

стик процесса манганиповыми датчиками указывалось в [3], где в начальной фазе сигнала $p(t)$ наблюдались заметные осцилляции. По этой причине, учитывая, что при вычислении \dot{P} используется операция дифференцирования данных, анализ погрешностей, вносимых датчиками, представляется сложной задачей.

Из расчетных данных следует, что максимальные скорости изменения основных параметров инициирующей волны в ТГ 50/50 реализуются при скорости УВ D^* , заметно отличающейся от стационарной. Параметры потока за фронтом УВ таковы, что становится возможным гомогенное разложение ВВ. С целью исследования характера взаимодействия очагового и гомогенного механизмов представляет интерес экспериментальное изучение квазистационарной (при $D \geq D^*$) зоны переходной области. Однако при использовании манганиповых или электромагнитных датчиков подобное исследование может быть затруднено как из-за конечного времени разрешения передних фронтов, так и возможным влиянием самого датчика на исследуемый процесс.

*Поступила в редакцию 20/XI 1984,
после доработки — 5/II 1985*

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Каупервайт, Дж. Розенберг.— В кн.: Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.
2. В. С. Трофимов.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1978.
3. С. А. Бордзиловский, В. Ф. Лобанов, С. М. Караханов. ФГВ, 1983, 19, 4, 136.
4. В. Ф. Лобанов. ФГВ, 1980, 16, 6, 113.
5. В. Ф. Лобанов, С. М. Караханов, С. А. Бордзиловский. ФГВ, 1982, 18, 3, 90.
6. M. Van Thiel. Compendium of Shock Wave Data, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, UCRL.— 50108. V. 3. 1977.
7. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
8. M. Cowperthwaite. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. М. Ханов, И. В. Яковлев

(Новосибирск)

В работах [1, 2] рассмотрены механизмы и условия образования соединения волокнистых композиционных материалов (ВКМ) при сварке взрывом при различной ориентации армирующих волокон по отношению к направлению распространения фронта детонации. Там же получены соотношения для определения оптимального объемного содержания армирующих волокон, необходимые для обеспечения максимальной прочности по границе соединения.

Высокая прочность соединения волокна и матрицы не может быть обеспечена чисто механическим контактом, а для образования физического контакта между волокном и матрицей требуется их взаимодействие на межфазной границе [3]. Для материалов, не образующих при взаимодействии хрупких химических соединений, это условие есть схватывание волокна с матрицей в результате ее оплавления.

Принятое в литературе представление области сварки взрывом в плоскости (угол соударения γ , скорость точки контакта v_k) в виде верхней и нижней границ сварки дает возможность рассматривать верхнюю границу как границу, выше которой при всех γ и v_k будет иметь место оплавление по линии соединения. Таким образом, построение верхней границы области сварки взрывом для линий соединения волокно — матрица позволит определить пределы изменения параметров соударения, гарантирующие оплавление, а условие оплавления по линии соединения может

рассматриваться как достаточное для создания физического контакта между волокном и матрицей. Иллюстрацией этого факта могут быть исследования [4, 5], где установлена связь прочности соединения волокон с матрицей с наличием расплавленного слоя матрицы. В частности, в работе [4] определено условие образования прочного соединения волокна с матрицей в виде

$$t_x \leq t \leq t_p, \quad (1)$$

где t , t_x , t_p — времена контактирования волокна с расплавом матрицы, в течение которого образуется их прочное соединение, контактирования поверхности волокна с матрицей, необходимое для протекания между ними химического взаимодействия, и задержки образования интерметаллида. При этом экстремальные размеры расплава матрицы, удовлетворяющие условию (1), определяются как

$$h_{\max}^{\min} = 2,15 \sqrt{at_{x,p}}, \quad (2)$$

h^{\min} — минимальная толщина расплава матрицы, находящейся в контакте с волокном, соответствующая времени t_x ; h_{\max} — максимально допустимая толщина расплава матрицы, соответствующая t_p .

Применять условие (1) к оценке влияния параметров сварки взрывом на прочность соединения волокна с матричными пластинами трудно по ряду причин. Во-первых, не у всех сочетаний волокно — матрица при их взаимодействии образуются интерметаллидные соединения. Во-вторых, отсутствуют какие-либо данные по определению значений t_x и t_p для конкретных пар металлов в условиях сварки взрывом.

Поэтому, исходя из того, что наибольшую прочность соединения волокна с матричными пластинами можно получить при наличии на межфазной границе оплавленных участков материала матрицы, оценка параметров сварки взрывом должна следовать из условия, что время существования на границах раздела матрица — матрица и волокно — матрица положительных давлений t_1 (время сварки) больше времени застывания расплавов t_2 , т. е.

$$t_1 \geq t_2. \quad (3)$$

Таким образом, для волокнистого композиционного материала, получаемого сваркой взрывом, должны быть одновременно обеспечены условия оплавления на межфазной границе и сохранения соединения после прихода волны разгрузки на границу.

Время существования в зоне соединения положительных давлений, т. е. время прихода растягивающих напряжений может быть определено, согласно [6], из зависимости

$$t_1 = \xi \delta_1 / v_k. \quad (4)$$

Здесь δ_1 — толщина метаемой матричной пластины; ξ — отношение расстояния от точки контакта до точки прихода растягивающих напряжений к толщине метаемой пластины. Известно [6], что $\xi = 1 \div 2$ для $v_k = 2,5 \div 5$ км/с. Для ВКМ выражение (4) имеет вид

$$t_1 = \xi \frac{n \delta_1}{v_k}$$

(n — номер свариваемого слоя).

Время t_2 можно определить, решая уравнение теплопроводности [7]:

$$t_2 = \frac{Q_1^2}{4\pi c_1^2 \rho_1^2 a_1 (T_1 - T_0)^2}, \quad (5)$$

где ρ_1 — плотность; c_1 — теплоемкость; a_1 — температуропроводность; Q_1 — тепло, выделенное на границе соединения матрица — матрица; T_1 и T_0 — температуры плавления материала матрицы и начальная соответственно.

Время застывания расплавов на границе матрица — матрица

$$t_2' = \frac{Q_1^2}{4\lambda\kappa_1(T_1 - T_0)^2\rho_1c_1} \quad (6)$$

(κ_1 — теплопроводность), а время застывания расплавов на границе волокно — матрица [7]

$$t_2'' = \frac{Q_2^2}{\pi a_2 \left(\frac{\kappa_1}{a_1} + \frac{\kappa_2}{a_2} \right)^2 (T_1 - T_0)^2} \quad (7)$$

(Q_2 — тепло, выделенное на границе матрица — волокно; T_1 — температура плавления более легкоплавкого материала) или

$$t_2'' = \frac{Q_2^2}{\pi\kappa_2 \frac{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)^2}{\rho_2c_2} (T_{пл} - T_0)^2} \quad (8)$$

Количество тепла Q_1 , выделяющегося в очень узкой зоне соединения матричных пластин, определяется частью энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию околошовной зоны. Хотя величина Q_1 незначительна в сравнении с энергией метаемой пластины (порядка 3—5% [8]), температура, возникающая в результате выделения этого количества тепла, может превысить температуру плавления свариваемых материалов. Кроме того, происходит выделение тепла по всей глубине свариваемых материалов, на что расходуется около половины кинетической энергии метаемой пластины, но при этом повышение температуры сваренных образцов не превосходит 400 К [6].

Приближенную зависимость величины Q_1 от параметров соударения, согласно [6], можно представить в виде

$$Q_1 = k \frac{\pi}{4} \left(\sqrt{1 - \frac{v_k^2}{c_l^2}} \right) \rho_1 v_k^2 \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \sin^2 \frac{\gamma}{2}, \quad (9)$$

где $k = 6,8 \cdot 10^{-2}$ — эмпирический коэффициент; c_l — скорость звука в материале матрицы.

Исходя из изложенного выше и учитывая, что при сварке ВКМ толщина метаемой пластины равна $n\delta_1$, получим

$$Q_1 = k\rho_1 v_k^2 \delta_1 \sin^2 \frac{\gamma_n}{2}. \quad (10)$$

Здесь γ_n — угол соударения в n -м слое. Из [1, 2] следует, что на границе волокно — матрица есть условия, ведущие к появлению локальных зон, в которых происходит адиабатическое сжатие воздуха. Наличие в этих зонах расплавленного металла позволяет предположить, что температура адиабатически сжатого воздуха T_v способствует расплавлению наиболее легкоплавкого составляющего ВКМ (обычно это материал матрицы), нагреваемого, кроме того, до 400 К в результате пластической деформации свариваемых пластин.

При таком подходе, зная T_v , можно оценить количество тепла, дополнительно выделяющегося на границе волокно — матрица:

$$Q_2 = 2c_1\rho_1\sqrt{\lambda a_1 t_k} T_v, \quad (11)$$

где t_k — время контактирования матрицы и волокна с областью адиабатически сжатого воздуха. Величина T_v находится из уравнения $T_v = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ при $p \sim 10 \div 100$ кбар, $T_0 = 10^4$ К. Значение t_k , согласно

[1, 2], определяется из зависимости

$$t_k = \frac{d - \Delta l_n}{v_k} \operatorname{tg} \gamma_n. \quad (12)$$

Здесь d — диаметр волокна; Δl_n , γ_n — глубина внедрения волокна в нижнюю матричную пластину и угол соударения в n -м слое. Таким образом,

$$Q_2 = 2c_1 \rho_1 \sqrt{\pi a_1 \frac{d - \Delta l_n}{v_k} \operatorname{tg} \gamma_n T_B}. \quad (13)$$

Соотношения для Q_1 и Q_2 при подстановке в (6) и (7) позволяют получить время застывания расплавов на границах соединений матрица — матрица и матрица — волокно

$$t_2' = \frac{k^2 v_k^4 \rho_1^2 \delta_1^2 \sin^4 \frac{\gamma_n}{2}}{4\pi (T_{\text{пл}} - T_0)^2 \kappa_1 c_1} \quad (14)$$

($T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала матрицы),

$$t_2'' = \frac{4a_1 (d - \Delta l_n) T_B^2 \operatorname{tg} \gamma_n \rho_1^2 c_1^2}{a_2 v_k (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2 (T_{\text{пл}} - T_0)^2}. \quad (15)$$

Подставив (14), (15) и (4) в неравенство (3), получим

$$\frac{k^2 v_k^4 \rho_1^2 \delta_1^2 \sin^4 \frac{\gamma_n}{2}}{4\pi (T_{\text{пл}} - T_0)^2 \kappa_1 c_1} \leq \frac{\xi_n \delta_1}{v_k}, \quad (16)$$

$$\frac{4a_1 (d - \Delta l_n) T_B^2 \operatorname{tg} \gamma_n \rho_1^2 c_1^2}{a_2 v_k (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2 (T_{\text{пл}} - T_0)^2} \leq \frac{\xi_n \delta_1}{v_k}. \quad (17)$$

Из (16), (17) легко получить пределы изменения углов соударений для режимов сварки взрывом ВКМ с расплавами на границах матрица — матрица

$$\sin \frac{\gamma_n}{2} \leq \sqrt[4]{\frac{4\pi \kappa_1 c_1 (T_{\text{пл}} - T_0)^2 n \xi}{k^2 v_k^5 \rho_1^2 \delta_1}} \quad (18)$$

и волокно — матрица

$$\operatorname{tg} \gamma_n \leq \frac{a_2 (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2 (T_{\text{пл}} - T_0)^2 \xi_n \delta_1}{4a_1 (d - \Delta l_n) T_B^2 \rho_1^2 c_1^2}. \quad (19)$$

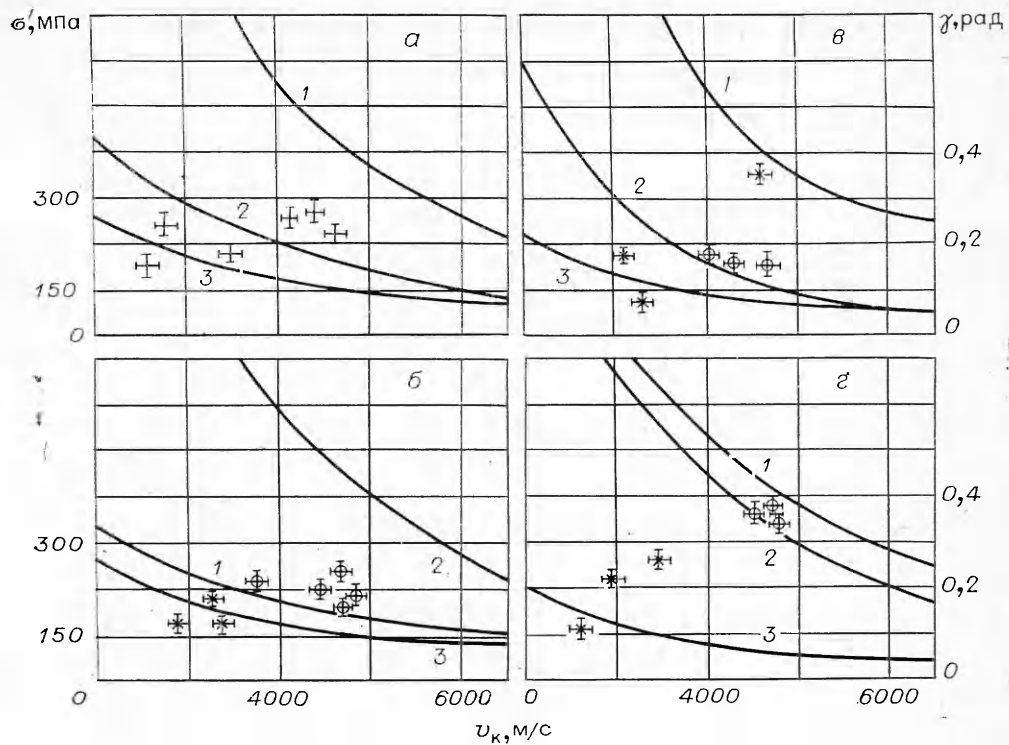
Согласно [9], существует зависимость

$$\gamma_{\text{опт}} = 200 \sqrt[4]{\frac{\sigma_T}{\rho v_k^2}}, \quad (20)$$

позволяющая определить оптимальный угол соударения пластин, при котором достигается максимальная прочность на границе соединения свариваемых взрывом материалов.

Следовательно, на основе полученных соотношений (18) — (20) можно построить верхние границы и определить области значений γ и v_k , в которых достигается расплавление на границах матрица — матрица и волокно — матрица.

На рисунке приведены зависимости поперечной прочности σ модельных волокнистых композиционных материалов от параметров соударения и кривые 1—3, соответствующие зависимостям (18) — (20). Это совмещение наглядно демонстрирует, что максимальные значения поперечной прочности всех исследованных ВКМ соответствует величинам γ и v_k в области между кривыми 1 и 2. Из этого следует, что формулы (18) и



Зависимость σ от параметров соударения для модельных материалов титановая матрица — стальные волокна (а), титановая матрица — молибденовые волокна (б), алюминиевая матрица — стальные волокна (в), медная матрица — стальные волокна (г).

(19) могут быть использованы для определения параметров соударения, одновременно обеспечивающие условие оплавления на межфазной границе и условие сохранения после прихода волны разгрузки на эту границу. Таким образом, результаты данной работы, вместе с исследованиями [1, 2], позволяют установить необходимые и достаточные условия для получения сварки взрывом ВКМ с оптимальными свойствами.

Поступила в редакцию 30/VIII 1983,
после доработки — 29/I 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Ханов, И. В. Яковлев. ФГВ, 1979, 15, 6.
2. А. М. Ханов, И. В. Яковлев. ФГВ, 1981, 17, 2.
3. М. Х. Шоршоров.— В кн.: Волокнистые и дисперсноупрочненные композиционные материалы. М.: Наука, 1976.
4. В. А. Котов, В. С. Седых.— В кн.: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Тр. ВПИ. Волгоград, 1975.
5. Y. Fleck, D. Laber, R. Leonard. J. Comp. Mater, 1969, 3, 4.
6. В. О. Ефремов, И. Д. Захаренко. ФГВ, 1976, 12, 2.
7. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1972, 8, 3.
8. И. Д. Захаренко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1971, 7, 3.
9. В. И. Беляев и др. Высокоскоростная деформация металлов. Минск: Наука и техника, 1976.