

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Войтенко, А. Ф. Демчук, Б. И. Куликов. ПТЭ, 1970, 1, 250.
2. А. Ф. Демчук. Канд. дис. ИГ СО АН СССР, 1971.
3. В. В. Болотин. Прикладная механика, 1972, 8, 4, 3.
4. В. В. Болотин. ПММ, 1963, 23, 2, 362.
5. W. E. Baker, F. I. Allen. Proceeding of the Third U. S. National Congress Applied Mechanics, ASME, 1958, p. 79.
6. А. Ф. Демчук.— В сб.: Второй международный симпозиум. Обработка металлов взрывом, Т. 2. Прага, 1974.
7. В. Е. Вэйкер, В. Ху, Т. Джексон. Тр. ASME, сер. E, Прикл. мех., 1966, 33, 4, 91.
8. И. К. Макайвор. Тр. Америк. об-ва инж.-мех., сер. E, Прикл. мех., т. 33, № 4, 1966.
9. W. E. Baker. J. of the Acoustical Society of America, 1961, 33, 12, 1749.
10. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ПМТФ, 1968, 6, 94.
11. С. И. Бодренко, Б. Л. Глушак и др. Тез. докл. Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976, с. 34.
12. J. Nětčesek, F. Nykl. Proceeding of the 2-nd International Symposium "Explosive Working of Metals", v. 2, Praha, 1974, p. 412.
13. А. А. Бузуков. ФГВ, 1976, 12, 4, 605.
14. Ф. Никл, Й. Немечек.— В сб.: Третий международный симпозиум «Обработка металлов взрывом», Т. 2. Мариански Лазни, 1976.
15. В. М. Корнев. Изв. АН СССР, МТТ, 1972, 2, 119.
16. В. В. Болотин. ПММ, 1960, 24, 5, 831.
17. В. И. Цыпкин, А. Г. Иванов и др. Атомная энергия, 1976, 41, 5, 303.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

А. М. Ханов, И. В. Яковлев
(Новосибирск)

Известно, что свойства волокнистых композиционных материалов (ВКМ) на металлической основе зависят главным образом от объемного содержания армирующих волокон [1] и от прочности связи на границе матрица — волокно [2]. Прочность же связи определяется физико-механическими свойствами материалов матрицы и волокна, а также геометрией распределения армирующих волокон в матрице [2].

Одним из способов получения волокнистых композиционных материалов является сварка металлов взрывом, преимущества которой перед другими способами отмечаются многими авторами [3—5]. В соответствии со схемами получения сваркой взрывом волокнистых композиционных материалов [2, 3] при чередовании слоев матрицы и волокна важны соотношения толщин матричных слоев и волокон, а также шага между волокнами. Очевидно, что при некотором шаге между волокнами соединение осуществляется не только по границе матрица — волокно, но и по границе матрица — матрица.

Специфической особенностью образования соединения волокнистого композиционного материала сваркой взрывом является взаимодействие при высокоскоростном соударении плоской матричной пластины и цилиндрического волокна, а в промежутках между волокнами — взаимодействие матричных слоев. Поэтому большой интерес представляет сам механизм образования соединения волокнистого композиционного материала в условиях сложного взаимодействия матричных слоев и волокна. Частично этот вопрос исследован в [6].

Цель работы — исследование механизма и условий образования соединения волокнистого композиционного материала с учетом некоторых физико-механических свойств волокна и матрицы, рационального

размещения волокна, а также начальных параметров соударения при сварке взрывом.

На рис. 1 представлена фотография микроструктуры границы соединения модельного волокнистого композиционного материала медная матрица — стальные волокна, полученного сваркой взрывом. Волокна однонаправленные, направление укладки волокон совпадает с направлением распространения фронта детонации в заряде взрывчатого вещества. На этом же рисунке представлены фотографии микроструктуры границы раздела матрица — матрица в направлении, перпендикулярном направлению расположения

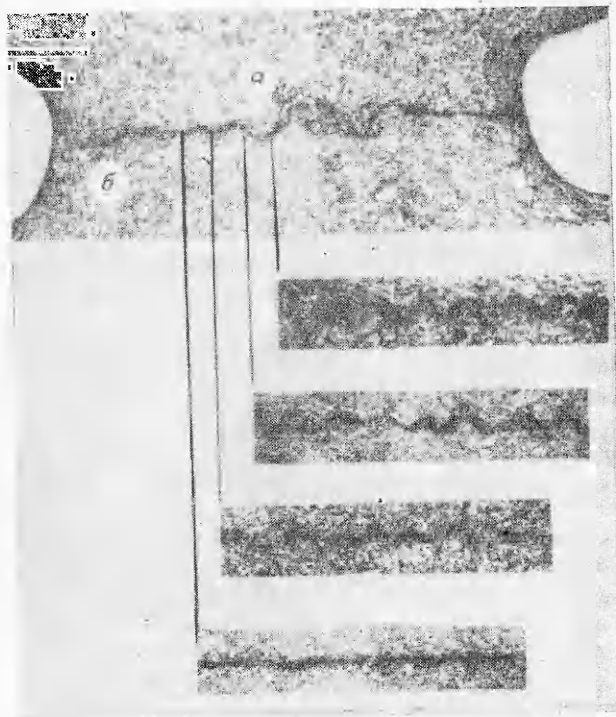


Рис. 1.

волокон. Анализируя эти фотографии, можно представить механизм взаимодействия метаемой матричной пластины с волокнами и неподвижной матричной пластиной. Схематически это выглядит так, как показано на рис. 2. Не нарушая общности, можно предположить, что в некотором положении армирующие волокна лежат на неподвижной пластине практически без зазора.

В начальный момент времени осуществляется соударение метаемой пластины и волокна с образованием зоны I, затем происходит соударение матричных слоев с образованием зоны II и взаимодействие волокна с неподвижной матричной пластиной с образованием зоны III. При металлографическом исследовании этих зон установлены следующие факты. Оказалось, что зона II состоит из двух участков. На первом участке (см. рис. 1, а) наблюдается характерная для сварки взрывом волнообразная граница раздела между матричными слоями в направлении, нормальном к направлению волокон. На втором участке (см. рис. 1, б), характерная волнообразная граница между матричными слоями наблюдается в направлении, практически перпендикулярном направлению волнообразования на первом участке.

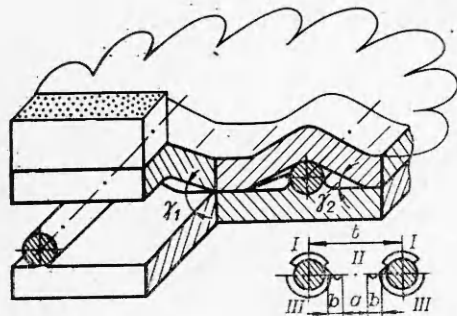


Рис. 2.

Эти факты могут быть объяснены при рассмотрении схемы, представленной на рис. 2. Метаемая пластина, пролетая между волокнами, соударяется с неподвижной пластиной и процесс наслаивания осуществляется в направлении распространения фронта детонации под постоянным углом соударения γ_1 . Далее происходит схлопывание полости между волокнами и матрич-

ными слоями в сторону волокон под увеличивающимся углом γ_2 .

Рассмотренный механизм является общим при образовании соединения в волокнистом композиционном материале, геометрические же размеры выделенных участков и зон зависят от взаимного расположения волокон, геометрических параметров волокон и матричных слоев, механических и физических свойств соединяемых материалов.

По результатам экспериментов установлено, что в зависимости от расстояния между волокнами или, иными словами, в зависимости от шага укладки волокна при одних и тех же начальных параметрах сварки для фиксированной композиции матрица — волокно изменяется только зона II. Так, при шаге укладки $t < 1,5d$ (d — диаметр волокна) для композиционных материалов медь — стальные волокна и алюминий — стальные волокна в зоне II матричные пластины не образуют между собой прочного соединения при таких начальных параметрах сварки взрывом, которые обеспечивают качественную сварку между матричными пластинами в случае их сварки без армирующих волокон. Увеличение в таких случаях скорости соударения приводит к появлению нежелательных для большинства пар металлов расплавов по границе матрица — волокно на участке b в зоне II, его размер зависит от шага укладки и при $t = 1,5 \div 2,5d$ находится в пределах $0,15—0,5d$.

Эти результаты позволяют ограничить область достижимых объемных содержаний волокон V_f при равных толщинах матричной пластины и волокна для установленного оптимального шага укладки волокон $t = 1,3 \div 1,5d$ величиной, равной $V_{f, \max} = 23 \div 27\%$. Таким образом, становится очевидным, что общепринятое варьирование начальными параметрами соударения для обеспечения прочного соединения во всех зонах границы раздела в волокнистом композиционном материале не даст положительных результатов, если не учитывается условие оптимального размещения армирующих волокон.

Если при сварке взрывом плоских листов обеспечение одинаковых условий соударения по всей поверхности контакта не представляет существенных трудностей, то в случае сварки волокнистого композиционного материала достижение одинаковых условий соударения на участках a , b в зоне II принципиально невозможно, так же как и для областей I и III. Это следует хотя бы из того, что в межволоконном пространстве (на участке a) происходит соударение матричных слоев под постоянным углом γ_1 , а на участке b зоны II соударение осуществляется под увеличивающимся углом γ_2 . Так, например, в модельном волокнистом композиционном материале медь — медные волокна в областях I и III отсутствует характерная для сварки взрывом волнообразная граница раздела, а в зоне II отмечается отчетливая волнообразная граница раздела. Отсутствие волн в зонах I и III объясняется разгрузкой волокон на свободные поверхности в окрестности точки контакта. Кроме этого, матричная пластина, соударяясь с волокном, движется в межволоконное пространство, обтекая при этом волокно в области I. А в зоне III волокно внедряется в нижнюю пластину. Вследствие такого отличия во взаимодействии волокна с метаемой и неподвижной матричными пластинами соотношение областей I и III должно быть неодинаково для различных сочетаний волокнистых композиционных материалов.

На рис. 3 приведены фотографии микроструктуры волокнистых композиционных материалов медь — стальные волокна и алюминий — молибденовые волокна. Начальные параметры соударения в обоих случаях одинаковы. Видно, что характер взаимодействия матричных слоев и волокна различен. В первой композиции (см. рис. 3, а) армирующие волокна внедрялись в нижнюю матричную пластину, а во второй (см. рис. 3, б) они практически целиком находятся в метаемой матричной пластине.



Рис. 3.

Проанализируем взаимодействие волокна и матричных пластин в условиях описанного выше механизма высокоскоростного соударения элементов волокнистого композиционного материала, учитывая относительные деформации материалов при динамическом сжатии, а также скорость полета матричной пластины, скорость точки контакта и угол соударения.

На рис. 4 представлена схема внедрения волокна в матричную пластину. При этом делаются следующие естественные предположения: волокно и пластина существенно отличаются по своим пластическим свойствам и волокно без зазора расположено на неподвижной матричной пластине. На рисунке v_k — скорость точки контакта, v — скорость полета метаемой пластины, v'_n и v''_n — составляющие скорости метаемой пластины и пластины с волокном соответственно, γ_1 — угол соударения, Δl_1 — перемещение волокна в результате упругой деформации неподвижной пластины и Δl_2 — перемещение волокна в результате пластической деформации неподвижной матричной пластины.

Считая, что пока точка контакта пройдет путь $AB = (d + \Delta l_1) \operatorname{ctg} \gamma_1$ со скоростью v_k , а волокно переместится на расстояние $\Delta l_1 + \Delta l_2$ со скоростью $1/2 \cdot v''_n$ (v''_n легко находится из закона сохранения количества движения), получим следующее соотношение:

$$\frac{(d + \Delta l_1) \operatorname{ctg} \gamma_1}{v_k} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{\frac{1}{2} v''_n \frac{m_M}{m_M + m_B} \cos \gamma_1}, \quad (1)$$

из которого легко выразить перемещение

$$\Delta l_2 = \frac{d + \Delta l_1}{\frac{m_M + m_B}{m_M} \cdot \frac{2v_k}{v''_n} \cdot \frac{\sin \gamma_1}{(1 - \sin^2 \gamma_1)}} - \Delta l_1, \quad (2)$$

где m_M — единичная масса матричной пластины; m_B — единичная масса волокна.

Воспользуемся выражением (2) для сравнения с результатами экспериментов на материалах медная матрица — стальные волокна и алюминиевая матрица — молибденовые волокна. Упругая деформация матричных пластин может быть определена из зависимости

$$\Delta l_1 = \varepsilon \delta_1,$$

где ε — относительная деформация при динамическом сжатии;

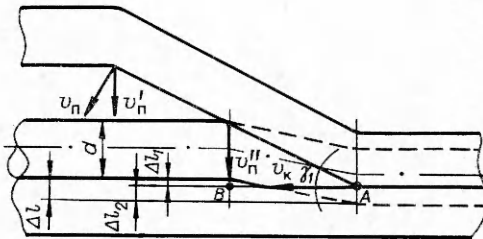


Рис. 4.

| d, мм | σ_1 , мм | $v_{\text{п}}$, м/с | $v_{\text{к}}$, км/с | Δl_2 , мм | |
|-------|-----------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| | | | | Расчет | Эксперимент |
| 1 | 1 | 0,583 | 2,5 | 0,32 | 0,32 |
| 2 | 2 | 0,792 | 3,4 | 0,59 | 0,6 |
| 3 | 3 | 0,863 | 3,7 | 0,9 | 0,9 |
| 4 | 4 | 0,910 | 3,9 | 1,2 | 1,30 |
| 5 | 5 | 0,980 | 4,2 | 1,52 | 1,60 |

δ_1 — толщина пластины. Согласно [7], для алюминия $\epsilon = 0,1$, для меди $\epsilon = 0,15$. В таблице приведены расчетные и экспериментальные значения величины Δl_2 для композиционного материала медная матрица — стальные волокна ($\gamma_1 = 8^\circ 24'$). Видно, что выражение (2) с достаточной точностью

позволяет определить величину проникания волокна в матрицу.

Выражение (2) допускает, чтобы величина Δl_2 была меньше или равна нулю. Физический смысл этого допущения: либо материал матрицы обладает высокой деформационной способностью, либо скорость соударения метаемого слоя настолько высока, что волокно не успевает внедриться в неподвижный матричный слой и обволакивается слоем метаемой пластины. Это справедливо для матрицы из алюминиевых сплавов. На рис. 3 представлен фрагмент волокнистого композиционного материала на основе алюминия, армированного молибденовыми волокнами, в котором армирующие волокна практически полностью находятся в метаемой пластине. Из (1) для конкретных материалов и параметров соударения может быть аналогичным образом найден предельный угол соударения γ_1 , при котором волокна полностью распределяются в метаемой матричной пластине.

Таким образом, рассмотренный механизм взаимодействия матричных слоев и волокна в волокнистом композиционном материале, получаемом сваркой взрывом, позволяет определить оптимальное объемное содержание армирующих волокон с выполнением условия прочной связи по границе матрица — матрица, а также прогнозировать местоположение волокон в зависимости от свойств материалов матрицы и волокна.

Поступила в редакцию
31/1 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Копьев, Л. М. Устинов. ФХОМ, 1972, 2.
2. В. А. Котов, В. С. Седых.— В сб.: Сварка взрывом и свойства соединений. Тр. ВПИ, вып. 2. Волгоград, Изд. Волгоградского политехн. ин-та, 1975.
3. C. V. Jarvis, P. M. B. Slate. Nature, 1968, 220, 5169.
4. E. Wolf. Zeitschrift für Wirtschaftliche Fertigung, 1974, 69, 2.
5. В. А. Анциферов, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1975, 11, 5.
6. P. M. Slate. ICCM, Proceedings of the 1975 International Conference of Composite Materials. Vol. 2. New York, 1976.
7. Л. П. Орленко. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., Машиностроение, 1964.

ДЕТОНАЦИЯ ПЛОСКИХ ЗАРЯДОВ АММОНИТА 6ЖВ

В. А. Симонов
(Новосибирск)

Необходимость исследования детонации плоских зарядов ВВ обусловлена проблемами взрывной обработки металлов и связана с определением параметров движения метаемых такими зарядами относительно тонких металлургических элементов: пластин, листов труб или деталей, имеющих поверхности более сложной геометрии. Важнейшим параметром, определяющим процессы взрывной обработки материалов, является скорость детонации заряда $D[1, 2]$. Вместе с тем для порошкооб-