншими словами, утворення тріщин

розглядається як чинник гасіння процесу запалювання.

Аналіз результатів експериментальних досліджень та приведений матеріал показує, що енергоємні вибухові композиції можуть бути окремим класом первинних вибухових речовин для створення безпечних засобів ініціювання і розробки нових лазерних технологій проведення вибухових робіт.

Список літератури

1. Илюшин М. А., Судариков А. М., Целинский И. В. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях. Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2010. 188 с.
2. Chernaj A. V., Sobolev V. V., Pyushin M. A. Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coating. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1994. Vol. 30, No. 2. P. 239–242.
3. Laser ignition of explosive compositions based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-copper(II) perchlorate / Chernaj A. V., Sobolev V. V., Chernaj V. A., Pyushin M. A., Dlugashek A. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2003. Vol. 39, No. 3. P. 335–339.
4. Миркин Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. М.: Из-во МГУ, 1975. 382 с.
5. Поверхностное разрушение лазерных кристаллов рубина / Данилейко Ю. К., Маненков А. А., Прохоров А. М. [и др.]. *Труды ФИАН*. 1978. Т. 101, № 1. С. 9-21
6. Данилейко Ю. К., Маненков А. А., Прохоров А. М., Ханмов-Мальков В. Я. Поверхностное разрушение кристаллов рубина лазерным излучением. *ЖЭТФ*, 1970. Т. 58, Вып. 1. С. 31–36.
7. Маненков А. А., Нечитайло В. С., Прохоров А. С. Анализ механизма лазерного разрушения прозрачных полимеров, связанного с их вязкоупругими свойствами. *Квантовая электроника*. 1981. №4. С. 838–842.
8. Страковский Л. Г. Об очаговом механизме зажигания некоторых вторичных ВВ монохроматичным световым импульсом. *Физика горения и взрыва*. 1985. №1. С.41–44.
9. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.
10. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых телах. ПМА.: Из-во Иностранная литература, 1962. 244 с.
11. Илюшин М. А., Целинский И. В., Судариков А. М. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций: монография. СПб: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2006. 150 с.
12. On the mechanism of ignition of energetic materials by a laser pulse / Chernaj A. V., Sobolev V. V., Pyushin M. A., Zhitnev N. E., Petrova N. A. *Chemical Physics Reports*. 1996. Vol. 15, No. 3. P. 457–462.
13. Соболев В. В., Чернай А. В. Явище аномально високої чутливості вибухових сполук до детонаційного перетворення при дії лазерного моноімпульс. *Наукові записки АН ВШУ*. К.: Хрещатик. 1998. Вип. 1. С. 289–296.

14. Соболев В. В., Чернай А. В. Фізико-хімічні особливості взаємодії лазерного випромінювання з вибуховими сполуками. *Науковий вісник Національної гірничої академії України*. 1998. №2. С.66–69.

15. Chernaj A. V., Sobolev V. V. Laser method of profiled detonation wave generation for explosion treatment of materials. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 1995. No. 5. P. 120–123.

16. Sobolev V., Chernaj A., Studinski N. OPSIN – a new system of blast-hole change blasting in explosives. *5-th International symposium on mine planning and equipment + selection*. San Paulo, Brazil, 1996. P. 441–443.

17. К вопросу о разработке системы лазерного взрывания зарядов ВВ / Соболев В. В. [и др.]. *Высокоэнергетическая обработка материалов*. Днепропетровск: АРТ ПРЕСС, 1997. С. 63–67.

18. Илюшин М. А., Соболев В. В., Чернай В. А. Иницирующие взрывчатые вещества и составы в оптических системах инициирования пиростреда. *Науковий вісник НГА України*. 2001. №1. С.73–76.

19. Sobolev V., Chernaj A. Physics and Chemistry of Materials Treatment. Scientific Reports of Mining, Metallurgy and Materials in Ukraine. *Freiberger Forschungshefte*, 2008. P. 47–58.

20. Соболев В. В., Чернай А. В., Оболонский Р. В. Элементы оптической системы инициирования зарядов взрывчатых веществ. Перспективы освоения подземного пространства: матер. 5-й междунар научно-технич. конф. аспири и студ. 7-8 апреля 2011. Д.: НГУ, 2011. С.114–117.

21. Сазонникова Н. А. Лазерное инициирование детонации высокоэнергетических веществ. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG, 2013. 257 с.

22. Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кикоина. Москва: Атомиздат, 1976. 1006 с.

23. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. Москва: Наука, 1968. 255 с.

24. Чернай А. В. О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом. *Физика горения и взрыва*. 1996. №6. С. 62–69.

25. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. Москва: Наука, 1968. 174 с.

26. Регель В. Р., Слуцнер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. Москва: Наука, 1974. 560 с.

27. Барановский А. М. Оптика и особенности инициирования ТНРС лазерным моноимпульсом. *Гидродинамика взрыва*. Новосибирск : Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. С. 33–39.

28. Ципилев В.П., Морозова Е.Ю., Скрипин А.С. Лазерное инициирование порошков ТЭНа в условиях объемного сжатия. *Известия Томского политехнического университета*. 2010. № 4. С. 149–155.

References

- 1 Pyushin M. A., Sudarikov A. M., Tselinsky I. V. (2010), "Metal Complexes in Energetic Formulations". A.S. Pushkin Leningrad State University, St. Petersburg ["Metallokompleksy v vysokoenergeticheskikh kompozitsiyakh. Sankt-Peterburg: LGU im. A. S. Pushkina"], pp. 188 (in Russian)].

2. Chernai A. V., Sobolev V. V., Ilyushin M. A., Zhitnik N. E. (1994), "Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coating", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 30, No. 2, pp. 239-242.
3. Chernai A. V., Sobolev V. V., Chernai V. A., Ilyushin M. A., Dlugashek A. (2003), "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*, Vol. 39, No. 3, pp. 335-339.
4. Mirkin L.I. (1975), "Physical basis of processing materials with laser beams", ["Fizicheskiye osnovy obrabotki materialov luchami lazera"], M.: Izvo MGU, pp. 382. (in Russian)].
5. Danileiko Y. K., Manenkov A. A., Prokhorov A.M. et al. (1978), "Surface destruction of laser crystals of ruby", ["Poverkhnostnoye razrusheniye lazernykh kristallov rubina"]. *Trudy Fizicheskogo instituta AN SSSR*, Vol. 101, No. 1, pp. 9-31 (in Russian)].
6. Danileiko Y. K., Manenkov A. A., Prokhorov A. M., Khaimov-Malkov V. Ya. (1970), "Surface destruction of ruby crystals by laser radiation", ["Poverkhnostnoye razrusheniye kristallov rubina lazernym izlucheniym"], *Zh. eksper. i teor. Fiziki*, Vol. 58, No. 1, pp. 31-36 (in Russian)].
7. Manenkov A. A., Nechitailo V. S., Prokhorov A. S. (1981), "Analysis of the mechanism of laser destruction of transparent polymers associated with their viscoelastic properties", ["Analiz mekhanizma lazernogo razrusheniya prozrachnykh polimerov, svyazannogo s ikh vyazkouprugimi svoystvami"], *Kvantovaya elektronika*, No. 4, pp. 838-842 (in Russian)].
8. Strakovsky L.G. (1985), "On the focal mechanism of the ignition of some secondary explosives by a monochromatic light pulse", ["Ob ochagovom mekhanizme zazhiganiya nekotorykh vtorichnykh VV monokhromatichnym svetovym impul'som"], *Fiz. goren. i vzryva*, No. 1, pp. 41-44 (in Russian)].
9. Zuev V. E. (1970), "Propagation of visible and infrared waves in the atmosphere", ["Rasprostraneniye vidimyykh i infrakrasnykh voln v atmosfere"], *M.: Sovetskoye radio*, pp. 496 (in Russian)].
10. Bowden F., Yoffe A. (1962), "Fast reactions in solids", ["Bystryye reaktsii v tverdykh telakh"], *PMA.: Iz-vo Inostrannaya literatura*, pp. 244 (in Russian)].
11. Ilyushin M.A., Sudarikov A. M., Tselinsky I. V. (2006), "Development of components of high-energy compositions (Monograph)", ["Razrabotka komponentov vysokoenergeticheskikh kompozitsiy (Monografiya)"], SPb: LGU im. A.S. Pushkina, pp. 150 (in Russian)].
12. Chernai A. V., Sobolev V. V., Ilyushin M. A., Zhitnev N. E., Petrova N. A. (1996), "On the mechanism of ignition of energetic materials by a laser pulse", *Chemical Physics Reports*, Vol. 15, No. 3, pp. 457-462.
13. Sobolev V. V., Chernay A. V. (1998), "The phenomenon of abnormally high sensitivity of explosive compounds to detonation transformation under the action of a laser monopulse", ["Yavyshche anomal'no vysokoyi chutlyvosti vybukhovyykh spolkuk do detonatsiynoho peretvorenniya pry diyi lazernoho monoimpul'sa"], *Naukovi zapysky AN VSHU. Vyp. 1. K.: Khreshchatyk*, pp. 289-296 (in Ukrainian)].
14. Sobolev V. V., Chernay A. V. (1998), "Physical-chemical features of the interaction of laser radiation with explosive compounds", ["Fizyko-khimichni osoblyvosti vzayemodiyi lazernoho vyrominyuvannya z vybukhovymy spolkukamy"], *Nauk. visnyk Natsional'noyi hirnychoyi akademiyi Ukrayiny*, No. 2, pp. 66-69 (in Ukrainian)].
15. Chernaj A. V., Sobolev V. V. (1995), "Laser method of profiled detonation wave generation for explosion treatment of materials", *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 5, pp. 120-123.
16. Sobolev V., Chernay A., Studinski N. (1996), "OPSIN – a new system of blast-hole change blasting in explosives", *5-th International symposium on mine planning and equipment + selection*. San Paulo, Brazil. pp. 441-443.
17. Sobolev V.V. et al. (1997), "To the issue of the development of a laser explosion system for explosive charges", ["K voprosu o razrabotke sistemy lazernogo vzryvaniya zaryadov VV"], *Vysokoenergeticheskaya obrabotka materialov. Dnipropetrovsk: ART PRESS*, pp. 63-67 (in Russian)].
18. Ilyushin M. A., Sobolev V. V., Chernai V. A. (2001), "Initiating explosives and compounds in optical systems of initiation of pyroresources", ["Initsiirovaniye vzryvchatykh veshchestv i sostavy v opticheskikh sistemakh initsiirovaniya pirosredstv"], *Naukoviy visnik NGA Ukraini*, No. 1, pp. 73-76 (in Russian)].
19. Sobolev V., Chernay A. (2008), "Physics and Chemistry of Materials Treatment", *Scientific Reports of Mining, Metallurgy and Materials in Ukraine.– Freiburger Forschungshefte*, pp. 47–58.
20. Sobolev V. V., Chernai A. V., Obolonsky R. V. (2011), "Elements of the optical system for initiation of charges of explosives", ["Elementy opticheskoy sistemy initsiirovaniya zaryadov vzryvchatykh veshchestv"], *Perspektivy osvoyeniya podzemnogo prostranstva: mater. 5-y mezhdunar nauchno-tehnicheskaya konferentsiya aspirantov i studentov, D: NGU*, pp. 114-117 (in Russian)].
21. Sazonnikova N. A. (2013), "Laser initiation of detonation of high-energy substances", ["Lazernoye initsiirovaniye detonatsii vysokoenergeticheskikh veshchestv"], *Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG*, 257 p. (in Russian)].
22. (1976), "Tables of physical quantities", ["Tablitsy fizicheskikh velichin"], *Pod red I. K. Kikoina. – Moskva: Atomizdat*, pp. 1006 (in Russian)].
23. Belyaev A. F. (1968), "Combustion, detonation and work of explosion of condensed systems", ["Goreniye, detonatsiya i rabota vzryva kondensirovannykh sistem"], *Moskva: Nauka*, pp. 2558 (in Russian)].
24. Chernai A. V. (1996), "About the mechanism of ignition of condensed secondary explosives by a slip pulse", ["O mekhanizme zazhiganiya kondensirovannykh vtorichnykh VV lazernym impul'som"], *Fizika goreniya i vzryva*, No. 6, pp. 62-69 (in Russian)].
25. Afanasiev G. T., Bobolev V. K. (1968), "Initiation of solid explosives by impact", ["Initsiirovaniye tverdykh vzryvchatykh veshchestv udarom"], *Moskva: Nauka*, pp. 174 (in Russian)].
26. Regel V. R., Slutskner A. I., Tomashevsky E. E. (1974), "The kinetic nature of the

strength of solids", ["Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel"], *Moskva: Nauka*, pp. 560 (in Russian)].

27. Baranovsky A. M. (1986), "Optics and Isolation of TNRS Initiation by Laser Monopulse", ["Optika i osobennosti initsirovaniya TNRS lazernym monoimpul'som"], *Hydrodynamics of Explosion. Novosibirsk: Institute of Hydrodynamics SO AN SSSR*, pp. 33-39 (in Russian)].

28. Tsipilev V. P. Morozova E. Y., Skripin A. S. (2010), "Laser initiation of powders of PETN under conditions of volumetric compression", ["Lazernoye initsirovaniye poroshkov TENa v usloviyakh ob'yemnogo szhatiya"], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, No. 4, pp. 149-155 (in Russian)].

Надійшла до редакції 03.06.2018

Рецензент д-р. техн. наук, проф. С.В. Подкопаєв.

Зазимко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та будівництва Донецького національного технічного університету (м. Покровськ Донецької обл., пл. Шибанкова, 2).

E-mail: velo1947@ukr.net

Кириченко Олексій Леонідович – кандидат технічних наук, головний технолог, Державне підприємство «Науково-виробниче об'єднання «Павлоградський хімічний завод» (м. Павлоград Дніпропетровської обл., 51400, вул. Заводська, 44).

E-mail: alekseyphz@gmail.com.

Кулівар Вячеслав Вячеславович – аспірант кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро 49005, пр. Д. Яворницького, 19).

E-mail: kulivarslavik@gmail.com

Скобенко Олександр Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро 49005, пр. Д. Яворницького, 19).

E-mail: skobenkoavdn@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС ОЧАГОВОГО ЗАЖИГАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Целью работы является развитие модельных представлений о механизме зажигания лазерным импульсом конденсированных взрывчатых веществ.

Методика включает экспериментальные и теоретические результаты исследований с применением аналитических методов, теории вероятности, статистической физики, математического моделирования. Использована экспериментальная технология подготовки и изготовления энергоемких взрывчатых композитов. В физических исследованиях использовались оптическая и электронная микроскопия, электронный парамагнитный резонанс, методы регистрации задержки зажигания взрывчатого превращения.

Результаты. Проанализированы известные результаты экспериментальных исследований в области влияния действия лазерного излучения с оптически прозрачными диэлектриками, в том числе и взрывчатыми веществами. Физические особенности образования разрушений в материалах учтены при моделировании лазерного зажигания взрывчатых веществ. Получили развитие модельные представления о механизме зажигания лазерным импульсным излучением конденсированных взрывчатых веществ, в том числе, энергонасыщенных взрывчатых композитов – светочувствительных первичных взрывчатых веществ для средств иницирования лазерных систем.

Научная новизна. Разработан новый физический механизм зажигания бризантных взрывчатых веществ лазерным импульсным излучением. Установлено, что во время лазерного воздействия происходит разогрев оптических микронеоднородностей, теплообмен которых с окружающим веществом приводит к зажиганию взрывчатого вещества, если к этому моменту времени не произошло образование микротрещины. В работе образование трещин рассматривается как фактор подавления процесса зажигания.

Практическое значение. Анализ результатов экспериментальных исследований и приведенный материал показывают, что энергоемкие взрывные композиции могут быть отдельным классом первичных взрывчатых веществ для создания безопасных средств иницирования и разработки новых лазерных технологий проведения взрывных работ.

Ключевые слова: лазер, зажигание, очаг, взрывчатое вещество, разрушение, трещиноватость, математическое моделирование.

Зазимко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та будівництва Донецького національного технічного університету (г. Покровськ Донецької обл., пл. Шибанкова, 2).

E-mail: velo1947@ukr.net

Кириченко Олексій Леонідович – кандидат технічних наук, головний технолог, Государственное предприятие «Научно-производственное объединение «Павлоградский химический завод» (г. Павлоград Днепропетровской обл., 51400, ул. Заводская, 44).

E-mail: alekseyphz@gmail.com

Кулівар Вячеслав Вячеславович, – аспірант кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (г. Дніпро, 49005, пр. Д. Яворницького, 19).

E-mail: kulivarslavik@gmail.com.

Скобенко Александр Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, геотехники и геомеханики, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» (г. Днепр, 49005, пр. Д. Яворницкого, 19).

E-mail: skobenkoavdn@gmail.com

INFLUENCE OF CRACKING ON THE PROCESS OF FOCAL IGNITION FOR EXPLOSIVES

The purpose of the work is the development of model concepts about the mechanism of lighting of the condensed explosives with the help of a laser impulse.

Methodology includes experimental and theoretical researches with the use of analytical methods, the theory of probability, statistical physics and mathematical design theories.

There is used the experimental technology of preparation and making power-hungry explosive compos. An optical and electronic microscopy, electronic paramagnetic resonance, methods of registration of delay of lighting the explosive were used in physical researches.

The results. The earlier known results of experimental researches are analysed in the area of influence of action of impulse laser radiation with an optically transparent dielectrics, including explosives. The physical features of formation of destructions in materials are taken into account at the design of the laser lighting of explosives. There got the development of model concepts about the mechanism of lighting of condensed explosives with the laser impulse.

Scientific novelty. The new physical mechanism of lighting of brisant explosives with the help of laser impulse radiation is worked out. It is set that during a laser action there is heating of heterogeneities the heat exchange of which with a surrounding substance results in lighting of the explosive, if formation of a tiny crack did not happen to this moment of time. In this advanced study formation of cracks is examined as a factor of extinguishing of lighting process.

Practical value. The analysis of results of experimental researches and theoretical estimations shows that power-hungry explosive compositions can be a separate class of primary explosives for creation of safe facilities of initiation as well as for the development of laser NT when conducting explosive works.

Key words: laser, lighting, cell, explosive, destruction, formation of cracks, mathematical design.

V. Zazimko – candidate of technical sciences, associate professor the Department of Geodesy and Construction of Mining of Donetsk National Technical University (2, Shybankova Square, 85300 Pokrovsk Donetsk Region).

E-mail: velo1947@ukr.net .

A. Kirichenko – candidate of technical sciences, chief technologist, State Enterprise Research-Industrial Complex «Pavlograd Chemical Plant» (51400, Dnepropetrovsk region, Pavlograd, Zavodskaya St, 44).

E-mail: alekseyphz@gmail.com.

V. Kulivar – postgraduate student of the department of construction, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University Dnipro Polytechnic (49005, Dnipro, D.Yavornitskogo Ave, 19).

E-mail: kulivarslavik@gmail.com

A. Skobenko – candidate of technical sciences, associate professor the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University Dnipro Polytechnic (49005, Dnipro, D.Yavornitskogo Ave, 19)

E-mail: skobenkoavdn@gmail.com.