

# Том 7

# Геомеханіка

УДК 541.8 002+661

**Кулівар В.В.** аспірант кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки  
**Науковий керівник: Соболев В.В., д.т.н., професор кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки**  
*(Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ, Україна)*

## **ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗЛУЧЕНИЕМ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА**

Взрывание зарядов промышленных ВВ. Лазерное инициирование в настоящее время успешно используется в управлении пиросредствами космических аппаратов и ракет различного назначения, в научных исследованиях. Актуальным является применение в машиностроении: сварка, штамповка, упрочнение, синтез новых материалов, в горно-металлургической отрасли. При этом лазерное инициирование открывает принципиально новые возможности в решении проблем повышения надежности и безопасности использования высокоэнергетических материалов. Это обстоятельство обуславливает интерес к исследованию данного явления.

К концу 80-х прошлого столетия имелись все предпосылки для создания безопасной, надежной и прецизионной, экономически и технологически эффективной системы инициирования зарядов взрывчатых веществ лазерным излучением. Так был разработан ряд способов возбуждения детонации в зарядах ВВ с помощью кристаллов циркона, металлических фольг и проволочек, взрывающихся при действии мощного лазерного моноимпульса. Однако оказалось, что этого явно было недостаточно для решения проблемы лазерного инициирования. Необходимо было создать такие светочувствительные высокоэнергетические композиции, которые бы позволяли применять лазерные системы при проведении массовых взрывов и во многих других технологических процессах, отличаясь высокой гибкостью и способностью удовлетворять любые новые требования со стороны различных промышленных производств. Другими словами, требовалась новая система инициирования с большим физико-техническим потенциалом.

Изучение процесса зажигания ВВ импульсными потоками света началось в шестидесятые годы прошлого столетия. В качестве источников света использовались кварцевые импульсные лампы, сильноточный искровой разряд в воздухе, фронт ударной волны. Длительность световых импульсов находилась в пределах  $10^{-3} \dots 10^{-6}$  с. Изучалось действие света на азиды серебра, свинца, нитрид серебра, ТЭН, стифнат свинца и другие вещества. Результаты исследований наиболее подробно изложены в работах Ф.Бодена, А.Иоффе и Д.Росса.

Для исследования и разработки механизма зажигания были измерены спектры поглощения ряда инициирующих ВВ. Так, азид серебра использовался в виде тонких прозрачных пластинок толщиной  $0,1 \dots 0,01$  мм, измерения показали, что при комнатной температуре это вещество сильно поглощает свет с длиной волны меньше  $\lambda=0,35$  мкм. Коэффициент поглощения при  $\lambda=0,3$  мкм составляет примерно  $10^3 \text{ см}^{-1}$  и резко увеличивается при дальнейшем уменьшении длины волны. При  $\lambda>0,385$  мкм, вплоть до ближней инфракрасной области спектра, поглощение невелико. Подобные результаты получены и для других взрывчатых веществ, таких как азиды таллия, свинца, фульминат серебра, стифнат свинца, ТЭН и др].

В результате исследований инициирования ВВ импульсными источниками света сплошного спектра установлено, что процесс зажигания развивается в поверхностном слое вещества в результате его разогрева ультрафиолетовым и синим излучением.

С появлением оптических квантовых генераторов (ОКГ) в начале 60-х годов прошлого века начались исследования процесса зажигания ВВ лазерным излучением.

Большинство экспериментов проведено с использованием наносекундных (длительность импульса  $\tau=20...50$  нс), микросекундных ( $\tau=0,5...0,7$  мкс) и миллисекундных ( $\tau\sim 1$  мс) импульсов неодимового ( $\lambda =1,06$  мкм) и рубинового ( $\lambda =0,69$  мкм) лазеров, табл. 1.

Таблица 1

## Критические плотности энергии зажигания ВВ лазерным импульсом

Наименование ВВ	Длина волны излучения $\lambda$ , мкм	Длительность импульса $\tau$ , с	Пороговая плотность энергии зажигания $E_{кр}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Комментарий	Авторы
Азид серебра	1,06	$5 \cdot 10^{-8}$	0,02	Свободная поверхность. Давление прессования $P_{пр}=0,5 \cdot 10^8$ Па	Ю.Карабанов, В.Боболев, 1981
-"-	-"-	$10^{-3}$	2,1	-"-	
Азид свинца	-"-	$5 \cdot 10^{-8}$	0,1	-"-	
-"-	-"-	$10^{-3}$	3,0	-"-	
Гремучая ртуть	-"-	$5 \cdot 10^{-8}$	1,0	-"-	
-"-	-"-	$10^{-3}$	3,0	-"-	
ТНРС	-"-	$5 \cdot 10^{-8}$	0,4	-"-	
-"-	-"-	$10^{-3}$	2,2	-"-	
Азид свинца	-"-	$10^{-3}$	0,8	$P_{пр}=15 \cdot 10^8$ Па	Е.Александров и др., 1978, 1984
-"-	-"-	$0,3 \cdot 10^{-7}$	0,0038	-"-	
-"-	-"-	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0,03	-"-	
-"-	-"-	$6,0 \cdot 10^{-7}$	0,8	Насыпная плотность	А.Бриш и др., 1966
$\beta$ -азид свинца	0,69	$0,8 \cdot 10^{-7}$	0,0015	Монокристаллы 40 мкм $\times$ 200 мкм $\times$ 10 мм	Ј.Нagan b lh/, 1981]
ТЭН	-"-	$4 \cdot 10^{-8}$	15	Давление прижатия: $P_{ВН}=2 \cdot 10^9$ Па	Ю.Карабанов, Г.Афанасьев, В.Боболев, 1977
-"-	-"-	$4 \cdot 10^{-8}$	1000	$P_{ВН}=107$ Па	
-"-	0,69	$3 \cdot 10^{-8}$	0,013	$P_{ВН}=14 \cdot 10^8$ Па	
-"-	1,06	$3 \cdot 10^{-9}$	1000-10000	Свободная поверхность	
Октоген	0,69	$3 \cdot 10^{-8}$	15	$P_{ВН}=10^7$ Па	
Гексоген	-"-	-"-	30	-"-	

Как и следовало ожидать, результаты исследований показывают, что чувствительность к действию лазерного импульса первичных инициирующих ВВ значительно выше, чем чувствительность вторичных ВВ. Другими словами, общепризнанный ряд чувствительности ВВ, в основном, коррелирует с чувствительностью к лазерному воздействию.

Вызывает интерес особенность инициирования вторичных взрывчатых веществ, которая состоит в том, что процессу инициирования способствует наличие вблизи поверхности ВВ стеклянной пластинки, затрудняющей разлет продуктов распада вещества.

Так, в работе А.Волковой и др. (1977), не получен подрыв ТЭНа с открытой поверхности при энергии лазерного излучения в 40 раз превышающей пороговую энергию инициирования со стеклянной пластинкой. Длительность лазерного импульса равнялась 50 нс.

Эффект снижения порога зажигания при наличии прозрачной преграды вблизи поверхности ВВ достигается за счет уменьшения энергопотерь при разгрузке вещества в волне разрежения.

Из табл. 1 следует, что чувствительность ВВ зависит от длительности лазерного импульса. Для всех исследованных веществ замечено, что увеличение длительности импульса приводит к возрастанию порога зажигания.

К факторам, влияющим на иницирование ВВ лазерным излучением, следует отнести и начальную температуру образца. В режиме моноимпульса ( $\tau=30$  нс) влияние температуры нагрева образца на чувствительность не обнаружено. Возможным параметром, влияющим на чувствительность ВВ, может быть длина волны лазерного излучения. Эксперименты показывают, что чувствительности ВВ к действию излучения рубинового и неодимового лазеров, в пределах точности эксперимента, совпадают. Влияние давления прессования на поведение ВВ в поле лазерного излучения изучено в основном для азида свинца. Установлено, что в интервале давлений  $(0,1 \dots 15) \cdot 10^8$  Па в режиме свободной генерации чувствительность азида свинца незначительно повышается с ростом давления прессования. Совершенно иной характер носят эти же зависимости при действии моноимпульса: существуют две четко выделенные области в зависимости от давления прессования:

1– область низкой чувствительности – соответствует малым давлениям ( $P_{пр} < 3 \times 10^7$  Па);

2 – область высокой чувствительности – соответствует высоким давлениям ( $P_{пр} > 15 \times 10^7$  Па).

Для практических целей, а также для понимания механизма зажигания важное значение имеют исследования оптических свойств ВВ. Измерены показатели ослабления  $k_\lambda$  и коэффициенты диффузного отражения  $R_\lambda$  ряда ВВ, табл. 2. Как видно, большая часть излучения на длине волны неодимового и рубинового лазеров отражается от образцов ВВ, а на длине волны  $CO_2$  лазера ( $\lambda=10,6$  мкм) – картина противоположная. Очевидно, что излучение с длиной волны  $\lambda=10,6$  мкм ослабляется в значительно большей степени, чем излучение с длинами волн  $\lambda=1,06$  мкм и  $\lambda=0,69$  мкм. Разброс данных для  $k_\lambda$ , полученных в различных экспериментах, свидетельствует о важной роли процессов рассеяния излучения в образцах ВВ, которые зависят от чистоты, плотности, дисперсности материала.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований механизма зажигания иницирующих ВВ импульсным излучением, проводившиеся главным образом в 60-х годах прошлого столетия, явились фундаментальной основой для развития нового направления в химической физике быстрых реакций, возбуждаемых лазерным импульсным излучением, в целом способ лазерного взрывания зарядов ВВ с использованием штатных иницирующих ВВ не нашел широкого практического применения в связи с отсутствием высокочувствительных к лазерному излучению химических веществ.

В области наук о взаимодействии лазерного излучения с энергонасыщенными светочувствительными веществами и способов их иницирования известно относительно большое число выполненных работ. Теоретические и экспериментальные исследования главным образом выполнялись в СССР (позже в РФ и Украине), США, Китае, Японии и в других странах [1].

Впервые в мировой практике ученые Национального горного университета совместно с коллегами из Санкт-Петербургского технического университета России создали технологию синтеза светочувствительных энергонасыщенных композиций,

изучили процесс инициирования световым импульсом, разработали лазерный метод подрыва. Первый в мире образец экспериментальной системы лазерного инициирования был создан в Национальном горном университете. По оценкам российских специалистов в начале 90-х годов прошлого века научные и практические результаты наших исследований опережали аналогичные работы в США и Японии на 18-20 лет.

Таблица.1

## Показатели ослабления и коэффициенты отражения некоторых ВВ

Наименование ВВ	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Длина волны $\lambda$ , мкм	Показатель ослабления $k_\lambda$ , см <sup>-1</sup>	Коэффициент диффузного отражения $R_\lambda$ , %
ТЭН PETN	1,0	1,06	155	-
ТЭН	-	0,69	-	79
ТЭН	-	1,06	-	81
ТЭН	1,0	0,69	40	-
ОктогенНМХ	1,7	0,36	-	87
Октоген	1,7	1,06	6,6	75
Октоген	-	0,69	20	-
Октоген	-	10,6	120	-
Октоген+ 1% сажи	1,7	0,36	-	87
Октоген+ 1% сажи	1,7	1,06	-	75
Гексоген RDX	-	1,06	5,7	71
Гексоген	-	10,6	175	3,5
Азид свинцаPbN <sub>6</sub>	1,5-2,8	0,69	1200	>90
Азид свинца	-	0,69	-	78
Азид свинца	-	1,06	-	85
Тетрил (нитрамин,тетралит) tetryl	1,5-1,6	10,6	163	5,7
Тетрил	1,62	1,06	18,4	-
Тротил+гексоген (40/60) TNT+RDX (40/60)	1,67	10,6	196	5,2
Тротил-гексоген (40/60)	1,67	1,06	4,3	-

Полученные нами высокочувствительные к действию лазерного моноимпульса взрывчатые составы (критические плотности энергии зажигания находятся в диапазоне (2-40) мДж/см<sup>2</sup>), а также разработанная технология получения твердых покрытий из этих ВС на различных материалах /I/ позволили расширить область применения лазерного метода инициирования. Так, в работе [2] предложен метод испытания прочности материалов и стойкости конструкций к действию механических импульсов суб- и микросекундой длительности, сущность которого заключается в нанесении на исследуемый объект взрывчатого состава в виде покрытия заданной толщины и последующем его облучении(инициировании) лазерным пучком, диаметр которого превышает характерный размер покрытия. Получены плоские волны нагружения, интенсивностью и длительностью которых можно варьировать путем использования разных ВС или изменением концентрации связующего полимера в одном и том же взрывчатом составе.

Дальнейшее развитие лазерного метода нагружения позволило реализовать нагружение материалов и конструкций не только плоской детонационной волной, но и

волнами, профиль фронта которых задается иницированием части поверхности ВС, открытой для лазерного излучения (остальная поверхность закрывается экраном). Таким образом были реализованы скользящая, кольцевые расходящиеся и сходящиеся детонационные волны (ДВ). Метод получения профилированных ДВ апробирован при испытаниях прочности композиционных материалов [3].

Воздействие ударных волн на материалы сопровождается большим разнообразием явлений, вызывающих интерес, как с практической точки зрения, так и с теоретической. В частности, энергия взрыва может быть использована для изменения прочности материала. В производственных условиях, как правило, упрочнение осуществляют скользящей детонационной волной контактных зарядов, а также путем использования косых соударений металлических поверхностей. С другой стороны, упрочнение материалов плоскими ударными волнами упрощает поиск необходимых для упрочнения нагрузок, а также интерпретацию микроструктурных превращений в металлических материалах.

Для решения этой задачи использовалась экспериментальная установка на базе оптического квантового генератора на неодимовом стекле. Длительность импульса 30нс, длина волны 1,06мкм, энергия в импульсе 150мДж. Лазерный луч расширялся до диаметра 25мм. Упрочняемые образцы металлов представляли собой цилиндры высотой 5мм и диаметров 20мм. На одно из оснований цилиндра наносилось покрытие из ВС2 (критическая плотность энергии зажигания  $2,3\text{мДж/см}^2$ ) с поверхностной плотностью массы  $300\text{ мг/см}^2$ .

В качестве исследуемых материалов использовались сталь Ст.45 с исходной твердостью (по Виккерсу)  $3000\text{-}3800\text{ МН/см}^2$  и нержавеющая сталь Х18Н10Т с исходной твердостью  $2900\text{-}3600\text{ МН/см}^2$ .

Предварительно на этих материалах были исследованы зависимости плотности импульса ( $j_s$ ) от массовой плотности покрытия ВС2. Результаты экспериментов показали, что эти зависимости в пределах точности эксперимента совпадают. При массовой плотности ВС2, равной  $m_s=300\text{ мг/см}^2$ , плотность импульса нагружения составляла  $j_s=5\text{ кПа}\times\text{с}$ .

В процессе экспериментов упрочнено по 5 образцов каждого из указанных выше металлов. После нагружения среднее (по пяти образцам) значение твердости для Ст.45 составило  $4600\text{ МН/см}^2$ , для Х18Н10Т –  $5200\text{ МН/см}^2$ . Следует отметить, что значение твердости на поверхности образца практически не изменяется в пределах круга  $\varnothing 18\text{мм}$ .

Использование лабораторного лазера типа ГОС-1001 с энергией в моноимпульсе  $\approx 100\text{ Дж}$  обеспечивает одновременное иницирование поверхности из ВС на площади  $\geq 1\text{ м}^2$ , а, следовательно, лазерный метод иницирования может успешно конкурировать с традиционными методами подрыва ВВ при решении практических задач.

### Библиографический список

1. Илюшин М.А., Судариков А.М., Целинский И.В. и др. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях. – СПб: ЛГУ им. А.С.Пушкина, 2010. – 188 с.
2. О методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов / А.В. Чернай, В.В. Соболев, М.А. Илюшин, Н.Е. Житник // Физика горения и взрыва. – 1994.- Т.30, №2.-С.106-111.
3. Соболев В.В., Чернай А.В. Лазерный метод получения профилированных детонационных волн для обработки материалов взрывом // Физика и химия обработки материалов. – 1995-№5.-С.120-123.

УДК 691.32

**Дичковський Р.О. професоркафедри підземної розробки родовищ***(Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна)***Дупляк М.О. м.н.с теми ГП-472 кафедри підземної розробки родовищ***(Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна)***Семенов А.І. студент кафедри архітектурного проектування***(Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна)*

## **СТРУЖКОБЕТОНИ ЯК НОВІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ТА ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ**

Українське будівництво має багату історію використання різних будівельних матеріалів, незаслужено забутих в сучасному будівництві. Наприклад, використання тирси, очерету, соломи, тощо. В світовому сучасному виробництві будівельних матеріалів вивчаються і використовуються альтернативні матеріали як наповнювачі для бетонів. Дана стаття має за мету висвітлення доцільності дослідження і розроблення бетонної суміші з місцевих дешевих матеріалів перш за все тирси в якості заміника дрібного заповнювача, в виробках, які можуть бути використані для зведення будівель, особливо в приватному житловому будівництві. Робота виконана у рамках реалізації досліджень за проектом ГП-472 на замовлення МОН України. Особливої уваги заслуговує визначення факторів, що впливають на продуктивність тирси в бетоні, як альтернативного дрібного заповнювача, для житлового будівництва, у виробництві новітніх бетонних виробів з місцевих дешевих матеріалів і збереженні навколишнього середовища.

Ключові слова: Будівництво, дрібний заповнювач, пісок, тирса в бетонній суміші, стружкобетон.

Стружкобетон є одним з різновидів бетону, що відрізняється дешевизною, при цілком прийнятних якісних характеристиках, які використовуються в індивідуальному житловому будівництві, де кожен індивідуальний забудовник підходить до виготовлення з точки зору свого розуміння і на основах досвіду практики зведення будинків свого регіону. Основна сфера застосування стружкобетону – виготовлення блоків. Отримані блоки можуть використовуватися як для зведення несучих конструкцій, так і для утеплення стін, фундаментів і інших елементів. В мережі інтернет є достатньо порад виготовлення стружкобетону, і зокрема порад по виготовленню блоків з наповнювачами тирси, соломи, очерету тощо.

У всьому світі, в епоху інформаційної революції та екологічної свідомості спостерігається відродження інтересу до матеріалів які віками застосовувались, як будівельний матеріал, а з розвитком науково-технічної революції і з появою нових матеріалів втратили своє значення. Зокрема до відходів деревообробної промисловості, чи деревини яка є непридатною в основній деревообробній промисловості. При детальному вивченні унікальних фізико-механічних властивостей, обґрунтування техніко-економічних показників, тирса, є нескінченним джерелом рішень для здешевлення житла.

Шукати нові, альтернативні будівельні рішення, спонукає не тільки висока вартість будівельних матеріалів, але й розумний підхід до екології і використання вторинної сировини при виготовленні будівельних матеріалів в певній місцевості. Тому необхідно використовувати альтернативний доступний локальний матеріал для виробництва бетону. Таким чином, вивчення використання місцевих будівельних матеріалів, таких як деревна тирса в якості заміників для дрібного заповнювача в бетоні є одним із перспективних досліджень у виготовленні сучасних будівельних матеріалів.

Однак на будівельному ринку пострадянського простору склалася стійка думка, що стружкобетон це матеріал, продиктований бідністю і нестачею, якому не місце в сучасному будівництві, при цьому, абсолютно не враховується світовий позитивний досвід.

У канадському університеті UNBC (університет північної Британської Колумбії) дослідницька група, у складі професора РонГрінга, АянаХартлі і Соріна Паски при вивченні утилізації гірської сосни ураженої шашелем, запропонували і розробили стружкобетон з властивостями і фанери і бетону. Стінові панелі з такого стружкобетону є зручними тим, що володіють високими шумо- і теплоізоляційними властивостями і на них легко встановлювати підвісні конструкції. Такий стружкобетон легко обробляти. В нього можна забити цвях без попереднього свердління, його можна обробляти звичайними деревообробними інструментами. При тому вони є водонепроникними і міцнішими від багатьох аналогічних продуктів, які є в даний час на ринку. Такі унікальні властивості цього стружкобетону вчені пов'язують із пошкодженням сосни шашелем, яке і забезпечило підвищену адгезію цементу до ураженої сосни. В результаті пошуків утилізації непотрібної деревини канадські вчені отримали будівельний матеріал, який поєднує в собі всі структурні переваги бетону з естетичною якістю дерева. [1]

Стружкобетон, в'язучим матеріалом якого є цемент, є екологічнішим ніж, матеріали, в'язучими яких є смоли.

В вивченні властивостей стружкобетону основним пріоритетом повинно бути забезпечення адгезії компонентів бетону, вивчення можливості створення деревоволокнам адгезії, шляхом синтезу його зв'язку з використанням цементу.[2]

Не вивченим і не висвітленим є забезпечення адгезії з волокнами очерету, соломи і інших придатних для таких цілей матеріалів рослинного походження.

Виготовлення саманної цегли чи глинобитної стіни вивчається на уроках історії в українських школах. В українських селах, саман як несучий і теплоізоляційний матеріал використовують при дрібному приватному будівництві. Новітні технології, досвід українського і світового надбання в використанні екологічно чистих і дешевих матеріалів в виготовленні будівельних виробів можуть вивести українську будівельну індустрію на новий якісний рівень.

Місцеві матеріали сільськогосподарських або промислових відходів, якими може бути тирса, рослини різного призначення такі як очерет чи солома, бетонне сміття, шлаки і попіл, як продукт відходів з ТЕЦ, і так далі, повинні бути предметом вивчення, використання альтернативних будівельних матеріалів, які є доступними на місцях.[3]

Необхідно сприяти скороченню відходів і використання вторинної сировини для виготовлення будівельних матеріалів. Таким чином, з екологічних міркувань розробка і виготовлення будівельних матеріалів з альтернативної сировини сприяє не тільки оптимальному використанню кожної деревини, взятої з природи чи навпаки дбайливе ставлення до природних ресурсів і обмеження добування піску чи щебеню.[4] Це забезпечить економію для лісопереробних підприємств, в утилізації відходів. У той же час це дає широкі можливості для відкриття нового венчурного бізнесу, та залучення до підвищеної підприємницької активності, широких верств населення. Дослідження в галузі використання вторинної сировини для виготовлення будівельних матеріалів вкаже на нові шляхи і можливості для подальшого розвитку, а також спонукатиме майбутніх дослідників в галузі утилізації інших відходів і закликатиме громадськість до більш екологічно свідомого ставлення до переробки та вторинного використання матеріалів і в інших галузях.

## Перелік посилань

1. <http://www.unbc.ca>
2. Tomas U. Ganiron Jr «Effect of Sawdust as Fine Aggregate in Concrete Mixture for Building Construction» International Journal of Advanced Science and Technology Vol.63, (2014), pp. 73-82 електронний ресурс. [http://www.natureplus.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/cert-criterias/GL1005.pdf](http://www.natureplus.org/fileadmin/user_upload/pdf/cert-criterias/GL1005.pdf)
3. T. U. Ganiron Jr, “Concrete Debris as Fine Aggregate for Architectural Finishing Mortar”, Architectural Journal, vol. 2, no. 5, (2012).
4. T. U. Ganiron Jr, “Effect of Rice Husk as Substitute for Fine Aggregate in Concrete Mixture”, International Journal of Advanced Science and Technology, vol. 58, (2013).
5. Попович О.Р., Захарко Я.М., Мальований М.С., Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів (Вісник / Національний університет "Львівська політехніка" ; № 755) 2013.
6. <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/22379/1/59-321-324.pdf>.

УДК 541.8.002; 542.51

**Зазимко В.І., к.т.н., доцент кафедри геодезії і підземних споруд.***(Державний ВНЗ "Донецький національний технічний університет", м. Покровськ, Україна)***Соболев В.В., д.т.н., професор кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки, Іщенко Б.С. аспірант кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки, Кулівар В.В. аспірант кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки, Романова А.С. аспірант кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки***(Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ, Україна)*

## ОПТИЧЕСКОЕ ЗАЖИГАНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ КОМПОЗИТОВ

Взрывчатые вещества (ВВ) или ВС, используемые в качестве инициаторов в оптических детонаторах (ОД) оптических систем иницирования (ОПСИН), прежде всего должны обладать химической стойкостью во время хранения, низкой восприимчивостью к механическим и тепловым воздействиям. Одним из веществ, проявляющих такие свойства, является ди(3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол) медь (II) перхлорат [1] (в дальнейшем будем использовать сокращенное название этого вещества – ГАТР). С целью выяснения возможности использования ГАТР в ОД была разработана технология получения ВС на основе ГАТР и измерены характеристики этих составов относительно действия лазерного моноимпульса.

ВС получали путем приготовления эмульсии кристаллов ВВ в растворе полиметилметакрилата (ПММ) с последующим нанесением ее на поверхность стекла. После испарения быстролетучего растворителя образовывался конденсированный ВС, представляющий собой монолитную массу, состоящую из ВВ и связки (ПММ). Диаметр покрытия из ВС был равен 5-7 мм.

Учитывая тот факт, что порог иницирования зависит от толщины покрытия из ВС [2], экспериментально было установлено, что, начиная с толщины образца  $h \geq 1$  мм, порог зажигания не изменяется при увеличении  $h$ . Поэтому толщина покрытия из ВС составляла 2-3 мм.

Экспериментальная установка создана на базе твердотельного оптического квантового генератора CFR 200-10 PulsedNd:YAG Laser System, произведенного фирмой BigSkyLaser (США). Длина волны излучения 1.064  $\mu\text{m}$ , поляризация вертикальная, максимальная энергия в импульсе 200 мДж, длительность импульса на полувысоте интенсивности 10.1 нс. Лазер работает в импульсно-периодическом режиме с регулируемой частотой генерации в диапазоне  $1.7 \cdot 10^{-2} - 10$  Гц. Частота вспышек лампы накачки постоянная и равна 10 Гц. Появление первого модулированного импульса осуществляется после генерации 20 импульсов лампы вспышки, выход на стабильный режим работы лазера происходит после десяти модулированных импульсов. Диаметр выходного пучка 6 мм, расходимость при энергии в импульсе, составляющей 85.5% от максимальной величины, равняется 2.8 mrad. Схема экспериментальной установки показана на рис.1.

Здесь цифрой 1 обозначен Nd:YAG лазер. Лазерный диод 2 и диафрагма 3 использовались для юстировки оптического тракта, после чего они убирались. С помощью призмы 5 лазерный луч направлялся на ВС 12, нанесенный на стеклянную пластинку 11. Образец, состоящий из ВС и стеклянной пластинки, прикреплялся к алюминиевой пластине 10 толщиной 8 мм, имеющей отверстие диаметром 8 мм для прохождения лазерного излучения. Линза 8 использовалась для изменения диаметра лазерного пучка, падающего на образец. Для защиты линзы и фотодиода 14 от осколков стекла, образующихся при взрыве, между этими приборами и образцом ставился

стеклянный экран 9. Кроме того, образец закрывался кожухом 13. Светофильтры 6 использовались для для изменения энергии лазерного излучения, падающего на образец, при фиксированном расстоянии от ВС до линзы. Для определения энергии применялся измеритель энергии ИЭЛ-300 укомплектован тремя головками, которые обеспечивают измерение в диапазоне 1  $\mu\text{J}$ -300 J, и может быть настроен на измерения энергии излучения на шести длинах волн. При работе в диапазоне 1-100 mJ точность определения энергии не меньше 0.01 mJ.

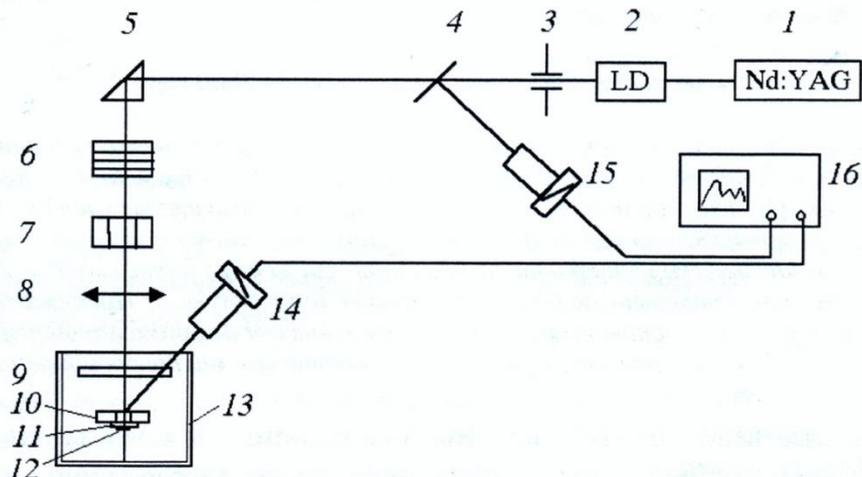


Рисунок. 1. Схема экспериментальной установки

Показания ИЭЛ-300 масштабировались таким образом, чтобы они совпадали с показаниями калориметра OPHIR, измерительная головка которого размещалась на месте установки образца ВС. Погрешность измерения энергии излучения калориметром в диапазоне 1-100 mJ не превышала  $\pm 3\%$ .

Для установления времени задержки зажигания ВС относительно начала действия лазерного импульса использовались фотодиоды 14 и 15, работающие в спектральных диапазонах 0.4-1.2  $\mu\text{m}$  и 0.8-1.4  $\mu\text{m}$  соответственно. Фотодиод 15 регистрировал лазерный импульс, а 14 - излучение от продуктов взрыва ВС. Сигналы с этих фотодиодов поступали на осциллограф 16 по кабельным линиям одинаковой длины, чтобы избежать возникновения постоянной составляющей времени задержки. В экспериментах использовался 2-канальный цифровой осциллограф TDS-350 фирмы «Tektronix» (США). Максимальная частота входного сигнала (аналогового) 200 МГц.

Центральная часть лазерного пучка вырезалась по уровню  $\geq 0.5$  круглой диафрагмой диаметром 3 mm, уменьшенное изображение которой проецировалось с помощью линзы с фокусным расстоянием 15 mm на поверхность образца ВС. Площадь пятна определялась по отпечатку на фотобумаге, размеры которого измеряли с помощью микроскопа. С помощью методики [3] было установлено, что граница отпечатка соответствует плотности лазерной энергии  $E^* = 0.641 \text{ mJ/cm}^2$ . Поэтому все приведенные ниже значения диаметров лазерного пучка – это размеры относительно абсолютного значения уровня плотности энергии  $E^*$ .

Так как исследуемые ВС представляли собой смесь ВВ и связующего компонента, в качестве которого использовался ПММ, то возникает вопрос о влиянии количества связки на чувствительность ВС к действию лазерного моноимпульса. Ответ на этот вопрос мог быть получен только экспериментальным путем.

Естественно было ожидать, что добавление ПММ в образцы ВС приведет к снижению их чувствительности, поскольку эта добавка химически нейтральна по отношению к продуктам взрыва. С другой стороны, связующее вещество ПММ прозрачно для лазерного излучения, поэтому его использование в ВС, несомненно, вызовет увеличение области поглощения лазерной энергии, а следовательно,

уменьшение потерь энергии на разгрузку вещества за счет действия волн разрежения, являющихся мощными факторами снижения чувствительности ВВ к действию лазерного излучения [4].

На рис. 2 показаны результаты экспериментальных исследований зависимости чувствительности ВС на основе ГАТР от массовой концентрации ПММ. Во всех экспериментах диаметр лазерного пятна на поверхности ВС равнялся 2.8 mm при энергии в импульсе 84 mJ. Из рисунка видно, что минимум энергии инициирования достигается когда, концентрация ПММ равняется 20 %.

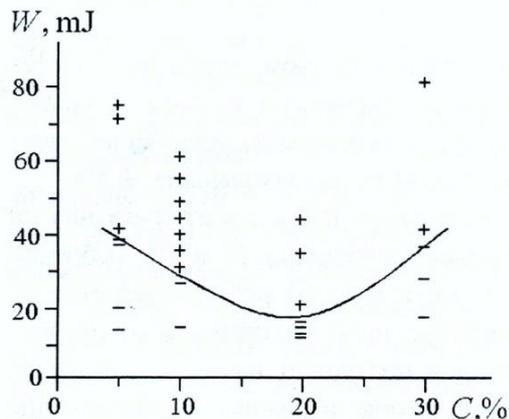


Рисунок. 2. Зависимость чувствительности ВС от концентрации связки. Плюс и минус обозначают соответственно взрыв и отказ

Снижение энергии инициирования при увеличении концентрации от 5 до 20 % обусловлено, на наш взгляд, увеличением светопропускания образцов ВС. Так как ВС инициировались со стороны стеклянной пластинки, затрудняющей разлет продуктов разложения ВВ, то наиболее вероятно, что формирование очага зажигания обусловлено не разгрузкой вещества за счет газодинамического течения продуктов разложения, а деформационной разгрузкой материала. Дальнейшее снижение чувствительности ВС при увеличении концентрации связки, по-видимому, обусловлено уменьшением плотности энергии тепловыделения взрывчатого состава за счет нейтральной добавки.

Исходя из полученных выше результатов, основное внимание было уделено исследованиям особенностей лазерного зажигания ВС с концентрацией связки 20 %.

Настоящая работа направлена на создание оптической системы инициирования взрывчатых зарядов, в которой взрывание ОД осуществляется в результате передачи по световоду, диаметром 100-200  $\mu\text{m}$  лазерной энергии на образец ВС. Поэтому наиболее актуальными представлялись исследования зависимости чувствительности ВС от диаметра лазерного пучка и времени задержки взрыва относительно начала лазерного воздействия от плотности энергии лазерного излучения.

На рис. 3 показаны результаты измерения чувствительности инициирования ВС с концентрацией ПММ 20% в зависимости от диаметра лазерного пучка. Видно, что при уменьшении диаметра пятна облучения энергия зажигания  $W$  уменьшается, а плотность энергии  $E$  немного увеличивается.

Эти результаты на качественном уровне согласуются с данными работы [5], посвященной исследованию размерного эффекта на примере лазерного инициирования азида свинца.

Из зависимости  $W(d)$  следует, что для диаметров лазерного пучка в диапазоне 100-200  $\mu\text{m}$  энергия инициирования не может превысить величину 1 mJ. Рост плотности энергии зажигания при уменьшении диаметра пятна облучения указывает на важную роль процесса рассеяния излучения диффузно рассеивающей средой, каковой является образец ВС. Чем меньше диаметр пятна облучения, тем больше потери

энергии лазерного излучения за счет процессов рассеяния фотонов на микронеоднородностях ВС.

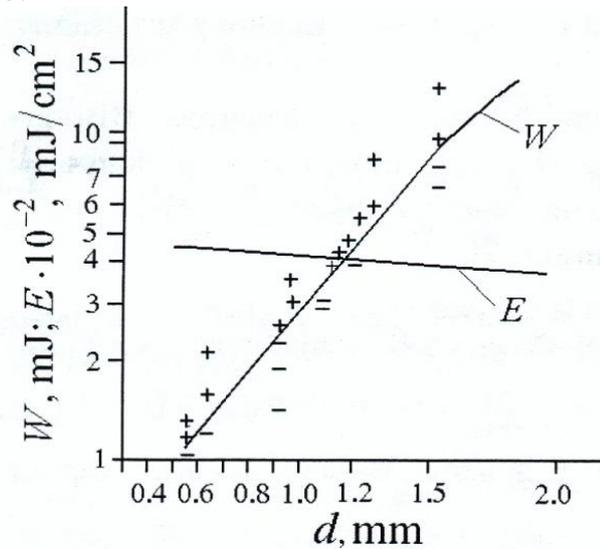


Рисунок 3. Зависимость энергии и плотности энергии иницирования ВС от диаметра пятна облучения.

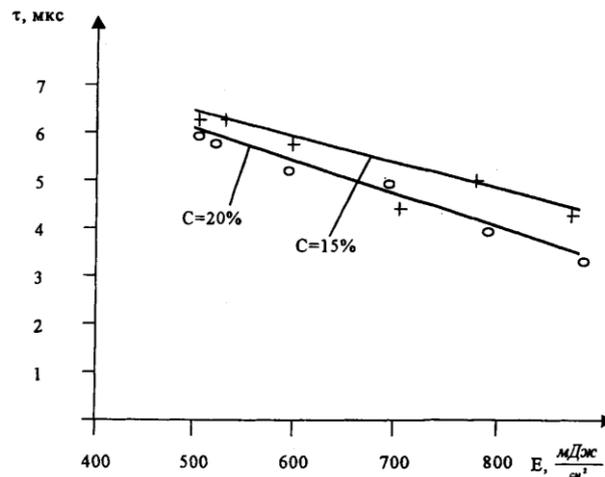


Рисунок 4. Зависимость времени задержки иницирования ВС от плотности энергии лазерного излучения: 1 – C = 15%, 2 – C = 20%

На рис. 4 изображены зависимости задержки времени зажигания образцов ВС относительно начала действия лазерного импульса от плотности световой энергии при массовой концентрации полимера 15 и 20%. Интересно, что ВС, имеющие содержание полимера 15%, проявляют большую задержку времени зажигания, чем образцы ВС с

C = 20%. На первый взгляд все должно быть наоборот. Чем больше содержание ВВ и ВС, тем меньше должно быть время «разгорания» ВС. Однако это не так. По нашему мнению, отмеченный факт свидетельствует о том, что индукционное время зажигания ВС определяется в основном временем формирования очага зажигания, а время перехода от горения к детонации составляет сравнительно малую часть от общего регистрируемого времени задержки зажигания.

Полученные зависимости энергии зажигания ВС от концентрации ПММ и времени задержки иницирования от плотности энергии излучения указывают на то, что лазерный подрыв ВС в первую очередь зависит от процесса деформационной разгрузки в очаге зажигания [6], хотя вероятным может быть и тепловой механизм зажигания за счет поглощения лазерного излучения включениями меди в ГАТР.

На наш взгляд, усовершенствование технологии приготовления ГАТР позволит существенно повысить чувствительность ВС к лазерному воздействию, а следовательно, и разрешить вопрос о механизме лазерного зажигания исследованных ВС.

Таким образом, установлено, что на основе комплексного ВВди (3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол) медь (II) перхлората можно получать ВС, обладающие чувствительностью к действию лазерного моноимпульса, превышающей чувствительность азид свинца [7].

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса лазерного инициирования взрывчатых составов (ВС) на основе ди (3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол) медь (II) перхлората. Получены зависимости чувствительности от концентрации прозрачного для излучения связующего материала, диаметра пятна облучения, отражающие характеристики образцов, временные зависимости задержки зажигания ВС относительно действия лазерного моноимпульса. Предлагается механизм инициирования, основанный на представлениях о деформационной неустойчивости ВС, вызванной локальным разогревом оптических микронеоднородностей.

### Библиографический список

1. Илюшин М.А., Целинский И.В., Чернай А.В. Светочувствительные взрывчатые вещества и составы и их инициирование лазерным моноимпульсом // Российский химический журнал 41, вып. 2, 81 (1997).
2. Чернай А.В., Соболев В.В. К вопросу о механизме зажигания взрывчатых материалов лазерным моноимпульсом // ФТВД, №2, 111-115, (1994).
3. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А., Житник Н.Е.. О методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов // Физика горения и взрыва 30, №2, 106 (1994).
4. Илюшин М.А., Судариков А.М., Целинский И.В. и др. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях. – СПб: ЛГУ им. Пушкина А.С., 2010. – 188 с.
5. Е.И. Александров, Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании прессованного азид свинца лазерным моноимпульсом // Физика горения и взрыв 17, №5, 77 (1985).
6. Чернай А.В. О механизме зажигания инициирующих взрывчатых веществ лазерным моноимпульсом // ФТВД 7, №4, 60 (1997).
7. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора // Физика горения и взрыва №3, 132 (1966).