

**ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
НА ПРОЦЕСС ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ**

*А. А. Дерibas, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков*  
(Новосибирск)

Характерной особенностью соединений, полученных сваркой взрывом, является довольно строгая регулярность и периодичность остаточных деформаций в области соударения, что придает контактным поверхностям соударяющихся тел волнообразную форму (рис. 1).

Само образование волн в результате высокоскоростного соударения металлических тел было зафиксировано еще в 40-х годах при исследовании специальных кумулятивных зарядов группой ученых, работавших под руководством академика М. А. Лаврентьева. Подобные эффекты обнаруживались также на металлических обшивках специальных сооружений в местах попадания высокоскоростных тел.

Первое сообщение о явлении волнообразования в процессе высокоскоростного соударения двух металлических тел сделано в 1954 г. [1]. В начале 60-х годов было обнаружено, что образование волн при соударении металлических пластин способствует получению прочного соединения между ними [2, 3]. Положительная роль волнообразования в процессе сварки металлов взрывом связана, по-видимому, со следующими основными факторами.

1. При образовании волн основная доля исходной кинетической энергии метаемой пластины переходит не в энергию сжатия, а в энергию волнообразного пластического течения металлов с последующим превращением ее в тепло. Благодаря этому обстоятельству исключается возникновение при разгрузке металлов, растягивающих напряжений, способных разрушить соединения, а металл в зоне соединения



Рис. 1. Вид контактной поверхности алюминиевой пластины после соударения.

сильно разогревается, что в большинстве случаев способствует образованию прочного соединения.

2. Процесс волнообразования сопровождается образованием зоны перемешивания поверхностных слоев металлов, где одновременно присутствуют оба свариваемых компонента. Существование такой зоны можно объяснить чисто механическими процессами, которые имеют место при образовании волн.

3. При волнообразовании происходит активное разрушение и удаление окисных пленок и загрязнений, всегда присутствующих на контактных поверхностях свариваемых пластин. При этом часть поверхностного слоя в виде отдельных частиц или более крупных образований вообще выносятся из зоны соединения, и большая часть поверхности оказывается полностью очищенной.

4. Волнообразование увеличивает общую поверхность соединений. Благодаря приведенным выше особенностям исследования процесса волнообразования приобрели помимо самостоятельного научного интереса еще и определенное практическое значение в более общей проблеме сварки металлов взрывом. Настоящая

работа посвящена выяснению влияния начальных параметров соударения на волнообразование и установлению критических условий, при которых происходит образование волн.

В экспериментах была использована схема, показанная на рис. 2. В большинстве опытов применялись пластины стандартной площади ( $50 \times 200$  мм). Если толщина метаемой пластины превышала 4 мм, площадь пластин увеличивалась так, чтобы избежать влияния искривления метаемой пластины за счет разгрузочных явлений при разлете продуктов взрыва со стороны боковых граней заряда.

Точная форма волны устанавливалась путем фотографирования микроструктуры сварного шва. Соответствующий шлиф всегда вырезался из среднего участка сваренного образца. На каждом шлифе с помощью микроскопа определялась амплитуда  $a$  и длина  $\lambda$  25—75 различных волн, а затем находились соответствующие средние значения. Такая методика позволяет определить размеры волн в каждом отдельном опыте с точностью до 10%.

В некоторых опытах сваренные пластины удается отделить друг от друга без существенного разрушения, что позволяет исследовать волны на всей контактной поверхности (см. рис. 1). Обычно амплитуда и длина волн несколько возрастают в направлении распространения фронта детонации, а под детонатором волны вообще не образуются. Фронт волны имеет форму дуги, отдельные части которой могут оказаться несколько сдвинутыми относительно друг друга.

Размеры волн, их форма сильно меняются в зависимости от следующих начальных параметров соударения: начального угла между пластинами  $\alpha$ , безразмерной величины  $r$ , равной отношению массы ВВ к массе метаемой пластины той же площади ( $r = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_1 \delta_1}$ ), начального расстояния между пластинами  $h_0$  и скорости детонации ВВ ( $D$ ). Здесь  $\rho_0$  и  $\rho_1$  — плотности ВВ и металла метаемой пластины.

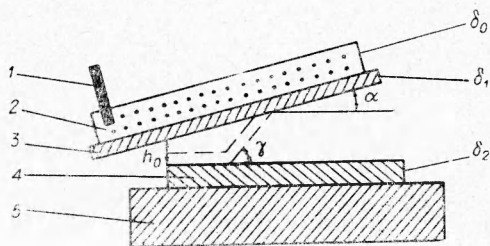


Рис. 2. Схема опыта.

1 — капсуля-детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — метаемая пластина; 4 — неподвижная пластина; 5 — жесткое основание.

В лабораторных условиях изменением начальных параметров соударения можно получать волны размером от десятков микрон до 5—7 мм, когда они становятся соизмеримыми с толщиной метаемой пластины, и ее наружная поверхность принимает волнообразную форму. При указанных изменениях абсолютных размеров волн отношение амплитуды к длине волны изменяется весьма незначительно, главным

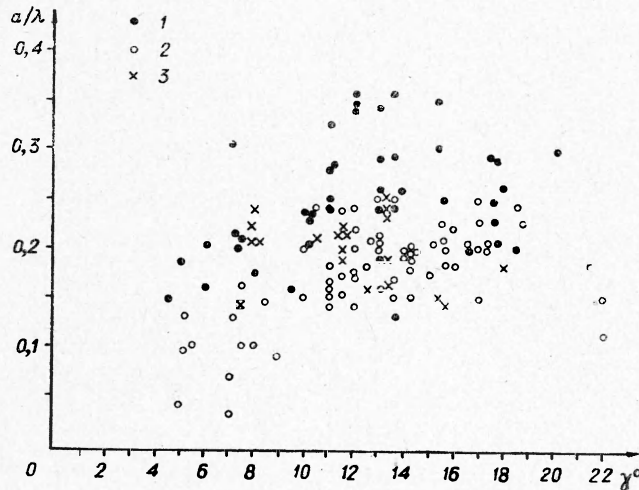


Рис. 3. Зависимость отношения амплитуды к длине волны от угла соударения.

1 — Cu+Cu; 2 — Ст. 3+Ст. 3; 3 — Д16Т+Д16Т.

образом в пределах от 0,14 до 0,3. Соответствующие экспериментальные данные были получены в результате обработки 130 различных опытов и приведены на рис. 3. Небольшое число точек, лежащих ниже отмеченного диапазона изменения величины  $q$ , относится к критическим режимам соударения. В этих режимах волнообразование имеет неустановившийся характер и при незначительном изменении параметров может вообще исчезнуть. Это обстоятельство позволяет для количественной характеристики размеров волн выбрать основным исследуемым параметром длину волны  $\lambda$ .

Еще в первых исследованиях было установлено, что наиболее заметное влияние на процесс волнообразования оказывает изменение начального угла между пластинами  $\alpha$ . Во-первых, оказалось, что при использовании ВВ с высокой скоростью детонации существует критическое значение начального угла  $\alpha^*$ , ниже которого образование волн вообще не происходит. Об этом сообщалось в работах [2, 3] и др. Во-вторых, увеличение начального угла при сохранении заряда ВВ и начального расстояния между пластинами ( $r = \text{const}$ ,  $h_0 = \text{const}$ ) всегда приводит к увеличению размеров волн [3, 4].

Характерные зависимости для некоторых пар однородных металлов приведены

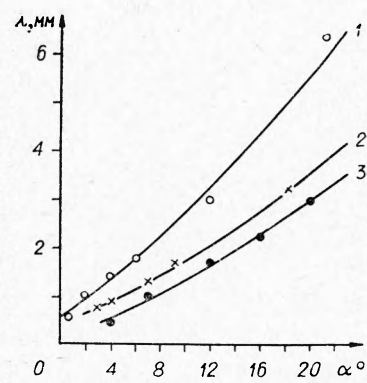


Рис. 4. Зависимость длины волны от начального угла.

1 — Д16Т+Д16Т; 2 — Cu+Cu; 3 — Ст. 3+Ст. 3.

на рис. 4. В случае очень больших углов ( $\alpha \sim 15-30^\circ$ ) волны начинают сильно удлиняться, а затем вообще могут исчезнуть. В обычных режимах соударения это явление иногда наблюдается у самого конца



Рис. 5. Микрофотография соединения Ст. 3 + Ст. 3 при  $\alpha=0$ .

пластин. В зависимости от начального угла меняется и форма волн. Если при небольших углах волны обычно приближаются к синусоидальной форме (рис. 5), то с его увеличением преобладают деформации в направлении распространения детонации (рис. 6).



Рис. 6. Микрофотография соединения Ст. 3 + Ст. 3 при  $\alpha=16^\circ$ , полуволна.

Деформация волн может в ряде случаев приводить даже к отрыву гребней волн и их сносу. Подобные изменения формы волн, возможно, связаны с увеличением тангенциальной составляющей скорости метаемой пластины и возникновением тангенциального разрыва между соударяющимися металлами. При очень больших углах перед тем как исчезнуть волны принимают правильную синусоидальную форму без каких-либо заметных завихрений. На рис. 7 показан характер исчезновения волн в подобном критическом режиме.

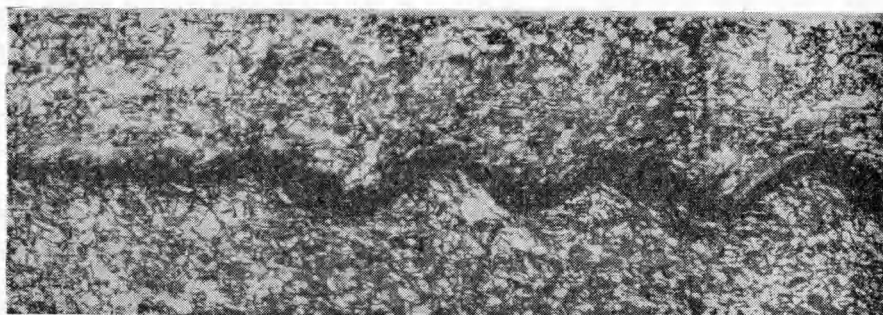


Рис. 7. Микрофотография соединения  $\text{Cu} + \text{Cu}$  в критическом режиме.

Для исследования влияния на волнообразование величины заряда ВВ была проведена серия опытов, в которой изменялся параметр  $r$  при постоянных начальных углах и начальных расстояниях между пластинами. Было установлено, что при любом фиксированном начальном угле существуют определенные для каждой пары металлов критические значения параметра  $r^*$ , уменьшение которых приводит к исчезновению волн. Увеличение параметра  $r$ , т. е. толщины заряда ВВ, в этих опытах всегда приводило к росту волн (рис. 8).

В следующей серии опытов изменялась толщина нижней неподвижной пластины (рис. 9) при сохранении заряда ВВ, размеров метаемой

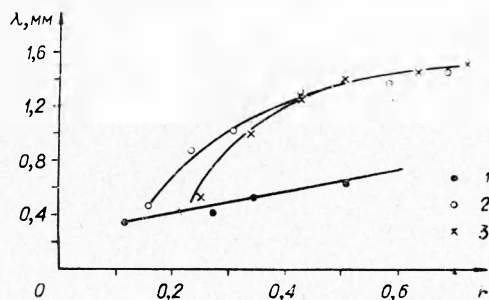


Рис. 8. Зависимость длины волны от параметра  $r$  в разных режимах:  
1 —  $\text{Cu} + \text{Cu}$  ( $\alpha = 3^\circ$ ); 2 —  $\text{Cu} + \text{Cu}$  ( $\alpha = 11^\circ$ );  
3 — Ст. 3 + Ст. 3 ( $\alpha = 9^\circ$ ).

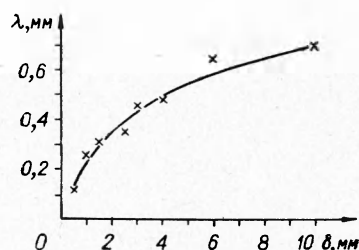


Рис. 9. Зависимость длины волны от толщины нижней пластины для пары  $\text{Cu} + \text{Cu}$  при  $\delta_1 = 3$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ .

пластины и взаимного расположения медных пластин ( $r = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ ,  $h_0 = \text{const}$ ). С целью исключения влияния жесткого основания обе пластины вместе с зарядом подвешивались в воздухе.

При увеличении начального расстояния  $h_0$  между пластинами волны постепенно увеличиваются до определенного предела. Это свидетель-

ствуется о необходимости учета разгона метаемой пластины в случае небольших расстояний между пластинами.

Полученные экспериментальные данные не позволяют непосредственно установить зависимость длины волны от скорости метаемой пластины  $v_0$ , угла соударения  $\gamma$  и скорости точки контакта  $v_k$ , так как в каждой отдельной серии опытов изменялось одновременно не менее двух из этих параметров. Это следует из рассмотрения формул, приведенных в работе [6]:

$$v_0 = 1,2 D \frac{\sqrt{1 + 1,18 r - 1}}{\sqrt{1 + 1,18 r + 1}}, \quad (1)$$

$$\gamma = \alpha + 2 \arcsin \frac{v_0}{2D}; \quad (2)$$

$$v_k = D \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin \gamma}. \quad (3)$$

Вместе с тем расчет основных параметров соударения в критических режимах, при которых начинается волнообразование, позволил установить следующие особенности процесса образования волн.

1. Для каждого фиксированного значения начального угла существует критическое значение скорости метаемой пластины  $v_0^*$ , ниже которой волны не образуются. Эти значения заметно увеличиваются с ростом начального угла между пластинами. В таблице приведены основные параметры соударения, которые были рассчитаны для различных критических режимов. Сопоставление этих данных позволяет сделать вывод, что независимо от величины начального угла для каждой пары металлов существует соответствующее критическое значение

Параметры соударения в критических режимах

Вид ВВ	Материал пластины	$\delta_0$ , мм	$\delta_1$ , мм	$\alpha^*$	$v_0^*$ , м/сек	$v_k^*$ , км/сек	$P_k^*$ , тыс. атм
Гексоген	МЗ+МЗ	4,5	3	18°	300	0,85	30
	МЗ+МЗ	3,0	3	10°	200	0,95	40
	Ст. 3+Ст.3	4,5	3	5°	260	1,90	145
	Ст. 3+Ст.3	6,0	3	14°30'	360	2,00	160
Аммонит	Д16Т+Д16Т	10,0	10	5°	290	2,60	37
		15,0	10	8°	460	1,70	40
		25,0	10	16°	850	1,80	44

скорости точки контакта  $v_k^*$ , и при  $v_k < v_k^*$  волны вообще не образуются.

Для установления физического смысла полученного результата рассмотрим движение пластин в подвижной системе координат, перемещающейся вдоль неподвижной пластины со скоростью точки контакта. В этой системе соударение двух пластин подобно слиянию под углом  $\gamma$  двух плоских потоков со скоростями течения  $v_1$  и  $v_2$ . В работе [6] показано, что

$$v_1 = v_k \frac{\cos \frac{\gamma + \alpha}{2}}{\cos \frac{\gamma - \alpha}{2}}, \quad v_2 = v_k. \quad (4)$$

В исследуемых режимах соударения обе эти скорости примерно равны.

При слиянии потоков, благодаря их торможению, возникают высокие гидростатические давления, величина которых зависит от скорости потоков  $v_1$  и  $v_2$ . Приближенная оценка максимальных значений давлений, возможных при заданной скорости течения, проводилась по формуле для определения давлений в точке торможения потока:

$$p_k \approx \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \approx \frac{1}{2} \rho_1 v_k^2.$$

Приведенные в таблице значения давлений  $p_k^*$  в ряде критических режимов заметно превышают критические разрушающие напряжения исследуемых металлов [9]. Следовательно, одним из необходимых условий волнообразования является возникновение в области соударения давлений, достаточных для пластической деформации металлов. В этих условиях прочностные силы становятся значительно меньше сил инерционных, и поэтому можно предположить, что механизм волнообразования является гидродинамической проблемой. Такое предположение поддерживают и другие авторы [3, 5, 8].

2. Расчеты скорости точки контакта в многочисленных опытах по соударению пластин, метаемых зарядом из порошкообразного гексогена ( $D=6,2$  км/сек), показали, что волнообразование происходит в случае, когда скорость точки контакта меньше скорости звука в металлах и течение в подвижной системе координат является дозвуковым. В случае правильности этого критерия следовало ожидать образования волн и при параллельном расположении пластин ( $\alpha=0$ ), если использовать ВВ, скорость детонации которого меньше скорости звука. Это непосредственно следует из формул (3), (4). Первые же эксперименты, в которых был использован аммонит № 6 со скоростью детонации 3,5—4 км/сек, подтвердили этот вывод. В результате была предложена более удобная в технологическом отношении схема сварки параллельных пластин.

Эти экспериментальные данные свидетельствуют о том, что режим высокоскоростного соударения металлических пластин резко меняется в области перехода от звукового к сверхзвуковому течению. Подобные изменения были теоретически обоснованы Уолшом, Шрефлером и Уиллингом [7]. Ими установлено существование трех различных режимов: 1) дозвуковое течение —  $v_1 < c$ ,  $v_2 < c$ ; 2) сверхзвуковое течение при углах, превышающих критические углы  $\gamma > \gamma_{кр}$ ; 3) сверхзвуковое течение при углах  $\gamma < \gamma_{кр}$ . В первых двух режимах, по данным [7, 8], образуется кумулятивная струя, а в третьем имеет место бесструйная конфигурация с устойчивыми косыми ударными волнами исходящими из точки соударения. Расчет критических углов в различных режимах дан в работах [5, 7, 8].

Абрахамсон [5] на основании анализа экспериментов по соударению пуль с тонкими преградами сделал предположение о совпадении критериев волнообразования с критическими условиями для формирования кумулятивной струи. Приведенные выше экспериментальные данные также подтверждают этот вывод. Образование волн во втором режиме ( $v_1 > c$ ;  $\gamma > \gamma_{кр}$ ) наблюдалось в специальных опытах по соударению медных пластин, метаемых зарядом из сплава ТГ 50/50 со скоростью детонации 7,6 км/сек. Образование волн зафиксировано в следующих режимах:  $v_1 = 4,8$  км/сек,  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\gamma_{кр} = 4^\circ$  и  $v_1 = 5,1$  км/сек,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\gamma_{кр} = 6^\circ$ . Отметим, что второй режим соударения для других

металлов осуществить очень сложно. Поэтому в целях сварки металлов и исследования процесса волнообразования используются преимущественно дозвуковые режимы, когда соударения являются достаточно сильными ( $v_1 > v_1^*$ ,  $p_k > p_k^*$ ) и скорость точки контакта меньше скорости звука в металлах.

Изложенный в настоящей работе экспериментальный материал о характере влияния начальных параметров на волнообразование позволил установить некоторые закономерности процесса, которые постоянно использовались нами в целях более детального исследования этого явления и при разработке конкретных технологических режимов сварки новых пар металлов и листов больших размеров. Подробное обсуждение этих результатов будет проведено в дальнейшем при обсуждении механизма волнообразования.

*Поступила в редакцию  
9/II 1967*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Allen, J. M. Mapes, W. G. Wilson J. Appl. Phys., 1954, 25, 675.
2. Explosive Welding. Light Metal Age, 1962, 20, 3—4.
3. В. С. Седых, А. А. Дерибас и др. Сварочное производство, 1962, 5.
4. Pearson, Hayes. Machine Design, 1963, № 79270.
5. Абрахамсон. Прикладная механика (русский перевод), 1961, вып. 4.
6. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов и др. ФГВ, 1967, III, 2.
7. J. M. Walsh, R. Shreffler, F. S. Willig. J. Appl. Phys., 1953, 24, 349.
8. G. Cowan, A. Holtzman. J. Appl. Phys., 1963, 34, 4.
9. J. Rinehart. J. Appl. Phys., 1951, 22, 5.