

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЭНА С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВАЕМОЙ СВЕТОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

УДК 662.215.1+535.21

В. И. Таржанов, А. Д. Зинченко, Б. Н. Смирнов,  
А. И. Погребов, В. И. Сдобнов, Б. Б. Токарев

ВНИИ технической физики,  
454070 Снежинск

*Изучено инициирование тэна с удельной поверхностью  $8000 \text{ см}^2/\text{г}$  и плотностью  $0,9 \text{ г}/\text{см}^3$  с помощью взрываемой лазерным импульсом тонкой металлической пленки из различных материалов. Получена единая для всех материалов обобщенная зависимость поглощаемой в пленке энергии от ее толщины. Проведена оценка динамики потерь теплопроводностью и показана их малость. Описаны основные процессы механизма инициирования тэна с помощью световзрываеваемых металлических пленок.*

Исследованию инициирования вторичных взрывчатых веществ (ВВ) взрываемыми лазерным излучением тонкими металлическими пленками посвящено около десятка работ (см. [1–4] и ссылки в них). Однако полного количественного описания и понимания механизма такого инициирования пока нет. В данной работе исследуются особенности инициирования тэна, связанные с характерными параметрами взрываеваемых лазерным излучением металлических пленок, обсуждаются некоторые детали механизма инициирования.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная сборка (рис. 1,а) содержала навеску порошкообразного тэна с удельной поверхностью  $8000 \text{ см}^2/\text{г}$  и плотностью  $0,9 \text{ г}/\text{см}^3$ . Диаметр и высота образца составляли 6 мм. Толщина стекла (ГОСТ 683-52) прозрачного окна сборки 1,4 мм. Металлические пленки изготавливались вакуумным напылением на стекло сборки. Исследовались пленки из алюминия, марганца, меди, цинка, олова, магния и свинца толщиной  $(40-12000) \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

Использовался лазер на неодимовом стекле, работающий в режиме модуляции надежности резонатора. Длина волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса на полувысоте 40 нс, энергия до 4,5 Дж. Излучение фокусировалось на пленку сквозь стекло сборки с помощью линзы. Размер  $d$  (рис. 1,б) области воздействия излучения на пленку определялся в специальной серии измерений и является эффективным диаметром квазигауссова распределения поверхностной плотности энергии.

Пороговая энергия инициирования  $E_{0,5}$  определялась как энергия падающего интегрально за импульс на пленку лазерного излучения, соответствующая 50 %-й вероятности инициирования детонации при большом числе опытов. Она вычислялась обработкой по методу максимального правдоподобия результатов типа «инициирование — отказ» серии

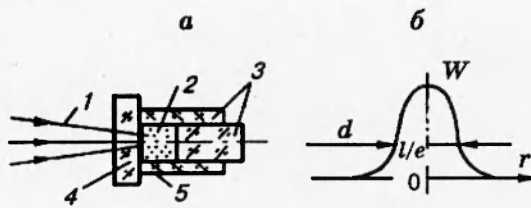


Рис. 1. Экспериментальная сборка (а) и распределение энергии на пленке (б):

1 — лазерный пучок; 2 — тэн; 3 — корпус из оргстекла; 4 — стекло окна сборки; 5 — пленка

из 15–20 опытов с варьированием энергии в импульсе.

Факт инициирования тэна в опыте устанавливался по характерному резкому звуку и полному разрушению сборки. Эти признаки однозначно свидетельствуют о детонации навески ВВ с задержкой не более 0,8 мкс, что проверено в большом числе опытов с измерением времени работы сборок при помощи фотоэлектрической методики [5, 6]. Низкоскоростной режим детонации и горение ВВ никогда не наблюдались в нашей схеме эксперимента. Явления, наблюдаемые при отказах в инициировании, описаны в [7]. Пороговая поверхностная плотность энергии инициирования (интегральная за импульс) вычислялась по формуле  $W_{0,5} = E_{0,5}/(\pi d^2/4)$ .

Подробно методика исследований изложена в [3].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние материала и толщины пленки иллюстрирует рис. 2,а. Видно, что зависимости пороговой энергии инициирования тэна  $E_{0,5}$  от толщины пленки  $\Delta$  качественно одинаковы для всех металлов — это кривые с минимумами при некоторых оптимальных толщинах ( $\Delta_{\text{опт}}$ ), своих для каждого металла. При  $\Delta > \Delta_{\text{опт}}$  связь  $E_{0,5}$  с  $\Delta$  линейна.

В пределах погрешности измерений минимальные значения энергии инициирования не различаются для разных металлов при фиксированном диаметре области воздействия излучения.

Представленные данные удовлетворительно ложатся на одну кривую в относительных координатах (рис. 2,б).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученный характер зависимостей пороговой энергии инициирования от толщины пленки объясняется следующим образом. При малых толщинах ( $\Delta < \Delta_{\text{опт}}$ ) значительная часть энергии излучения пропускается пленкой, не поглощаясь в ней, что приводит к повышению  $E_{0,5}$ . При  $\Delta > \Delta_{\text{опт}}$  увеличение  $E_{0,5}$  связано с необходимостью прогревания «лишнего» материала. Следует заметить, что значения  $\Delta_{\text{опт}}$  для фиксированного материала сильно зависят от технологии напыления пленок, так же как и их начальные оптические характеристики.

На первый взгляд, близость значений  $E_{0,5}$  различных материалов пленок при  $\Delta_{\text{опт}}$  неожиданна. Однако данные [5] по оптическим характеристикам пленок при импульсном лазерном воздействии проясняют этот вопрос. Такая близость связана с тем, что большая доля ( $\approx 0,8$ ) энергии вводится в материал пленки на разлетной стадии, когда металлические свойства им уже утеряны. На рис. 3, взятом из [5], показано изменение оптических

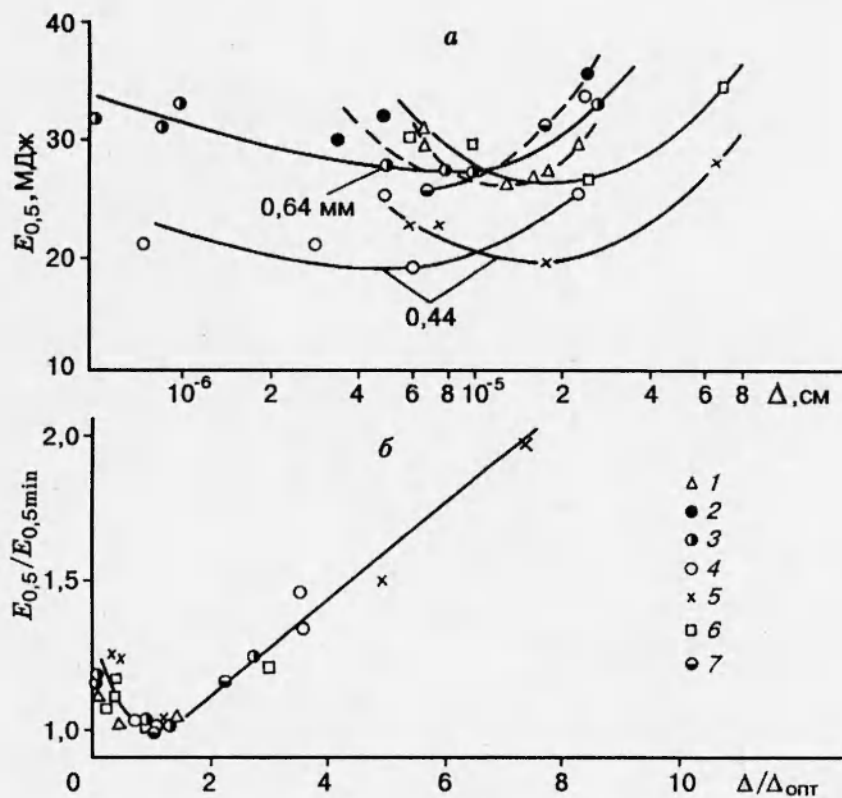


Рис. 2. Влияние материала и толщины пленки на энергию иницирования; материал пленки: 1 — Sn, 2 — Pb, 3 — Mn, 4 — Al, 5 — Cu, 6 — Zn, 7 — Mg, 8 — Ni; цифры у кривых — размер области воздействия излучения

характеристик пленок в течение лазерного импульса для случаев их контакта с водой и воздухом при атмосферном давлении. Случай контакта пленки с пористым ВВ является промежуточным, но более близким к случаю контакта ее с водой.

Вычисление поглощенной пленкой энергии с использованием оптических характеристик пленок позволяет представить полученные результаты по иницированию в обобщенном виде (рис. 4). Как видно, поглощенная пленкой энергия, необходимая для иницирования, постоянна при  $\Delta < \Delta_{opt}$  и линейно растет при  $\Delta > \Delta_{opt}$ . Это означает, что чем более тонкая пленка при  $\Delta < \Delta_{opt}$  используется для иницирования ВВ, тем большая плотность поглощенной энергии в ней реализуется. Для  $\Delta > \Delta_{opt}$  в случае увеличения толщины пленки необходимо обеспечивать постоянство плотности поглощенной энергии.

### О ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Поперечный размер  $q$  зоны растекания тепла по пленке определяется ее теплопроводностью  $\chi$  и временем энерговода  $\tau$ :  $q = \sqrt{\chi\tau}$ . Для Al, Cr и Ag  $q = 1,7, 0,7$  [6] и 3 мкм [7] соответственно. Эти значения много меньше эффективных диаметров области облучения при иницировании ВВ, т. е. поперечное размытие области облучения за импульс, обусловленное теплопроводностью, несущественно.

Для оценки роли потерь в ВВ и стеклянную подложку вычислим с учетом зависимости поглощательной способности Al от температуры (введенной плотности энергии  $\epsilon$ ) [8] время

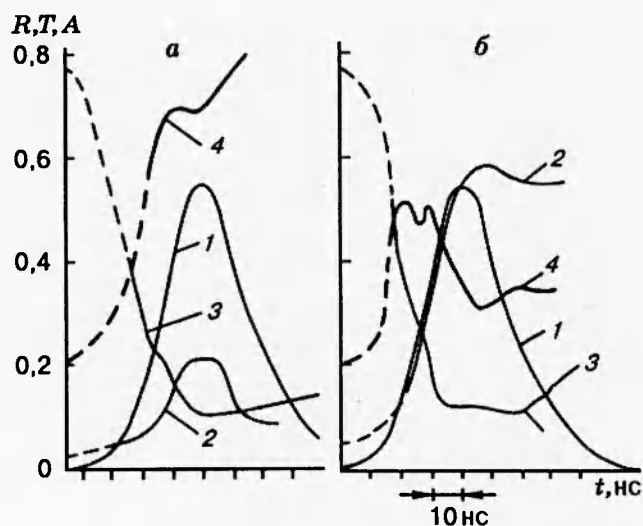


Рис. 3. Изменение оптических характеристик пленок алюминия толщиной  $570 \cdot 10^{-8}$  см в течение лазерного импульса при  $E = 0,0055$  Дж и  $d = 0,5$  мм:

*a* — контакт с водой; *b* — контакт с воздухом; 1 — форма импульса (масштаб по ординате произвольный); 2 — коэффициент пропускания  $T$ ; 3 — коэффициент отражения  $R$ ; 4 — коэффициент поглощения  $A = 1 - R - T$

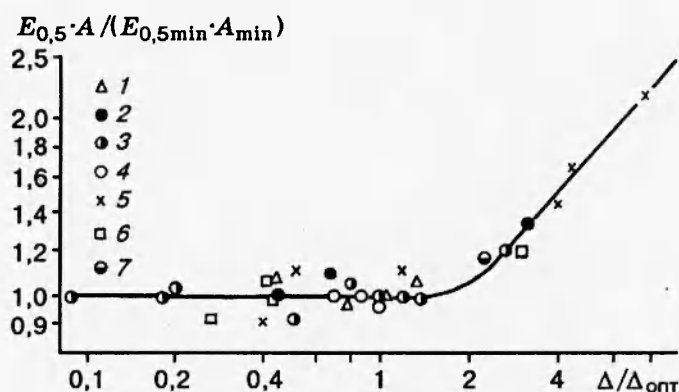


Рис. 4. Зависимость поглощенной пленкой энергии от ее толщины в относительных координатах. Обозначения приведены на рис. 2

$t_{\Omega}$ , необходимое для введения в пленку энергии ее сублимации  $\Omega$ . Используем выражение

$$\int_0^{t_{\Omega}} W(t) A(\varepsilon) \left( 1 - \sqrt{t} \frac{\rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \sqrt{\chi_{\text{п}}} + \rho_{\text{ВВ}} c_{\text{ВВ}} \cdot \sqrt{\chi_{\text{ВВ}}}}{2\rho_{\text{Al}} c_{\text{Al}} \Delta_{\text{Al}}} \right) dt = \Omega \rho_{\text{Al}} \Delta_{\text{Al}}$$

Здесь  $W$  — мгновенная плотность энергии излучения;  $\rho_{\text{п}}$ ,  $c_{\text{п}}$ ,  $\chi_{\text{п}}$  — плотность, теплоемкость, температуропроводность материала подложки;  $\rho_{\text{ВВ}}$ ,  $c_{\text{ВВ}}$ ,  $\chi_{\text{ВВ}}$  — те же параметры ВВ. Для значения пороговой плотности энергии инициирования  $8 \text{ Дж/см}^2$ , реализующегося в экспериментах при  $d = 0,5$  мм,  $t_{\Omega} = 10\text{--}12$  нс. Оно хорошо согласуется с данными по оптическим характеристикам пленок. Из рис. 3 следует, что за это время вводится 0,1 всей энергии импульса. Потери энергии из-за теплопроводности за это время составляют  $\approx 1\%$ .

При разлете пленки в поры ВВ поглощается основная доля энергии. При этом теплоотвод из нее уменьшается вследствие резкого падения коэффициента температуропроводности материала и утолщения ее до эффективного размера пор ( $\sim 10$  мкм). Оценка по формуле, аналогичной приведенной выше, с использованием значения  $\chi$  для плазмы из [9],

показывает, что потери за оставшееся до конца импульса время составляют еще  $\approx 1\%$ .

### О МЕХАНИЗМЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА СВЕТОВЗРЫВАЕМЫМИ ПЛЕНКАМИ

Световой поток, падающий на поверхность пленки, нагревает ее. Для условий эксперимента (длительность импульсов 40 нс, толщина пленок  $< 1$  мкм) можно считать, что распределение тепловых источников во времени повторяет форму лазерного импульса, а их пространственное распределение равномерно [10, 11]. С повышением температуры пленки увеличивается поглощательная способность [10, 11], что приводит к нелинейному росту темпа ее нагрева.

Как показали измерения [6], большая часть (0,6–0,9) поверхности пленки контактирует с воздухом тэна, т. е. эти ее участки имеют возможность расширяться в поры при введении энергии порядка энергии сублимации материала. В [12] показано, что на пороге световой абляции слоя металла в одну оптическую толщину лазерным моноимпульсом с  $\tau = 30$  нс материал представляет собой плазму с температурой 5000 К. Эффективная толщина ионизованных паров пленки определяется дисперсностью и плотностью тэна. При разлете в поры ВВ плазма пленки продолжает поглощать энергию при довольно высоком (0,4–0,6) значении поглощательной способности, причем на этой стадии поглощается 0,8 всей энергии. В результате такого энерговода в области взаимодействия излучения с металлом образуется плазма с температурой до 20000 К (при плотности энергии лазерного излучения до  $10$  Дж/см<sup>2</sup>) [13, 14]. Таким образом, к концу лазерного импульса продукты взрыва пленки являются горячим поршнем, формирующим в ВВ и подложке ударные волны и нагревающим их.

Проведенное математическое моделирование взрыва пленки без учета процессов ионизации ее материала показало, что при экспериментальных плотностях энергии, вводимой в пленку при иницировании тэна, в нем формируются ударные волны с амплитудой  $8\text{--}10^8$  Па, соответствующей его иницированию в ударно-волновых экспериментах [15] с задержкой 0,1–0,2 мкс. Однако, роль контакта горячих продуктов взрыва пленки с ВВ требует дальнейшего уточнения. Прогрев ВВ на фоне формирования ударной волны может приводить к образованию химического пика зажигания, как и в случае прямого лазерного иницирования тэна [3, 16, 17].

В заключение отметим естественную аналогию между световым и электрическим взрывами металлических пленок [18] и их действием. Как электрический, так и световой взрыв пленок — следствие взаимодействия газа свободных электронов металла с высокочастотным электромагнитным полем, отсюда очевидна одинаковость результатов этого взаимодействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Yang L. C., Menichelli V. J. Detonation of insensitive high explosives by a Q-switched ruby laser // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 19, N 11.
2. Yang L. C., Menichelli V. J. Laser Initiation of Insensitive High Explosives // Proc 6th Symp. (Int.) on Detonation; Sun Diego, California, August 1976. P. 612–621.

3. Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В. и др. Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 760–766.
4. Yang L. C. Performance characteristics of a laser initiated microdetonator // Propellants and Explosives. 1981. N 6. P. 151–157.
5. Zinchenko A. D., Tarzhanov V. I., Tokarev B. B., et al. Optical Parameters of Thin Metal Films under Laser Effect // Proc 2nd Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and its Effects; Chengdu, China, June 1992. P. 583–587.
6. Зинченко А. Д., Погребов А. И., Таржанов В. И., Токарев Б. Б. Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 80–87.
7. Зинченко А. Д., Сабденов В. И., Таржанов В. И. и др. Лазерное воздействие на пористое ВВ без его инициирования // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 97–101.
8. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Проекционный способ обработки материалов излучением ОКГ // Физика и химия обраб. материалов. 1968. № 4.
9. Фортон В. Е., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. Черногловка, 1984.
10. Анисимов С. Н., Имас Я. А. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970.
11. Либенсон М. Н. Нагрев и разрушение тонких пленок излучением ОКГ // Физика и химия обраб. материалов. 1968. № 2.
12. Андреев С. Н., Вержиковский Н. В., Дымшиц Ю. И. Условия образования плазмы и твердотельной мишени под действием моноимпульсного излучения лазера // Журн. техн. физики. 1970. Т. XL, вып. 7.
13. Калмыков А. А., Розенталь Г. Н. Ионизирующие свойства свечений на диэлектрических и металлических поверхностях, облучаемых светом рубинового лазера // Квантовая электроника. М.: Радио, 1973. № 2(14).
14. Гончаров В. К., Минько Л. Я., Тюнина Е. С. Лазерные методы генерации плазменных потоков и ударных волн // Журн. прикл. спектроскопии. 1970. № 13. С. 707.
15. Stirpe D., Johnson J., Wackerly J. Shock initiation of XTX-8003 and pressed PETN // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 9.
16. Волкова А. А., Таржанов В. И., Сапожников А. Г. и др. Математическое моделирование инициирования тэна лазерным излучением // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черногловка, 1978. С. 46–56.
17. Tarzhanov V. I., Zinchenko A. D., Sdobnov V. I., et al. Laser initiation of PETN // 13th Int. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems; Nagoya, Japan, July 28–August 2 1991.
18. Электрический взрыв проводников / Под ред. А. А. Рухадзе, Н. С. Шнипеля. М.: Мир, 1965.

*Поступила в редакцию 19/XII 1994 г.,  
в окончательном варианте — 15/VIII 1995 г.*

---