

## СВАРКА ВЗРЫВОМ МНОГОСЛОЙНОГО БЛОКА АМОРФНЫХ ЛЕНТ

Х.-Х. Янь, Я.-Д. Цюй, С.-Цз. Ли

Государственная центральная лаборатория структурного анализа индустриального оборудования, Отделение инженерной механики Технологического университета Даляня, 116023 Далянь, КНР  
quyandong159@sohu.com

Показана возможность соединения аморфных лент при помощи сварки взрывом. Получены плоские образцы, сваренные из 20 ÷ 120 слоев аморфных сплавов  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  и  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ . Толщина каждой ленты 25 мкм, ширина 10 см. Скорость точки контакта достигала 3 900 ÷ 4 800 м/с, скорость летящей пластины — 570 ÷ 900 м/с. Наибольшая площадь сваренного взрывом образца составила 30 см<sup>2</sup>. Микроструктура образцов изучалась на оптическом микроскопе и с помощью рентгеновской дифрактометрии. Предложена расчетная модель с прямоугольным профилем температуры на поверхности раздела сваренных лент, которая может быть использована для объяснения причин, в силу которых образцы сохраняют аморфное состояние на границах сварки. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами.

Ключевые слова: аморфные сплавы, сварка взрывом, температурное поле, скорость точки контакта.

### ВВЕДЕНИЕ

Аморфные сплавы характеризуются прекрасными механическими, магнитными и антикоррозионными свойствами.

Для того чтобы сохранить аморфное состояние расплава, требуется быстрое охлаждение сплава со скоростью  $\approx 10^6$  К/с от температуры плавления до температуры стеклования. Поэтому аморфные сплавы получают в виде тонких полос, проволок или порошков. Однако для промышленных применений необходимы объемные образцы. Проведены многочисленные исследования по получению аморфных компактов различными методами, такими как методы порошковой металлургии [1–5], твердофазные реакции [6], прямое получение объемных образцов из расплава [7–11], сварка взрывом [12]. Для компактирования порошков использовались и взрыв, и техника газовых пушек [13–16].

Техника сварки взрывом аморфных лент весьма проста. Поверхности лент разогреваются до температуры несколько выше или близкой к температуре плавления, затем образующимися металлическими струями они очищаются от оксидной пленки и свариваются. Температура поверхности столь быстро падает до среднего значения ниже температуры кристал-

лизации  $T_x$ , что аморфное состояние не успевает разрушиться при сварке взрывом.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для сварки взрывом использовались аморфные ленты из  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  и  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$  толщиной 25 мкм и шириной 10 см. Их свойства представлены в табл. 1. Применялись два типа экспериментальныхборок. В сборке № 1 использована схема косоугольного соударения (рис. 1). Пластина А при взрыве пластического взрывчатого вещества (ВВ) со скоростью детонации 6 500 м/с разогналась и соударялась с пласти-

Таблица 1  
Свойства аморфных лент

Параметры	$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7.18	7.51
Статическая прочность $\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	340	206
Твердость по Виккерсу $H_V$ , кг/мм <sup>2</sup>	910	640
Температура кристаллизации $T_x$ , °С	550	412
Средняя теплоемкость $c_p$ , Дж/(кг · К)	590 (25 ÷ 550 °С)	570 (25 ÷ 412 °С)

Hanghao Yan, Yandong Qu, Xiaojie Li.

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics of Dalian University of Technology, Dalian 116023, PR China.

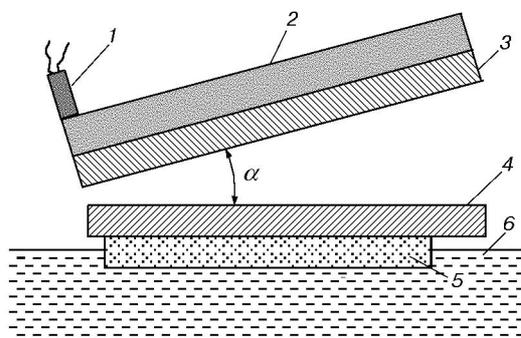


Рис. 1. Сборка № 1:

1 — детонатор, 2 — ВВ, 3 — пластина А, 4 — пластина В, 5 — аморфные ленты, 6 — вода

ной В. После того как пластины сваривались, они нагружали аморфные ленты, упакованные в алюминиевую фольгу, что приводило к сварке самих лент. Параметры соударения — скорость соударения  $v_p$  и скорость точки контакта  $v_c$  — рассчитывались по формуле Азиза [17] и уравнению сохранения импульса:

$$\frac{v_{pA}}{v_d} = 2 \sin \frac{\beta_A}{2} = \frac{\left(1 + \frac{32}{27}R\right)^{1/2} - 1}{\left(1 + \frac{32}{27}R\right)^{1/2} + 1}, \quad (1)$$

$$v_c = v_d \sin \beta_A / \sin(\beta_A + \alpha), \quad (2)$$

$$v_p = m_A v_{pA} / (m_A + m_B). \quad (3)$$

Здесь  $v_{pA}$ ,  $\beta_A$  — скорость пластины А и угол соударения соответственно;  $R$  — отношение масс ВВ и пластины А;  $m_A$ ,  $m_B$  — массы пластин А и В;  $\alpha$  — угол, показанный на рис. 1;  $v_p$  — средняя скорость пластин А и В после соударения, приблизительно равная скорости соударения лент между собой;  $v_d$  — скорость детонации ВВ.

Экспериментальная сборка № 2 показана на рис. 2. Аморфные ленты плотно намотаны на сердечник диаметром 8 мм и высотой 10 см. Средняя плотность пакета лент составляет 63,5 % от теоретической. Сборка расположена над бассейном. Параметры сварки рассчитывали с помощью двумерного гидродинамического кода, в котором пакет из намотанных лент рассматривался как пористый материал, а массовая скорость за фронтом ударной волны  $u_p$  принималась за скорость соуда-

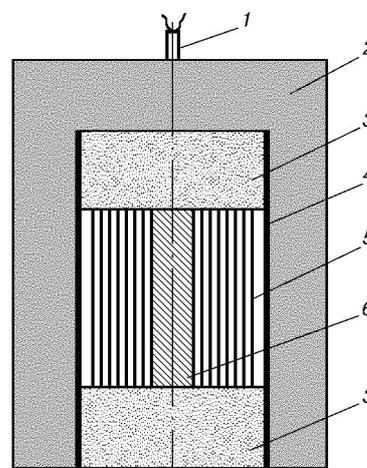


Рис. 2. Сборка № 2:

1 — детонатор, 2 — ВВ, 3 — пробки, 4 — летящая оболочка, 5 — ленты, 6 — стержень (сердечник)

рения лент. Скорость детонации ВВ, состоящего из смеси ANFO и гексогена, составляла  $4000 \div 4800$  м/с.

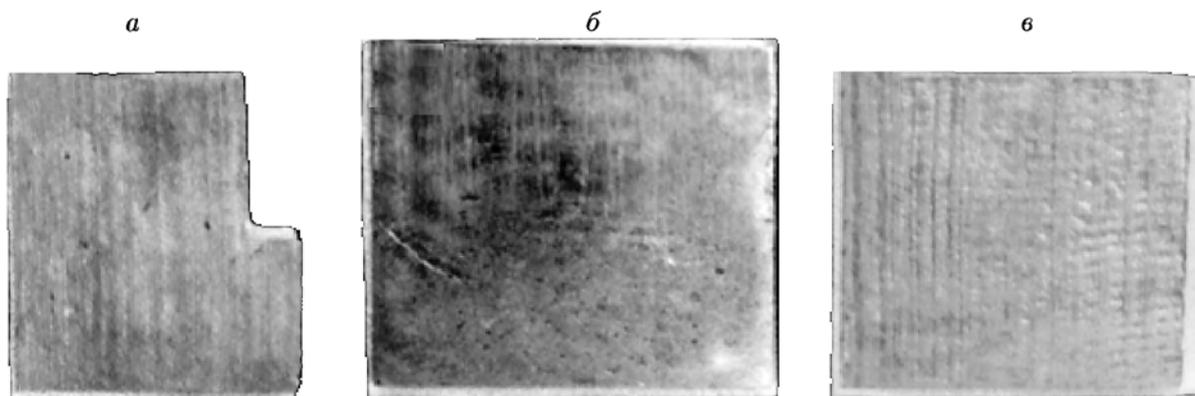
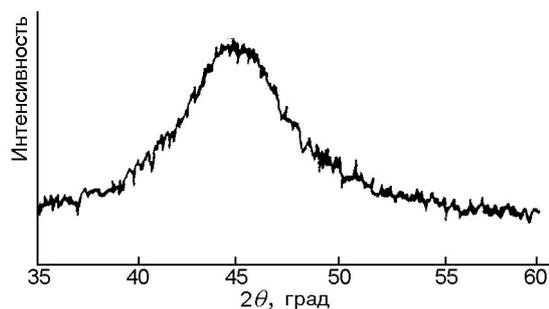
## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные результаты представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что получить хороший образец, используя сборку № 1, трудно — образцы разрушались на небольшие фрагменты площадью  $1 \div 10$  см<sup>2</sup>. При этом одни фрагменты были прочно соединены между собой, другие — частично кристаллизовались и разрушались. При использовании сборки № 2 в эксперименте № 04165 после его завершения 20 слоев аморфных лент и 1 слой алюминиевой фольги были прочно соединены друг с другом. После удаления алюминиевой фольги в кипящем растворе NaOH получены шесть фрагментов толщиной 0,05 см. Макроскопическая морфология этих образцов (рис. 3) показывает, что аморфные ленты хорошо соединены друг с другом. На рис. 4 представлено металлографическое изображение их микроструктуры, из которого следует, что образцы остались аморфными и не были разрушены сдвиговыми напряжениями. Хорошее соединение поверхностей раздела без образования волн свидетельствует о том, что аморфные ленты сварены друг с другом. Рентгеновская дифрактограмма образца из лент сплава Fe<sub>40</sub>Ni<sub>40</sub>P<sub>14</sub>B<sub>6</sub> после сварки взрывом приведена на рис. 5. Выпуклость при угле

Таблица 2

Параметры нагружения и результаты экспериментов

Номер опыта	Сборка	Материал	$v_c$ , м/с	$v_p$ , м/с	$u_p$ , м/с	Результаты
04159	1	$Fe_{78}B_{13}Si_9$	4 074	898	—	Сварка, трещины, кристаллизация
04160	1	—//—	4 520	790	—	Сварка, трещины, аморфное
04161	1	—//—	4 376	750	—	—//—
04162	1	—//—	3 900	683	—	—//—
04163	2	—//—	4 483	577	490	Нет сварки
04164	2	—//—	4 800	791	640	—//—
04165	2	—//—	4 800	898	720	Сварка, нет трещин, аморфное
04166	2	$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	4 800	780	630	—//—

Рис. 3. Сваренные взрывом образцы из аморфных лент сплавов  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$  (а, в) и  $Fe_{78}B_{13}Si_9$  (б)Рис. 4. Оптическое металлографическое изображение сваренных взрывом лент сплава  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$  ( $\times 200$ )Рис. 5. Дифрактограмма сваренных взрывом лент сплава  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ 

$40 \div 50^\circ$  и высокий фон также доказывают аморфность образца.

На основе экспериментальных результатов сделан вывод, что в принципе сварка взрывом является перспективным методом получе-

ния объемных образцов аморфных сплавов.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Процесс теплопроводности при сварке взрывом сложен. Сварка взрывом носит ло-

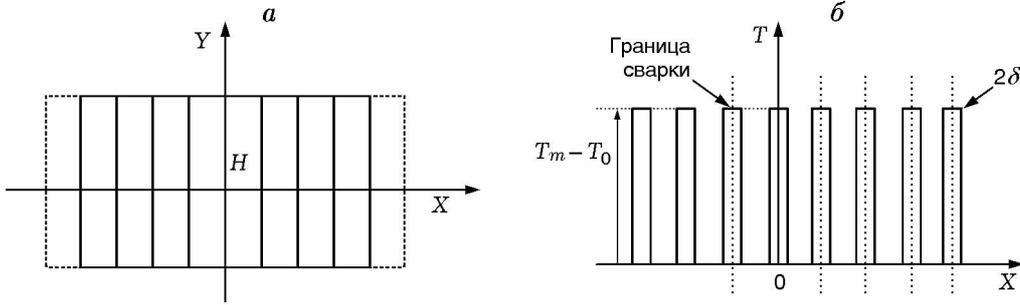


Рис. 6. Схема сварки взрывом аморфных лент (а). Модель поля температур на границах лент при сварке взрывом (б)

кальный характер, поэтому подъем температуры, вызванный прохождением ударной волны, также локализован и распространяется по мере движения точки сварки вперед. При построении температурной модели предполагалось, что слои с высокой температурой располагаются на каждой границе сварки фольг и являются тепловыми источниками, действующими вдоль оси  $x$ . Здесь предполагается, что компактировались  $2m$  слоев. Модель представлена на рис. 6. Начало координат по оси  $x$  находится на границе раздела между  $m$ -м и  $(m + 1)$ -м слоями. Толщина каждого слоя равна  $H$ , расплавленной зоны —  $2\delta$ . Температура расплавленной зоны —  $T_m$ , а остальных частей —  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Уравнение теплопереноса и начальные условия задаются следующим образом:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$T(x, 0) =$

$$= \begin{cases} T_m - T_0, & x \in [iH - \delta, iH + \delta], \\ 0, & \begin{cases} x \in (-\infty, -(m-1)H - \delta], \\ x \in [(m-1)H + \delta, \infty), \\ x \in [iH + \delta, (i+1)H - \delta], \\ i = -(m-1), -(m-2), \dots, (m-1). \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности.

Уравнение (4) имеет решение в виде

$$T = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}\right) d\xi. \quad (6)$$

Уравнение (6) является типичным для плоского источника тепла. Из рассмотрения температурной модели можно заключить, что температура между точками  $x \simeq [iH - \delta, iH + \delta]$ ,  $i = -(m-1), -(m-2), \dots, (m-1)$ , влияет на все распределение температуры в аморфных фольгах, так как в других областях температура постоянна. После интегрирования уравнения (6) получаем

$$T = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \times \sum_{i=-(m-1)}^{m-1} \int_{iH-\delta}^{iH+\delta} (T_m - T_0) \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}\right) d\xi + T_0. \quad (7)$$

Используя параметр  $\xi = x + \theta\sqrt{4\alpha t}$ , уравнение (7) можно упростить:

$$T(x, t) = \frac{T_m - T_0}{\sqrt{\pi}} \times \sum_{i=-(m-1)}^{m-1} \int_{(iH-\delta-x)/2\sqrt{\alpha t}}^{(iH+\delta-x)/2\sqrt{\alpha t}} \exp(-\theta^2) d\theta + T_0. \quad (8)$$

Вычислим далее производную температуры по времени:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m - T_0}{\sqrt{\pi}} \times \sum_{i=-(m-1)}^{m-1} [\exp(-b^2)b' - \exp(-a^2)a'], \quad (9)$$

где  $a = (iH - \delta - x)/2\sqrt{\alpha t}$ ,  $b = (iH + \delta - x)/2\sqrt{\alpha t}$ ,  $a' = -t^{-3/2}(iH - \delta - x)/4\sqrt{\alpha}$ ,  $b' = -t^{-3/2}(iH + \delta - x)/4\sqrt{\alpha}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для примера рассмотрим сварку взрывом 100 слоев аморфных фольг  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  со следующими физическими параметрами:  $H = 25$  мкм,  $T_m = 1450$  °С,  $\alpha = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $2\delta = 0.5$  мкм,  $T_x = 550$  °С. Задавая значение  $t$  в уравнении (8), можно получить распределение температуры в определенный момент времени, а также значения температуры в различных точках. Распределение температуры по пространству, рассчитанное на момент времени 10 мкс, показано на рис. 7.

Очевидно, что поле температур аморфных фольг при сварке взрывом является периодическим и симметричным вдоль оси  $x$ . Каждый из расплавленных слоев на границах раздела сваренных взрывом фольг слабо влияет на другие слои, так как толщина расплавленного слоя на два порядка величины меньше толщины фольги. Поэтому мы исследовали только поле температур на сваренной поверхности при  $x = 0$ . Интерес представляет распределе-

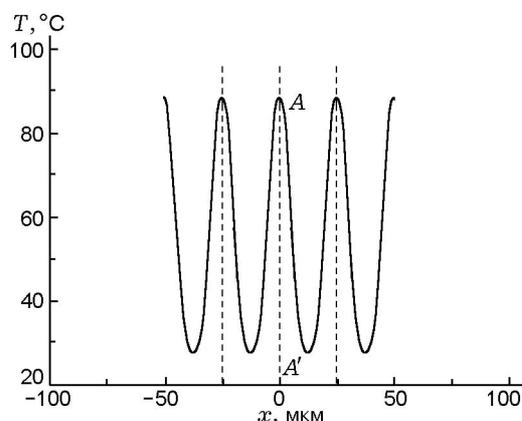


Рис. 7. Распределение температуры в момент времени 10 мкс

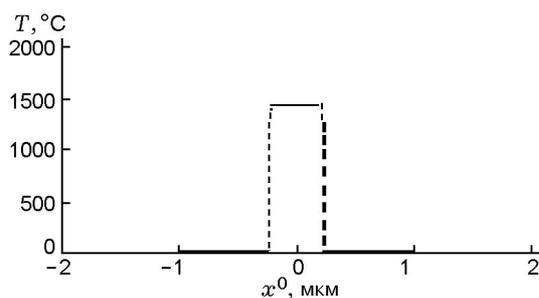


Рис. 8. Распределение температуры в момент времени 0.2 нс

ние температуры при значении  $t$ , находящемся в наносекундном диапазоне. Результат расчета по уравнению (8), полученный при  $t = 0.2$  нс, показан на рис. 8. Видно, что распределение близко к прямоугольному импульсу. Толщина расплавленного слоя  $2\delta = 0.5$  мкм, что свидетельствует о хорошем согласии расчета с моделью, использованной для расчета распределения температуры.

Как известно, скорость охлаждения разных материалов изменяется в диапазоне  $10^3 \div 10^{10}$  К/с. Скорость охлаждения и температура перехода играют важную роль в формировании аморфных сплавов, поэтому скорость охлаждения следует принимать во внимание, когда температура превышает температуру стеклования. На основе результатов, приведенных на рис. 7, рассмотрим температурную модель в виде, представленном на рис. 9: это распределение температуры вблизи поверхности сварки. Участок  $AB$  — половина сваренного взрывом слоя в начальный момент времени;  $C$  — некоторая точка вблизи такого слоя;  $A'B'C'$  — распределение температуры по оси  $x$  через некоторое время. Из сравнения температуры в точках  $B$  и  $A$  видно, что в точке  $B$  она падает быст-

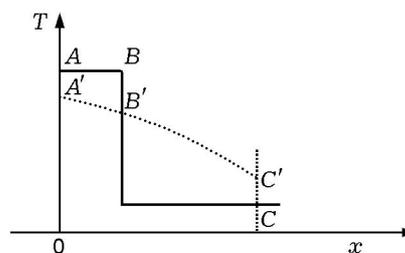


Рис. 9. Простая модель поля температуры

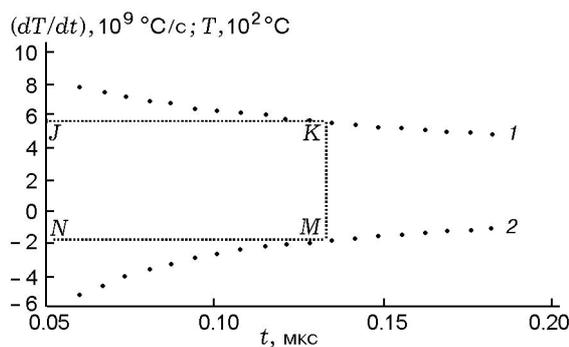


Рис. 10. Зависимость температуры (1) и скорости охлаждения (2) от времени при  $x = 0$

рее, чем в точке  $A$ . Тем временем температура в точке  $C$  растет. Вместе с тем для формирования аморфного сплава необходимо, чтобы температуры в точках  $A'$ ,  $B'$  и  $C'$  были ниже температуры стеклования. В соответствии с расчетом по приведенной выше модели при  $t = 10^3 \div 10^4$  мкс температура опускается до  $54^\circ\text{C}$ , что намного меньше температуры стеклования  $550^\circ\text{C}$ . Между тем, когда распределение температуры становится постоянным, температура в целом увеличивается, что необходимо для формирования аморфных сплавов. Если при этом скорость охлаждения достигла определенного значения, образец должен остаться аморфным после сварки.

На рис. 10 показано распределение температуры в различные моменты времени на границе раздела фольг (точка  $A'$ ), полученное при  $x = 0$  в уравнениях (8), (9). Температура в точке  $A'$  постепенно уменьшается. Абсолютное значение скорости охлаждения также уменьшается. Температура стеклования аморфных фольг  $\text{Fe}_{78}\text{V}_{13}\text{Si}_9$  около  $550^\circ\text{C}$ . Точка  $J$  соответствует точке  $N$ , линия  $JK$  пересекается с кривой  $1$  в точке  $K$ . Значение времени в точке  $K$  соответствует времени в точке  $M$ , где линия  $KM$  пересекается с кривой  $2$ . В этот момент можно определить значение скорости охлаждения в точке  $N$ , оно равно  $1.78 \cdot 10^9 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$ . Для получения аморфных фольг сплава  $\text{Fe}_{78}\text{V}_{13}\text{Si}_9$  скорость охлаждения должна быть порядка  $\approx 10^6 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$ . Значение  $1.78 \cdot 10^9 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$  заведомо удовлетворяет этому требованию. В то же время значение скорости охлаждения в каждой точке, где температура выше  $550^\circ\text{C}$ , больше  $10^6 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$ .

На основе результатов этого анализа сделан вывод, что при сварке взрывом слои аморфных лент могут остаться в аморфном состоянии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи сварки взрывом аморфных лент сплавов  $\text{Fe}_{78}\text{V}_{13}\text{Si}_9$  и  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{V}_6$  получены плоские образцы длиной около 7 см, шириной 6 см и толщиной  $0.05 \div 0.4$  см с небольшим числом трещин. На основе характеристик формирования аморфных сплавов и характеристик теплопереноса при сварке взрывом предложена модель с прямоугольным профилем температуры на границе раздела сваренных фольг. Эта модель может быть использована для анализа распределения температуры

в многослойных блоках аморфных фольг, сваренных взрывом, и объяснения причин, по которым аморфное состояние на границах сварки сохраняется. Результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Следует отметить, конечно, что при расчете толщины расплавленного слоя принимали равной  $\approx 1\%$  от толщины фольги. Как получить более точное значение толщины — вопрос, над которым ведутся исследования.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 19972015).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kato A., Horikiri H., Inoue A., Masumoto T. Microstructure and mechanical properties of bulk  $\text{Mg}_{70}\text{Ca}_{10}\text{Al}_{20}$  alloys produced by extrusion of atomized amorphous powders // Mater. Sci. Eng. 1994. V. 179-180A. P. 707-711.
2. Uenishi K., Kobayashi K. F. Fabrication of bulk amorphous alloy by rolling of mechanically alloyed Al—Cr powders // Mater. Sci. Eng. 1994. V. 181-182A. P. 1165-1168.
3. Takagi M., Kawamura Y., Saka H., Imura T. Effect of preparation technique and atmosphere on the mechanical properties of bulk amorphous alloy compacts // Mater. Sci. Eng. 1991. V. 133A. P. 301-306.
4. Kalandadze G. I., Shalamberidze S. O., Peikrshvili A. B. Sintering of Boron and Boron Carbide // J. Solid State Chem. 2000. V. 154, N 1. P. 194-198.
5. Averback R. S., Hofler H. J., Hahn H., Logas J. C. Sintering and grain growth in nanocrystalline ceramics // Nanostr. Mater. 1992. V. 1, N 2. P. 173-178.
6. Clemens B. M., Suchoski M. J. Amorphous iron zirconium formed by solid state reaction // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47, N 9. P. 943-944.
7. Inoue A., Shinohara Y., Shinohara Y. Preparation of bulky Zr-based amorphous alloys by a zone melting method // Mater. Trans. JIM. 1994. V. 35, N 12. P. 923-926.
8. Inoue A., Kohinata M., Tsai A. P., Masumoto T. Mg—Ni—La amorphous alloys with a wide supercooled liquid region // Mater. Trans. JIM. 1989. V. 30, N 5. P. 378-381.
9. Inoue A., Zhang T., Masumoto T. Al—La—Ni amorphous alloys with a wide super-cooled liquid region // Mater. Trans. JIM. 1989. V. 30, N 12. P. 965-972.
10. Inoue A., Zhang T., Masumoto T. Zr—Al—Ni amorphous alloys with high glass transition temperature and significant supercooled liquid region // Mater. Trans. JIM. 1990. V. 31, N 3. P. 177-193.

11. **Inoue A., Zhang T.** Stabilization of supercooled liquid and bulk glassy alloys in ferrous and non-ferrous systems // J. Non-Crystalline Solids. 1999. V. 250–252, Pt 2. P. 552–559.
12. **Zhang K., Li X. J.** Study on the multilayer explosive cladding of thin amorphous foils // J. de Phys. 1991. V. 1, N C3. P. 229–234.
13. **Prummer R.** In: Explosive Welding, Forming and Compaction / T. Z. Blazynski (Ed.). Applied Science. London, 1983.
14. **Nesterenko V. F.** Dynamics of Heterogeneous Materials. New York; Berlin; Heidelberg: Springer, 2001.
15. **Cline C. F., Hopper R. W.** Explosive fabrication of rapidly quenched materials // Scripta Met. 1977. V. 11, N 2. P. 1137–1138.
16. **Morris D. G.** The properties of dynamically compacted metglas // J. Mater. Sci. 1982. V. 17, N 6. P. 1789–1794.
17. **Shao B. H., Zhang K.** Principle of Explosive Welding and its Engineering Use. Dalian: Dalian Engineering Institute Press, 1987. (in Chinese).

*Поступила в редакцию 24/IV 2007 г.,  
в окончательном варианте — 4/VIII 2007 г.*

---