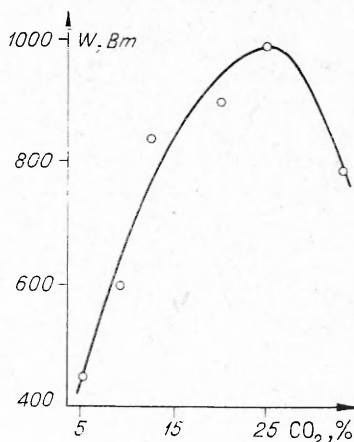


Рис. 6. Экспериментальные данные о зависимости мощности генерации от содержания CO_2 в инжестируемой смеси ($p_{\text{см}}=9$ атм, $T_0=1900$ К, $p_0=9$ атм, $l^*=2,5$ мм).



($W/G \sim 1$ Дж/г) объясняется тем, что при достигаемом здесь уровне показателя усиления $\alpha \approx i$ м⁻¹ резонатор работает не в оптимальном режиме: малая длина активной среды (12 см), недостаточно высокое качество покрытия зеркал резонатора и т. д.

Подводя итоги, отметим, что приведенные выше характеристики режимов генерации в ГДЛ со смещением в сверхзвуковом потоке (выходная мощность генерации ~ 1 кВт, с удельной энергией сжема 25 Дж/г при КПД резонатора порядка 25% и длине активной среды 12 см) свидетельствуют о высокой эффективности и перспективности ГДЛ с селективным тепловым возбуждением.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность С. А. Лосеву, В. К. Конюхову и Ю. А. Якоби за полезные обсуждения.

Институт теоретической и
прикладной механики
СО АН СССР, Новосибирск

Поступила в редакцию
7/V 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. E. T. Gerry. IEEE Spectrum, 1970, 7, 11, 51.
2. P. V. Avironis, D. R. Dean, R. Grotbeck. Appl. Phys. Lett., 1973, 23, 7, 375.
3. В. Н. Кардюшин, Р. И. Солоухин. ФГВ, 1972, 8, 2, 163.
4. Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов. ЖТФ, 1970, 40, 1, 173.
5. V. N. Groshko, R. I. Soloukhin, P. Wolanski. Opt. Com., 1972, 6, 3, 275.
6. В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1973, 211, 4, 829.
7. J. P. E. Taran, M. Charpenel, R. Borghi. AIAA-Paper, 1973, № 73—622.
8. В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин, Н. А. Фомин. ФГВ, 1974, 10, 4, 473.
9. V. N. Groshko, N. A. Fomin, R. I. Soloukhin. 5-th Int. Coll. on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems, (c3), 1975, Bourges.
10. T. A. Cool, I. A. Shirley, R. R. Stephens. Appl. Phys. Lett., 1970, 17, 7, 278.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА НАЧАЛО ПРОЦЕССА ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

М. П. Бондарь, А. А. Дерibas, В. И. Мали,
В. А. Симонов

В работах [1, 2] экспериментально установлено, что волнообразование возможно, когда скорость соударения превосходит некоторую критическую, характерную для каждого материала. Значение критической скорости в [2] находится из выражения для числа Рейнольдса, определенного как

$$\text{Re} = \frac{(\rho_v + \rho_n) v_k^2}{H_s + H_n}, \quad (1)$$

где ρ_v , ρ_n — плотности материалов верхней и нижней свариваемых пластин; H_v , H_n — твердости пластин, измеренные алмазной пирамидкой; величина Re найдена из эксперимента и равна 10,6. Как видно, в качестве характеристики сопротивления материала действию напряжений в зоне соударения в [2] используется твердость. Структурные особенности материалов в известных работах по волнообразованию не учитываются.

В настоящей работе показано, что на начало волнообразования большое влияние оказывает размер зерна. Исследование этого вопроса имеет большое теоретическое и практическое значение, особенно при сварке тех материалов, которые для получения необходимых прочностных свойств подвергаются высокотемпературной обработке. Изучение влияния размера зерна на начало процесса волнообразования проводилось на образцах из чистой меди и из внутреннеокисленных медных сплавов.

Материалы и методика эксперимента

Для исследования использовались пластины площадью 40×120 мм, имеющие толщину 4; 3; 2; 1 и 0,5 мм. Пластины готовились из меди и сплава $Cu + 0,2\% Be$, полученных в вакууме ($\sim 10^{-4}$ мм рт. ст.). Для обеспечения сильно текстурированной структуры некоторые слитки подвергались 400% обжатию при прокатке. Для создания разного размера зерен — d образцы отжигались в вакууме при температурах 300 и $1000^\circ C$ от 6 до 20 ч. В результате этой обработки d изменялся от 30 до 2500 мкм. Пластины конечной толщины сплава $Cu + 0,2\% Be$ после описанных видов обработки подвергались внутреннему окислению при $950^\circ C$ по методике [3]. После этого процесса на поверхности образцов, предварительно отожженных при $300^\circ C$, сохранялся малый d (~ 50 мкм), а начиная с глубины 50 мкм от поверхности d и в этих образцах превышал 1000 мкм.

На подготовленных к сварке пластинах измерялась микротвердость на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г и по микрошлифам определялся размер исходных зерен. Сварка взрывом проводилась по схеме несимметричного соударения. Параметры соударения изменялись в следующих пределах: $1740 \leq D \leq 3600$ м/с, $11 \leq \gamma \leq 22^\circ$, $800 \leq v_k \leq 3000$ м/с.

После сварки пары одинаково обработанных пластин заготовка разрезалась на две равные части вдоль ее длины, из концов и из середины отрезанной полосы вырезались образцы для шлифов, которые готовились по плоскостям разреза, перпендикулярным плоскости сварки. По шлифам определялся характер зоны соединения и параметры волн в случае их образования.

Изучение структуры микрошлифов образцов серии опытов на пластинах равной толщины, но с разным d , сваренных взрывом при одних и тех же γ и разных v_k , позволило обнаружить, что v_k , при которой происходит переход от гладкой зоны соединения к волновой, для образцов с разным d , разная. Так, для образцов меди с $d = 60$ мкм, сваренных при $\gamma = 16^\circ$, величина v_k , при которой наблюдался переход от гладкой зоны соединения к волновой, была равна 950 м/с. Это значение практически совпадает с критическими скоростями начала волнообразования, определенными в [1,2].

Для образцов с $d = 1000$ мкм при том же γ переход к волнообразной зоне соединения происходил при $v_k = 1400$ м/с, хотя значения микротвердости для этих образцов одинаковы и равны 50 кг/мм². Характер такой зависимости начала волнообразования для образцов с разным d от v_k выполняется и для внутреннеокисленной меди; для образцов с $d = 50$ мкм на поверхности переход к волновой зоне при

$\gamma=10^\circ$ происходит при $v_k=2200$ м/с, для образцов с $d=1000$ мкм и том же γ — при $v_k=2700$ м/с (микротвердость этих образцов равна 200 кг/мм²).

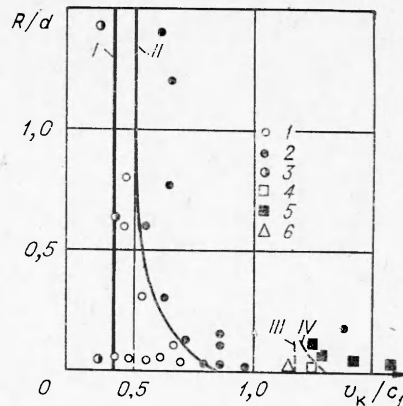
Для установления закономерности связи между величиной зерна и критической скоростью точки контакта при сварке взрывом, при которой происходит переход от гладкой зоны соединения к волновой, был использован графический метод представления результатов, приведенный на рисунке. График построен в координатах $R/d-v_k/c_t$, где R — характерный размер зоны высокого давления, определенный в [4] следующим образом:

$$R = \frac{4\delta}{\pi} \left(1 - \frac{v_1^2}{c_0^2} \right)^{1/2} \sin^2 \gamma/2,$$

где δ — толщина метаемой пластины; v_1 — скорость движения материала метаемой пластины в системе координат, связанной с точкой контакта; $c_0=3600$ м/с — скорость распространения упругих продольных волн в меди; $c_t=1860$ м/с — минимальное значение скорости упругих поперечных (сдвиговых) волн в меди. Выбор этих безразмерных координат для построения графика основывался на том, что для отражения картины процесса сварки необходимо сопоставить параметры материала и параметры соударения. Использование минимального значения скорости сдвиговых волн определялось тем, что начало волнообразования для чистой меди с любым размером зерен происходит при $v_k < c_t$. Зависимость начала волнообразования от скорости точки контакта одинакова как для сильно текстурированных, так и нетекстурированных образцов, т. е. на начало волнообразования не влияет характер кристаллографической плоскости. Кроме того, рассматривается нижняя граница сварки взрывом по величинам скоростей точки контакта, а следовательно, и по давлениям, развиваемым при соударении, при которых, вероятно, закономерности процессов близки к статическим (т. е. в первую очередь в деформацию включаются направления с минимальным модулем сдвига).

Приведенные на графике результаты экспериментов показывают, что для чистой меди нижняя граница сварки (*I*) соответствует прямой $v_k/c_t=0,4$, причем сварка вначале происходит с прямолинейной границей соединения. Переход к волнообразной границе соединения наблюдается при больших значениях величины v_k и изображен на графике кривой (*II*). Граница (*II*), разделяющая области гладкого и волнового соединения при $R/d > 1$, проходит по прямой $v_k/c_t=0,5$; с увеличением d , т. е. при уменьшении отношения R/d , соответствующие величины v_k/c_t увеличиваются. Для образцов из внутреннеокисленной меди картина начала сварки и перехода от гладкой зоны соединения к волновой аналогична (кривые *III*, *IV*).

Из рисунка видно, что величина интервала безволнового соединения с ростом d увеличивается; интервал для внутреннеокисленной меди значительно меньше, чем для чистой. Тонкие пластины ($h=0,5$ мм) из внутреннеокисленной меди при сварке в безволновом режиме соединяются некачественно. Если принять, что для сварки пластин



Экспериментальные результаты в координатах ($R/d, v_k/c_t$).

I — граница сварки для меди; *II* — граница волнообразования для меди; *III* — граница сварки для внутреннеокисленной меди; *IV* — граница волнообразования для внутреннеокисленной меди; *1* — медь, сварка; *2* — медь, волны, сварка; *3* — медь, сварки нет; *4* — внутреннеокисленная медь, сварка; *5* — внутреннеокисленная медь, волны, сварка; *6* — внутреннеокисленная медь, сварки нет.

необходимо пластическое смятие неровностей на контактирующих поверхностях и структурная подстройка атомов в области создавшегося контакта, то, вероятно, для обеспечения необходимой «гладкости» свариваемых поверхностей нужна оптимальная степень совместного пластического течения свариваемых пластин. Резерв течения будет тем больше, чем больше разность $\sigma_b - \sigma_t$ (σ_b — предел прочности при разрушении, σ_t — предел текучести). С увеличением этой разницы интервал безволнового соединения будет расти. Для чистой меди область безволнового соединения значительно больше, чем для внутреннеокисленных сплавов ($\sigma_t = 9$ кГ/мм², $\sigma_b = 22$ кГ/мм² — для меди, а для внутреннеокисленного сплава Cu+0,2%Be $\sigma_t = 34,2$ кГ/мм², $\sigma_b = 38,7$ кГ/мм²).

Начало возникновения волновой зоны соединения для образцов с $d \leq R$ не зависит от d , как видно на рисунке, для $R/d \geq 1$ линия начала волнообразования идет параллельно оси ординат. Необходимо подчеркнуть, что изменение R/d в проведенных экспериментах в основном определено разным размером зерен. Наблюдаемую при $R/d < 1$ зависимость начала волнообразования от d нельзя связать с тем, что для крупнозернистых материалов предел текучести меньше, чем для мелкозернистых, так как последнее в большей степени должно влиять на начало сварки, т. е. на положение линии I , и должно сместить ее в сторону меньших значений v_k/c_t .

Зависимость начала волнообразования от d может быть понята из условий деформации соударяющихся поверхностей.

При постоянном γ , рост v_k связан с увеличением давления в зоне R . Если $v_k \rightarrow c_t$, то уменьшается расстояние впереди точки контакта, на котором происходит деформация за счет релаксации напряжений на свободную поверхность. Это приводит к образованию бугра перед точкой контакта, т. е. к началу волнообразования. При уменьшении v_k это расстояние будет увеличиваться при меньшем уровне напряжений в зоне R , и условия развития волнообразования будут ухудшаться. При большой разнице ($c_t - v_k$) образование бугра возможно, если считать, что границы зерен являются существенным препятствием для развития скольжения в объеме образца. В этом случае время деформации поверхности при образовании волн можно определить как $t = v_k/d$, время распространения поперечной упругой волны через пластинку толщиной δ как $\tau = \delta/c_t$. Тогда условие волнообразования можно записать в виде

$$t < \tau. \quad (2)$$

Анализ результатов, полученных в работе, подтверждает правильность данных рассуждений. Кривая II на рисунке — граница перехода от гладкой зоны соединения к волновой — в интервалах $0 < R/d < 0,5$ и $0,5 < v_k/c_t < 1$ близка к гиперболе и может быть описана выражением

$$R/d = c_t/v_k. \quad (3)$$

Используя приближение $R = A\delta$, где $A = A(\gamma)$, уравнение (3) можно переписать в следующем виде: $A\delta/d = c_t/v_k$ или $A\delta/c_t = d/v_k$. Тогда область правее кривой 2, соответствующая волновой зоне соединения, может быть выражена как $A\delta/c_t > d/v_k$, что совпадает с принятым условием волнообразования (2).

Результаты, полученные в работе, имеют существенное значение для сварки взрывом пластин толщиной до нескольких миллиметров из жаропрочных материалов, имеющих, как правило, крупное зерно и высокий предел текучести. Плохое качество сварки крупнозернистых пластин с гладкой зоной соединения позволяет предположить, что при сварке материалов с большим пределом текучести и малым значением

$(\sigma_b - \sigma_t)$ пластическая деформация не достаточна для обеспечения связи, и только волнообразование, приводящее к развитию совместного течения, создает необходимую связь. При сварке толстых пластин величина зоны высокого давления возрастает, отношение R/d приближается к единице, и влиянием размера зерна можно пренебречь.

Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
18/VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972. с. 117.
2. G. R. Cowp, O. R. Bergmann, A. H. Holtzman. Met. Trans., 1971, 2, 11, 3145.
3. М. П. Бондарь. Физика металлов и металловедение, 1969, 27, 4, 650.
4. А. А. Дерибас. ФГВ, 1973, 9, 2, 268.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ОТ ДИАМЕТРА ЗАРЯДА

Л. Г. Болховитинов, С. Д. Викторов

Влияние диаметра заряда на скорость детонации объясняется тем, что при диаметрах заряда меньше предельного в результате прихода волн разгрузки от боковых поверхностей заряда происходит боковое расширение продуктов детонации до завершения химической реакции разложения исходного взрывчатого вещества.

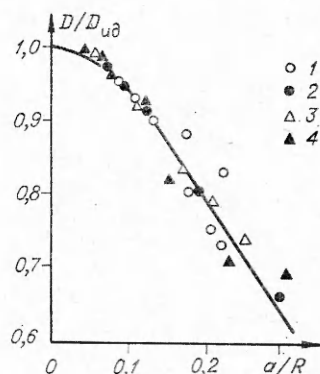
В работе [1] найдено, что опытные значения скорости неидеальной детонации ряда ВВ различной плотности могут быть описаны единой функциональной зависимостью

$$D/D_{ид} = f(a/R), \quad (1)$$

где $D_{ид}$ — скорость идеальной детонации, R — радиус заряда. Величина a — «эффективная зона реакции» — подбирается для каждого индивидуального ВВ, причем она сохраняет постоянное значение при изменении радиуса заряда.

Используя имеющиеся в литературе данные и собственные эксперименты, выясним, не является ли полученная в работе [1] зависимость (1) приемлемой и для других типов взрывчатых веществ. Вид этой зависимости показан на рисунке. Учитывая, что опытные значения скоростей детонации получены с некоторой ошибкой, для определения входящих в зависимость (1) $D_{ид}$ и a использовался метод наименьших квадратов.

В таблице приведены результаты вычислений для различных ВВ. В расчетах использовались имеющиеся в литературе опытные зависимости скорости детонации от величины диаметра заряда. В пятой колонке таблицы приведены отношения вычисленной ширины зоны химической реакции a в мм и критического диаметра $d_{кр}$ рассматриваемых составов.



Зависимость приведенной скорости детонации от приведенного обратного радиуса заряда.

1 — зерногранулит 80/20, $\rho_0 = 1$ г/см³; 2 — аммонит 6ЖВ, $\rho_0 = 1$ г/см³; 3 — аммонит ПЖВ-20, $\rho_0 = 1$ г/см³; 4 — скальный аммонит № 1, $\rho_0 = 0,95$ г/см³.