

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

О. Б. Дреннов, А. Л. Михайлов, Р. С. Осипов, Л. Д. Родигина

(Москва)

Косое соударение слоев металлов в ряде случаев сопровождается волнообразованием на границе раздела [1]. Для развития волнообразования необходимо выполнение предельных условий по углу соударения  $\gamma$  и скорости точки контакта  $v_k$ , которые связаны с критериями струеобразования при косом соударении [2, 3]. К настоящему времени разработано несколько концепций механизма волнообразования [1, 2, 4—9]. Обзор большинства из них дан в работе [1]. В ряде исследований волнообразование объясняется развитием возмущений по типу неустойчивости Кельвина — Гельмгольца при реализации тангенциальных течений материалов вдоль контактной границы за точкой соударения [6—9].

Процессы волнообразования и взаимного перемещения материалов находят широкое применение при сварке металлов взрывом [1, 10, 11]. Однако в ряде случаев (профилированная сварка взрывом и т. д.) волнообразование и перемешивание слоев металлов при косом соударении нежелательны.

Экспериментально исследованы косое соударение плоских слоев металлов (медь, латунь, алюминий, магний и их комбинации) в режиме сварки взрывом и влияние различных защитных прокладок на состояние контактной границы после нагружения. Использовалась традиционная схема метания пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ. Схема проведения опытов и обозначения характерных параметров метания представлены на рис. 1. На массивном стальном основании 6 размещается неподвижная пластина 5 толщиной  $\Delta = 4$  мм. Над ней устанавливается метаемая пластина 3 с  $\Delta = 4$  мм, которая наклонена под заданным углом  $\alpha$  к плоскости неподвижной пластины. Минимальное расстояние  $h$  между поверхностями метаемой и неподвижной пластин выбирается из условия обеспечения стационарности полета ударника 3 перед соударением [1]. На поверхности пластины 3 располагается слой пластического бризантного ВВ 1 с  $\Delta = 3,5 \div 7$  мм, в котором возбуждается плоская скользящая детонационная волна (ДВ). Для предотвращения откольных явлений в материале ударника между ним и слоем ВВ помещается тонкая прокладка 2, имеющая малый акустический импеданс [12]. На поверхность контакта неподвижной пластины (плоскость  $A - A'$  на рис. 1) предварительно наносится исследуемый защитный слой 4 с  $10 \leq \Delta \leq 50$  мкм. Металлическое покрытие наносилось методом электронно-лучевого напыления или гальванического осаждения.

Режимы нагружения для всех исследованных пар металлов подбирались необходимыми и достаточными для развития волнообразования на границе раздела [1—3]. Реализовалось дозвуковое косое соударение:  $2,5 \leq v_k \leq 4,5$  мм/мс;  $12 \leq \gamma \leq 25^\circ$ . Параметры  $\gamma$  и  $v_k$  рассчитывались по общепринятым соотношениям [1]. Оценки величины

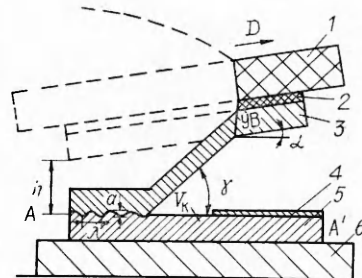


Рис. 1. Схема проведения опытов.

давления в окрестности точки контакта  $p_k$  выполнялись по упрощенному полуэмпирическому методу, описанному в [13]. Из образцов, испытанных динамическое нагружение, готовились микрошлифы по которым проводился металлографический анализ зоны контактирования металлов.

Экспериментально обнаружен стабилизирующий эффект металлических покрытий относительно развития возмущений на контактной границе (рис. 2, *a — e*, таблица). Отмечено, что во всех опытах, где наблюдается надежная стабилизация контактной границы, структура металла неподвижной пластины не меняется. Фольги из тех же металлов той же толщины не обладают столь сильными стабилизирующими свойствами (см. рис. 2, *ж, з*). При этом фольга из АМЦ дробится и перемешивается с расплавами нагружаемых металлов. Факт присутствия в зоне расплава фрагментов алюминиевой фольги подтвержден рентгеноструктурным анализом. Пара металлов М1 — М1 при нагружении через фольгу из стали 1Х18Н10Т с  $\Delta = 20$  мкм сварного соединения не образовала. Из-за высокой прочности стальная фольга не дробится.

В специальной серии опытов исследовано влияние адгезии слоя покрытия на эффект стабилизации волнообразования (при напылении есть

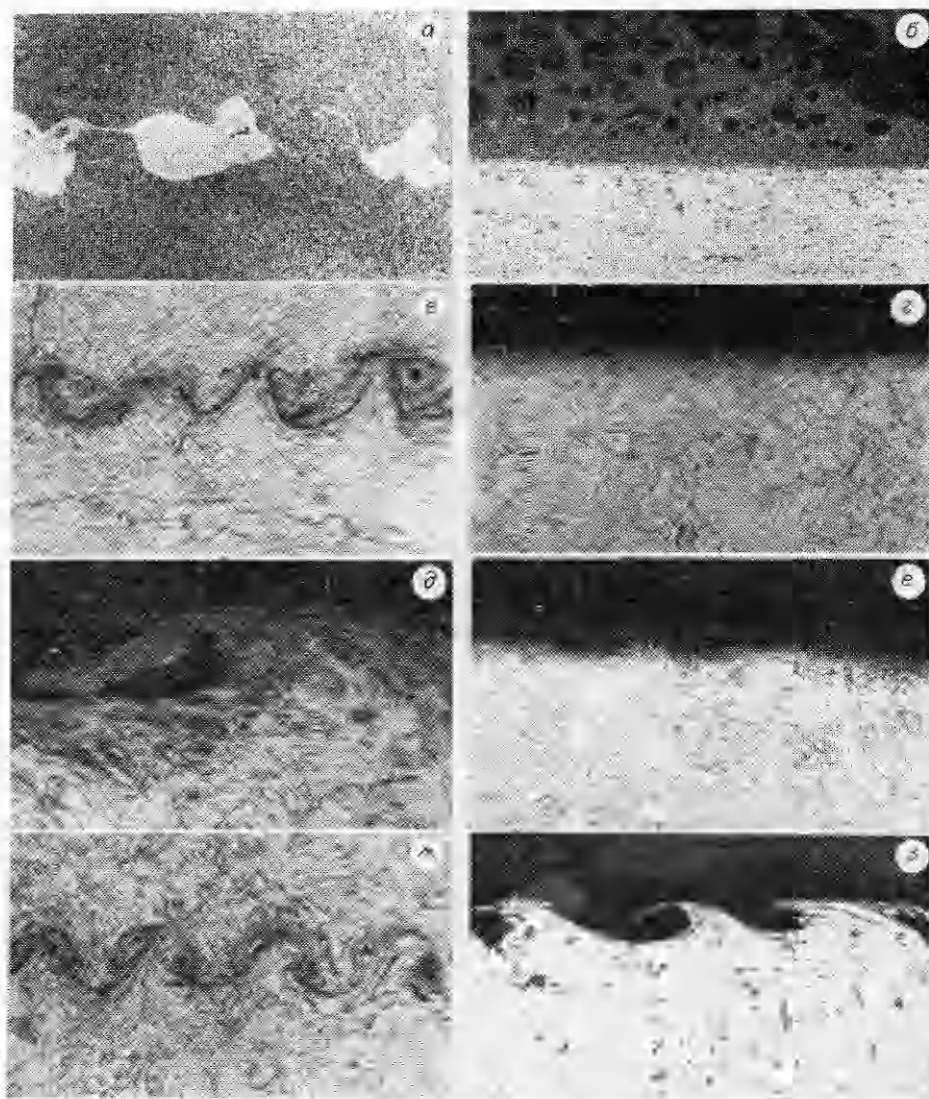


Рис. 2. Контактные границы пар различных металлов (см. таблицу).

Рис. 2	Металлы	$v_k$ , мм/мкс	$\gamma$ , град	$p_k$ , ГПа	Защитный слой и его толщина	$a$ , мкм
<i>a</i>	АМЦ — АМЦ	4	12	6,5	—	400
<i>б</i>					Mg (22 мкм)	$\leq 10$
<i>в</i>	M1 — M1	2,5	13,5	10	—	350
<i>г</i>					Zn (22 мкм)	$\leq 15$
<i>д</i>	АМЦ — M1	3	21	10	—	250
<i>е</i>					Zn (22 мкм)	$\leq 25$
<i>ж</i>	M1 — M1	2,5	13,5	10	АМЦ (фольга, 20 мкм)	$\sim 350$
<i>з</i>					1X18H10T (фольга, 20 мкм)	$\sim 200$

конечная адгезия). На поверхность неподвижной пластины предварительно накладывались слой покрытия из меди (слева) и медная фольга (справа) толщиной по 20 мкм (рис. 3). Видны стабилизирующие свойства слоя покрытия и отсутствие таковых у фольги.

По оценкам [1], толщина выносимого слоя с поверхности неподвижной пластины превосходит толщину используемого слоя покрытия. Вследствие этого на границе раздела должны формироваться волны. Однако экспериментально факт волнообразования не обнаружен. По-видимому, физические свойства металлического покрытия таковы, что этот слой не позволяет интенсивно формироваться облаку частиц в точке контакта (соударение метаемой пластины с относительно пористым слоем, обладающим аномальными физико-механическими свойствами). Покрытие частично сохраняется на контактной поверхности и участвует в тангенциальном течении материалов за точкой контакта.

На рис. 4 иллюстрируются стабилизирующие свойства покрытия из цинка и цинковой фольги. Не способны устранять возмущения на контактной границе пар металлов при исследованных режимах соударения и органические пленки с  $50 \leq \Delta \leq 100$  мкм.

Результаты этих опытов позволяют выдвинуть утверждение, что эффект стабилизации определяется природой металлического покрытия, его физическими свойствами как единого целого. Плотность слоя покрытия  $\rho = 0,9 \div 0,95$  от кристаллической плотности соответствующего металла  $\rho_{кр}$ . Сцепление элементарных микрообъемов крайне слабое, описывается связями при плотной упаковке. Для медного покрытия  $\Delta \approx 20$  мкм проч-

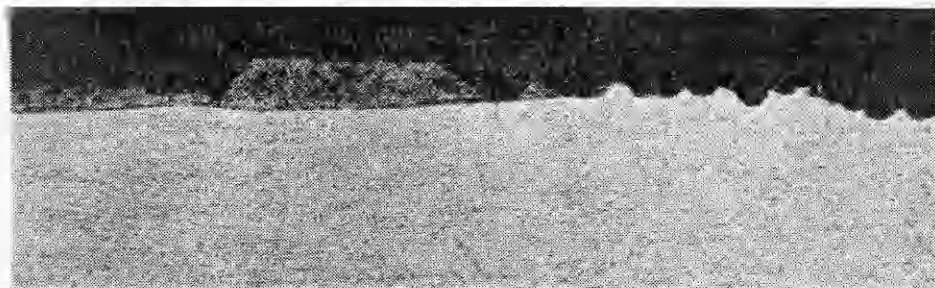


Рис. 3. Контактная граница пары металлов Al (АМЦ) — Al (АМЦ);  $v_k = 4,4$  мм/мкс,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $p_k = 6,5$  ГПа,  $a \approx 10$  мкм (слева) и  $\approx 200$  мкм (справа).

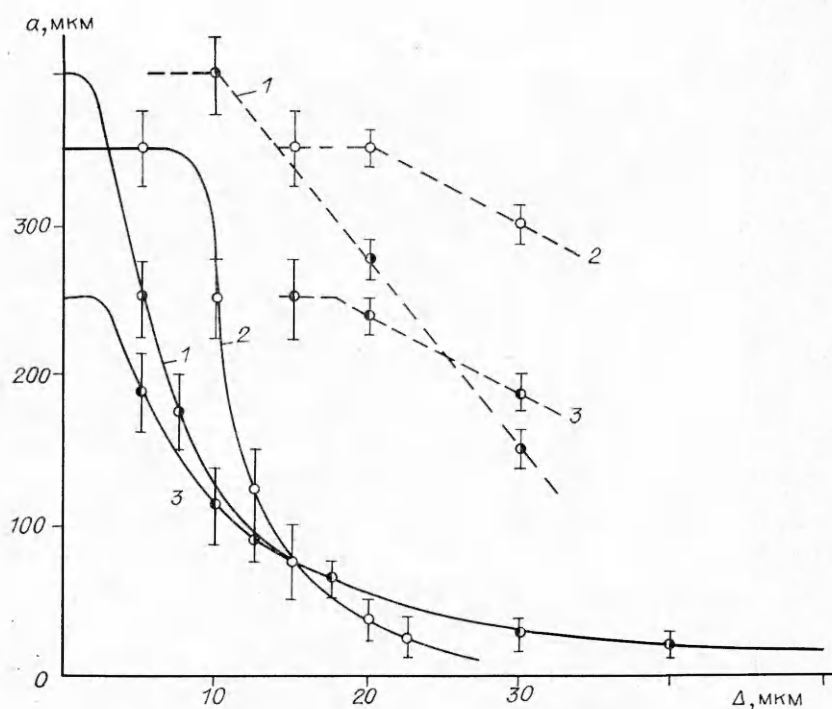


Рис. 4. Зависимости амплитуды возмущений на контактных границах АМЦ — АМЦ (1), М1 — М1 (2) и АМЦ — М1 (3) от толщины защитного слоя из цинка.  
 — цинковое покрытие; - - - - цинковая фольга.

ность на разрыв  $\leq 0,01$  ГПа, для медной фольги той же толщины —  $\leq 0,2$  ГПа.

К слоям металлических покрытий может быть применена теория смесей несоединяющихся компонентов, разработанная в [14—16] (под смесью подразумевается равномерное, плотноупакованное, нерастворимое распределение твердых микрочастиц в сплошной среде — жидкости, газе). Теория постулирует, что при очень малых размерах конечного числа твердых микрочастиц проявляется влияние их разобценности. Начинает сказываться микроструктура отдельно взятого микротела, что определяет особенности в динамическом нагружении таких смесей. Результатом сложной реакции смеси твердых микрочастиц в сплошной среде на динамическое нагружение является значительная разница между нормальным и тангенциальным напряжениями и, как следствие, большая величина динамического предела текучести (динамической прочности) [16].

Данные этой теории подтверждаются экспериментами с матрицей из эпоксидной смолы, заполненной микрочастицами алюминия диаметром  $2 \leq d \leq 8$  мкм ( $\rho \sim 0,9\rho_{\text{кр}}$ ) [17].

Согласно концепции [16], металлические покрытия в условиях динамического нагружения будут характеризоваться высокой динамической прочностью, чем и объясняется их стабилизирующий эффект. В [2] предложено полуэмпирическое соотношение для описания зависимости параметров волнообразных возмущений (амплитуды и длины волн) от скорости точки контакта, плотности и прочностных свойств (микротвердости  $H$ ) соударяющихся металлов. Из этого соотношения следует, что при прочих равных условиях возмущения на контактной границе меньше для более прочных материалов. Эти же предпосылки использованы при расчетно-экспериментальном описании нижней границы сварки взрывом [18].

В специальной серии опытов, проведенной по методике [19], измерен динамический предел текучести медного покрытия. Получена величина  $Y \approx 2,5$  ГПа при гидродинамическом давлении импульсного нагружения  $p \approx 5$  ГПа. Это значение значительно превышает динамический предел

текучести сплошной меди ( $Y \approx 0,7$  ГПа при  $p \sim 5$  ГПа) и совпадает с таковым для стали 1X18H10T [19].

На эффект стабилизации влияют и теплофизические свойства материала покрытия. Слои легкоплавких металлов или просто тонкие слои металлов не могут приобретать значительную величину  $Y$  при импульсном нагружении, поскольку после полного плавления слоя в нем не проявляются межкристаллические взаимодействия. Свойство устранять возмущения на контактной границе исчезает. Из рис. 4 следует, что для пары М1 — М1 ( $v_k = 2,5$  мм/мкс,  $\gamma = 13,5^\circ$ ,  $p_k = 10$  ГПа) слой покрытия из цинка ( $\Delta < 10$  мкм) не стабилизирует контактную границу. Очевидно, он плавится и участвует в перемешивании приграничных слоев нагружаемых металлов как однородная сплошная среда.

В серии одномерных тепловых расчетов, использующих основные уравнения теплопроводности [20], получено, что при указанных выше параметрах нагружения за время  $t \leq 5$  мкс (время нагружения) слои покрытий толщиной  $\leq 10$  мкм практически из всех металлов полностью плавятся. Соответственно интенсивно прогревается контактная граница, материалы перемешиваются. При  $10 < \Delta \leq 20$  мкм полностью расплавляются лишь слои из легкоплавких металлов (олово, свинец, кадмий, висмут). Покрытия из тантала, меди, никеля, титана, алюминия, магния, цинка испытывают частичное плавление во внешней зоне. Слои с  $20 < \Delta \leq 30$  мкм всех обследованных металлов лишь частично плавятся во внешней зоне. Внутренняя зона слоя покрытия и приграничные слои нагружаемого образца слабо разогреты и характеризуются присущей каждому материалу исходной динамической прочностью.

Наиболее эффективно стабилизируют контактную границу слои покрытий из металлов с температурой плавления  $> 400^\circ\text{C}$ , обладающих слабой теплопроводностью (с коэффициентом температуропроводности  $< 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с).

Таким образом, предложен способ устранения возмущений на контактной границе пары металлов в процессе косоугольного соударения. Показано, что тонкие слои металлических покрытий ( $\Delta \sim 30$  мкм) надежно стабилизируют контактную границу и исключают взаимное перемешивание нагружаемых металлов. Это свойство покрытий объясняется их высокой динамической прочностью при импульсном нагружении. Указаны теплофизические свойства материалов покрытий, способствующие эффективной стабилизации контактной границы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980.
2. Cowan G. R., Holtzman A. H. J. Appl. Phys., 1963, 34, 4, 928.
3. Walsh J., Shreffler R., Willing F. // Ibid., 1953, 24, 3, 349.
4. Абрахамсон Г. Тр. Америк. о-ва ниж.-механиков. Прикладная механика, 1961, 4, 45.
5. Bahrani A. S., Black T. J., Crossland B. Proc. Roy. Soc., 1966, A296, 1445, 123.
6. Hunt J. N. Phylos. Mag., ser. 8, 1968, 17, 148, 669.
7. Cowan G. R., Bergmann O. R., Holtzman A. H. Metallurg. Trans., 1971, 2, 11, 3145.
8. Robinson J. L. Phylos. Mag., ser. 12, 31, 3, 587.
9. Уткин А. В., Дремин А. Н., Михайлов А. Н. и др. ФГВ, 1980, 16, 4, 126.
10. Крушин А. В., Соловьев В. Я., Шефтель Н. И. и др. Деформация металлов взрывом. — М.: Металлургия, 1975.
11. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978.
12. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Погорелов А. П. и др. ФГВ, 1981, 17, 6, 90.
13. Botros K. K., Groves T. K. J. Appl. Phys., 1980, 51, 7, 3706.
14. Gard S. K. J. Geophys. Res., 1971, 76, 7947.
15. Morland L. W. // Ibid., 1972, 77, 890.
16. Drumheller D. S. J. Appl. Phys., 1982, 53, 2, 957.

17. Chhabildas L. C., Swegl J. W. // *Ibid.*, 954.
18. Захаренко И. Д. ФГВ, 1972, 8, 3, 422.
19. Батъков Ю. В., Новиков С. А., Сеницына Л. М. и др. Проблемы прочности, 1981, 5, 56.
20. Годунов С. К. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1979.

*Поступила в редакцию 29/1 1988,  
после доработки — 24/III 1988*

УДК 536.46—546.27

## КОНДЕНСАЦИОННО-ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ

*А. Г. Варламов, В. А. Кудряшов, А. Н. Фирсов,  
Ю. М. Григорьев, А. Г. Мержанов  
(Черноголовка)*

Протекание многих физико-химических процессов сопровождается выделением конденсированных продуктов. Здесь можно различать две группы процессов: физическую конденсацию (фазовое превращение 1-го рода) и химическую, когда конденсированный продукт образуется в результате гетерогенно-гомогенных реакций. Примеры последнего — парофазное окисление металлов с выделением конденсированного окисла, осаждение металлов и соединений на подложку при пиролизе газовой фазы, транспортные реакции и др. Общая черта, присущая обеим группам процессов, состоит в их сильной экзотермичности.

Однако между физической и химической конденсацией имеются и принципиальные различия. При протекании фазовых превращений 1-го рода скорость конденсации, как правило, определяется скоростью подвода пара к поверхности к-фазы (диффузионный режим). При фазовом переходе устанавливается равновесный режим, когда тепло, выделяемое при конденсации, полностью расходуется на нагрев пара до температуры конденсации.

При химической конденсации сказывается конечная величина скорости химической реакции на межфазной границе, в результате чего температура к-фазы может изменяться в широких пределах. Сильная экзотермичность процесса здесь обуславливает возможность явлений типа теплового самовоспламенения, когда накопление тепла приводит к прогрессивному увеличению скорости химической конденсации, заканчивающемуся достижением больших «взрывных» скоростей. Специфика самовоспламенения в данном случае состоит в прогрессивном возрастании массы образца (массовый взрыв), приводящем к увеличению его полной тепловой емкости и геометрических размеров, оказывающих влияние как на темп изменения температуры, так и на условия теплообмена.

В настоящей работе рассматривается простейшая модель конденсационного воспламенения, основанная на допущении об экспоненциальной зависимости скорости химической конденсации на межфазной границе от температуры [1] и ее постоянстве во времени в изотермических условиях.

### Постановка задачи

Сущность рассматриваемой модели заключается в следующем. Образец-подложка правильной геометрической формы (пластина, цилиндр, сфера) мгновенно попадает в газ, способный к термическому разложению на поверхности образца с выделением конденсированного продукта. Скорость роста массы продукта  $\frac{dm}{dt}$  определяется удельной скоростью