

О. Б. Дреннов

## О СОСТОЯНИИ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ КОСОГО СОУДАРЕНИЯ

Экспериментально исследован процесс косоугольного соударения слоев металлов в широком диапазоне скоростей точки контакта  $v_k$ . Показано, что в области дозвукового течения рост  $v_k$  увеличивает амплитуду возмущений на контактной границе, а в области сверхзвукового течения — уменьшает. Предложена аналитическая связь амплитуды возмущений с прочностными свойствами соударяющихся материалов.

В динамических исследованиях твердых тел при высоких давлениях обычно используются два типа нагружения — нормальной или косоугольной ударной волной (УВ). В отличие от нагружения нормальной УВ описание упругих и волновых процессов в режиме нагружения косоугольной УВ усложняется необходимостью учета не только нормальных, но и тангенциальных составляющих тензора напряжений [1, 2].

При косоугольном соударении слоев металлов (один из способов реализации нагружения косоугольной УВ) в контактной зоне развиваются интенсивные сдвиговые деформации, приграничные слои материалов сильно разогреваются, возможно возникновение кумулятивных струй [3]. Указанные эффекты приводят к искажению профиля контактной границы металлов после соударения. Возникают регулярные волны и несимметричные искаженные волны, а также слои расплава перемешанных компонентов. В ряде случаев развитие таких возмущений приводит к прочному соединению образцов [4—6].

В специальной литературе подробно исследован дозвуковой режим косоугольного соударения:  $v_k < c_0$  ( $v_k$  — скорость точки контакта;  $c_0$  — скорость звука в данном материале). В таких условиях нагружения в точке контакта постоянно формируется кумулятивная струя [2—4]. Хорошо изучена связь характера развития возмущений на контактной границе с параметрами, определяющими условия нагружения: толщиной  $\delta$  и материалом  $\rho$  соударяющихся пластин, толщиной  $\delta_{ВВ}$  и составом  $\rho_{ВВ}$ , углом соударения  $\gamma$  и т. п. [1—5].

Соударение образцов с  $v_k > c_0$  описывается по аналогии с описанием сверхзвукового потока, обтекающего клин [2]. При  $\gamma \approx \text{const}$  существует критическое значение скорости точки контакта  $v_{кр}$ . Если  $c_0 \leq v_k \leq v_{кр}$ , в потоке формируются отсоединенные УВ. При переходе через фронт УВ поток из сверхзвукового трансформируется в дозвуковой. В точку контакта оба потока (метаемая и неподвижная пластины в системе координат, связанной с точкой контакта) приходят с звуковой скоростью, в зоне соударения формируется кумулятивная струя. При  $v_k > v_{кр}$  в точке контакта устанавливаются присоединенные УВ. Они разворачивают потоки на угол, примерно равный  $\gamma$ . Струеобразование в этом режиме невозможно [2, 4]. Состояние контактной границы материалов при подобных сверхзвуковых косоугольных соударениях практически не исследовано.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению состояния контактной границы слоев металлов при различных режимах косоугольного соударения (скоростях точки контакта), но постоянном угле нагружения. В опытах использовали традиционную схему метания пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ (рис. 1). На массивное стальное основание 4 устанавливается неподвижная пластина 3. Над ней под заданным углом  $\alpha$  укрепляется метаемая пластина (ударник) 2, разгоняемая ПВ заряда ВВ 1, где реализуется плоская скользящая детонационная волна (ДВ). Минимальное расстояние между пластинами выбирается из условия стационарности полета ударника перед соударением:  $h_{\min} \geq (3-5)\delta_{уд}$  (где  $\delta_{уд}$  — толщина ударника) [7].

Рис. 1. Схема проведения опытов.

На рис. 1 отмечены характерные параметры, определяющие косое соударение:  $D$  — скорость детонации заряда ВВ,  $W$  — скорость полета ударника,  $a$ ,  $\lambda$  — амплитуда и длина волн реализующихся возмущений.

После динамического нагружения пластины улавливались. Из середины образцов вырезались фрагменты для изготовления микрошлифов (обычно использовалась неподвижная пластина). Исследовался участок контактной границы, параллельный направлению движения точки контакта. Структура образцов в приграничной зоне выявлялась путем травления интересующих поверхностей. Исследование и фотографирование наиболее характерных участков шлифа проводились на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-2.

Из работы [6] известно, что при  $v_k < 1,5$  мм/мкс на границе раздела двух произвольных металлов возмущения не образуются (в данном случае невелико давление нагружения  $P_k$ ). Прочность материала препятствует реализации сдвиговых течений. При  $v_k > 1,5$  мм/мкс на контактной границе возникают симметричные волнообразные возмущения (рис. 2, а). При последующем росте  $v_k$  волны теряют симметрию, гребни завихряются, амплитуда возмущений несколько возрастает. Эксперименты [6] ограничивались диапазоном  $v_k < 3$  мм/мкс.

В описываемых опытах получено, что при дальнейшем росте  $v_k$  наблюдается трансформация геометрического вида контактной границы от волнообразного к слою турбулентно перемешанных материалов (рис. 2, б).

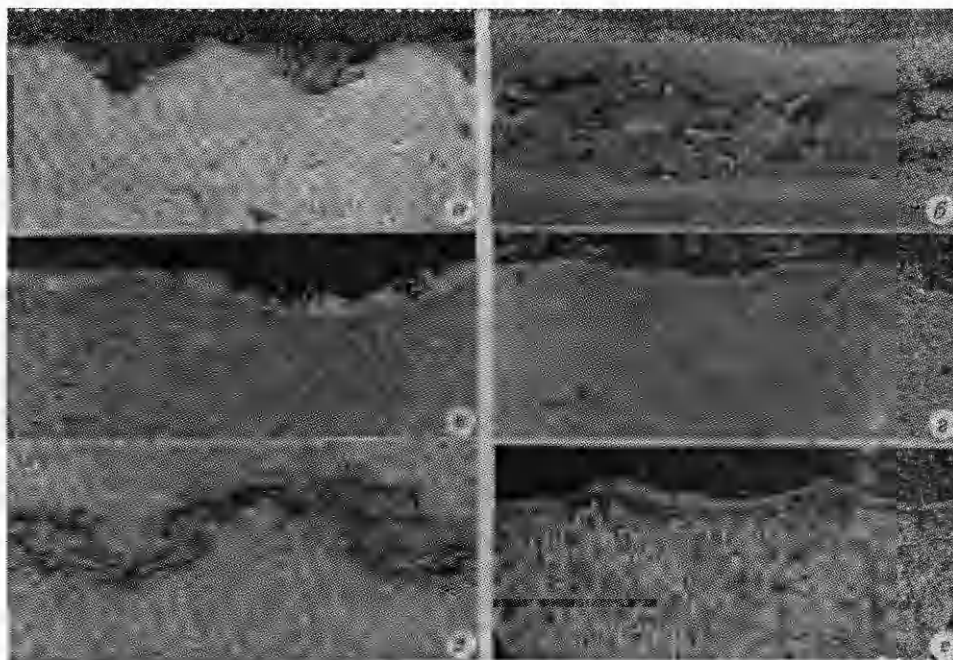
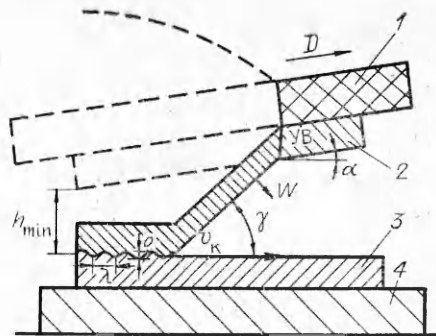


Рис. 2. Контактная граница слоев металлов после высокоскоростного косого соударения;  $\gamma = 12^\circ$ .

а — АМЦ — АМЦ,  $v_k = 2,4$  мм/мкс,  $a \approx 0,25$  мм,  $\times 100$ ; б — АМЦ — АМЦ,  $v_k = 6,5$  мм/мкс,  $a \approx 0,43$  мм,  $\times 50$ ; в — АМЦ — АМЦ,  $v_k = 7,8$  мм/мкс,  $a \approx 0,21$  мм,  $\times 50$ ; г — АМЦ — АМЦ,  $v_k = 8,7$  мм/мкс,  $a \approx 0,07$  мм,  $\times 30$ ; д — М1 — М1,  $v_k = 2,4$  мм/мкс,  $a \approx 0,2$  мм,  $\times 100$ ; е — Ст. 3 — Ст. 3,  $v_k = 6,9$  мм/мкс,  $a \approx 0,15$  мм,  $\times 50$ .

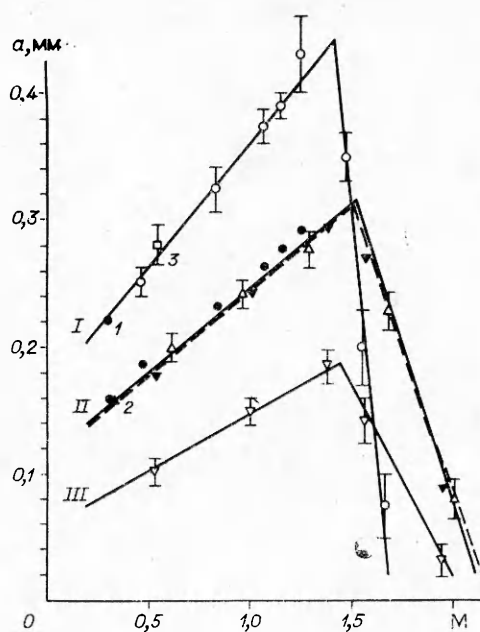


Рис. 3. Зависимости амплитуды возмущений на контактных границах слоев металлов от числа Маха:

Сплошные линии: I — АМЦ — АМЦ, II — М1 — М1, III — Ст. 3 — Ст. 3; 1 — Al — Al [6], 2 — Cu — Cu [12]; 3 — для Mg — Mg. Штриховая линия — обобщенная зависимость  $a(M)$  ( $\gamma = 12^\circ$ , пересчет по динамическому пределу текучести  $Y$ ).

Затем амплитуда возмущений достигает максимума, после чего последовательно уменьшается (рис. 2, в, г). Подобные закономерности отмечены для всех обследованных пар металлов (алюминиевый сплав АМЦ, медь М1, Ст. 3).

При анализе экспериментальных данных в качестве основного параметра, характеризующего состояние контактной границы, выбрана амплитуда реализующихся возмущений  $a$ . За величину  $a$  принимается перпендикулярное расстояние от уровня вершины гребня

до предельного углубления соседней впадины (при четко различимом волнообразовании) либо перпендикулярное расстояние между уровнями соседних выпуклости и впадины (если возмущения значительно отличаются от регулярных волн), либо вся ширина зоны турбулентного перемешивания контактирующих материалов. При анализе экспериментальных данных в качестве амплитуды возмущений учитывалась усредненная величина после обсчета  $\sim 20$  соседних возмущений.

На рис. 3 приведены зависимости амплитуды возмущений на контактных границах конкретных пар металлов от числа Маха  $M = v_k/c_0$ . Выбор переменной  $M$  для графической интерпретации экспериментальных данных сделан из соображений подобия для сравнения амплитуд возмущений на контактных границах разных металлов в идентичных условиях нагружения (или гидродинамического течения).

Восходящая ветвь зависимости  $a = f(M)$  определяется режимом струеобразования в точке контакта (дозвуковая область течения). Схема реализующегося потока вблизи зоны соударения в системе координат, связанной с точкой контакта изображена на рис. 4, а. Рост  $v_k$  приводит к увеличению давления нагружения и интенсивности пластических сдвиговых деформаций в контактной зоне. Большая масса металлов вовлекается в струйное течение, амплитуда возмущений возрастает.

Из трех обследованных металлов (см. рис. 3) Al — наиболее легкоплавкий. Этим объясняется его плавление при волнообразовании, усиливающейся с ростом  $v_k$  и заканчивающееся полным перемешиванием расплавленных слоев на контактной границе (см. рис. 2, б). Для Cu этот эффект выражен слабее, однако прослеживается наличие зон, захваченных интенсивным плавлением (см. рис. 2, д). Для стали не был достигнут интенсивный разогрев в достаточно широких приграничных областях. Однако состояние, близкое к плавлению, отмечается в узких слоях вблизи контактной границы (рекристаллизационная зона, см. рис. 2, е). Параметры волнообразования, отмеченные в [6, 12], удовлетворительно согласуются с нашими результатами (см. рис. 3). При конкретных для каждой пары металлов  $v_{кр}$ , характеризующих переход от дозвукового к сверхзвуковому течению, амплитуда возмущений достигает максимальной величины.

Дальнейший рост  $v_k$  сопровождается разворотом соударяющихся пластин. Струеобразование в точке контакта отсутствует (см. рис. 4, б).

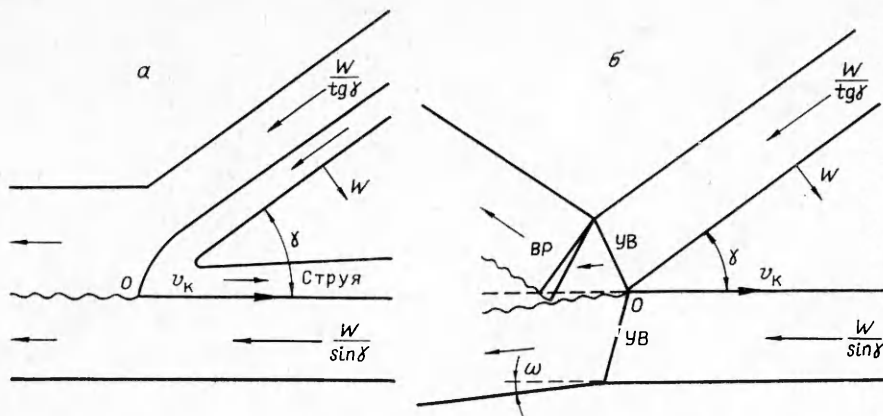


Рис. 4. Схема реализующегося течения вблизи зоны соударения в системе координат, связанной с точкой контакта, в режимах дозвукового косоугольного соударения (а) и сверхзвукового косоугольного соударения с присоединенными УВ (б).

В этом режиме возмущения на контактной границе формируются при развитии неустойчивости Кельвина — Гельмгольца. Разворот пластин происходит при выходе волны разрежения на контактную границу. Приближенно можно определить время контактирования слоев металлов:

$$t = \frac{\delta_{уд}}{D_{УВ}} + \frac{\delta_{уд}}{c_0},$$

где  $D_{УВ}$  — скорость УВ в материале пластины. Из законов сохранения на фронте косоугольного УВ следует, что подобное соударение сопровождается разворотом пластин на угол  $\omega$  [2]. До разделения два потока (метаемая и неподвижная пластины) в течение времени  $t$  движутся за фронтами косоугольных УВ параллельно, касаясь один другого, т. е. происходит их относительное скольжение. На фронте волны повышается температура образцов. В процессе относительного скольжения на контактной границе реализуются интенсивные сдвиговые деформации, развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, вследствие которой формируются возмущения на границе раздела двух металлов. Плоскость контакта оплавляется, в результате чего в тонких приграничных слоях происходит сварка взрывом. Волна разрежения, разделяющая пластины, разрывает сварной шов. Часть металла ударника (до  $\sim 0,1$  мм по толщине) остается присоединенной к поверхности неподвижной пластины в виде пористого слоя (см. рис. 2, в, з). С ростом  $v_k$  увеличивается и скорость относительного скольжения металлов, одновременно сокращается время нахождения их в контакте. Возмущения не успевают полностью сформироваться, их амплитуда уменьшается (ветви зависимости  $a(M)$  на рис. 3; рис. 2, в, з).

Из результатов опытов следует, что амплитуда возмущений (при одинаковых числах  $M$  и  $\gamma \sim \text{const}$ ) больше для металлов с меньшими прочностными характеристиками (см. рис. 3, а).

При высокоскоростном косоугольном соударении поведение металлов в окрестности точки контакта удовлетворительно описывается с позиций гидродинамики [4—6, 9, 10]. Реально в жидкую фазу переходят тонкие приграничные слои металла шириной до нескольких микрон [11—13]. Остальная масса металла вблизи точки контакта переходит в некое пластичное квазижидкое состояние, поведение которого в значительной степени зависит от величины напряжений сдвига  $\tau$ , которые можно оценить как полуразность нормального  $P_n$  и касательного  $P_\tau$  к фронту ударной волны напряжения [14].

С другой стороны, существует соотношение для динамического предела текучести, которое характеризует способность материала сопротивляться сдвиговым деформациям [14]  $Y = 2\tau$ . Экспериментальные зави-

симости величины динамического предела текучести некоторых металлов от давления нагружения приведены в [15].

В [6] при анализе геометрического вида контактных границ слоев металлов после косоугольного соударения получено:

$$a \sim Re = \frac{(\rho_{уд} + \rho_{пл}) v_k^2}{2(H_{уд} + H_{пл})},$$

где  $\rho_{уд}$ ,  $\rho_{пл}$  — плотность ударника и неподвижной пластины;  $Re$  — эквивалентное число Рейнольдса;  $H_{уд}$ ,  $H_{пл}$  — микротвердость ударника и неподвижной пластины. Переписывая это соотношение для соударения одинаковых пластин и учитывая, что динамический предел текучести в большей степени отвечает физическим процессам, происходящим на контактной границе, нежели  $H$ , вводя соотношение  $M = v_k/c_0$  и принимая во внимание, что произведение  $\rho_{пл} v_k c_0$  — параметр давления в окрестности точки контакта  $P_k$ , получаем

$$a \sim Re = P_k \cdot M/Y.$$

При сравнении амплитуд возмущений на контактных границах слоев различных металлов фиксируется число  $M$  и для него  $P_k$ . Каждому значению  $P_k$  соответствует определенная величина  $Y$  [15]. Таким образом, соотношение из [6] переходит в простую связь двух параметров  $a \sim 1/Y$ , т. е. чем меньше величина динамического предела текучести данного материала, тем больше амплитуда возмущений на контактной границе, и наоборот. Сравнивая восходящие ветви зависимостей на рис. 3, можно отметить

$$\frac{a_{Cu}}{a_{Al}} \approx \frac{Y(P_k)_{Al}}{Y(P_k)_{Cu}}, \quad \frac{a_{Cu}}{a_{Ст}} \approx \frac{Y(P_k)_{Ст}}{Y(P_k)_{Cu}}$$

(при  $\gamma \approx \text{const}$ , равных значениям  $M$  и соответствующих им  $P_k$  и  $Y$ ). Пересчитанные подобным образом экспериментальные значения для амплитуд возмущений перенесены на зависимость  $a(M)$  для меди. Видно хорошее согласие для трех пар обследованных металлов (см. рис. 3, штриховая кривая).

По-видимому, можно проводить и обратную операцию, т. е. амплитуда возмущений на контактной границе металлов может являться косвенным методом оценки динамического предела текучести. На рис. 3 точкой 3 нанесено экспериментальное значение амплитуды возмущений на контактной границе  $Mg - Mg$ . Эта точка лежит практически на зависимости для  $Al$ . Можно предположить, что динамические пределы текучести  $Al$  и  $Mg$  близки.

Связь амплитуды возмущений на контактной границе с динамическим пределом текучести для  $Cu$  и  $Ст$ . 3 сохраняется и в сверхзвуковом режиме нагружения. В данном случае определяющую роль играют волновые свойства материалов (близость значений скоростей УВ и звука, величины тангенциального разрыва скоростей за фронтом косоугольного УВ и т. п.). Получены также предварительные результаты по связи амплитуды возмущений на контактных границах разнородных пар металлов. Аналитическое выражение для этой связи носит более сложный характер.

Таким образом, представленные результаты позволяют построить зависимость амплитуды возмущений на контактной границе слоев металлов от числа Маха в широком диапазоне скоростей точки контакта. Впервые получена экспериментальная иллюстрация состояния контактной границы при косоугольном соударении двух металлов в режиме с присоединенными к точке контакта косыми УВ. Предложена аналитическая связь амплитуды возмущений на контактных границах различных пар металлов с их прочностными свойствами (динамическим пределом текучести).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
2. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны.— М.: ИЛ, 1950.
3. Крутин А. В., Соловьев В. Я., Шефтель Н. И. и др. Деформация металлов взрывом.— М.: Metallургия, 1975.
4. Cowan G. B., Holtzman A. H. Flow configurations in colliding plates: explosive bonding // J. Appl. Phys.— 1963.— 34, N 4.— P. 928—939.
5. Bahrani A. S., Black T. J., Crossland B. The mechanics of wave formation in explosive welding // Proc. Roy. Soc. Ser. A.— 1966.— 296, N 1445.— P. 123—136.
6. Cowan G. R., Bergmann O. R., Holtzman A. H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals // Metallurgical Trans.— 1971.— 2, N 11.— P. 3145—3155.
7. Кузьмин Г. Е., Симонов В. А., Яковлев И. В. Зависимость параметров волн при сварке взрывом от фазы разгона метаемой пластины // ФГВ.— 1976.— 13, № 3.— С. 458—461.
8. Уткин А. В., Дремин А. Н., Михайлов А. Н. и др. Волнообразование при высокоскоростном соударении металлов // ФГВ.— 1980.— 16, № 4.— С. 126—132.
9. Hunt J. N. Wave formation in explosive welding // The Phyl. Mag. Ser. 8.— 1968.— 17, N 148.— P. 669—680.
10. Robinson J. L. Fluid mechanics of copper: viscous energy. Dissipation in impact welding // J. Appl. Phys.— 1977.— 48, N 6.— P. 2202—2207.
11. Crossland B., Williams J. D. Explosive welding // Metallurgical Rev.— 1970.— N 144.— P. 79—100.
12. Lucas W. Transmission electron microscopy of copper, stainless steel and aluminium explosion welds // J. Inst. of Metals.— 1971.— 99, N 2659.— P. 335—340.
13. Кривенцов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обраб. материалов.— 1969.— № 1.— С. 132—141.
14. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
15. Батюков Ю. В., Новиков С. А., Синецына Л. М. и др. Исследование сдвиговых напряжений в металлах на фронте ударной волны // Пробл. прочности.— 1981.— № 5.— С. 56—59.

г. Москва

Поступила в редакцию 11/XII 1989

УДК 514.84; 510.66 : 662.215.5

Т. С. Пивина, Э. А. Петров, Г. Х. Агранов,  
В. А. Шляпочников

### МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КРИТЕРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВВ К УДАРУ

Оценивается возможность выявления взаимосвязей химического строения и чувствительности ВВ к удару. Используются методы компьютерной химии (логико-структурный подход распознавания образов на молекулярных графах) и квантовой химии. Теоретические расчеты соотнесены с одним из эмпирических параметров чувствительности. На качественном уровне показана детерминированность чувствительности фрагментами структурных формул ВВ.

Следуя [1], чувствительность взрывчатых веществ (ВВ) к удару можно рассматривать как совокупность процессов возбуждения и развития самораспространяющегося взрывчатого превращения. Ранее эти процессы изучали на молекулярно-кристаллическом (макромолекулярном) уровне. В работах [2, 3] показана возможность рассмотрения некоторых аспектов возбуждения взрывчатого превращения и на молекулярном уровне. Эти исследования представляются актуальными, поскольку выявление зависимости чувствительности от химического строения имеет большое значение для целенаправленного синтеза ВВ.

Цель работы состояла в разработке методических приемов, позволяющих оценить взаимосвязи молекулярного строения и чувствительности ВВ к удару. Использовали как методику, предложенную в [2], так и собственные разработки, выполненные на базе методов искусственного интеллекта (ИИ) [4] (логико-структурный подход распознавания образов на графах). В обоих случаях для корреляций привлекался один из