

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИКУ РАЗВОРОТА ПЛАСТИНЫ, МЕТАЕМОЙ В РЕЖИМЕ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА ВВ

О. Б. Дреннов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Экспериментально зарегистрирована различная динамика разворота пластин, метаемых скользящей детонационной волной, если пластины выполнены из материалов с близкими физическими свойствами, но с различной прочностью. Путем корректировки существующего соотношения для угла отгиба удалось единым способом описать экспериментальные данные. Учет динамической прочности металла позволил прогнозировать ход зависимости угла отгиба для одного материала, если известна такая зависимость для другого материала с близкими физическими свойствами.

Ключевые слова: скользящая детонация, угол отгиба, динамическая прочность, скорость, давление.

Во многих практически важных случаях ударные волны в твердых и жидких средах распространяются таким образом, что их фронты оказываются непараллельными границам раздела или неперпендикулярными вектору скорости среды перед фронтом. Одним из основных параметров, характеризующих такие волны, является угол разворота потока вещества за фронтом. В довольно часто реализующемся на практике случае — метание пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ — это угол разворота пластины.

По окончании процесса разгона пластина приобретает скорость w_∞ и поворачивается на угол $\beta(\infty)$, определяемый из геометрического рассмотрения схемы стационарного процесса разворота пластины с привлечением формулы Гарни [1–3]:

$$\beta(\infty) = 2 \arcsin \frac{w_\infty}{2D} = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{2E_G}}{2D} \frac{r\sqrt{3}}{\sqrt{r^2 + 5r + 4}} \right). \quad (1)$$

Здесь D — скорость детонации заряда ВВ, r — отношение массы ВВ к массе метаемой пластины, E_G — энергия Гарни (часть энергии Q — теплоты взрыва, переходящей в кинетическую энергию продуктов взрыва).

В настоящее время разработаны одно- и двумерные расчетные схемы, описывающие метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной [1–5]. Данные схемы позволяют рассчитывать не только предельные углы разворота пластин, но и динамику их разгона. Однако для практических задач удобно определять углы разворота $\beta(\infty)$ по соотношению (1).

Начальный (ударно-волновой) угол разворота $\beta(0)$ находят по пересечению ударных поляр материала метаемой пластины и продуктов взрыва [6]. Это — строгое определение угла $\beta(0)$.

Для прикладных целей используют приближенные методы. В работе [7] предложен графический способ определения массовой скорости в материале пластины при выходе ударной волны на свободную поверхность $u_0 = w_0/2$ по пересечению (p, u) -диаграммы материала пластины с изоэнтропой разгрузки продуктов взрыва из точки Жуге $(p_J, 0)$ — при скользящей детонации в направлении y скорость продуктов взрыва $u = 0$ (здесь w_0 — скорость пластины при выходе ударной волны на свободную поверхность).

В работе [8] примерно те же соображения представлены в аналитической форме:

$$\beta(0) = 2 \arcsin u_0/D, \quad (2)$$

$$\rho_1 u_0 (A_1 + B_1 u_0) = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{(\gamma^2 - 1) u_0}{2\gamma D} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (3)$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-01-00807а).

Здесь левая часть — ударная адиабата материала метаемой пластины, а правая — давление продуктов детонации в одномерной волне разгрузки, ρ_0 , ρ_1 — плотности ВВ и пластины, γ — показатель изоэнтропы.

В работе [8] предложено также соотношение для определения промежуточных значений угла разворота:

$$\beta y = \beta(0) + (\beta(\infty) - \beta(0))(1 - \exp(-\xi y)). \quad (4)$$

Здесь $\beta(0)$ определяется из соотношений (2) и (3), $\beta(\infty)$ задается формулой (1). Параметр ξ может зависеть от свойств ВВ, но в первом приближении, как показывает сравнение с экспериментами, можно положить $\xi = 2$.

Из анализа соотношений (1)–(4) следует, что из всех физико-механических свойств материала метаемой пластины влияние на динамику угла разворота оказывает только плотность ρ .

Вместе с тем, из расчетно-аналитического рассмотрения нагружения металлов в упруго-пластической области следует, что динамическая прочность материала может влиять на характер разворота пластины [9].

В работе [10] экспериментально обнаружено появление регулярных упругих волн на поверхности пластины, метаемой скользящей детонационной волной ($0.95 \leq D \leq 2$ км/с). Этот эффект объясняется влиянием прочности материала.

Из сказанного выше вытекает цель данных исследований — экспериментальное изучение влияния прочности на динамику разворота пластины, метаемой в режиме скользящей детонации заряда ВВ. Для исследований выбраны стали (12Х18Н10Т и Ст. 3) и алюминиевые сплавы (АД-1 и АМГ-6). Эти материалы обладают практически одинаковыми физическими свойствами, но существенно различаются динамической прочностью (величиной динамического предела текучести) [9, 11].

Схема постановки опытов приведена на рис. 1. Тонкая пластина толщиной $0.2 \div 2$ мм разгонялась в режиме скользящей детонации толстого ($r \gg 1$) слоя ВВ. Использовалось бризантное пластическое ВВ на основе высокодисперсного тэна ($\rho_0 = 1.5$ г/см³, $D = 7.8$ км/с).

Расстояние от линии инициирования основного заряда ВВ (перпендикулярной плоскости рисунка) до плоскости, видимой фотохронографом, выбиралось достаточно большим, с тем чтобы практически исклю-

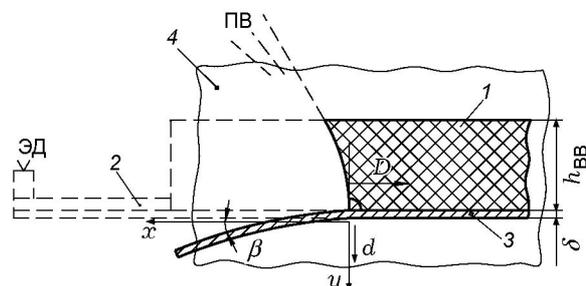


Рис. 1. Схема постановки опытов при скользящей детонации заряда ВВ:

1 — заряд ВВ высотой h , мм, 2 — метаемая пластина толщиной δ , мм, 3 — дополнительный заряд ВВ, обеспечивающий создание плоского детонационного фронта, параллельного оптической оси фотохронографа, 4 — взрывная подсветка, ЭД — электродетонатор, ПВ — продукты взрыва, d — база полета пластины, мм, β — угол отгиба метаемой пластины, град



Рис. 2. Фотохронограмма опыта

чить влияние кривизны цилиндрической детонационной волны, которая по этой причине при анализе результатов принималась плоской. Скорость пластины в направлении оси y регистрировалась фотохронографом в режиме щелевой развертки по скорости перекрывания пластиной светящейся щели (подсветка от вспомогательного заряда ВВ, расположенного за исследуемым объектом). Типичная фотохронограмма приведена на рис. 2.

Погрешность эксперимента в основном определяется погрешностью расчета по фотохронограммам опытов. Максимальный разброс для линейных величин составляет приблизительно ± 0.25 мм и соответствует максимальной ошибке в определении угла $\pm 2.0^\circ$.

На рис. 3, 4 представлены зависимости $\beta(y)$ для стали и алюминия соответственно. Построение выполнено по соотношению (4) [8].

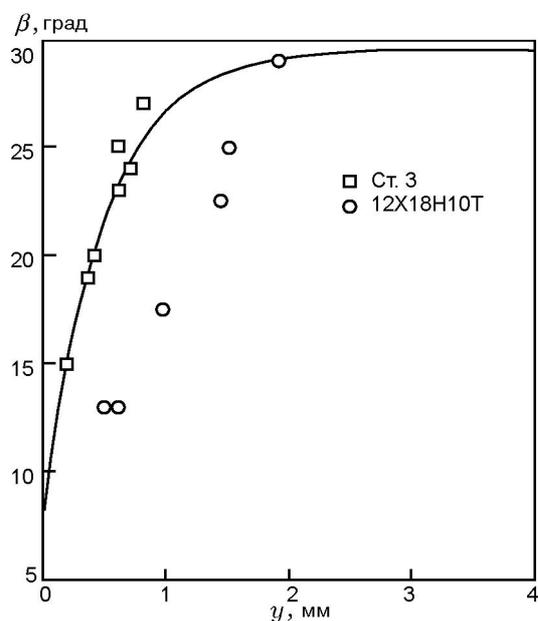


Рис. 3. Зависимость $\beta(y)$ для стали

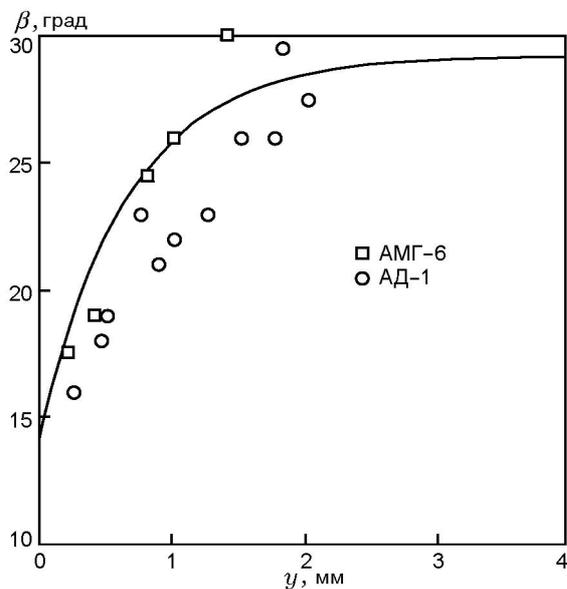


Рис. 4. Зависимость $\beta(y)$ для алюминия

Помимо этого, на рисунках приведены экспериментальные точки для сталей Ст. 3 и 12X18H10T и алюминиевых сплавов АД-1 и АМГ-6. Видно, что зависимость (4) удовлетворительно описывает эксперименты с менее прочными и чаще используемыми в технологии (в частности, в сварке взрывом) материалами.

Для описания хода зависимости $\beta(y)$ для более прочных образцов из аналогичных мате-

риалов необходима корректировка базового соотношения (4). Для этого предварительно была выполнена обработка экспериментальных точек методом наименьших квадратов [12] и выделен отрезок на прямой $\beta(y)$. Начальная и конечная координаты отрезка отстоят от значений $\beta(0)$ и $\beta(\infty)$ на $2 \div 4^\circ$. При погрешности измерения $\pm 2^\circ$ обеспечивается удовлетворительная сшивка координат отрезка $\beta(y)$ с точками $\beta(0)$ и $\beta(\infty)$. Затем путем изменения показателя степени экспоненты и введения коэффициента перед экспонентой в соотношении (4) добились наиболее близкого совпадения кривой и прямой линий на заданном участке $\beta(y)$.

На рис. 5–8 приведены результаты расчетов по корректировке соотношения (4).

Таким образом, для описания динамики разворота пластин из исследуемых металлов (материалы с одинаковыми физическими свойствами, но различающиеся по прочности) при метании в режиме скользящей детонации заряда ВВ в базовое соотношение (4) введены следующие изменения:

сталь Ст. 3:

$$\beta(y) = \beta(0) + (\beta(\infty) - \beta(0))[1 - \exp(-2.09y)];$$

сталь 12X18H10T:

$$\beta(y) = \beta(0) + (\beta(\infty) - \beta(0))[1 - 1.3 \exp(-0.97y)];$$

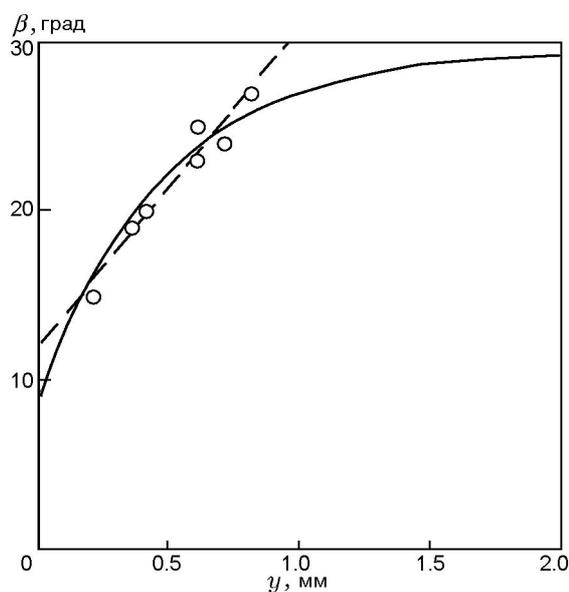


Рис. 5. Скорректированная зависимость $\beta(y)$ для стали Ст. 3

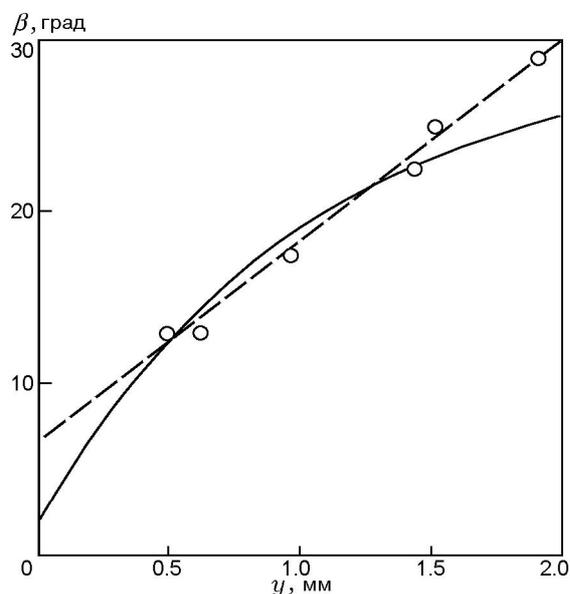


Рис. 6. Скорректированная зависимость $\beta(y)$ для стали 12X18H10T

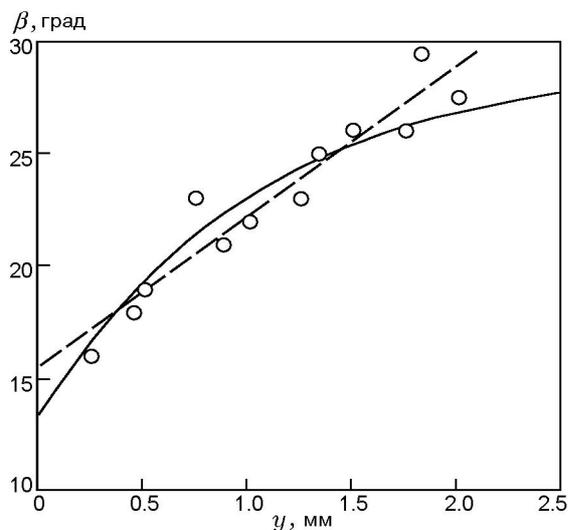


Рис. 7. Скорректированная зависимость $\beta(y)$ для алюминиевого сплава АД-1

алюминиевый сплав АМГ-6:

$$\beta(y) = \beta(0) + (\beta(\infty) - \beta(0))[1 - \exp(-1.91y)];$$

алюминиевый сплав АД-1:

$$\beta(y) = \beta(0) + (\beta(\infty) - \beta(0))[1 - 1.4 \exp(-1.25y)].$$

Различие в динамике разворота пластин определяется их динамической прочностью, более конкретно — динамическим пределом текучести, который определяет сопротивляемость материала динамическим нагрузкам.

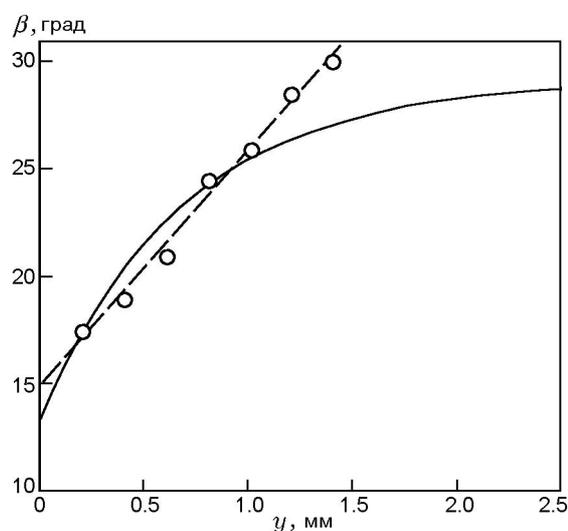


Рис. 8. Скорректированная зависимость $\beta(y)$ для алюминиевого сплава АМГ-6

Ниже приведены значения динамического предела текучести исследуемых материалов: при $p = \sigma_{xx} = 23.7$ ГПа

$$12X18H10T \quad Y = 10.6 \text{ ГПа} \quad [11],$$

$$\text{Ст. 3} \quad Y = 5.4 \text{ ГПа} \quad [11];$$

при $p = \sigma_{xx} = 18.5$ ГПа

$$\text{АД-1} \quad Y = 1.6 \text{ ГПа} \quad [9],$$

$$\text{АМГ-6} \quad Y = 1.1 \text{ ГПа} \quad [9].$$

Здесь σ_{xx} — главное напряжение вдоль оси Ox , p — давление на контактной границе «продукты взрыва — металл» при скользящей детонации заряда ВВ (в условиях проведения опытов).

Из анализа расчетно-экспериментальных данных следует, что в пределах разброса $\leq 10\%$ справедливы соотношения

$$\frac{Y_{12X18H10T}}{Y_{\text{Ст. 3}}} \approx \frac{\xi_{\text{Ст. 3}}}{\xi_{12X18H10T}}, \quad \frac{Y_{\text{АД-1}}}{Y_{\text{АМГ-6}}} \approx \frac{\xi_{\text{АМГ-6}}}{\xi_{\text{АД-1}}}.$$

Влияние коэффициента при экспоненте k заключается в смещении точки пересечения зависимости $\beta(y)$ с осью ординат вниз (в формальном уменьшении значения начального угла разворота $\beta(0)$). Расчеты, проведенные для исследованных материалов, показали, что увеличение коэффициента k выше значения 1.4 не приводит к заметному сближению расчетной зависимости с экспериментальными точками. Значение $k = 1.4$ соответствует смещению точки пересечения $\beta(0)$ вниз на $\leq 5^\circ$.

Следовательно, зная ход зависимости $\beta(y)$ для металла или сплава, можно построить такую же зависимость для металла или сплава с близкими физическими свойствами, но с иной динамической прочностью, используя соотношение

$$\xi_x = \xi_0 \frac{Y_0}{Y_x},$$

где индексом x обозначен материал, для которого зависимость $\beta(y)$ не известна, индексом 0 — для которого известна. Учет влияния коэффициента k на ход зависимости $\beta(y)$ может быть выполнен простым ее смещением вниз на $\approx 5^\circ$.

Таким образом, основные результаты работы заключаются в следующем.

- Экспериментально зарегистрирована различная динамика разворота пластин, метаемых в режиме скользящей детонации заряда ВВ, если пластины выполнены из материалов с близкими физическими свойствами, но с различной прочностью.

- Проведена корректировка существующего соотношения для угла разворота пластины, учитывающая динамическую прочность материала.

- Предложен метод определения зависимости угла разворота пластины от базы полета по известной зависимости для металла с близкими физическими свойствами, если для обоих материалов определен динамический предел текучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980.
2. **Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А.** Взрывные технологии. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
3. **Дерибас А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 68–74.
4. **Дерибас А. А., Кузьмин Г. Е.** Двумерная задача о метании пластины скользящей детонационной волной // Прикладная механика и техническая физика. — 1970. — Т. 11, № 1. — С. 177–183.
5. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** О расчете распада разрыва на границе ВВ — конденсированная среда // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 1. — С. 126–133.
6. **Курант Р., Фридрихс К.** Сверхзвуковое течение и ударные волны. — М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
7. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л.** О начальной стадии разгона тонких пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 4. — С. 143–146.
8. **Киселев В. В.** Оценка параметров метания металлических пластин скользящей детонацией зарядов конденсированных ВВ в начальной фазе процесса // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 138–142.
9. **Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А.** Сопротивление материалов пластической деформации при высокоскоростном деформировании в ударных волнах. — М.: ЦНИИ Атоминформ, 1990.
10. **Беспашошников Ю. А., Кожевников В. Е., Чернухин В. И., Пай В. В.** Влияние прочности материала при метании пластин низкоскоростными взрывчатыми веществами // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 135–138.
11. **Вильданов В. Г., Слободенюков В. М., Борщевский А. О., Зверев С. В., Ткачев О. В.** Скорость звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T // Труды междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 17–21 марта 2003. — С. 155–158.
12. **Румшиский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971.

Поступила в редакцию 19/V 2009 г.