

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ОРТОГОНАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА НАСЛАИВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

А. М. Ханов, И. В. Яковлев

(Новосибирск)

Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей можно получить методом сварки металлов взрывом при произвольной ориентации упрочняющих волокон по отношению к направлению фронта наплавления и фронта детонации в заряде ВВ, используемого для металла матричного слоя [1—4].

При движении фронта детонации в направлении укладки волокон определяются оптимальные параметры соударения для получения соединения с максимальной прочностью [3, 4]. Но в таких случаях, как окружное армирование оболочек, получение композиционных материалов с хрупкой армирующей фазой, исключение потери устойчивости волокон, осуществляется режим соударения матричных слоев и армирующего во-

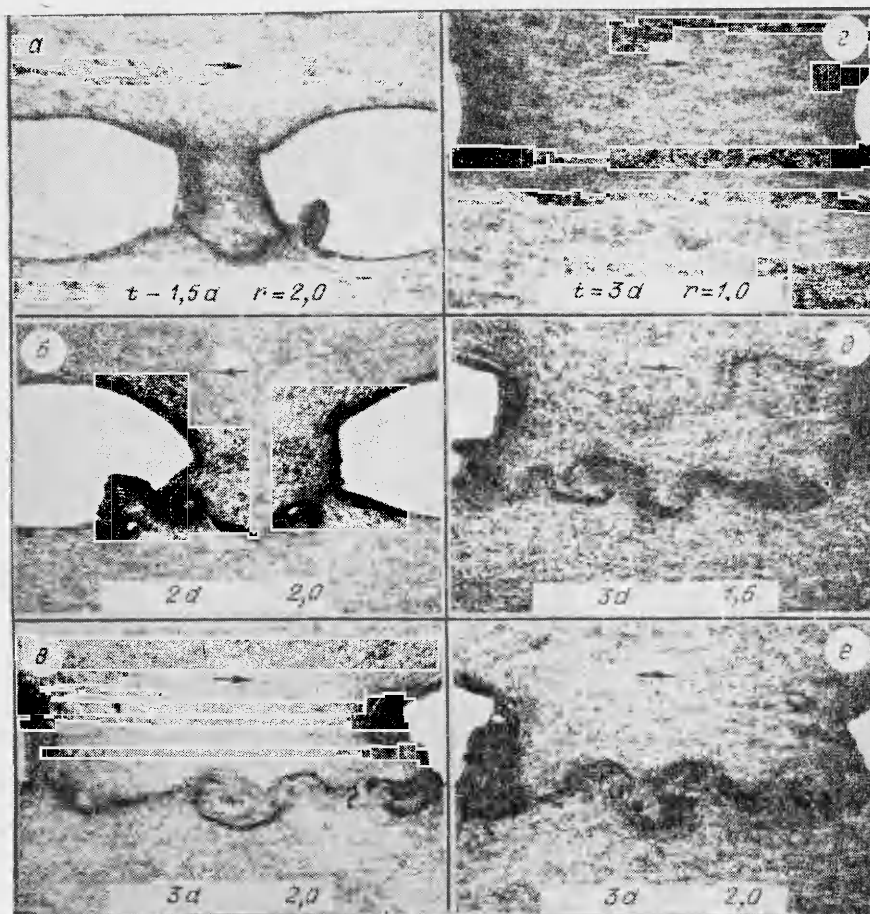


Рис. 1.

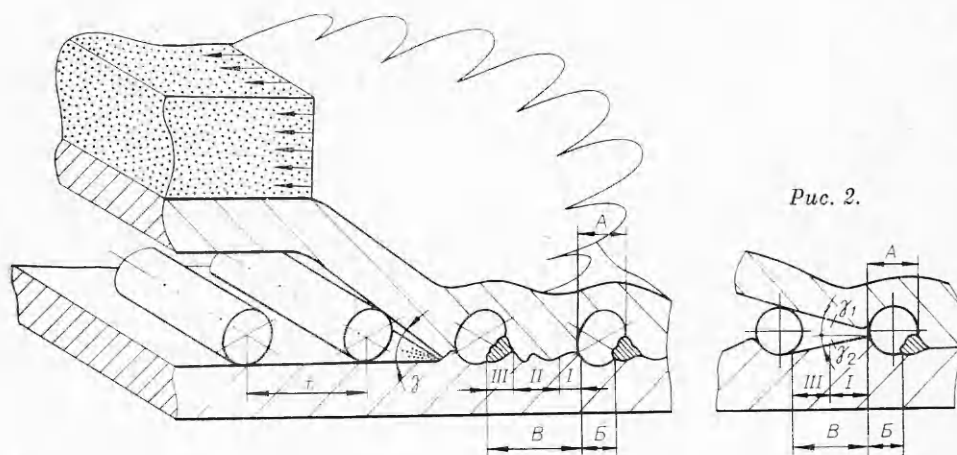


Рис. 2.

локна в направлении перпендикулярном направлению расположения волокон.

В работе [4] рассмотрен механизм образования соединения волокнистого композиционного материала при распространении фронта наплаивания метаемой матричной пластины вдоль направления укладки волокон. Вместе с этим большой интерес представляет механизм образования соединения волокнистого композиционного материала при движении фронта наплаивания матричной пластины в направлении, перпендикулярном направлению расположения волокон.

Цель работы — исследование механизма взаимодействия матричных пластин и волокна, определение условий оптимального размещения армирующих волокон и оценка влияния физико-механических свойств волокон и матрицы на общий характер границы соединения в волокнистом композиционном материале, полученном в условиях неонаправленного распространения фронта наплаивания по отношению к направлению ориентации армирующих волокон. Экспериментальные исследования проводились на модельных материалах, позволяющих оценить в общих чертах взаимодействие матрицы и волокна. В качестве таких материалов выбраны медная матрица — стальные волокна и алюминиевая матрица — стальные и молибденовые волокна.

На рис. 1 представлены фотографии микроструктур границы соединения волокнистого композиционного материала на основе меди, армированной стальными волокнами. Волокна однонаправленные, направление укладки волокон ортогонально направлению распространения фронта детонации в заряде взрывчатого вещества, т. е. направлению наплаивания матричной пластины, волокна практически без зазора уложены на неподвижной матричной пластине. Толщина матричной пластины δ и диаметр волокна d равны. Стрелкой обозначено направление детонации, t — шаг укладки волокон, r — отношение массы VB к массе метаемой пластины.

Анализируя рис. 1, можно представить механизм взаимодействия матричных пластин с волокнами так, как это показано на рис. 2. На первом этапе осуществляется соударение метаемой матричной пластины и волокна с образованием зоны A , с некоторым отставанием по времени происходит взаимодействие волокна с неподвижной матричной пластиной с образованием зоны B , затем следует соударение матричных слоев с образованием зоны B .

В зависимости от шага укладки волокон характер и величина зоны B могут меняться, но в общем случае металлографические исследования всех зон позволили установить некоторые качественные закономерности. Оказалось, что зона B состоит из трех участков. На участке I (см. рис. 2) происходит образование бугра из-за выдавливания волокном материала

матрицы в сторону свободной поверхности при взаимодействии волокна с матрицей в зоне *Б*. На участке *II* наблюдается характерная волнообразная граница между матричными слоями. На участке *III* зафиксировано образование пор и проникновение материала матрицы в волокно. Параметры бугра, образующегося на участке *I*, зависят от угла соударения и физико-механических свойств материала волокна и матрицы.

Образовавшийся бугор в свою очередь оказывает существенное влияние на характер границы матрица — матрица. Известно [5], что волнообразование между свариваемыми пластинами может инициироваться возмущением поверхности одной из свариваемых пластин. Таким возмущением, в частности, может быть препятствие. Если его размеры соизмеримы с амплитудой волны, то волнообразование начинается сразу после препятствия либо на некотором расстоянии l_0 от препятствия, если размеры препятствия несоизмеримы с амплитудой ожидаемой волны при волнообразовании. Величина l_0 определяется, согласно [5], как

$$l_0 = \frac{2\delta_1 v_k}{\sqrt{c^2 - v_k^2}}, \quad (1)$$

где δ_1 — толщина метаемой пластины; v_k — скорость точки контакта; c — продольная скорость звука.

Многочисленными экспериментами показано, что оптимальное качество соединения при волнообразной границе сварки достигается в случае ламинарного течения металлов в процессе волнообразования. Таким образом, для образования подобной волновой границы раздела в зоне *Б*, по-видимому, необходимо выполнение одного из следующих условий: расстояние между волокнами $t \geq d + l_0$ либо высота бугра на участке *I* соизмерима с амплитудой ожидаемой волны. Образование пор и пустот на участке *III* (см. рис. 2) можно объяснить сжатием воздуха в замкнутом объеме и облаком дисперсных частиц, воздействующих на волокно с возникновением каверн и раковин на поверхности волокна.

Проникновение материала матрицы в волокно на участке *III* объясняется следующим образом. При определенном шаге укладки волокон участок *II* отсутствует, а искривление поверхностей метаемой и неподвижной пластин после внедрения волокна создает дополнительный угол соударения. На рис. 2 γ_1 — суммарный угол поворота метаемой пластины под фронтом детонации и угол, возникающий из-за искривления поверхности метаемой пластины; γ_2 — угол, возникающий за счет искривления неподвижной матричной пластины; $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ — полный угол соударения. Может оказаться, что γ будет больше критического угла струеобразования $\gamma_{кр}$, который в соответствии с работой [6] определяется формулой

$$\sin(\gamma_{кр}/2) \geq (\sqrt{1 + 4Re} - 1)/2Re, \quad (2)$$

где $Re = 2\delta_1 \delta_2 v_k / \nu (\delta_1 + \delta_2)$ — число Рейнольдса; ν — кинематический коэффициент вязкости.

Таким образом, в процессе соударения матричных слоев возможно появление условий для возникновения кумулятивной струи, которая и проникает в волокно, образуя при этом оплавленную зону.

Рассмотренная картина взаимодействия матрицы и волокна при образовании соединения в волокнистом композиционном материале при поперечном армировании является общей, а размеры и характер выделенных зон во многом зависят от параметров укладки волокон, свойств соединяемых материалов и параметров соударения. Так, на формирование зоны *Б* большое влияние оказывает шаг укладки армирующих волокон. Экспериментально установлено, что при шаге укладки $t = 1,5d$, $t = 2d$ и $r = 1,5$ для композиционных материалов медь — стальные волокна и титан — молибденовые волокна участок *II* отсутствует. При этом $\gamma \approx 60^\circ$,

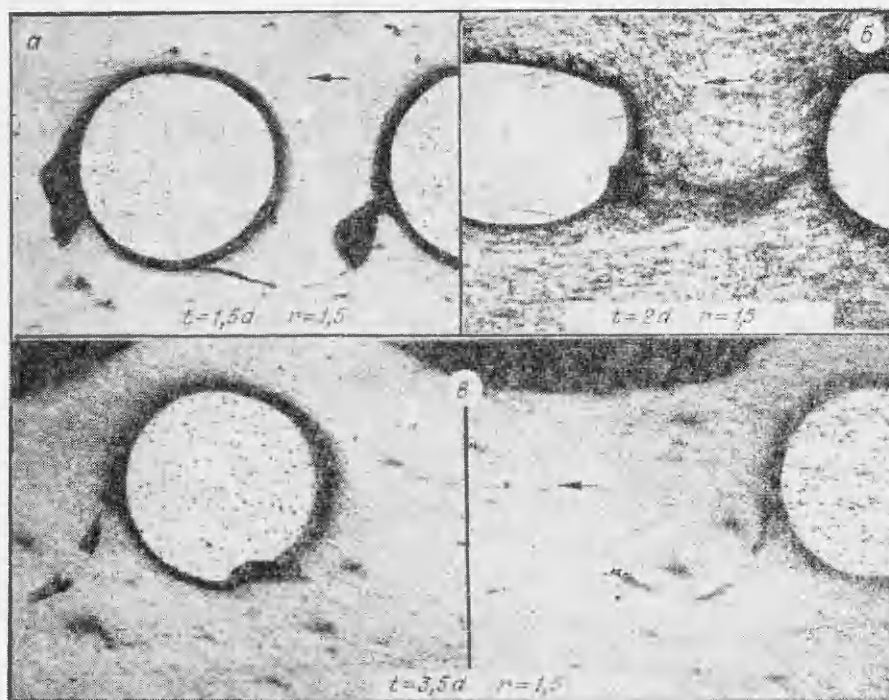


Рис. 3.

что превосходит для этих материалов величину $\gamma_{кр}$, определяемую из выражения (2), и на микроструктуре границы соединения наблюдается кумулятивная струя, проникающая в волокно.

При $t = 3d$ образующийся за волокном бугор соизмерим с амплитудой волн и на участке II (см. рис. 2) граница соединения волнообразная, на участке III фиксируется пористость вдоль границы соединения. При этом же шаге укладки и $r = 1$ измеренное расстояние до начала волнообразования составляет $1,33d$ от бугра, а расчет по зависимости (1) дает $l_0 = 1,37d$. Дальнейшее увеличение r приводит к тому, что волнообразование начинается сразу после бугра. Эти результаты позволяют ограничить область достижимых объемных содержаний волокна V_f при равных толщинах матричной пластины и волокна для установленного оптимального шага $t = 2 \div 3d$ величиной $V_{f \max} \leq 20 \div 25\%$.

Из многих работ, касающихся получения волокнистых композиционных материалов различными способами и в первую очередь для материалов, у которых отсутствует взаимодействие на межфазовой границе, прочность связи в значительной мере определяется связью матричных слоев, иными словами, наличием или отсутствием пор и несплошностей на границе соединения.

На рис. 3 приведены фотографии микроструктур волокнистых композиционных материалов медь — стальные волокна и алюминий — стальные волокна. Начальные параметры соударения в обоих случаях были одинаковы, однако видно, что характер взаимодействия матричных слоев и волокна различен. В композиции медь — стальные волокна армирующие волокна внедрились в нижнюю матричную пластину с образованием пор, а в композиции алюминий — стальные волокна армирующие волокна практически целиком находятся в метаемой матричной пластине и на участке III поры отсутствуют.

Рассмотрим, как и в работе [4], поведение волокна и матричных пластин в условиях описанного выше механизма взаимодействия элементов

волокнистого композиционного материала, учитывая относительные деформации материалов при динамическом сжатии, а также параметры соударения, но с позиций определения условий, влияющих на формирование структуры границы соединения на участке III.

На рис. 4 представлена схема взаимодействия волокна и матричных пластин при поперечном армировании. Схема рассматривается в предположении, что волокно и матричная пластина обладают существенно разными пластическими свойствами и волокно без зазора расположено на неподвижной матричной пластине. Считая, что за время, пока точка контакта пройдет путь ab со скоростью v_k , волокно переместится на расстояние $\Delta l_1 + \Delta l_2$ со средней скоростью $1/2 v_{\Pi}''$ (v_{Π}'' — находится из закона сохранения количества движения), можно получить следующее соотношение:

$$\frac{d}{2 \operatorname{tg}(\gamma/2) v_k} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{1/2 \frac{m_M}{m_M + m_B} \cos^2(\gamma/2) v_{\Pi}}, \quad (3)$$

из которого легко выразить величину Δl_2

$$\Delta l_2 = \frac{d}{\frac{4v_k}{v_{\Pi}} \cdot \frac{m_M + m_B}{m_M} \cdot \frac{\sin(\gamma/2)}{\cos^3(\gamma/2)}} - \Delta l_1, \quad (4)$$

где v_{Π} — скорость полета метаемой пластины; v_{Π}' , v_{Π}'' — составляющие скорости метаемой пластины и пластины с волокном соответственно; Δl_1 , Δl_2 — перемещение волокна в результате упругой и пластической деформации неподвижной пластины соответственно; m_M , m_B — массы матрицы и волокна в единице объема.

Анализ выражения (4) позволяет определить структуру на участке III границы соединения (см. рис. 2). Физический смысл изменения величины Δl_2 заключается в том, что при определенных соотношениях физико-механических характеристик волокна и матрицы, а также параметров соударения волокно либо внедряется в неподвижную пластину, либо не успевает внедриться в течение процесса соударения. А это в свою очередь, определяет наличие или отсутствие пор на участке III. Если волокно внедряется в неподвижную пластину ($\Delta l_2 > 0$), то возникают условия для образования кумулятивной струи, и на этом же участке наблюдается пористая структура границы соединения и деформированное проникающей струей волокно, а если волокно не успевает внедриться в матричную пластину ($\Delta l_2 \leq 0$), то пористость практически отсутствует. Вообще говоря, не только кумулятивная струя определяет пористую структуру границы соединения, а, как сказано выше, сжатие воздуха и облако дисперсных частиц в замкнутом объеме. И все же кумулятивная струя деформирует волокно, проникая в него, и создает значительно больше дефектов в структуре границы соединения.

Пользуясь выражением (4), можно прогнозировать образование пористости на участке III на материалах медная матрица — стальные волокна и алюминиевая матрица — стальные волокна. Упругую деформацию матричных пластин можно определить из зависимости

$$\Delta l_1 = \epsilon \delta_1,$$

где ϵ — относительная деформация при динамическом сжатии. Согласно

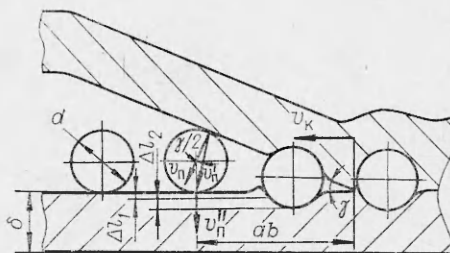


Рис. 4.

[7], для алюминия $\varepsilon = 0,1$, для меди $\varepsilon = 0,15$. Если для меди при $\delta_1 = d = 1$ мм и $r = 1; 1,5; 2$ расчет по (4) дает $\Delta l_2 = 0,074; 0,065; 0,045$ соответственно, то это предполагает наличие пористого участка, что подтверждается экспериментами (см. рис. 1 и 3). Для алюминия при $\delta_1 = d = 1$ мм и $r = 1,5$ расчет дает $\Delta l_2 = -0,003$, что означает отсутствие пористого участка (см. рис. 3, в). Из выражения (3) для конкретных сочетаний материалов и параметров соударения находится предельный угол соударения, при котором исключается появление пористого участка.

Таким образом, рассмотренный механизм взаимодействия матричных слоев и волокна в волокнистом композиционном материале, полученном сваркой взрывом при поперечном армировании, позволяет определить оптимальное объемное содержание армирующих волокон для получения максимальной прочности, а также прогнозировать образование пор на границе соединения в зависимости от свойств волокна, матрицы и параметров соударения.

Поступила в редакцию
13 / XII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. C. V. Jarvis, P. M. B. Slate. Nature, 1968, 220, 5169.
2. В. И. Беляев и др. Высокоскоростная обработка металлов. Минск, Наука и техника, 1976.
3. В. А. Котов, В. С. Седых.— В сб.: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Труды ВПИ, Волгоград, 1975.
4. А. М. Ханов, И. В. Яковлев. ФГВ, 1979, 15, 6.
5. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварка взрывом. Новосибирск, Наука, 1972.
6. С. К. Годунов, А. А. Дерибас. Докл. АН. 1972, 202, 2.
7. Л. П. Орленко. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., Машиностроение, 1974.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА СТЕНКУ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ

С. А. Ждан

(Новосибирск)

Разработка и совершенствование конструкций взрывных камер непосредственно связаны с умением рассчитывать на прочность оболочки камер при динамических нагрузках.

Задачу о взаимодействии оболочки с ударной волной (УВ) и продуктами детонации, как указывалось в [1], можно разделить на две независимые задачи:

1) определение взрывной нагрузки, действующей на стенку камеры, в предположении, что стенка абсолютно жесткая;

2) определение напряженно-деформированного состояния в оболочке, подвергшейся динамическим нагрузкам.

При решении второй задачи в различных постановках [1—4] предполагалось, что взрывная нагрузка $p_c(t)$ на стенку линейно убывает со временем

$$p_c(t) = \begin{cases} \Delta p_{отр}(1 - t/t_*), & 0 \leq t \leq t_*, \\ 0 & t > t_*, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время; t_* — время действия нагрузки; $\Delta p_{отр}$ — давление в отраженной волне.