

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ДИ-(3-ГИДРАЗИНО-4-АМИНО-1,2,3-ТРИАЗОЛ)-МЕДЬ (II) ПЕРХЛОРАТА

А. В. Чернай, В. В. Соболев, В. А. Чернай, М. А. Илюшин*, А. Длугашек**

Национальный горный университет, 49027 Днепропетровск, Украина, sobolevV@nmu.org.ua

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 198013 Санкт-Петербург

**Институт оптоэлектроники Военно-технической академии республики Польша, 01-489 Варшава, Польша

Приведены результаты экспериментального исследования лазерного инициирования взрывчатых составов на основе ди-(3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол)-медь (II) перхлората. Получены зависимости чувствительности составов от концентрации прозрачного для излучения связующего материала и от диаметра пятна облучения, а также временные зависимости задержки зажигания. Предложен механизм инициирования, основанный на представлениях о деформационной неустойчивости взрывчатого состава, вызванной локальным разогревом оптических микронеоднородностей.

Ключевые слова: лазерное инициирование, задержка зажигания, взрывчатый состав, лазерный моноимпульс, оптические микронеоднородности, горение, детонация, очаг зажигания.

Взрывчатые вещества (ВВ) или взрывчатые составы (ВС), используемые в качестве инициаторов в оптических детонаторах оптических систем инициирования, 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 оптических детонаторах была разработана технология получения ВС на основе ГАТР и измерены характеристики этих составов при воздействии лазерного моноимпульса.

Взрывчатые составы готовились в виде эмульсии кристаллов ВВ в растворе полиметилметакрилата (ПММА), нанесенной на поверхность стекла. После испарения быстролетучего растворителя образовывался конденсированный ВС, представляющий собой монолитную массу, состоящую из ВВ и связки (ПММА). Диаметр покрытия из ВС $5 \div 7$ мм. Исходя из того, что порог инициирования зависит от толщины слоя ВС [2], экспериментально было установлено, что начиная с толщины образца 1 мм порог зажигания не изменяется при увеличении толщины. Поэтому использовались ВС толщиной $2 \div 3$ мм.

Экспериментальная установка создана на базе твердотельного оптического квантового генератора CFR 200-10 Pulsed Nd:YAG Laser System фирмы Big Sky Laser (США). Длина волны излучения 1,064 мкм, поляризация вертикальная, максимальная энергия импульса 200 мДж, длительность импульса на полувысоте интенсивности 10,1 нс. Лазер работает в импульсно-периодическом режиме с регулируемой частотой генерации в диапазоне $1,7 \cdot 10^{-2} \div 10$ Гц. Частота вспышек лампы накачки постоянна и равна 10 Гц. Первый модулированный импульс появляется после генерации 20 импульсов лампы-вспышки, выход на стабильный режим работы лазера происходит после 10 модулированных импульсов. Диаметр выходного пучка 6 мм, расходимость 2,8 мрад при энергии импульса, равной 85,5 % ее максимального значения.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Лазерный диод и диафрагма использовались для юстировки оптического тракта, после чего их убрали. Образец (ВС, нанесенный на стеклянную пластинку) прикреплялся к алюминиевой пластине толщиной 8 мм, имеющей отверстие диаметром 8 мм для прохождения лазерного излучения. Лазерный луч направлялся на ВС с помощью призмы. Для изменения диаметра лазерного пучка использовалась линза. Для защиты линзы и фотодиода от осколков стекла, образу-

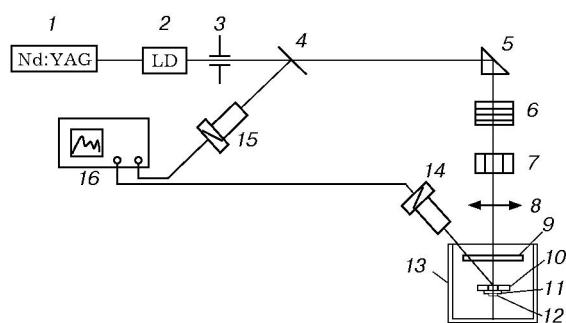


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — Nd:YAG-лазер, 2 — лазерный диод, 3 — диафрагма, 4 — делительная пластина, 5 — призма, 6 — светофильтры, 7 — головка измерителя энергии ИЭЛ-300, 8 — линза, 9 — стеклянный экран, 10 — алюминиевая пластина, 11 — стеклянная пластинка, 12 — взрывчатый состав, 13 — кожух, 14, 15 — фотодиоды, 16 — осциллограф

ющихся при взрыве, между этими приборами и образцом устанавливался стеклянный экран. Кроме того, образец закрывался кожухом. Светофильтры позволяли менять энергию лазерного излучения, падающего на образец, при фиксированном расстоянии от ВС до линзы. Энергию измеряли прибором ИЭЛ-300, укомплектованным тремя головками проходного типа, которые обеспечивают измерение в диапазоне $10^{-6} \div 300$ Дж. Прибор может быть настроен на измерение энергии излучения на шести длинах волн. При работе в диапазоне $1 \div 100$ мДж точность определения энергии не меньше 0,01 мДж.

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

Для установления времени задержки зажигания ВС относительно начала действия лазерного импульса использовались фотодиоды 14 и 15, работающие в спектральных диапазонах $0,4 \div 1,2$ мкм и $0,8 \div 1,4$ мкм соответственно. Фотодиод 15 регистрировал лазерный импульс, а фотодиод 14 — излучение продуктов взрыва ВС. Сигналы фотодиодов поступали на осциллограф по кабельным линиям одинаковой длины, чтобы избежать возникновения постоянной составляющей времени задержки. В экспериментах использовался двухканальный 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 мм и фокусировалась с помощью линзы с фокусным расстоянием 15 мм на поверхность образца ВС. Плоскость изображения находили по отпечатку на фотобумаге, размеры которого измеряли с помощью микроскопа. По методике [3] было установлено, что граница отпечатка соответствует плотности энергии лазерного излучения $E^* = 0,641$ мДж/см². Поэтому все приведенные ниже значения диаметров лазерного пучка — это размеры пучка, ограниченного областью с плотностью энергии E^* . Качественно распределение энергии в лазерном пучке проверялось с помощью анализатора лазерного пучка Silicon Camera MODEL LBA-100A фирмы Spiricon. Анализатор состоял из ПЗС камеры высокого разрешения Pulnix TM-745 (количество зарядовых элементов в матрице $768(H) \times 493(V)$, размеры одного элемента 1×13 мкм), непосредственно регистрирующей излучение, и микропроцессорной системы, анализирующей распределение энергии и имеющей стандартный порт для подключения принтера. Распределение плотности энергии в лазерном пучке, определяемое по методике [3], удовлетворительно согласуется с показаниями анализатора лазерного пучка.

Так как исследуемые взрывчатые составы представляют собой смесь ВВ со связующим компонентом (ПММА), естественно возникает вопрос о влиянии количества связки на чувствительность ВС к действию лазерного моноимпульса. Ответ на этот вопрос можно получить только экспериментальным путем.

Естественно ожидать, что добавление ПММА в образцы ВС приведет к снижению их чувствительности, так как эта добавка химически нейтральна по отношению к продуктам взрыва. С другой стороны, ПММА прозрачен для лазерного излучения, поэтому его использование в ВС, несомненно, приведет к увеличению области поглощения энергии лазерного излучения, а следовательно, к снижению потерь энергии на разгрузку вещества за счет действия волн разрежения, которые существенно снижают чувствительность ВВ к лазерному излучению [4].

На рис. 2 показана зависимость чувствительности ВС на основе ГАТР от массовой концентрации ПММА. Во всех экспериментах диа-

метр лазерного пятна на поверхности ВС равнялся 2,8 мм при энергии импульса 84 мДж. Из рисунка видно, что минимум энергии инициирования достигается при концентрации связки (ПММА) 20 %.

Снижение энергии инициирования при увеличении массовой концентрации связки от 5 до 20 % вызвано, 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 процессом разгрузки вещества за счет течения продуктов разложения, а деформационной разгрузкой материала*. Увеличение энергии инициирования ВС при росте концентрации связки выше 20 %, по-видимому, обусловлено уменьшением плотности энергии тепловыделения ВС за счет нейтральной добавки.

Исходя из полученных выше результатов основное внимание было уделено исследовани-

*Поясним термины «деформационная разгрузка», «деформационная релаксация», «время задержки зажигания».

При облучении образца ВС часть лазерного излучения проникает на некоторую глубину и поглощается в материале в основном за счет поглощающих микровключений, присутствующих в отдельных монокристаллах вещества. При этом микровключения разогреваются и, расширяясь, деформируют окружающую их среду — ВВ. Размер области деформирования, как показали результаты расчетов по методике [6], порядка размера включения ($\approx 10^{-5}$ см). Возмущения, вызванные быстрым расширением микровключения, распространяются в материале со скоростью упругих волн. Достигнув свободной поверхности образца, они возвращаются в обратном направлении, формируя волну разрежения, которая стремится перевести материал в первоначальное недеформированное состояние. Этот процесс называется деформационной разгрузкой или деформационной релаксацией. Если деформационная разгрузка реализуется быстрее, чем сформируется очаг зажигания, то взрыва не произойдет.

Пусть микровключение находится на глубине h от ближайшей свободной поверхности образца. Тогда для прихода волны разрежения необходимо время $t \geq h/c$, где c — скорость звука в материале.

Обозначим через τ — время инициирования химической реакции в деформированной области, называемое временем задержки зажигания. Очаг зажигания в области, окружающей микронеоднородность, формируется при условии $\tau < t$. При неизменном значении τ время t можно увеличить путем увеличения прозрачности материала, что приведет к более глубокому прониканию излучения и нагреву микронеоднородностей, находящихся на большей глубине h . Наличие стеклянной пластинки также увеличивает значение h , что ведет к увеличению чувствительности ВС.

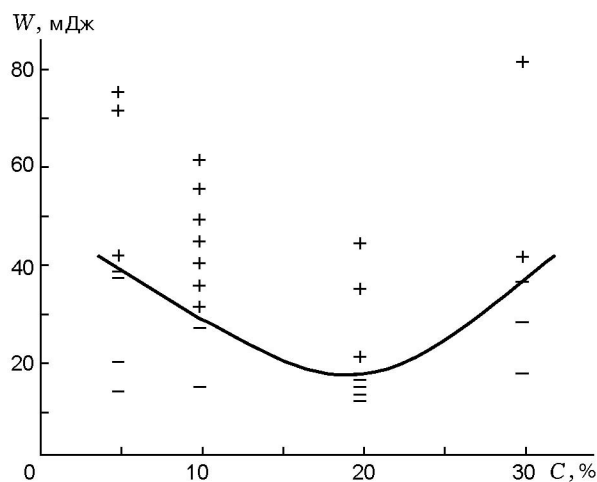


Рис. 2. Зависимость чувствительности ВС на основе ГАТР от массовой концентрации связки:

+ подрыв ВС, — отказ

ям особенностей лазерного зажигания ВС с концентрацией связки 20 %.

Так как настоящая работа направлена на разработку оптических систем инициирования взрывчатых зарядов, в которой оптический детонатор взрывается в результате передачи энергии лазерного излучения на образец ВС по световоду диаметром $100 \div 200$ мкм, наиболее актуальными представляются исследования зависимости чувствительности ВС от диаметра лазерного пучка и зависимости времени задержки взрыва относительно начала лазерного воздействия от плотности энергии лазерного излучения.

На рис. 3 показаны результаты измерения энергии и плотности энергии инициирования ВС с концентрацией ПММА 20 % от диаметра пятна облучения. Видно, что при уменьшении диаметра пятна облучения энергия инициирования W уменьшается, а ее плотность E немного увеличивается.

Диаметр пятна облучения измерялся при каждом изменении энергии лазерного импульса. Такой подход мог быть осуществлен только при стабильной работе лазера, который использовался в наших экспериментах. Эти результаты качественно согласуются с данными работы [5], посвященной исследованию масштабного эффекта на примере лазерного инициирования азида свинца.

Экстраполируя зависимость $W(d)$ в область малых диаметров лазерного пучка, можно видеть, что при $d = 100 \div 200$ мкм энер-

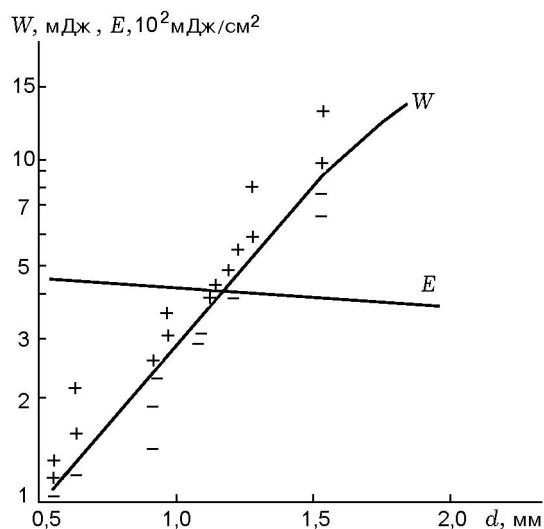


Рис. 3. Зависимости энергии и плотности энергии инициирования ВС от диаметра пятна облучения:

+ подрыв ВС, - отказ

гия инициирования меньше 1 мДж. Рост плотности энергии инициирования при уменьшении диаметра пятна облучения указывает на важную роль рассеяния излучения диффузно рассеивающей средой, каковой является образец ВС. Чем меньше диаметр пятна облучения, тем больше потери энергии лазерного излучения за счет рассеяния излучения на микронеоднородностях ВС и поверхностях раздела фаз ВВ — полимер.

При определении времени задержки зажигания в процессе экспериментов выяснилось, что измерения можно проводить с помощью одного фотодиода 14, который регистрировал как лазерный импульс, так и импульс света от продуктов взрыва. Типичная осциллограмма приведена на рис. 4. Первый пик соответствует лазерному импульсу, а второй пик, возникающий во время разрядки фотодиода через входную RC-цепь осциллографа, соответствует максимуму светового излучения, исходящего от продуктов взрыва. При использовании двухканальной схемы регистрации с помощью фотодиодов 14, 15 получены такие же результаты.

На рис. 5 изображены зависимости времени задержки зажигания образцов ВС относительно начала действия лазерного импульса от плотности световой энергии при массовой концентрации полимера 15 и 20%. Интересно, что время задержки зажигания ВС, содержащих 15% полимера, больше, чем у образцов ВС

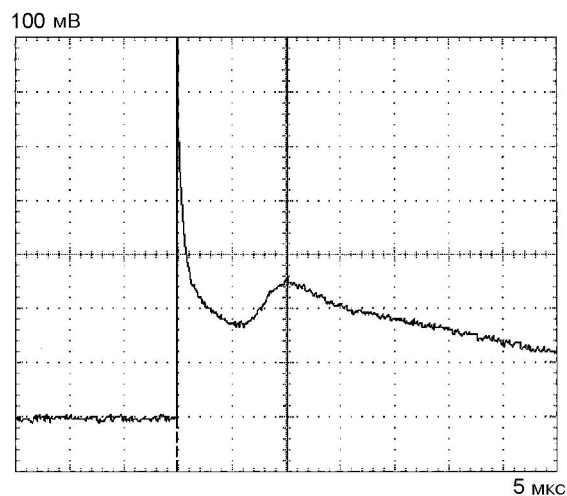


Рис. 4. Осциллограмма регистрации времени задержки зажигания ВС относительно лазерного импульса:

частота дискретизации 10^7 с^{-1}

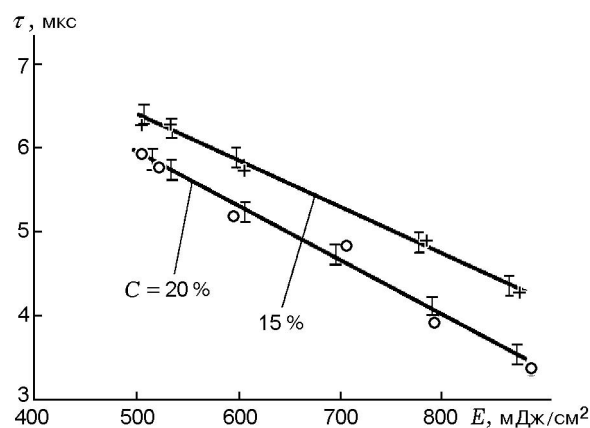


Рис. 5. Зависимость времени задержки зажигания ВС от плотности энергии лазерного излучения

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

Следует также отметить, что при облучении образцов ВС широкими пучками ($d =$

3 ÷ 4 мм) с критической плотностью энергии лазерного излучения в случае отказа ни визуально, ни под микроскопом никаких изменений на поверхности образца не наблюдалось при иницировании как со стороны свободной поверхности ВС, так и со стороны стеклянной пластины. Причем критическая плотность энергии иницирования в первом случае была в 2–3 раза больше, чем во втором. При иницировании ВС узкими лазерными пучками ($d < 1$ мм) в случае отказа незначительно изменялся цвет ВС, однако ни разрушения, ни отслоения образца ВС от стекла не наблюдалось. Все это указывает на то, что процесс лазерного иницирования осуществляется при низкой средней температуре поверхности образца ВС.

Для подтверждения этого вывода были проведены спектрофотометрические измерения коэффициента отражения и показателя ослабления ВС на длине волны 1,06 мкм, которые оказались равными $R \approx 80\%$ и $k \approx 100 \text{ см}^{-1}$ соответственно. Учитывая, что теплоемкость ВС с концентрацией связки 20 %, по нашим данным, равна $c_p \approx 0,4 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{К})$, а плотность $\rho = 4,0 \text{ г}/\text{см}^3$, при критической плотности энергии иницирования $E_{cr} \approx 0,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$ температуру разогрева микровключения можно оценить по формуле $\Delta T \approx E_{cr}(1+R)k/c_p\rho = 56 \text{ К}$.

Эта оценка сильно завышена, так как в качестве показателя поглощения мы подставили в формулу показатель ослабления. Естественно, что такой разогрев не может быть причиной ни зажигания ВС, ни каких-либо фазовых превращений.

С другой стороны, температура разогрева оптических поглощающих микронеоднородностей (в данном случае — включений меди) может достигать существенно больших значений [6]. Однако зависимость времени задержки зажигания от плотности энергии лазерного излучения и зависимость чувствительности ВС от концентрации связки противоречат гипотезе о «чисто тепловом механизме зажигания ВС», осуществляемом в результате разогрева оптических микронеоднородностей.

Весь комплекс экспериментальных данных свидетельствует о том, что зажигание ВС короткими лазерными импульсами в значительной степени зависит от разгрузки материала волнами разрежения. На наш взгляд, иницирование осуществляется по следующему механизму. В результате быстрого разогрева опти-

ческих неоднородностей ($\approx 10 \text{ нс}$) в соседствующих с ними микрообъемах ВВ за счет термоупругих напряжений возникают сдвиговые деформации кристаллической решетки, которые и вызывают протекание элементарных химических превращений; следовательно, возникают условия для формирования очагов зажигания.

Это утверждение согласуется с результатами работы [7], в которой на примере простейшего иницирующего ВВ (азида серебра) показано, что распад кристаллической структуры (взаимодействие групп N_3^- между собой) может проходить при сдвиговой деформации кристаллической решетки. Поэтому разгрузка вещества вблизи микронеоднородностей, осуществляемая за счет волн разрежения, приводит к деформационной релаксации материала и тем самым является причиной «гашения» реакции взрывного превращения ВВ.

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

Таким образом, установлено, что на основе комплексного ВВ — ди-(3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол)-медь (II) перхлорат — можно получать взрывчатые составы, обладающие чувствительностью к действию лазерного моноимпульса, превышающей чувствительность азида свинца [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюшин М. А., Целинский И. В., Чернай А. В. Светочувствительные взрывчатые вещества и составы и их иницирование лазерным моноимпульсом // Рос. хим. журн. 1997. Т. 41, вып. 2. С. 81–88.
2. Чернай А. В., Соболев В. В. К вопросу о механизме зажигания взрывчатых материалов лазерным моноимпульсом // Физика и техника высоких давлений. 1994. Т. 4, № 2. С. 111–115.
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. 1994. Т. 30, № 2. С. 106–111.
4. Чернай А. В. Об иницировании химической реакции в тэне световым излучением // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 6. С. 48–53.
5. Александров Е. И., Ципилев В. П. Размерный эффект при иницировании прессованного

- азиды свинца лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 5. С. 77–81.
6. **Чернай А. В.** О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 1. С. 11–19.
7. **Чернай А. В.** О механизме зажигания инициирующих взрывчатых веществ лазерным моноимпульсом // Физика и техника высоких давлений. 1997. Т. 7, № 4. С. 60–68.

*Поступила в редакцию 4/V 2000 г.,
в окончательном варианте — 14/V 2002 г.*
