

СДВИГОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В МЕТАЛЛАХ

А. Л. Михайлов

(Москва)

Известно явление волнообразования на границе раздела металлических пластин при их косом соударении и последующем сваривании [1]. Область существования волнообразования обычно связывается с областью струеобразования или с дозвуковой скоростью точки контакта соударяющихся пластин в окрестности этой точки ($u_k < c$).

Цель настоящих экспериментов — исследование устойчивости границы раздела двух металлов в случае бесструйной конфигурации при положении границы раздела двух плотно прижатых пластин, компланарном фронту ударной волны. В принятой трактовке этот случай соответствует нулевому углу соударения ($\gamma_k = 0$) и бесконечно большой скорости точки контакта ($u_k = \infty$).

Опыты проводились в постановке работы [2] с образцом, запрессованным в плоскую ампулу сохранения размерами 33×18 мм, изготовленную из стали IX18H10T и обжимаемую ударной волной, генерируемой толстым (10 мм) латунным ударником. Амплитуда ударной волны в стали составляла 350 кбар, время нахождения образца в обжатом состоянии около 4 мкс.

Кривизна фронта ударной волны, входящей в образец, не превышала 0,5 мм по диаметру образца, что проверялось фотохронографическим способом в режиме щелевой развертки.

Геометрия образцов приведена на рис. 1. Образец, запрессованный в ампулу 1, состоял из медного или алюминиевого диска 3 диаметром 15 мм и толщиной δ . Под ним располагался соответственно алюминиевый или медный диск 5 с коническим углублением (угол при вершине 150° и глубина 1,8 мм). Таким образом, между дисками задавался клиновидный зазор переменной ширины. Диски 3 и 5 отделялись от ампулы пластинами 2 и 6 из медной фольги толщиной 0,12 мм. В ряде опытов между дисками помещалось кольцо 4 толщиной δ_2 , увеличивавшее базу полета диска 3 до соударения его с диском 5. При захлопывании клиновидного зазора между дисками реализуется их косое соударение с углом $\theta = 15^\circ$ и сверхзвуковой скоростью точки контакта. Контрольные опыты проводились с плоским диском 5 и постоянной шириной зазора δ_2 между дисками 3 и 5 ($\delta_2 = 1 \div 2$ мм). В этом случае $\theta = 0$.

Обработка всех дисков (кроме медных пластин 2 и 6) и деталей ампулы соответствовала шестому классу шероховатости. Зазор между ампулой и пластиной 2 практически исключался плотной запрессовкой образца, что достигалось подгонкой суммарной толщины макета дисков

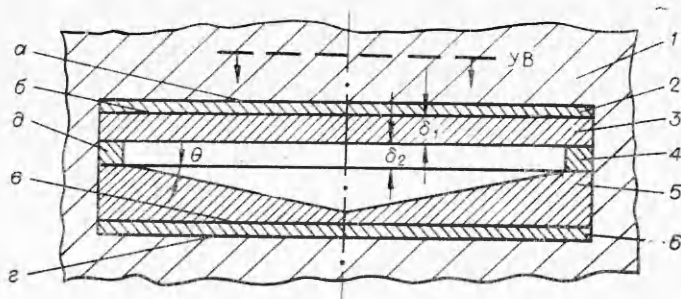


Рис. 1.

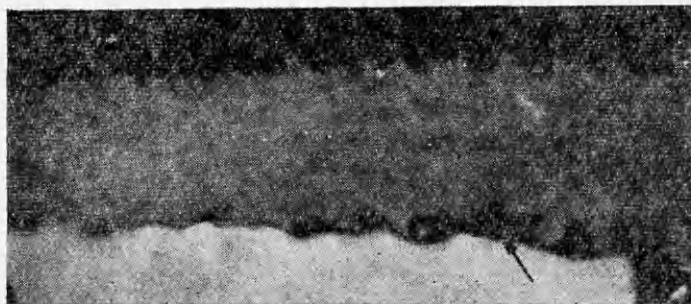


Рис. 2.

образца к толщине полости в ампуле. Таким образом, ширину этого зазора можно оценить в $5\div 10$ мкм (половина средней высоты шероховатостей).

Состояние границ разделов $a-g$, указанных на рис. 1, между разнородными металлами после ударно-волнового обжатия образца анализировалось по шлифу, приготовленному на диаметральной плоскости разреза ампулы.

Фотография характерного шлифа приведена на рис. 2. Видно, что помимо сварного соединения дисков 3 и 5 (см. рис. 1) по поверхности их соударений (указано стрелкой) наблюдается развитие возмущений на плоской и компланарной фронту ударной волны границе раздела a между стальным корпусом ампулы и медной фольгой 2, расположенной со стороны прихода ударной волны. Неустойчивость плоских границ разделов $b, в, г$ не была зафиксирована ни в одном опыте. Не было зафиксировано возмущений и на границе раздела a в контрольных опытах с нулевым углом соударения дисков 3 и 5. В таблице приведены начальные параметры образцов в четырех характерных опытах при $\theta=15^\circ$.

Параметры возмущений на границе раздела a между сталью и медью (условия опытов — см. таблицу) приведены на рис. 3, 4 в виде зависимостей длины волны λ и амплитуды A возмущения от расстояния x по диаметру образца от точки $г$ начала косого соударения дисков 3 и 5 (см. рис. 1). Видно, что развитие неустойчивости характеризуется нелинейным ростом длины волны возмущения от расстояния x от точки начала косого соударения или от времени. Зависимость амплитуды возмущений от того же параметра имеет более близкий к линейному характер. Начало формирования возмущений зафиксировано на расстоянии $3,2\div 3,5$ мм независимо от величины зазора. Несколько более раннее формирование возмущений в опыте 3 по сравнению с опытом 4 может быть связано с меньшей толщиной диска 3 в опыте 3.

Совокупность результатов свидетельствует о том, что зафиксированная неустойчивость имеет сдвиговый характер и вызвана взаимным скольжением стальной и медной пластин при захлопывании расположенного под ними клиновидного зазора. Подтверждает это отсутствие возмущений на границе b в опытах 3 и 4, на границах $в$ и $г$ во всех опытах и на границе a в контрольных опытах. В первом случае отсутствие возмущений объясняется отсутствием контакта между алюминиевой пластиной 3 и медной пластиной 2 при захлопывании зазора под пластиной 3. Во втором случае скольжение отсутствует на границах $в$ и $г$, а в третьем случае — на всех границах.

Номер опыта	Материал диска		δ_1 , мм	δ_2 , мм
	3	5		
1	Cu	Al	0,5	0,8
2			0,5	0,5
3	Al	Cu	0,5	0,5
4			1,0	0

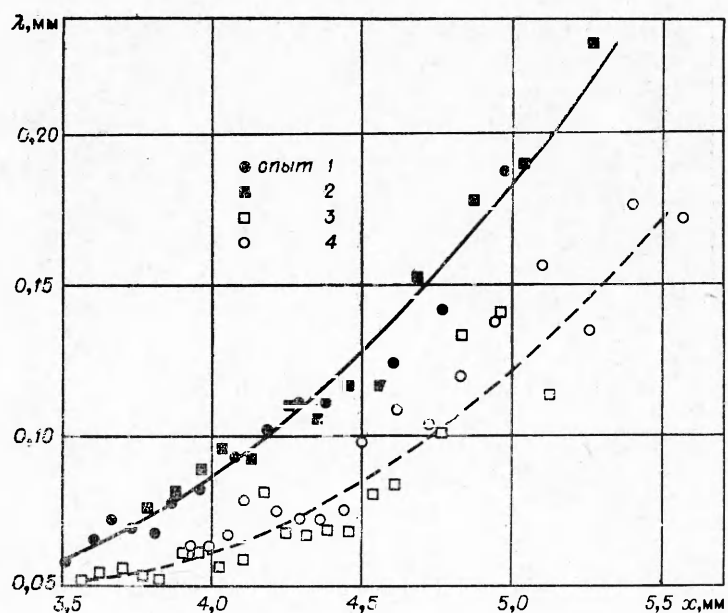


Рис. 3.

Величину тангенциального разрыва скоростей Δu можно оценить из геометрических соображений: $\Delta u = w \sin \theta \approx 0,42$ мм/мкс, где w — удвоенная массовая скорость стали за фронтом ударной волны. Время скольжения равно времени захлопывания клиновидного зазора ($t = x \operatorname{ctg} \theta / w$) и составляет примерно 1,1 мкс в центре образца. Рост длины волны возмущения с расстоянием x или со временем скольжения t , видимо, объясняется увеличением пограничного слоя, что приводит к уменьшению влияния вязкости и повышению максимально неустойчивой длины волны. Дополнительным фактором может быть уменьшение эффективной вязкости металлов на границе раздела вследствие их оплавления и роста ширины расплава. Это предположение подтверждается зафиксированной на микрошлифах перекристаллизацией меди, что

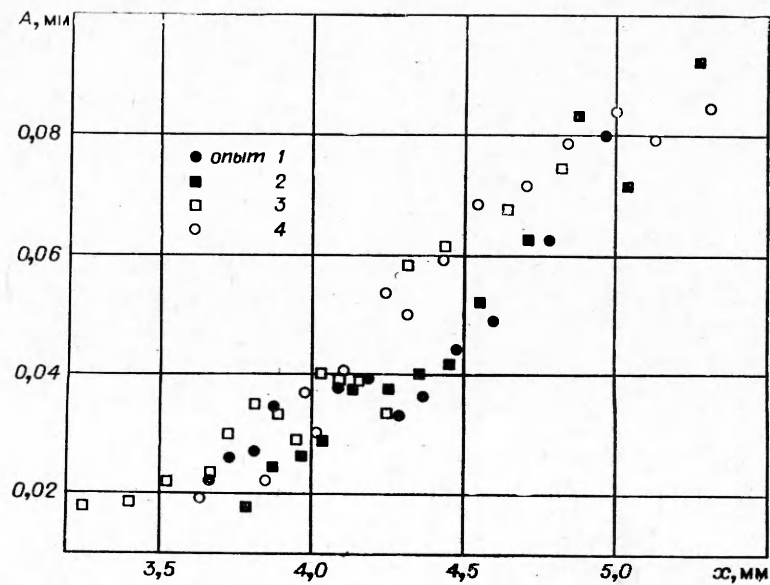


Рис. 4.

иллюстрируется на рис. 5 (опыт 5, граница a ; зона перекристаллизации указана стрелкой).

Аналогичным образом объясняется отклонение от экспоненциальной зависимости скорости роста амплитуды возмущений, являющейся функцией величины тангенциального разрыва, вязкости и волнового числа. Меньшая скорость роста длины волны возмущений в опытах 3, 4 по сравнению с опытами 1, 2 подтверждает известное из аналитических [3] и численных [4] расчетов стабилизирующее действие близко расположенной второй границы потока, в данном случае свободной границы раздела b между медью и алюминием.

Из значения координаты x начала развития возмущений в стоящих опытах можно оценить среднюю эффективную вязкость металлов. Полагая, что полуширина пограничного слоя d зависит от времени по известному закону $d = 2\sqrt{\nu t}$, где ν — кинематический коэффициент вязкости, можно записать:

$$d \approx 2\sqrt{\nu_{\text{эфф}} \frac{x \cdot \operatorname{tg} \theta}{\omega}}.$$

Принимая в соответствии с [4], что формирование заметных возмущений начинает наблюдаться при их амплитуде, приблизительно равной полуширине пограничного слоя ($A_{\min} \approx d$), из зафиксированной минимальной амплитуды $A_{\min} \approx 0,02$ мм и ее координаты $x \approx 3,2$ мм оценим среднюю эффективную вязкость металлов

$$\nu_{\text{эфф}} \approx \omega d^2 / 4x \operatorname{tg} \theta \approx \omega A^2 / 4x \operatorname{tg} \theta \approx 19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с},$$

что довольно хорошо, учитывая некоторую приближенность критерия $A_{\min} \approx d$, совпадает с вязкостью стали и меди в расплавленном состоянии [5] и подтверждается фактом зафиксированной перекристаллизацией меди.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца в металлах под действием ударных волн при величине тангенциального разрыва $\Delta u \sim 0,5$ мм/мкс и оплавлении по крайней мере одного из металлов вдоль линии скольжения. Они могут, по нашему мнению, служить дополнительным подтверждением возможности бесструйного механизма волнообразования и при сварке взрывом.

Поступила в редакцию
10/1 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. И. Н. Дулин, Л. В. Альтшулер и др. ФТТ, 1969, 11, 1262.
3. Н. Г. Кикина. Акустический журнал, 1967, XIII, 2, 213.
4. A. A. Amsden and F. H. Harlow. Phys. Fluids, 1964, 7, 3, 327.
5. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976.