

Рисунок 4. $L(t)$ -диаграммы опытов с SF_6

Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- с увеличением числа Маха УВ время t_0 перехода развития возмущений в развитую турбулентную стадию уменьшается и скорость роста зоны перемешивания увеличивается;
- при $\lambda/a_0 > 10$ время перехода развития возмущений в развитую турбулентную стадию можно описать представленным аналитическим решением, при $\lambda/a_0 \ll 10$ – нельзя, т.к. струи от возмущений существуют длительное время.

Список литературы

1. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc.Roy.Soc., 1950. V.A201. P.192.
2. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun.Pure Appl.Math., 1960. V.13. P.297.
3. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв.АН СССР, МЖГ, 1969, N 5. с.151-158.
4. Helmholtz H.L.F. Uber discontinuirlich Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss.// Berlin. 1868. P.215.
5. Авраменко М.И. О к-ε модели турбулентности. //Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005. – 76 с.
6. Бельский С.З., Фрадкин Е.С. Теория турбулентного перемешивания.// Труды Физического института АН СССР им. Лебедева, 1965. т.29, с.207-256.
7. Неуважаев В.Е. Математическое моделирование турбулентного перемешивания.// Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 2007. 160 с.
8. Зубарев В.Н., Козлов А.Д. и др. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. //М.: Энергоатомиздат. 1989, 232 с.
9. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Под редакцией Ф.К. Годунова. М.: //Изд-во «Наука», 1976, 400 с.

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛОВ

О.Б. Дреннов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Во многих практически важных 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 разворота потока вещества за фронтом θ , скорость течения потока q , давление на фронте косо́й ударной волны P [1].

В довольно часто реализующимся на практике случае – косо́е соударение слоев металлов – определяющие параметры θ , q и P достаточно точно рассчитываются аналитически и измеряются в экспериментах [2, 3]. Более того, подробно исследован характер поведения контактной границы двух металлов при дозвуковом («сварка взрывом» [2 – 5]) и сверхзвуковом [6, 7] режимах нагружения.

Режим нагружения двух плотноупакованных металлических пластин (зазор между слоями отсутствует) при последующем анализе поведения контактной границы (характер развития возмущений) практически не изучен. Можно выделить две экспериментальные работы [8, 9]. В первой [8] в экспериментах по нагружению двух плотноупакованных алюминиевых пластин косо́й ударной волной зафиксировано развитие волнообразных возмущений на контактной границе и сварка взрывом. Во второй [9] описаны опыты, в которых воздействие косо́й ударной волны на плотно контактирующую границу раздела стальных образцов приводит к развитию на ней периодических волнообразных возмущений.

По схеме проведения экспериментов как в [8], так и в [9] реализована возможность последующего совместного движения слоев металлов после выхода косо́й ударной волны на свободную поверхность и разворота этой поверхности за фронтом волны. Такое движение кратковременное, но сопровождается относительным скольжением слоев металлов после их ударноволнового разворота.

Настоящая серия экспериментов предполагает более жесткие начальные условия для развития возмущений – исключается возможность совместного движения материалов после их нагружения косо́й ударной волной.

Схема постановки опытов приведена на рисунке 1.

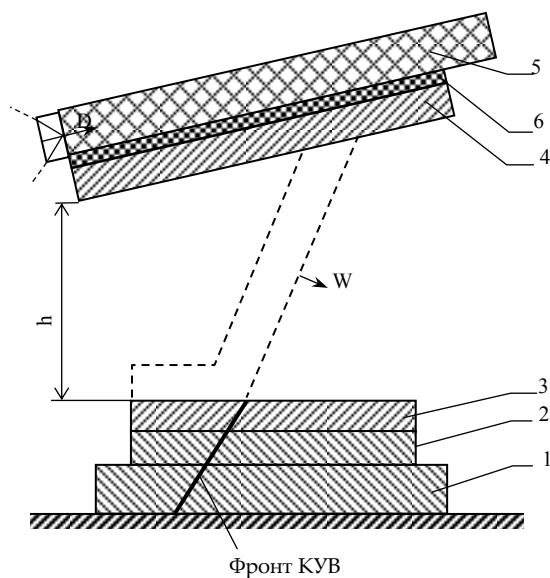


Рисунок 1. Схема постановки опытов по нагружению контактной границы двух металлов косо́й ударной волной

1. массивное основание
2. первая неподвижная пластина
3. вторая неподвижная пластина
4. пластина – ударник
5. слой бризантного ВВ
6. тонкая прокладка.

На массивное стальное основание (1) устанавливается неподвижная пластина (2). На ней размещается другая неподвижная пластина (3). Пластины (2) и (3) плотно прилегают друг к другу, имеют размеры: 100×60×5 мм. В опытах использовались пластины из меди марки М1, алюминиевого сплава АМГ в различных комбинациях. Над пакетом пластин устанавливается ударник (4) из алюминиевого сплава АМГ размером 150 × 120 × 4 мм. Минимальное расстояние между ударником (4) и пластиной (3) $h = 20$ мм, что обеспечивает стационарность параметров соударения [10]. На поверхности ударника размещается слой бризантного ВВ (5), в котором возбуждается плоская скользящая детонационная волна. С этой целью используется дополнительный плоский заряд бризантного ВВ, детонация в котором генерируется одновременно по всей плоскости [11]. Для предотвращения откольных явлений в ударнике между ним и слоем ВВ устанавливается тонкая прокладка из материала с малым акустическим импедансом (6). Ее наличие не влияет на скорость и симметрию движения ударника [12].

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

Основные результаты экспериментов представлены в таблице. В таблице приняты следующие обозначения: m_2 – материал пластины (2); m_3 – материал пластины (3); v_k – скорость перемещения точки косоугольного соударения ударника с поверхностью пластины; a , λ – амплитуда и длина волны возмущений, реализующихся на контактной границе (среднее значение после обсчета 20 соседних возмущений).

Таблица.

№ п/п	m_2	m_3	V_k , мм/мкс	a , мкм	λ , мкм	Фото (увеличение)
1.	Al	Al	6.9	100±10	200±20	2 (× 100)
2.	Cu	Cu	4.0	20±5	60±15	3 (× 50)
3.	Al	Cu	5.5	45±5	90±15	4 (× 100)
4.	Al	Cu	6.0	40±5	70±15	5 (× 100)
5.	Al	Cu	6.9	20±5	55±10	6 (× 200)

Фотографии микрошлифов контактных границ приведены на рисунках 2 – 6.

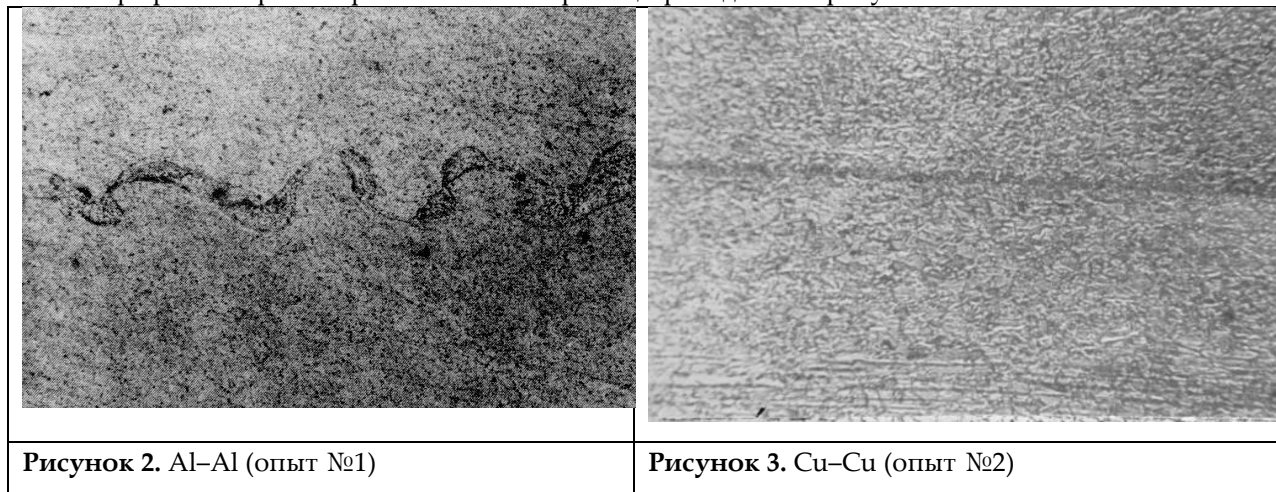


Рисунок 2. Al–Al (опыт №1)

Рисунок 3. Cu–Cu (опыт №2)



Рисунок 4. Al–Cu (опыт №3)



Рисунок 5. Al–Cu (опыт №4)



Рисунок 6. Al–Cu (опыт №5)

Поверхности контакта нагружаемых пластин обрабатывались по классу точности Rz20 (шероховатость поверхности ~ 10 мкм, амплитуда локального возмущения составляет $a_0 \approx 10$ мкм).

В опытах зафиксировано развитие волнообразных возмущений на контактных границах алюминий – алюминий, медь – медь, алюминий – медь при начальной плотной упаковке образцов. Возмущения на контактной границе являются следствием развития сдвиговой неустойчивости. Под воздействием косой ударной волны за фронтом осуществляется разворот и относительное скольжение слоев металлов вдоль контактной границы. Развиваются интенсивные пластические деформации. Материал сильно разогревается. Узкие приграничные слои теряют прочность. Более глубокие слои переходят в пластическое состояние.

Механизм образования возмущений по данной экспериментальной схеме нагружения косой ударной волной может быть объяснен с позиций физической модели развития сдвиговой неустойчивости, предложенной в [9]. При обработке поверхностей по классу точности Rz20 существует локальный зазор между пластинами толщиной $\Delta \approx 20$ мкм. Величина этого зазора, согласно результатам двумерных расчетов [9], является достаточной для развития сдвиговых течений материалов. При разгрузке вещества в микрозазор реализуется кратковременный (десятые доли мкс) скачок скорости величиной в несколько единиц мм/мкс. Импульс скорости в области зазора является причиной возникновения кратковременного градиента скорости в направлении, перпендикулярном границе раздела областей. Относительное течение слоев сопровождается реализацией тангенциального разрыва скорости и развитием неустойчивости Кельвина – Гельмгольца [9].

Начальное возмущение, наличие которого необходимо для зарождения неустойчивости, начинает расти после прохождения косой ударной волной контактной границы. В этот момент по

аналогии с описанным в [9] явлением (наблюдение и расчетное описание развития неустойчивости в экспериментах по нагружению криволинейной ударной волной системы диск – кольцо), должен быть реализован кратковременный тангенциальный разрыв скорости величиной порядка нескольких единиц мм/мкс. Следует отметить, что при нагружении разнородных металлов (алюминий–медь) вероятно развитие и неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. Однако вклад неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в развитие возмущений в данном случае (нагружение металлов) по-видимому второстепенный по сравнению со вкладом неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Это утверждение базируется на результатах многочисленных опытов по нагружению разнородных металлов ударной волной, фронт которой параллелен контактной границе (ускорение контактной границы разноплотных сред ударной волной). В этих экспериментах при сравнимых амплитудах давления ($P \leq 30$ ГПа) не зафиксировано развитие возмущений на контактной границе, характеризующейся исходной чистотой обработки Rz20 и выше.

Таким образом, экспериментально зафиксировано развитие волнообразных возмущений на контактной границе плотноупакованных металлических слоев при ее нагружении криволинейной ударной волной. По реализуемой схеме проведения опытов совместного движения слоев после выхода криволинейной ударной волной на свободную поверхность и ударно-волнового разворота невозможно.

За фронтом ударной волны за счет развития интенсивных пластических деформаций происходит кратковременное разупрочнение вещества, обусловленное гетерогенным характером деформирования. Наличие зазора (такой зазор возможен при стандартной обработке деталей по классу точности Rz20: $10 \text{ мкм} \leq 2a_0 \leq 20 \text{ мкм}$) приводит к появлению значительного (до ~ 4 мм/мкс), но кратковременного (до $\sim 0,2$ мкс) градиента скорости вещества вдоль границы раздела, что, в свою очередь, порождает рост возмущений. Времени существования градиента скорости оказывается достаточно для реализации и развития сдвиговой неустойчивости. Финальная амплитуда возмущений a определяется шириной слоя металла, перешедшего в пластическое состояние, так как именно этот слой и вовлекается в сдвиговое течение.

Список литературы

1. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: Иностранная литература, 1950.
2. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Н.: Наука 1998.
3. Крупин А.В., Соловьев В.Я., Шефтель Н.И. и др. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975.
4. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
5. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. 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 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 1999. Вып.1. С.35-38.
8. Дреннов О.Б., Михайлов А.Л. Соединение алюминиевых образцов по безззорной схеме при сверхзвуковом режиме нагружения // Физика и химия обработки 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 криволинейной ударной волны // Прикладная механика и техническая физика. 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: Сб. под ред. Фольрата К. и Томера Г. 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.