

УДК 534.222.2

О ДЕФОРМИРОВАНИИ БЕРИЛЛИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОСОМ СОУДАРЕНИИ

О. Б. Дреннов, А. Л. Михайлов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров

Экспериментально исследован процесс высокоскоростного косоугольного соударения образцов из бериллия (бериллия и нержавеющей стали). Проведено сравнение амплитуд возмущений бериллия, магния, алюминия, меди, стали. Установлено, что при одних и тех же числах Маха амплитуда возмущений максимальна для бериллия. Малая пластичность и высокая хрупкость бериллия определяют характер образования сварного соединения. Расплавление и перемешивание металлов происходят в очень узкой зоне, которая на микрошлифах практически не фиксируется. При косоугольном соударении бериллия и стали к контактной границе присоединяется слой твердого раствора повышенной твердости.

Одним из способов динамического нагружения металлов является нагружение ударными волнами (нормальными или косыми). Нагружение косыми ударными волнами осуществляется при соударении лайнера и мишени под углом.

При косоугольном соударении металлов в окрестности точки контакта развиваются интенсивные пластические сдвиговые деформации и зоны сильного разогрева. В течение малого промежутка времени реализуется сдвиговое течение с градиентом скорости, зависящим от угла и скорости соударения пластин. Вследствие интенсивного деформирования разогрев в локальной зоне приводит к существенному разупрочнению вещества. В этой области модуль сдвига и предел текучести значительно меньше, чем при нормальных условиях [1].

Указанные эффекты приводят к искажению профиля контактной границы металлов после соударения. Возникают регулярные волны, несимметричные искаженные волны, слои расплава из перемешанных компонентов. В ряде случаев развитие таких возмущений приводит к прочному соединению образцов — сварке взрывом [2–4].

В настоящее время достаточно подробно исследовано деформирование большого числа металлов при высокоскоростном косоугольном соударении. Однако, по мнению авторов данной работы, недостаточно внимания уделяется изучению бериллия, обладающего уникальными физико-механическими свойствами: сочетанием малых плотности и теплоемкости с аномально высокими модулем Юнга, скоростью звука, твердостью, что может привести к аномальному развитию сдвиговой неустойчивости для этого металла. Это может быть связано с тем, что бериллий обладает высокой хрупкостью, твердостью и малой пластичностью [5].

Для изучения деформирования бериллия при высокоскоростном косоугольном соударении проведена серия экспериментов по схеме, представленной на рис. 1. В массивную стальную обойму помещались неподвижная пластина (диск из бериллия диаметром 80 мм и толщиной 4 мм; в ряде опытов использовался диск из нержавеющей стали 12X18H10T) и метаемая пластина (диск из бериллия диаметром 80 мм и толщиной 2 мм). На поверхности обоймы в месте контакта с метаемой пластиной устанавливался заряд бризантного взрывчатого вещества (ВВ) на основе пластифицированного октогена (скорость детонации $D \approx 8,75$ мм/мкс, плотность $\rho \approx 1,85$ г/см³) или гексогена ($D \approx 8,15$ мм/мкс,

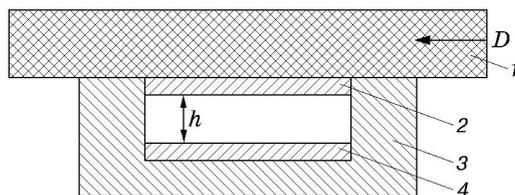


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд бризантного взрывчатого вещества; 2 — метаемая пластина;
3 — стальная обойма; 4 — неподвижная пластина

$\rho \approx 1,72 \text{ г/см}^3$) толщиной 20–30 мм. В заряде ВВ инициировалась плоская скользящая детонационная волна. Площадь поверхности заряда ВВ в 1,75 раза превосходила площадь поверхности обоймы и в 9 раз — площадь поверхности метаемого образца, тем самым обеспечивалось его нагружение стационарной скользящей детонационной волной с фронтом, практически перпендикулярным плоскости бериллиевой пластины.

База полета лайнера $h = 10 \text{ мм}$. На этой базе завершается разгон лайнера. Соударение пластин происходит в стационарных условиях [6, 7]. Угол соударения пластин γ определяется по соотношениям [2, 8]

$$\sin \gamma = \frac{W}{v_k}, \quad W = 1,2D \frac{\sqrt{1 + (32/27)R} - 1}{\sqrt{1 + (32/27)R} + 1}, \quad R = \frac{m_{\text{ВВ}}}{m_{\text{л}}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}} h_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{л}} h_{\text{л}}}, \quad (1)$$

где W — скорость полета лайнера; v_k — скорость перемещения точки контакта; $m_{\text{ВВ}}$, $m_{\text{л}}$ — масса слоя ВВ и лайнера; $\rho_{\text{ВВ}}$, $\rho_{\text{л}}$ — плотность слоя ВВ и лайнера; $h_{\text{ВВ}}$, $h_{\text{л}}$ — толщина слоя ВВ и лайнера.

В указанных условиях эксперимента $v_k = D$. Параметры D , $\rho_{\text{ВВ}}$, $\rho_{\text{л}}$, $h_{\text{ВВ}}$, $h_{\text{л}}$ известны с высокой точностью (до третьего знака после запятой). Возможная ошибка в определении угла соударения γ имеет систематический характер и определяется надежностью описания процесса метания пластин при скользящей детонации слоя ВВ вторым соотношением в (1), которая подтверждена многочисленными экспериментами.

В зависимости от величины отношения R угол соударения пластин меняется от $\gamma \approx 26,5^\circ$ до $\gamma \approx 29,5^\circ$, т. е. $\bar{\gamma} \approx 28^\circ$.

После динамического нагружения (давление в бериллиевых образцах в окрестности точки контакта не превышало 9 ГПа) обойма и пакет пластин улавливались слоем пористого вещества. Затем образцы из бериллия (метаемая и неподвижная пластины) разрезались по центральной оси в направлении движения детонационной волны. Из полученных фрагментов изготавливались микрошлифы, по которым проводился металлографический анализ.

Исходная шероховатость (амплитуда начального возмущения) заготовок из бериллия составляла $10 \text{ мкм} \leq a \leq 20 \text{ мкм}$.

Фотографии характерных микрошлифов приведены на рис. 2.

Из результатов опытов и металлографического анализа следует, что несмотря на малую пластичность, бериллий имеет высокую склонность к волнообразованию без заметного пластического течения материала вдоль линии скольжения и струеобразования.

На рис. 2, а, б приведены фотографии контактной границы бериллиевых образцов после высокоскоростного косоугольного соударения ($M = v_k/c$ — число Маха, c — скорость звука, \bar{a} , $\bar{\lambda}$ — осредненные амплитуда и длина волны возмущений).

В работе [9] по экспериментальным данным построены зависимости $a(M)$ для ряда металлов. Отмечается, что амплитуда возмущений при одинаковых значениях M выше для

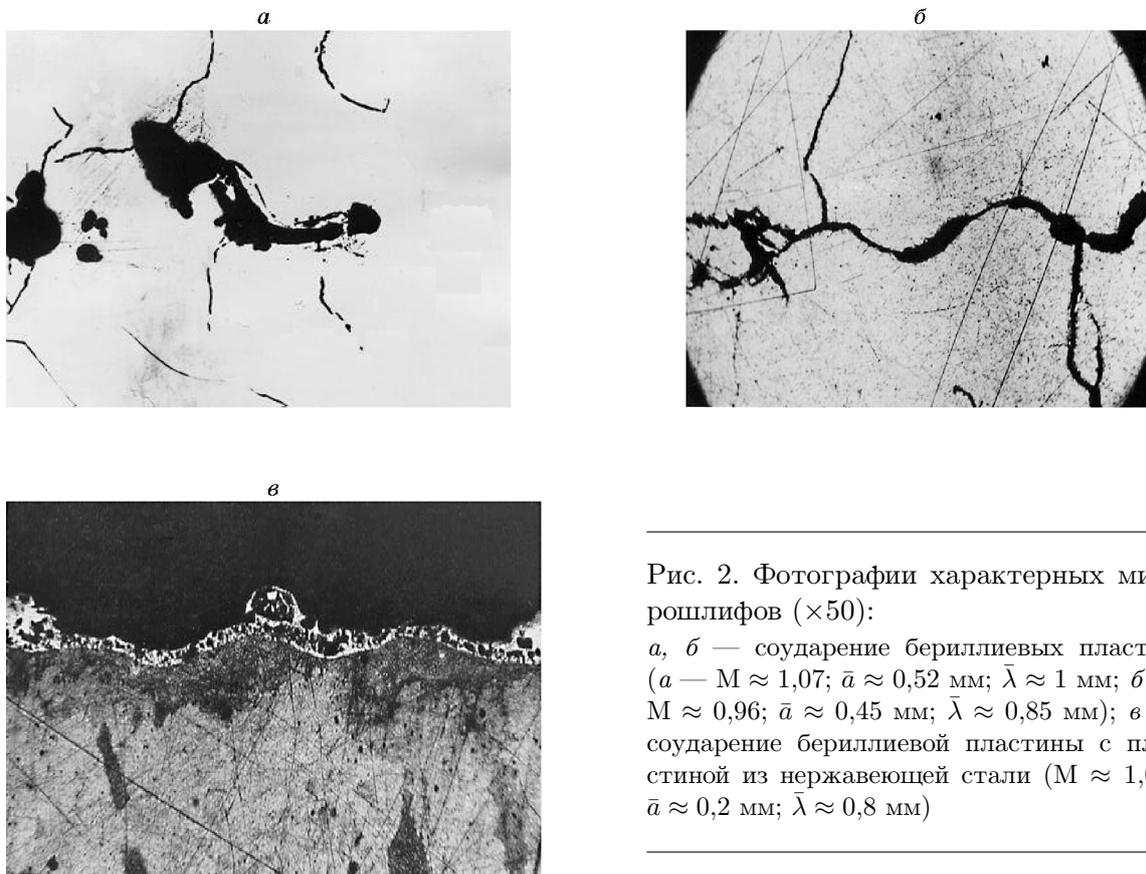


Рис. 2. Фотографии характерных микрошлифов ($\times 50$):

a, б — соударение бериллиевых пластин (*a* — $M \approx 1,07$; $\bar{a} \approx 0,52$ мм; $\bar{\lambda} \approx 1$ мм; *б* — $M \approx 0,96$; $\bar{a} \approx 0,45$ мм; $\bar{\lambda} \approx 0,85$ мм); *в* — соударение бериллиевой пластины с пластиной из нержавеющей стали ($M \approx 1,07$; $\bar{a} \approx 0,2$ мм; $\bar{\lambda} \approx 0,8$ мм)

металлов с меньшей динамической прочностью. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов (см. рис. 2, *a, б*) с данными [9] (рис. 3). Видно, что при одинаковых числах Маха максимальная амплитуда возмущений достигается при косом соударении бериллиевых образцов. Объяснить этот факт можно, по-видимому, существенным различием прочностных свойств материалов. Для бериллия, алюминия, меди значения статического предела текучести соответственно равны $2,55 \cdot 10^{-7}$; $5,63 \cdot 10^{-7}$; $6,88 \cdot 10^{-7}$ Н/м², значения статического модуля сдвига — $1,30 \cdot 10^{-10}$; $2,45 \cdot 10^{-10}$; $4,15 \cdot 10^{-10}$ Н/м² [5, 10].

Высокая хрупкость и малая пластичность бериллия существенно влияют на состояние контактной границы после косоугольного соударения. На микрошлифах (см. рис. 2, *a, б*) видно интенсивное трещинообразование, по границе гребней и впадин происходит расслоение. По-видимому, зона локального плавления в окрестности точки контакта достаточно узкая (менее 1 мкм) и не выявлена на фотографиях шлифов, практически отсутствует и зона перемешивания материалов. Эта зона легко разрушается при воздействии волны разрежения. Микрошлиф на рис. 2, *a* соответствует сварному соединению бериллиевых образцов. Справа на рис. 2, *a* граница раздела металлов не фиксируется. Несмотря на то что расслоение отсутствует, перемешивания металлов не происходит. Отсутствуют также заметные изменения структуры бериллия вблизи контактной границы.

На рис. 2, *в* показана контактная граница бериллий — нержавеющая сталь 12Х18Н10Т после высокоскоростного косоугольного соударения. Зафиксировано соединение бериллия со сталью. Толщина приварившегося к нержавеющей стали слоя не превышает 125 мкм (плакированный слой). Следующая за ударной волной волна разрежения вызывает изменения в структуре плакированного слоя (появляются поры). Вдоль крупных пор происходит откольное разрушение.

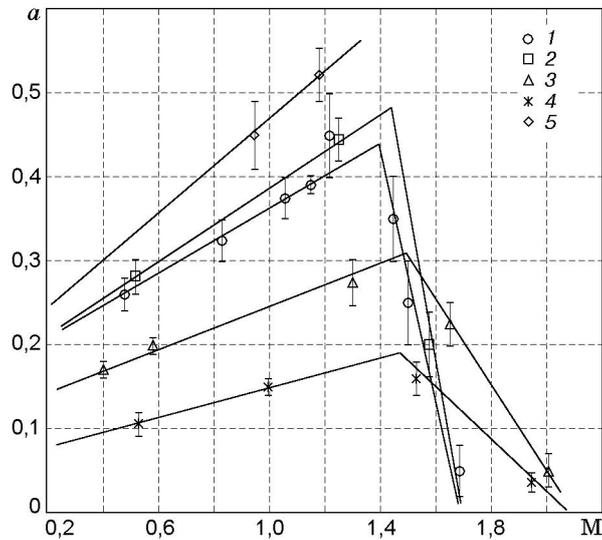


Рис. 3. Зависимость амплитуды возмущений на контактной границе однородных металлов a от числа Маха:

1 — соударение алюминиевых пластин, 2 — магниевых, 3 — медных, 4 — стальных, 5 — бериллиевых

Слой, прилегающий к контактной границе стали, представляет собой твердый раствор бериллий — железо с повышенной прочностью и твердостью ($5,9 \text{ ГПа} < H < 9,8 \text{ ГПа}$), способный сопротивляться откольному разрушению. По-видимому, откольное разрушение происходит по границе твердый раствор — бериллий.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Бериллий имеет наибольшую среди исследованных металлов (бериллий, алюминий, магний, медь, сталь) склонность к волнообразованию при высокоскоростном косом соударении (при одних и тех же числах Маха амплитуда возмущений на контактной границе максимальна для бериллия).

Малая пластичность и высокая хрупкость бериллия определяют характер образования сварного соединения. Перемешивание расплавленных слоев происходит в очень узкой зоне, не зафиксированной в данных экспериментах. В этой зоне происходит расслоение в волне разрежения. Заметных изменений структуры бериллия в зоне соударения не наблюдается.

При косом соударении бериллия со сталью на контактной границе образуется слой твердого раствора бериллий — железо повышенной прочности. Этот слой остается присоединенным к поверхности стали (плакированный слой) и имеет характерную пористую структуру.

Поскольку вдоль линии соударения бериллиевых образцов происходит значительное волнообразование и отсутствует заметная зона пластического течения, плавления и перемешивания, требуется дальнейшее изучение механизма потери устойчивости контактной границы в режимах косого соударения (сварки металлов взрывом).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Низовцев П. Н., Раевский В. А. Развитие возмущений на границе раздела металлов при косом соударении со сверхзвуковой скоростью перемещения точки контакта // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика.* 2001. Вып. 1. С. 4–12.

2. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
3. **Bahrani A. S., Black T. J., Crossland B.** The mechanics of wave formation in explosive welding // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966. V. 296, N 1445. P. 123–136.
4. **Cowan G., Holtzman A.** Flow configurations in colliding plates explosive bonding // J. Appl. Phys. 1963. V. 34, N 4. P. 928–939.
5. **Уайт Д., Берк Д.** Бериллий. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
6. **Кузьмин Г. Е., Симонов В. А., Яковлев И. В.** Зависимость параметров волн при сварке взрывом от фазы разгона метаемой пластины // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 3. С. 458–461.
7. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л.** О начальной стадии метания тонких пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 4. С. 143–146.
8. **Дерибас А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 5. С. 68–74.
9. **Дреннов О. Б.** О состоянии контактной границы слоев металлов в широком диапазоне изменения скорости косоугольного соударения // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 118–124.
10. **Таблицы физических величин: Справ. /** Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

*Поступила в редакцию 28/V 2001 г.,
в окончательном варианте — 6/VIII 2001 г.*
