

- газовых системах лазерным методом // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2009. Вып. 3. С.44–54.
- 12 Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков, Л.В.Точилина, О.Л.Кривонос, С.В.Фролов, Е.В.Бодров. Развитие зон турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах в условиях регулярного и нерегулярного взаимодействия ударной волны с контактной границей // Труды XVII Харитоновских тематических чтений. Саров. 2015. С.722–734.
- 13 Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков, А.А.Никулин, Л.В.Точилина, О.Л.Кривонос, Е.В.Шапоренко. Экспериментальное и численное исследование процесса турбулентного перемешивания на контактных границах трехслойных газовых систем // ПМТФ. 2015. Т.56. № 2. С.32–42.
- 14 В.В.Змушко, Ф.А.Плетенев, В.А.Сараев, И.Д.Софронов. Методика решения трехмерных уравнений газовой динамики в смешанных лагранжево-эйлеровых координатах // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1988. Вып.1. С.22–27.
- 15 Е.В.Бодров, В.В.Змушко, Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания газов на контактных границах трехслойной системы под действием ударных волн // Известия РАН. МЖГ. 2018. № 3. С.54-62.
- 16 И.Д.Софронов, Е.А.Афанасьева, О.А.Винокуров, А.И.Воропинов, В.В.Змушко, Ф.А.Плетенев, П.В.Рыбаченко, В.А.Сараев, Н.В.Соколова, Б.Н.Шамраев. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ "Эльбрус-2" // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып.2. С.3–9.
- 17 V.V.Zmushko. Computation of convective flows and their realization in MIMOZA code // International Workshop "New Models of Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media"/ Oxford / September 15–19. 1997.
- 18 В.К.Ладагин, А.М. Пастушенко. Об одной схеме расчета газодинамических движений // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск. 1977. Т.8. №2. С.66–72.

## О РАЗВИТИИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ АЛЮМИНИЙ – МЕДЬ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ КОСОГО СОУДАРЕНИЯ

О.Б. Дреннов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Описание физических процессов скользящего нагружения проводится обычно для стационарной фазы движения метаемой пластины. В этом случае скорость полета пластины зависит только от относительной массы  $R = \frac{m_{BB}}{m_{нл}}$  и метательной способности ВВ, учитываемой в полуэмпирических формулах через скорость детонации  $D$  [1].

Принято считать, что разворот ударника до постоянного значения угла  $\gamma$  осуществляется на базе полета  $d^* = (3-5)\delta$  ( $\delta$  - толщина метаемой пластины) [2].

При  $d < d^*$  соударение пластин будет происходить под углом, отличным от расчетного. Это, в свою очередь, может привести к изменению режима нагружения и изменению параметров образующихся в зоне контакта волн.

В ряде случаев, однако, необходимо знать состояние контактной границы металлов, соударение которых происходит на начальной стадии движения, до установления стационарного

режима. Например, при скользящем нагружении пластин, разделенных тонкими зазорами (ширина зазора меньше толщины метаемой пластины) или скользящем нагружении плотноупакованных систем пластин.

В настоящей работе предполагается изучить характер развития возмущений на контактной границе алюминий – медь при косом соударении на начальной стадии – в фазе разгона ударника.

Схема постановки опытов представлена на рисунке 1.

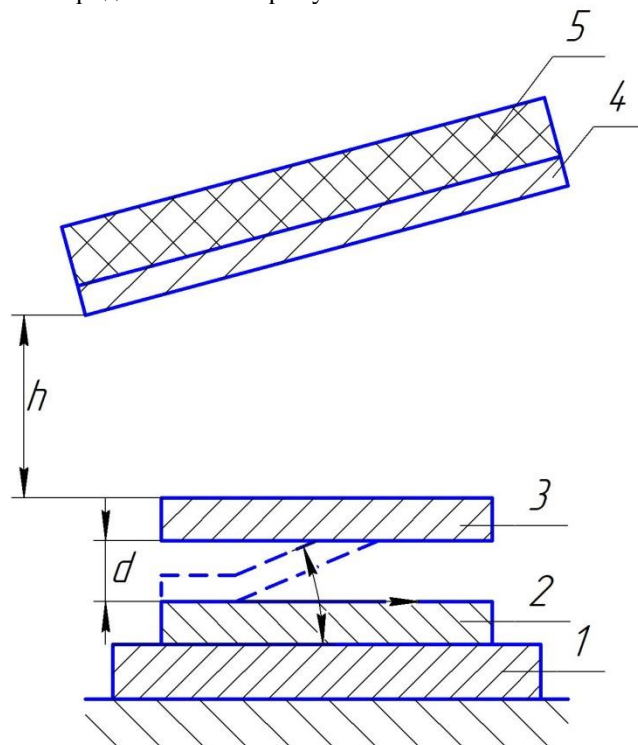


Рисунок 1. Схема постановки опытов

На массивное стальное основание 1 устанавливается неподвижная пластина 2 из меди М1 размером 100x50x5 мм. Над медной пластиной через зазор d фиксируется метаемая пластина 3 из алюминиевого сплава АМГ размером 100x60x5 мм. Над пакетом пластин устанавливается ударник 4 из алюминиевого сплава АМГ размером 150x120x4 мм. Минимальное расстояние между ударником и метаемой пластиной  $h = 20$  мм, что обеспечивает стационарность параметров соударения [2]. На поверхности ударника размещается слой ВВ 5 из тротила, в котором возбуждается плоская скользящая детонационная волна. От опыта к опыту менялось расстояние d между поверхностями неподвижной и метаемой пластин.

В реализованных условиях нагружения  $v_k > C_{Al} > C_{Cu}$  (скорость точки контакта больше скорости звука) начальный угол отгиба метаемой пластины  $\psi$  сохраняется равным углу ударно-волнового разворота в течение времени циркуляции волны по пластине, которое в первом приближении можно положить равным  $2\delta/C_{Al}$  ( $\delta$  - толщина метаемой пластины). Зная скорость полета пластины, получаем значение базы, на которой сохраняется постоянным начальный угол разворота:  $d' \approx w2\delta/C_{Al}$ . Для условий, реализованных в экспериментах,  $d' \approx 2$  мм. Из образцов, испытавших динамическое нагружение, изготавливались микрошлифы, по которым впоследствии проводился металлографический анализ состояния контактной границы алюминий – медь.

Основные результаты экспериментов представлены в таблице, где  $v_k$  – скорость точки контакта, d - база полета метаемой пластины, a,  $\lambda$  - амплитуда и длина волны возмущений,

реализующихся на контактной границе (средние значения после обшета 20 соседних возмущений). Фотографии микрошлифов контактных границ приведены на рисунках 2-6.



Рисунок 2.

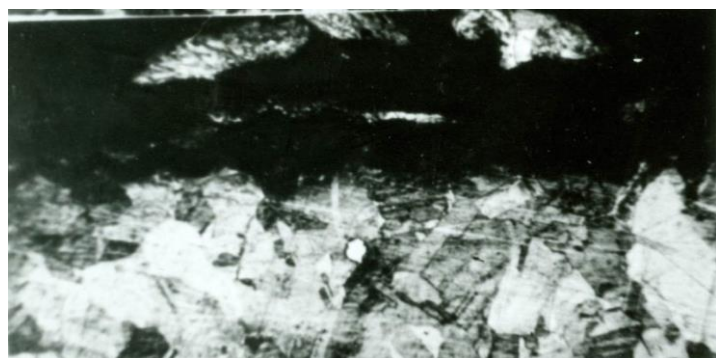


Рисунок 3.



Рисунок 4.

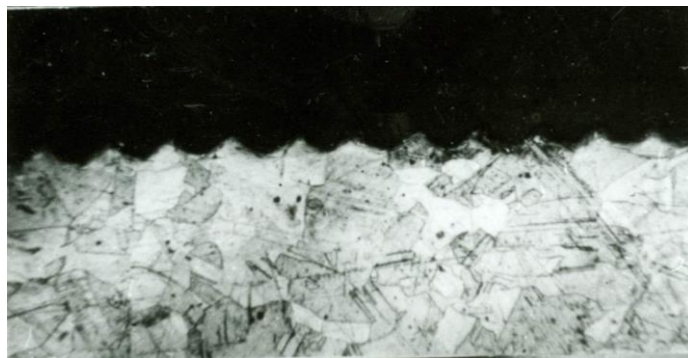


Рисунок 5.



Рисунок 6.

Наибольший интерес вызывают опыты по косому соударению пластин при  $d = 0$  и  $d = 0,1$  мм. Анализ экспериментальных данных показывает, что для плотной компоновки нагружаемых пластин амплитуда реализующихся возмущений примерно вдвое больше, чем для варианта с зазором  $d = 0,1$  мм, т.е. при  $d \rightarrow 0$  амплитуда возмущений не превращается в нуль, а уменьшается последовательно от  $a = 50-60$  мкм при  $d = 1$  мм до  $a = 15-20$  мкм при  $d = 0,1$  мм. Затем увеличивается до  $a = 40-45$  мкм при  $d = 0$ .

По схеме проведения опытов в режиме нагружения при  $d = 0$  (опыты 2, 4, 5) струеобразование невозможно. Отсутствуют первоначальные зазоры, замыкание которых сопровождается формированием кумулятивной струи. Возмущения на контактной границе являются следствием развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Под воздействием косої ударной волны за фронтом осуществляются разворот и относительное скольжение слоев металлов вдоль контактной границы. Узкие приграничные слои, заметно теряют прочность и переходят в «квазижидкое» состояние. Относительное течение слоев сопровождается реализацией тангенциального разрыва скоростей  $\Delta u$  и развитием сдвиговой неустойчивости.

Таблица.

Номер опыта	$u_k$ , мм/мкс	$d$ , мм	$a$ , мкм	$\lambda$ , мкм	Номер рисунка (увеличение)
1	5,5	0,1	$20 \pm 5$	$85 \pm 15$	2(x100)
2	5,5	0	$45 \pm 5$	$90 \pm 15$	3(x100)
3	6	0,1	$15 \pm 5$	$60 \pm 15$	4(x100)
4	6	0	$40 \pm 5$	$70 \pm 15$	5(x100)
5	6,9	0	$20 \pm 5$	$55 \pm 10$	6(x100)

При  $d = 0,1$  мм (опыты 1, 3) в точке контакта материалы нагружаемых пластин подвергаются интенсивным пластическим сдвиговым деформациям и переходят в тонких приграничных слоях в «квазиджидкую» фазу. Формируется микрокумулятивная струя, которая заполняет зазор шириной 0,1 мм. Осуществляется относительное течение трех потоков: от материала метаемой пластины, кумулятивная струя, от материала неподвижной пластины. Иными словами, реализуются два параллельных тангенциальных разрыва. Однако они частично стабилизируют друг друга относительно возмущений с длинами волн, большими по сравнению с расстоянием между разрывами [3]. Следовательно, амплитуда возмущений уменьшается.

Таким образом, микрокумулятивная струя в тонких зазорах выполняет обратную функцию: вместо генерации возмущений на контактной границе она их частично стабилизирует.

### Список литературы

1. А.А. Дерibas Физика упрочнения и сварки взрывом// Новосибирск: Наука, 1980.
2. Кузьмин Г.Е., Симонов В.А., Яковлев И.В. Зависимость параметров волн при сварке взрывом от фазы разгона метаемой пластины // ФГВ, 1976, №3.
3. Н.Г. Кикина О влиянии вязкости на неустойчивость тангенциальных разрывов в несжимаемой среде// Акуст. журнал, 1967, т.13, вып.2.

## СТРУКТУРА ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СВИНЦА И МЕДИ

*Н.В. Невмержицкий, Е.В. Бодров, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский, В.Н. Князев,  
Н.Б. Давыдов, К.В. Анисифоров, О.Л. Кривонос, А.С. Соколова, А.Р. Гавриш, С.В. Фролов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

### Аннотация

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований процесса выброса частиц с поверхности ударно-нагруженных образцов меди и свинца. Выброс происходил с узкой (0,2-0,8 мм) шероховатой ( $R_z 20$ - $R_z 80$ ) поверхности образца в низкий (0,05 атм) вакуум или в газовую смесь азота и гелия (40% и 60% по объему), находящуюся под давлением  $P_f = 8$  ати. Интенсивность ударной волны в опытах со свинцом составляла  $P \approx 17$  ГПа,  $P \approx 34$  ГПа,  $P \approx 42$  ГПа, с медью - 44 ГПа. Регистрация течения проводилась в проходящем и отраженном свете оптической микроскопической методикой при короткой двухимпульсной лазерной подсветке.

Благодаря малой оптической толщине пылевого потока в вакууме получены спектры частиц свинца примерно в 80% его высоты, отсчитываемой от фронта потока. При выбросе частиц в газовую смесь зарегистрирована ударная волна, отходящая в смесь от свободной поверхности образца и крупные частицы (порядка 20-40 мкм), находящиеся на фронте пылевого облака, которые в процессе движения могут разрушаться набегающим потоком газа. Мелкие частицы свинца (4÷10 мкм) не разрешаются. Расчетные оценки показывают, что мелкие частицы свинца в газовой смеси могут испаряться за единицы микросекунд. В экспериментах с медью, находящейся в твердом состоянии после ударно-волнового нагружения, и вакууме, и в газовой смеси наблюдаются частицы и множество отколов.