

гремучей смеси, в отличие от НГ, заметить не удалось. Возможно, что предполагаемое увеличение скорости детонации в этом случае компенсируется ее уменьшением вследствие усиления диссоциации молекулы H_2O в детонационной волне, распространяющейся в нагретом газе. Во всяком случае полной аналогии между процессами в газовой смеси и в жидком НГ обнаружить пока не удалось. Тем не менее установленные факты могут оказаться полезными в дальнейших исследованиях природы детонации, распространяющейся с малой скоростью.

Поступила в редакцию
14/IX 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев, Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, 1960.
2. А. Я. Апин, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1947, 58, 2, 241.
3. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
4. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, Докл. АН СССР, 1960, 139, 1, 137.
5. M. F. Zimmer. Combustion and Flame, 1968, 12, 1, 1.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 4, 493.

УДК 662.215.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА СВАРКИ БИМЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

Л. С. Амелина, Ю. В. Гаек, А. Н. Свириденко
(Днепропетровск)

Соударение металлических образцов при сварке взрывом представляет интерес не только в смысле изучения механических взаимодействий и эффектов, исследовавшихся уже в ряде работ [1—4], но и с точки зрения анализа физико-химических процессов, протекающих в зоне соударения, и энергетических затрат на эти процессы.

В настоящей работе приводятся некоторые экспериментальные данные, характеризующие энергоемкость сварки взрывом меди с нержавеющей сталью. Эксперименты выполнены на трубчатых образцах.

Сварка взрывом биметаллических труб заключается в следующем. Две трубы сочленяются коаксиально между собой таким образом, что между ними остается равномерный по периметру кольцевой зазор. Затем при помощи взрыва производится раздача внутренней трубы или обжатие наружной [3]. Процесс вовлечения в движение точек раздаваемой или обжимаемой трубы распространяется в осевом направлении со скоростью детонации заряда взрывчатого вещества (в экспериментах порядка 3000 м/сек).

При этом происходит накатывание стенки трубы, подвергшейся действию взрыва, на стенку неподвижной трубы. Если раздача или обжатие трубы протекает с достаточной радиальной скоростью, то на границе соударения развиваются интенсивные пластические деформации, спо-

собствующие возникновению металлических связей между контактными поверхностями стенок труб. Этот процесс сопровождается оплавлением отдельных микрообъемов свариваемых металлов в зоне соударения (рис. 1).

Установлено, что граница сварки стали марки Х18Н10Т и меди МЗС может иметь волнообразный или почти прямолинейный вид, причем геометрия волн зависит от толщины плакирующего слоя меди и величины радиальной скорости раздачи. Анализируя результаты исследования микроструктуры границы сварки биметаллических образцов указанного сочетания, следует отметить, что граница сварки неоднородна по своему строению.

Так, наряду с деформированной структурой (см. рис. 1), на что указывают вытянутые зерна в направлении деформации, на границе сварки наблюдаются отдельные участки (фаза), имеющие сходство с эвтектикой, которые отличаются от свариваемых металлов структурой, микротвердостью, химическим составом и оконтурены четкими грани

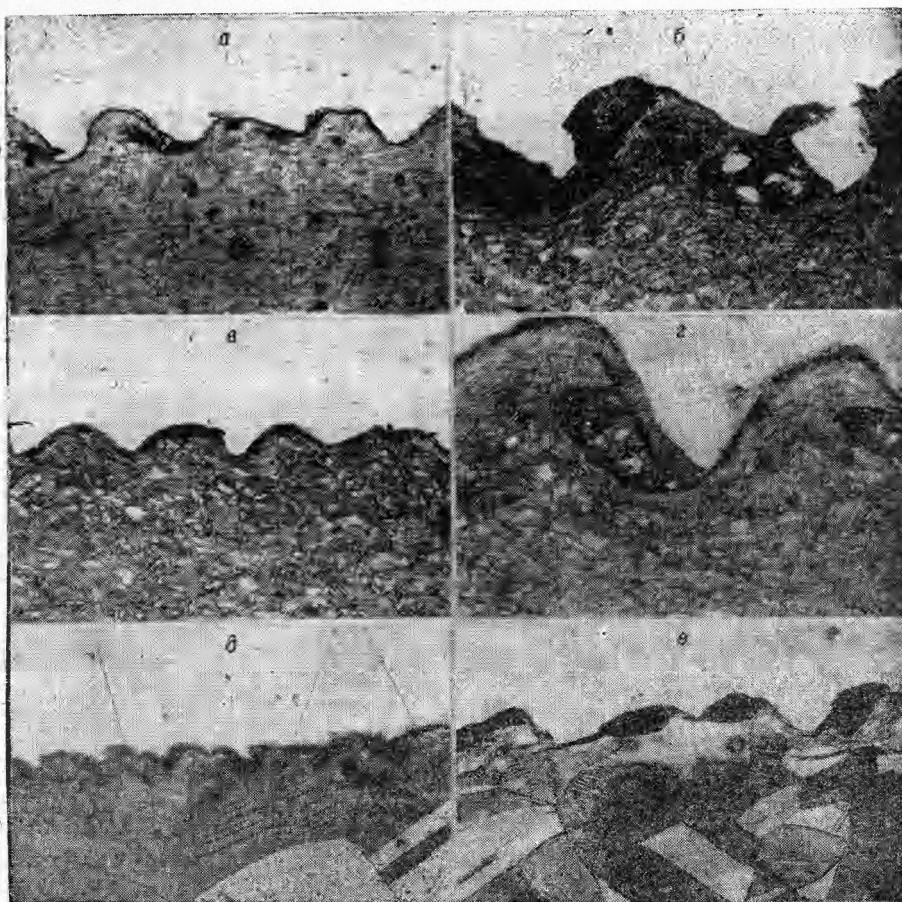


Рис. 1. Вид границы сварки биметаллических образцов стали Х18Н10Т и меди МЗС (δ — толщина медного слоя, мм; v_c — скорость соударения, м/сек; протравлена структура меди).

а) $\delta=1$, $v_c=360$; б) $\delta=1$, $v_c=780$; в) $\delta=1,5$, $v_c=340$; г) $\delta=1,5$, $v_c=570$; д) $\delta=3$, $v_c=160$; е) $\delta=6$, $v_c=280$.

цами раздела. Иногда в этих участках наблюдаются изолированные куски свариваемых металлов с рекристаллизованной мелкозернистой структурой. Следует отметить, что микротвердость фазы неодинакова в разных местах вдоль границы сварки (величина микротвердости колеблется в пределах 140—300 кг/см²), что свидетельствует, вероятно, о неоднородном химическом составе фазы.

Как показал качественный микрорентгеноспектральный анализ химического состава исследованных участков фазы, в них содержатся основные химические элементы свариваемых металлов: медь, железо, никель, хром.

На рис. 2 представлены кривые распределения импульсов рентгеновского излучения исследуемых элементов по толщине стенки биметалла в перпендикулярном к границе сварки направлении. Кривые распределения рентгеновских импульсов при переходе границ медь — фаза — сталь испытывают отчетливо выраженные скачки. В пределах фазы кривые характеризуются резкими колебаниями вокруг некоторой почти горизонтальной площадки. Такой вид кривых свидетельствует о том, что концентрация химических элементов в микрообъемах фазы испытывает флуктуации вокруг некоторого постоянного уровня.

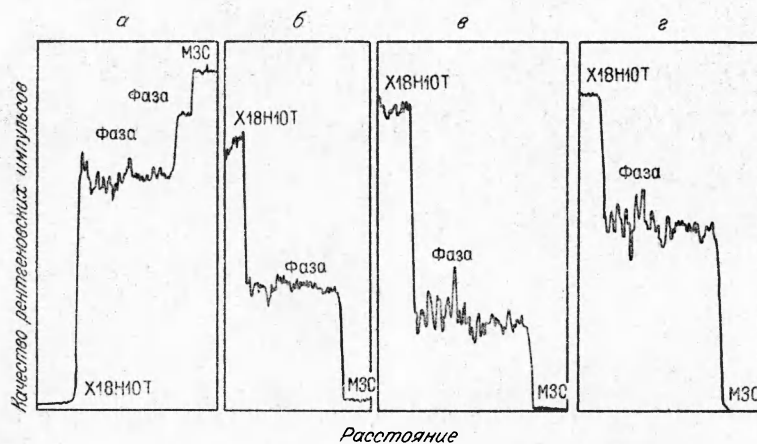


Рис. 2. Распределение рентгеновских импульсов исследуемых элементов на границе сварки и на некотором расстоянии от нее.
а) медь; б) никель; в) хром; г) железо.

Наличие четких границ раздела участков фазы, их строение, имеющее сходство с эвтектикой, наличие горизонтальной площадки на кривых распределения импульсов рентгеновского излучения, а также отдельных изолированных кусков свариваемых металлов в фазе, свидетельствуют о том, что образование фазы обусловлено совместным пластическим течением металлов и частичным оплавлением меди и стали в местах совместного пластического течения.

Опытами установлено, что не только геометрия волн, но и количество фазы существенно зависит от радиальной скорости раздачи и толщины стенки медной трубы. Специально выполненные измерения показали, что с увеличением радиальной скорости раздачи при неизменной толщине стенки количество фазы возрастает. Одновременно, при неизменной величине радиальной скорости метания стенки медной трубы, количество фазы увеличивается с увеличением толщины стенки (рис. 3). Количество фазы определялось измерением площади S , занимаемой се-

чением фазы в плоскости шлифа, перпендикулярной границе сварки, на базе 20 мм.

Увеличение скорости метания при уменьшении толщины метаемого слоя позволяет высказать предположение, что образование металлических связей по всей поверхности соударения характеризуется определенным количеством энергии, выделяющемся при торможении метаемого слоя. В самом деле, уменьшение величины v_{\min} при увеличении толщины метаемого слоя δ можно истолковать как тенденцию к сохранению кинетической энергии движущегося слоя.

Это предположение иллюстрируется следующими расчетами. Рассмотрим задачу водонаполненной трубы цилиндрическим зарядом ВВ (рис. 4). Вырежем бесконечно тонкий кольцевой слой из стенки трубы

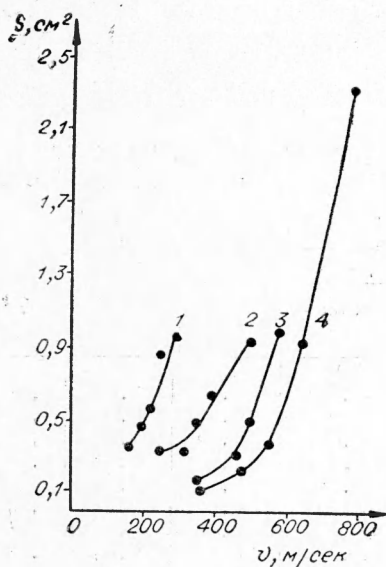


Рис. 3. Изменение количества фазы в зависимости от скорости соударения и толщины стенки меди. δ , мм: 1—6; 2—2; 3—1,5; 4—1.

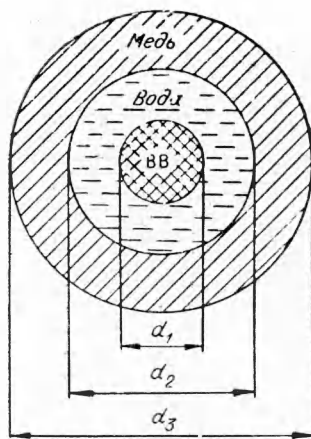


Рис. 4. Схема раздачи медной трубы взрывом.

или водной оболочки вокруг заряда ВВ. Если для этого слоя ввести обозначения: r — радиус; dr — толщина; ρ — плотность материала; v — скорость смещения, то кинетическая энергия этого кольцевого слоя, рассчитанная на единицу длины трубы, будет

$$dE = 2\pi r \rho \frac{v^2}{2} dr \quad (1)$$

Интегрируя это выражение в пределах изменения r , получим суммарную кинетическую энергию слоев воды и металла, рассчитанную на единицу длины трубы:

$$E = \int_{\frac{1}{2}d_2}^{\frac{1}{2}d_3} \pi r \rho_1 v^2 dr + \int_{\frac{1}{2}d_1}^{\frac{1}{2}d_2} \pi r \rho_2 v^2 dr, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности металла и воды соответственно; d_1, d_2, d_3 — диаметры соответственно заряда ВВ, внутренней и наружной поверхности стенки трубы.

Из экспериментов всякий раз было известно значение скорости v_1 на свободной поверхности трубы. Закон распределения скорости по нормальному сечению трубы для малых деформаций имеет вид

$$v = v_1 \frac{d_3}{2r}. \quad (3)$$

Интегрируя выражение (2) с учетом (3), получаем

$$E = \pi v_1^2 \frac{d_3^2}{4} \left(\rho_1 \ln \frac{d_3}{d_2} + \rho_2 \ln \frac{d_2}{d_1} \right). \quad (4)$$

Пусть цилиндрическая поверхность, по которой происходит соударение, имеет диаметр d , тогда можно найти выражение для удельной энергии соударения, рассчитанной на единицу площади, на основании (4)

$$E_1 = \frac{v_1^2 d_3^2}{4d} \left(\rho_1 \ln \frac{d_3}{d_2} + \rho_2 \ln \frac{d_2}{d_1} \right). \quad (5)$$

При помощи выражения (5) и данных, приведенных на графиках рис. 3, получена совокупность значений E_1 для различных сочетаний исходных параметров (см. таблицу).

Толщина слоя меди, см	d_3 , см	d_1 , см	d , см	$v \cdot 10^{-4}$, см/сек		S , см ²	E_1 , эрг/см ²
				экспери- мент	расчет		
0,1	3,0	1,8	4,0	5,7	4,7	0,5	$1,8 \cdot 10^9$
0,15	3,3	1,8	4,3	5,0	3,8	0,5	$2,0 \cdot 10^9$
0,2	3,8	1,9	4,9	3,6	3,19	0,5	$1,5 \cdot 10^9$
0,6	3,6	1,5	4,6	2,0	1,8	0,5	$1,0 \cdot 10^9$
0,1	3,0	1,9	4,0	6,0	5,1	0,7	$2,0 \cdot 10^9$
0,2	3,8	2,1	4,9	4,15	3,7	0,7	$1,9 \cdot 10^9$
0,6	3,6	1,9	4,6	2,3	2,3	0,7	$1,4 \cdot 10^9$
0,1	3,0	2,0	4,0	6,3	5,4	0,9	$2,1 \cdot 10^9$
0,15	3,3	2,4	4,3	5,6	5,4	0,9	$2,1 \cdot 10^9$
0,2	3,8	2,4	4,9	4,85	4,3	0,9	$2,4 \cdot 10^9$
0,6	3,6	2,2	4,6	2,65	2,7	0,9	$1,85 \cdot 10^9$

Расчет величины радиальной скорости соударения, приведенной в таблице, производился по формуле

$$v = \frac{D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\rho_{ВВ} \cdot d_1^2}{\rho_m (d_3^2 - d_2^2) + \rho_w (d_2^2 - d_1^2)}},$$

где $\rho_{ВВ}$, ρ_m , ρ_w — плотности ВВ, меди и воды соответственно;

d_1, d_2, d_3 — диаметр заряда ВВ, внутренний и наружный диаметры плакирующей трубы соответственно. Эта формула получена из предположения, что вся энергия продуктов взрыва расходуется на радиальную раздачу трубы и слоя воды.

Из таблицы видно, что E_1 является достаточно стабильной величиной, характеризующей образование биметаллического соединения сталь — медь. При этом имеют место следующие особенности. Средний уровень энергии E_1 незначительно возрастает с увеличением количества фазы в зоне соединения. Это вполне естественный факт, если учесть, что образование дополнительного количества фазы связано с энергетиче-

