

УДК 534.222.2

## ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛОВ

О. Б. Дреннов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Россия  
E-mail: drennov@mail.ru

Приведены результаты экспериментов по нагружению пакета плотно прилегающих металлических пластин косою ударной волной, в которых зарегистрирована потеря устойчивости контактной границы между пластинами. Показано, что периодические волнообразные возмущения формируются при развитии неустойчивости Кельвина — Гельмгольца за время, в течение которого контактная граница совершает поворот вследствие ударно-волнового воздействия. Установлено, что конечная амплитуда и длина волн возмущений определяются толщиной разупрочненного слоя при пластическом течении.

Ключевые слова: косая ударная волна, сдвиговая неустойчивость, амплитуда и длина волн возмущений, градиент скорости.

Во многих случаях ударные волны в конденсированных средах распространяются таким образом, что их фронты оказываются непараллельными различным границам раздела или перпендикулярными вектору скорости среды перед фронтом. Основными параметрами, характеризующими такие волны, являются угол поворота потока вещества за фронтом  $\theta$ , скорость течения потока  $q$ , давление на фронте косою ударной волны  $P$  [1].

В случае косою соударения слоев металлов определяющие параметры  $\theta$ ,  $q$ ,  $P$  достаточно точно рассчитываются аналитически и измеряются в экспериментах [2, 3]. Подробно исследовано поведение контактной границы двух металлов при дозвуковом (сварка взрывом [2–5]) и сверхзвуковом [6, 7] режимах нагружения.

Режим нагружения двух плотно прилегающих металлических пластин (зазор между слоями отсутствует) практически не изучен. В работе [8], в которой приведены результаты экспериментов по нагружению косою ударной волной двух плотно прилегающих алюминиевых пластин, зафиксированы развитие волнообразных возмущений на контактной границе и сварка взрывом. В [9] описаны эксперименты, в которых воздействие косою ударной волны на контактную границу стальных образцов приводит к развитию на ней периодических волнообразных возмущений. Следует отметить, что в экспериментах [8, 9] реализована возможность совместного движения слоев металлов после выхода косою ударной волны на свободную поверхность и поворота этой поверхности за фронтом волны. Такое движение является кратковременным, при этом имеет место скольжение слоев металлов относительно друг друга после их поворота вследствие ударно-волнового воздействия.

В проведенной серии экспериментов задавались более жесткие начальные условия развития возмущений, а именно исключалась возможность совместного движения материалов после их нагружения косою ударной волной.

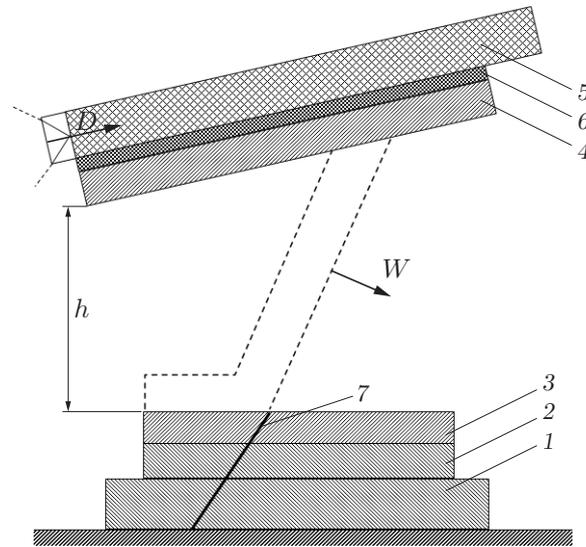


Рис. 1. Схема нагружения:

1 — основание, 2 — первая неподвижная пластина, 3 — вторая неподвижная пластина, 4 — пластина-ударник, 5 — слой бризантного ВВ, 6 — тонкая прокладка, 7 — фронт косоугольной ударной волны; штриховые линии — форма пластины 4 после соприкосновения с пластиной 3

Схема нагружения приведена на рис. 1. На стальное основание устанавливается неподвижная пластина, на которой размещается другая неподвижная пластина. Плотно прилегающие друг к другу пластины 2 и 3 имеют размеры  $100 \times 60 \times 5$  мм. В экспериментах использовались пластины из меди марки М1 и алюминиевого сплава АМГ в различных комбинациях. Над пакетом пластин устанавливается ударник из алюминиевого сплава АМГ размером  $150 \times 120 \times 4$  мм. Минимальное расстояние между ударником и пластиной 3 равно  $h = 20$  мм, что обеспечивает стационарность параметров соударения [10]. На поверхности ударника размещается слой бризантного взрывчатого вещества (ВВ), в котором возбуждается плоская скользящая детонационная волна. С этой целью используется дополнительный плоский заряд бризантного ВВ, в котором детонация генерируется одновременно на всей поверхности [11]. Для предотвращения возникновения откольных явлений в ударнике между ним и слоем ВВ устанавливается тонкая прокладка из материала с малым акустическим импедансом, наличие которой не влияет на скорость и не нарушает симметрию движения ударника [12].

В экспериментах реализован сверхзвуковой режим нагружения  $V_k > C_{Cu} > C_{Al}$ : скорость перемещения точки косоугольного соударения ударника с поверхностью пластины  $V_k$  больше объемной скорости звука  $C$  в ней.

Основные результаты экспериментов представлены в таблице ( $a$ ,  $\lambda$  — амплитуда и длина волны возмущений, реализующихся на контактной границе (среднее значение для 20 соседних возмущений)). Соответствующие фотографии микрошлифов контактных границ приведены на рис. 2.

Поверхности контакта нагружаемых пластин обрабатывались по классу точности  $R_z 20$  (шероховатость поверхности приблизительно равна 10 мкм, амплитуда начального возмущения  $a_0 \approx 10$  мкм).

В экспериментах зафиксировано развитие волнообразных возмущений на контактных границах алюминий — алюминий, медь — медь, алюминий — медь при начальном плотном контакте образцов. Возмущения на контактной границе обусловлены развитием сдви-

Результаты экспериментов по ударно-волновому нагружению медных и алюминиевых пластин

Номер эксперимента	Материал пластины		$V_k$ , мм/мкс	$a$ , мкм	$\lambda$ , мкм
	Пластина 2	Пластина 3			
1	Al	Al	6,9	$100 \pm 10$	$200 \pm 20$
2	Cu	Cu	4,0	$20 \pm 5$	$60 \pm 15$
3	Al	Cu	5,5	$45 \pm 5$	$90 \pm 15$
4	Al	Cu	6,0	$40 \pm 5$	$70 \pm 15$
5	Al	Cu	6,9	$20 \pm 5$	$55 \pm 10$

говой неустойчивости. Под действием косо́й ударной волны за ее фронтом происходят поворот и скольжение слоев металлов относительно друг друга вдоль контактной границы, в окрестности которой развиваются интенсивные пластические деформации. Температура материала существенно увеличивается. В тонких приграничных слоях материал теряет прочность, а в слоях, расположенных на большей глубине, переходит в пластическое состояние. Механизм образования возмущений в соответствии с данной экспериментальной схемой нагружения косо́й ударной волной может быть объяснен на основе физической модели развития сдвиговой неустойчивости, предложенной в [9]. При обработке поверхностей по классу точности R<sub>z</sub>20 между пластинами существует локальный зазор  $\Delta \approx 20$  мкм. Согласно результатам двумерных расчетов [9] размер этого зазора является достаточным для развития сдвиговых течений материалов. Перемещение вещества в микрозазор вызывает кратковременный (длящийся десятые доли микросекунды) скачок скорости, величина которого составляет несколько миллиметров в микросекунду. Увеличение скорости в области зазора обуславливает возникновение кратковременного градиента скорости в направлении, перпендикулярном границе раздела областей. При движении слоев относительно друг друга наблюдается тангенциальный разрыв скорости и развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца [9].

После прохождения косо́й ударной волны через контактную границу начальное возмущение, наличие которого необходимо для возникновения неустойчивости, увеличивается. В этот момент, так же как при развитии неустойчивости в экспериментах по нагружению косо́й ударной волной системы диск — кольцо [9], наблюдается кратковременный тангенциальный разрыв скорости величиной порядка нескольких миллиметров в микросекунду. Следует отметить, что при нагружении различных металлов (алюминий — медь) возможно также развитие неустойчивости Рихтмайера — Мешкова. Однако вклад такой неустойчивости в развитие возмущений в данном случае, по-видимому, менее существен по сравнению со вкладом неустойчивости Кельвина — Гельмгольца. Это утверждение следует из анализа результатов экспериментов по нагружению различных металлов ударной волной, фронт которой параллелен контактной границе. При этом наблюдается ускорение контактной границы разноплотных сред ударной волной. В данных экспериментах при сравнимых амплитудах давления ( $P \leq 30$  ГПа) не зафиксировано развития возмущений на контактной границе, характеризующейся исходной чистотой обработки R<sub>z</sub>20 и выше.

Таким образом, экспериментально зафиксировано развитие волнообразных возмущений на контактной границе плотно прилегающих металлических пластин при ее нагружении косо́й ударной волной. В соответствии с реализуемой схемой проведения экспериментов совместное движение слоев после выхода косо́й ударной волны на свободную поверхность и поворота вследствие ударно-волнового воздействия невозможно.

За счет развития интенсивных пластических деформаций за фронтом ударной волны происходит кратковременное разупрочнение вещества, обусловленное разнородным характером деформирования. Наличие зазора (при стандартной обработке деталей по классу

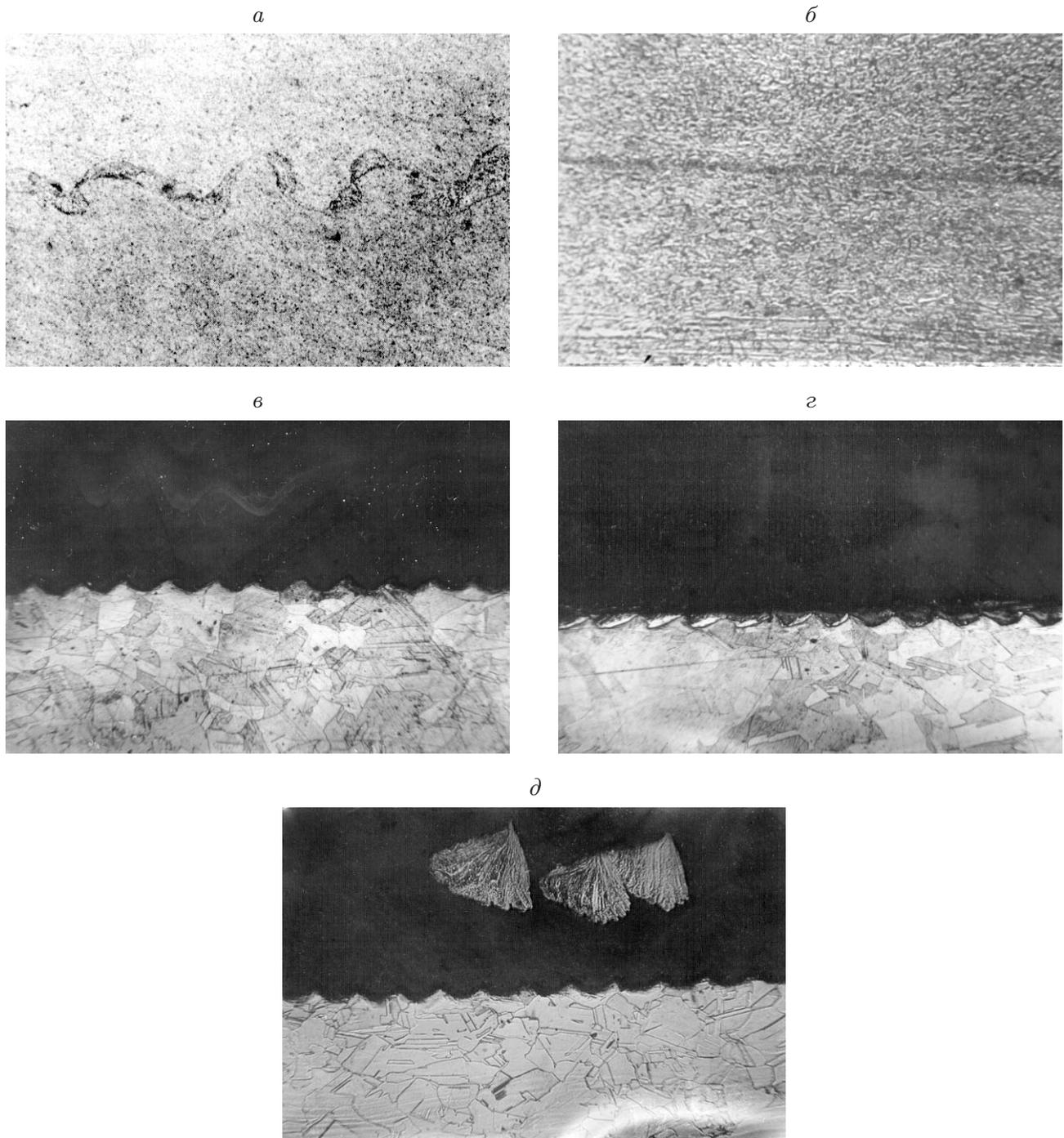


Рис. 2. Фотографии микрошлифов контактных границ алюминиевых и медных пластин:

*a* — Al–Al (эксперимент 1) ( $\times 100$ ), *б* — Cu–Cu (эксперимент 2) ( $\times 50$ ), *в* — Al–Cu (эксперимент 3) ( $\times 100$ ), *г* — Al–Cu (эксперимент 4) ( $\times 100$ ), *д* — Al–Cu (эксперимент 5) ( $\times 200$ )

точности  $10 \text{ мкм} \leq 2a_0 \leq 20 \text{ мкм}$ ) приводит к появлению значительного (до 4 мм/мкс), но кратковременного (менее 0,2 мкс) градиента скорости вещества вдоль границы раздела, что в свою очередь вызывает увеличение возмущений. Времени, в течение которого существует градиент скорости, оказывается достаточно для реализации и развития сдвиговой неустойчивости. Конечная амплитуда возмущений  $a$  определяется толщиной слоя металла, перешедшего в пластическое состояние, так как именно этот слой вовлекается в сдвиговое течение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Курант Р.** Сверхзвуковое течение и ударные волны / Р. Курант, К. Фридрихс. М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
2. **Дерibas А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1998.
3. **Крупин А. В.** Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель и др. М.: Металлургия, 1975.
4. **Кудинов В. М.** Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. М.: Металлургия, 1978.
5. **Конон Ю. А.** Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. М.: Машиностроение, 1987.
6. **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.
7. **Дреннов О. Б.** Косоугольное соударение металлических пластин со сверхзвуковой скоростью точки контакта // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1999. Вып. 1. С. 35–38.
8. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л.** Соединение алюминиевых образцов по беззазорной схеме при сверхзвуковом режиме нагружения // Физика и химия обраб. материалов. 1995. № 3. С. 84–87.
9. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Низовцев П. Н., Раевский В. А.** Неустойчивость контактной границы слоев из стали при воздействии косоугольной ударной волны // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 2. С. 3–13.
10. **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.
11. **Шалль Р.** Физика детонации // Физика быстропротекающих процессов / Под ред. К. Фольрата, Г. Томера. М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 87–103.
12. **Глушак Б. Л., Новиков С. А., Погорелов А. П. и др.** Исследование инициирования ТНТ и ТГ 50/50 ударными волнами малой длительности // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 6. С. 90–95.

*Поступила в редакцию 9/IV 2014 г.*