

## ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР ПРИ РАЗВИТИИ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ОПЫТАХ ПО КОСОМУ СОУДАРЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

О. Б. Дреннов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в жидкостях и газах определяется наличием разрыва тангенциальной составляющей поля скоростей. Для сред с прочностью развитие неустойчивости может определяться существованием начального возмущения. В серии экспериментов, где поверхности контакта имели шероховатость  $\approx 20$  мкм и полировались до зеркальности, не зафиксировано различие в параметрах и геометрическом виде реализующихся возмущений. Следовательно, определяющим фактором для развития неустойчивости является относительное скольжение двух разупрочненных («квазжидких») слоев металлов.

*Ключевые слова:* неустойчивость, тангенциальный разрыв скоростей, начальное возмущение, пластические деформации, термическое разупрочнение, «квазжидкий» слой.

В природе существует три типа неустойчивостей поверхности раздела:

❖ Рэлея–Тэйлора (когда на границу раздела веществ разной плотности действует ускорение, вектор которого направлен от вещества меньшей плотности [1]);

❖ Рихтмайера–Мешкова (когда граница раздела импульсно ускоряется ударной волной [2]);

❖ Кельвина–Гельмгольца (когда имеется разрыв тангенциальной составляющей поля скоростей [3]).

Неустойчивости Рэлея–Тэйлора и Рихтмайера–Мешкова развиваются при наличии начального возмущения на границе раздела, которое растет при ускорении последней.

С другой стороны, система, состоящая из двух касающихся потоков, движущихся параллельно с различными скоростями, является неустойчивой [4].

Такое утверждение абсолютно справедливо для жидкостей и газов. Однако когда взаимодействуют вещества, обладающие прочностью (металлы), ситуация становится не столь однозначной.

Реализовать относительное скольжение двух металлических образцов с высокой скоростью достаточно сложно. Наиболее простой способ – косоое соударение пластин. При определенном

подборе скорости метания  $u$  и угла соударения пластин  $\gamma$  реализуется так называемый режим «сварки взрывом» [5]. Контактная граница образцов приобретает волнообразный вид, а сами образцы прочно сцепляются. Образование волнообразных возмущений на границе раздела объясняется в гидродинамическом приближении развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. В точке контакта металлы рассматриваются как соударяющиеся струи, причем натекающая струя разделяется на прямую и обратную. Взаимодействие обратной струи (метаемой пластины) с неподвижной приводит к развитию неустойчивости, возникновению и росту возмущений [6, 7].

Однако подробный металлографический анализ соединенных образцов показал, что плавление происходит в ограниченных локальных зонах. Подавляющая область соединения происходит в твердой фазе [5, 8].

По-видимому, для развития неустойчивости необходимо наличие начального возмущения, рост которого и определяет волнообразную форму контактной границы.

Для выявления определяющего фактора для развития сдвиговой неустойчивости в средах, обладающих прочностью, была проведена серия

экспериментальных исследований. Схема постановки опытов представлена на рис. 1.

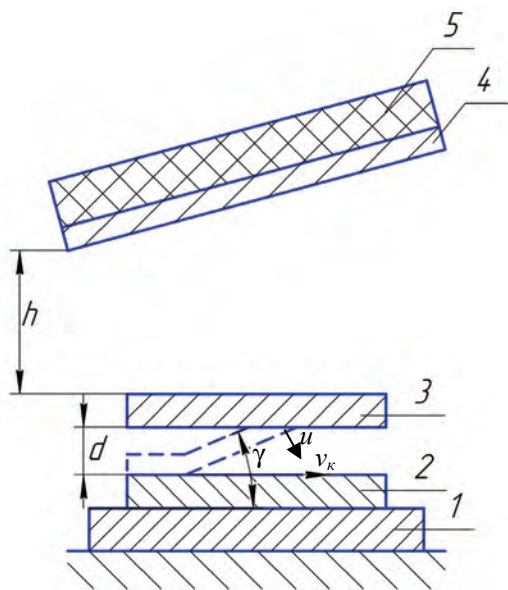


Рис. 1. Схема постановки опытов

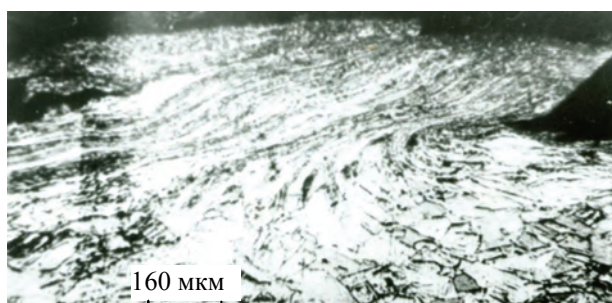
На массивное стальное основание 1 размещается неподвижная пластина 2 из меди М1 размером 100×60×5 мм. Над ней через зазор  $d$  фиксируется метаемая пластина 3 из алюминиевого сплава АМг размером 100×60×5 мм. Над пакетом пластин устанавливается ударник 4 из алюминиевого сплава АМг размером 150×120×4 мм [9]. Минимальное расстояние между ударником и метаемой пластиной  $h = 20$  мм, что обеспечивает стационарность параметров соударения, так как, согласно данным [10], разгон пластины, метаемой в режиме скользящей детонации заряда ВВ, заканчивается на базе полета, равной 3–5 ее толщины. На поверхности ударника размещается слой ВВ 5 из тротила, в котором возбуждается плоская скользящая детонационная волна.

В каждой серии опытов динамические параметры ударника оставались неизменными. Варьировалось расстояние между поверхностями неподвижной и метаемой пластин. Основные результаты экспериментов приведены 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 обсчета 20 соседних возмущений).

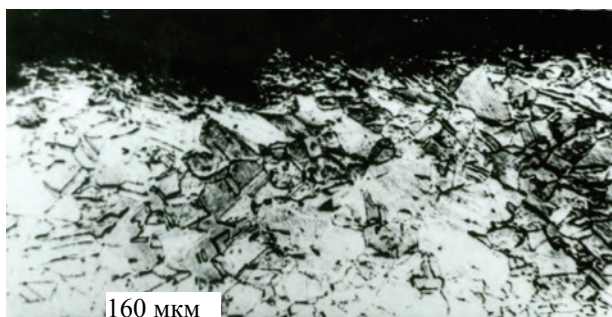
Основные результаты экспериментов

Номер опыта	$v_k$ , мм/мкс	$d$ , мм	$a$	$\lambda$	Номер рисунка (увеличение)
			мкм		
1	4	10	$240 \pm 20$	$750 \pm 250$	2 (x 100)
2	4	1	$80 \pm 10$	$350 \pm 50$	3 (x 100)
3	4	0,1	$30 \pm 5$	$150 \pm 20$	4 (x 100)
4	4	10	$250 \pm 20$	$800 \pm 250$	5 (x 100)
5	4	1	$70 \pm 10$	$350 \pm 50$	6 (x 100)
6	4	0,1	$25 \pm 5$	$140 \pm 20$	7 (x 100)

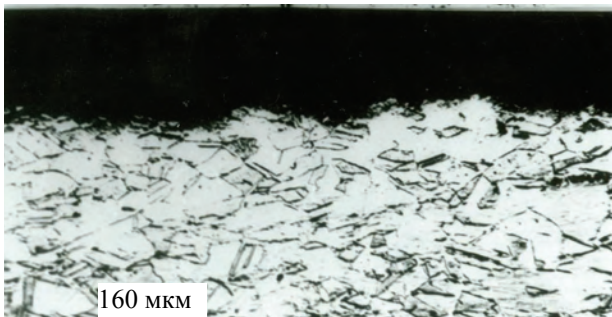
Фотографии микрошлифов контактных границ приведены на рис. 2, 3.



а



б



в

Рис. 2. Микрошлиф контактной границы Al–Cu (шероховатость поверхности не более 20 мкм): а –  $d = 10$  мм; б –  $d = 1$  мм; в –  $d = 0,1$  мм

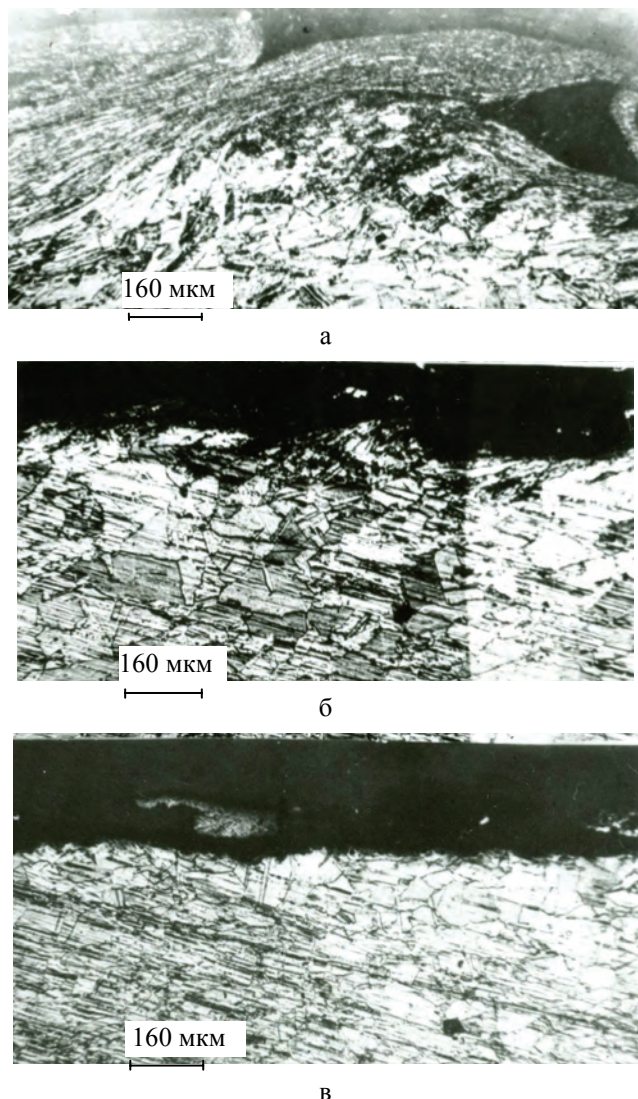


Рис. 3. Микрошлиф контактной границы Al-Cu (поверхности полировались до зеркальности):  
а –  $d = 10$  мм; б –  $d = 1$  мм; в –  $d = 0,1$  мм

В опытах 1–3 поверхности контакта нагружаемых пластин обрабатывались по классу точности  $R_{z20}$  (шероховатость поверхности не более 20 мкм), в опытах 4–6 – по классу точности  $R_{z0,05}$  (поверхности полировались до зеркальности).

Из результатов опытов следует: в пределах погрешности эксперимента не зафиксировано различие в параметрах и геометрическом виде реализующихся возмущений. Следовательно, начальное возмущение ( $a \approx 20$  мкм) не является определяющим фактором для развития неустойчивости.

После соударения пластин в точке контакта реализуются интенсивные пластические деформации.

Тепло, выделяемое в процессе деформирования, приводит к термическому разупрочнению, росту скорости пластических деформаций и авто-

каталитической кинетике увеличения температуры. Узкие (десятки микрон) приграничные слои металлов полностью теряют прочность, переходят в некое «квазизидкое» состояние.

Известно, что тангенциальный разрыв (относительное движение двух контактирующих струй с разными скоростями) неустойчив [4]. Именно относительное «течение» двух «квазизидких» слоев является определяющим фактором для развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в средах, обладающих прочностью.

### Список литературы

1. Taylor G. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // *Proceeding of Royal Society. Series A*, 1950. Vol. 201, № 1065. P. 192–196.
2. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // *Механика жидкости и газа*. 1969, № 5. С. 151–158.
3. Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике. I. О вихревом движении. II. О прерывном движении жидкости. Berlin Akad. 1868. С. 215–228 (русский перевод под ред. Е. А. Чаплыгина).
4. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы, факты, подобие. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
5. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, СО, 1980.
6. Hunt J. Wave Formation in Explosive Welding // *The Philosophical Magazine, Series 8*. 1968. Vol. 17, № 148. P. 669–680.
7. Robinson J. The mechanics of wave formation in impact welding // *The Philosophical Magazine*. 1975. Vol. 31, № 3. P. 587–597.
8. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987.
9. Дреннов О. Б. О развитии возмущений на контактной границе алюминий – медь в нестационарном режиме косоуго соударения. ПМТФ. 1989. № 3. С.41–44.
10. Кузьмин Г. Е., Симонов В. А., Яковлев И. В. Зависимость параметров волн при сварке взрывом от фазы разгона метаемой пластины // *ФГВ*. 1976. Т. 2, № 3. С. 458–461.

Статья поступила в редакцию 13.12.2019