

4. Mogilevsky M. A. Phys. Reports, 1983, 97, 6, 357.
5. Mogilevsky M. A., Teplyakova L. A. Intern. Conf. on Metallurg Applications of Shock-Wave and High Strain-Rate Phenomena, Oregon, 1985, 419.
6. Могилевский М. А., Мынкин И. О. ФГВ, 1985, 21, 3, 113.
7. Frenkel J. Z. Phys., 1926, 37, 572.
8. Kelly A. Strong Solids.— Oxford: Claredon Press, 1966.
9. Могилевский М. А., Мынкин И. О. Картина развития пластической деформации на последовательных стадиях ударно-волнового нагружения. Деп. ВИНТИ, 1985, № 4115-85.
10. Молодец А. М., Дремин А. М. Докл. АН СССР, 1979, 249, 6, 1361.
11. Мынкин И. О., Могилевский М. А. Роль дефектов в физико-механических свойствах твердого тела. Тез. докл. конф. Ч. 1.— Барнаул, 1985.
12. Asay J. R., Hicks D. L., Holdridge D. B. J. Appl. Phys., 1975, 46, 10, 4316.

*Поступила в редакцию 4/IX 1987,  
после доработки — 14/XII 1987*

### О СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ В АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

*В. И. Курко, А. А. Кузовников  
(Красноярск)*

В последнее время опубликован ряд работ об изменениях в структуре аморфных металлических сплавов (АМС) после их ударно-волнового нагружения [1—13]. Для исследования структуры и свойств АМС использовались различные методики: измерения микротвердости, рентгено-структурный, дифференциально-термический и сканирующий анализы, классический магнито-структурный анализ, растровая и просвечивающая электронная микроскопия (РЭМ и ПЭМ), а также методы исследований характеристик локальной магнитной анизотропии. На основе результатов этих исследований авторы работ делают выводы:

1) изменения в структуре АМС вследствие ударно-волнового нагружения могут происходить только за счет действия остаточной температуры [1—3];

2) обнаруженное упорядочение ближнего порядка происходит в результате уплотнения АМС, которое обусловлено выносом части свободного объема из структуры ударной волной [7, 9];

3) разупорядочение структуры АМС может происходить вследствие пластического течения при нагружении [11—13].

В настоящей работе на основе анализа известных экспериментальных данных рассматривается вопрос о возможных структурных изменениях в АМС, обусловленных ударно-волновым нагружением. Ввиду особенностей получения АМС из расплава последние обладают структурными неоднородностями различного масштаба. На атомарном уровне в АМС существует топологический и композиционный беспорядок, который обуславливает существование неоднородностей масштаба  $\sim 10$  Å. Наиболее эффективны методы исследований, дающие информацию о локальном окружении атома (ядерный магнитный резонанс [14] и метод тонкой структуры края поглощения рентгеновских спектров (EXAFS) [15]).

Конечная скорость охлаждения при получении АМС из расплава приводит к возникновению неоднородностей диффузионного расслоения масштаба  $\sim 100$  Å. Структура флуктуационных неоднородностей подобного типа может быть выявлена с помощью ПЭМ [16] либо малоуглового рентгеновского рассеяния [17].

На рис. 1 приведена фотография, полученная методом ПЭМ, которая демонстрирует флуктуацию плотности в АМС на основе железа. Структура характеризуется набором характерных размеров флуктуаций

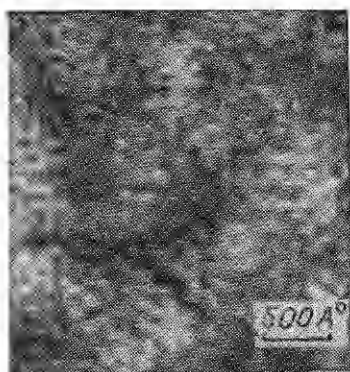


Рис. 1.

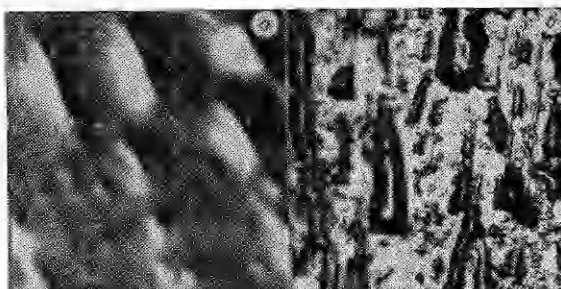


Рис. 2.

плотностью  $20 \div 10^3 \text{ \AA}$ . Коротковолновая часть флуктуаций с масштабом  $20\text{--}50 \text{ \AA}$  называется стохастической волновой структурой и наблюдается с помощью ПЭМ высокого разрешения [16]. Субмикронная часть масштабом  $10^2\text{--}10^3 \text{ \AA}$  проявляется в измерениях локальной магнитной анизотропии АМС [18] и при возникновении венозного узора в ходе разрушения АМС в антиплоской деформации [19]. Кроме того, на поверхности и в объеме АМС возникают неоднородности чисто технологического характера с масштабом  $1\text{--}10 \text{ мкм}$ . На рис. 2 показаны фотографии свободной (а) и прилегающей (б) к закалочному диску поверхностей, полученные методом РЭМ. Контактная поверхность характеризуется строчечной структурой неоднородностей, возникающих в результате захлопывания газа между расплавом и диском. На внешней поверхности образуется бугристая структура с выделенным вдоль оси ленты направлением.

В [10] показано, что неоднородности технологического рельефа поверхности АМС становятся источниками неомогенной деформации сплава. Последняя выражается в локализации пластического течения в узких полосах сдвига и проявляется в возникновении на поверхности экстрезивных складок. Объем материала, охваченного пластическим течением, увеличивается с возрастанием амплитуды импульса давления за счет возникновения новых складок. На рис. 3, а, б приведена фотография свободной и контактной поверхностей кобальтового сплава, подвергнутого динамическому нагружению давлением  $28 \text{ ГПа}$ . Видно, что именно технологические неоднородности являются генераторами экстрезивных складок. Экспериментально показано, что неомогенная деформация вызывает разупорядочение структуры АМС в объеме, охваченном пластическим течением [20]. После подобной деформации структура АМС полностью не восстанавливается, что проявляется, например, в повышенной травимости локальных полос сдвиговой деформации.

На рис. 4, а показана качественная пространственная зависимость флуктуации плотности для двухкомпонентного АМС, которая вызвана диффузионным расслоением при закалке из расплава. Штриховыми линиями обозначена максимально возможная флуктуация плотности, реализующаяся при критической скорости охлаждения, соответствующей минимальной скорости, при которой образуется аморфное состояние.

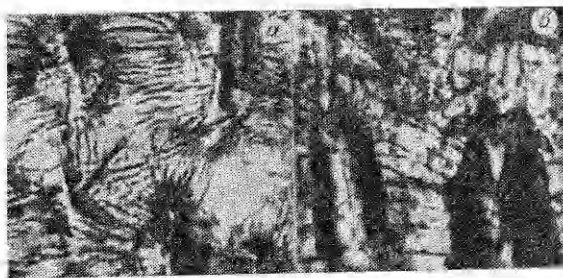


Рис. 3.

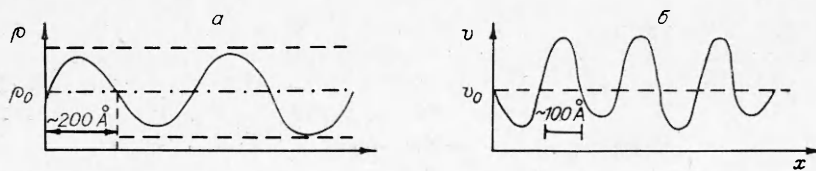


Рис. 4.

В [19] показано, что характерный масштаб и амплитуда флуктуации зависят от скорости закалки сплава при его получении. В идеальном случае, когда скорость закалки бесконечна, амплитуда флуктуации определяется флуктуацией плотности в жидком состоянии. Последняя определяет соответствующую ей флуктуацию свободного объема (рис. 4, б). В максимумах и минимумах концентрационной флуктуации сплав наиболее упорядочен. Это выражается в приближении структуры (конфигурационной энтропии) в этих областях к структуре кристаллических фаз. В точках перегиба система максимально разупорядочена, т. е. энтропия и свободный объем принимают максимальные значения.

При воздействии ударной волны на подобную структуру в объеме АМС; не охваченном пластическим течением, происходит сжатие областей с повышенным содержанием свободного объема и упорядочение их структуры. Для обычных стекол необратимый процесс уменьшения свободного объема начинается с давления, величина которого определяется микротвердостью материала [21]. Для большинства материалов микротвердость равна 400—1200 кг/мм<sup>2</sup>, что соответствует  $p = 4 \div 12$  ГПа. Сжатие локальных областей может привести к изменению плотности АМС, как это отмечено в [7], и к повышению внутренних напряжений в части объема материала [8—10]. Упорядочение структуры АМС при ударно-волновом нагружении обнаружено в [9], где с ростом амплитуды динамического давления монотонно возрастала величина обменного взаимодействия.

Таким образом, ударно-волновое нагружение АМС может приводить к упорядочению структуры в локальных областях с повышенным содержанием свободного объема на масштабах  $\sim 10^2$  Å и к разупорядочению структуры в областях интенсивного пластического течения. Последнее, по-видимому, объясняет противоречивые выводы работ [1—13]. Для выделения эффектов, связанных с упорядочением в структуре АМС, необходимо использовать металлические стекла, полученные химическим или электрохимическим осаждением, с достаточно гладкой поверхностью, где отсутствуют неоднородности, генерирующие неомогенную пластическую деформацию.

В [10] показано, что при высоких давлениях ( $p > 35$  ГПа) АМС деформируется гомогенно. На поверхности образуется кольцеобразная структура, возникновение которой не зависит от технологического рельефа поверхности ленты (рис. 5).

При гомогенной пластической деформации уменьшается амплитудная составляющая флуктуации плотности, что в конечном итоге приводит к разупорядочению структуры АМС. В сплавах, где температура кристаллизации зависит от концентрации атомов-аморфизаторов, это может привести к изменению интервала кристаллизации. Данный эффект в АМС впервые обнаружен в [6, 11, 22]. Подтверждением этого факта могут быть результаты работ [11, 23], где частично закристаллизованный АМС подвергался пластической деформации. После динамического и статического нагружения обнаружены переход кристаллических областей в аморфное состояние и измельчение областей когерентного рассеяния. При этом в [10] отмечено резкое уменьшение поля локальной магнитной анизотропии, которое свидетельствовало о значительном снятии внутренних напряжений.

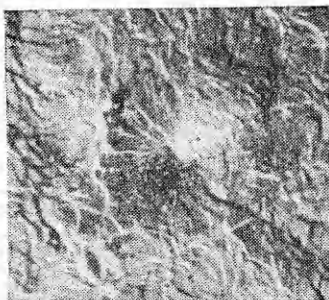


Рис. 5.

Рассмотрим возможные изменения в структуре АМС на атомарном масштабе ближайшего окружения. Из статических экспериментов известно [24], что давление изменяет порядок кристаллизации АМС. Одновременно с этим показано, что тетрагональная фаза  $Fe_3B$  ( $t-Fe_3B$ ) более устойчива при высоком давлении, чем орторомбическая. На основе ЯМР-исследований атомной структуры аморфных сплавов Fe—B [14] сделан вывод о том, что в этих сплавах с содержанием атомов бора 13,5—25 % химический ближний порядок относительно атомов бора одинаков. Однако топологический ближний порядок зависит от концентрации бора. Для сплавов Fe — (13,5—17) %. В топологический ближний порядок близок к его значению орторомбической фазы  $Fe_3B$  ( $o-Fe_3B$ ), а для заэвтектидных сплавов с 20—25% B он соответствует  $t-Fe_3B$ . Это позволяет предположить возможность необратимого изменения топологического порядка в доэвтектидных АМС под воздействием давления. Последнее, по-видимому, будет проявляться в изменении релаксационных спектров АМС.

Подведем итог проведенного исследования. На основе имеющихся экспериментальных исследований показано, что ударно-волновое нагружение вносит изменения в структуру АМС. На субмикронных масштабах  $\sim 10^2$ — $10^3$  Å происходит упорядочение структуры АМС в областях с повышенной концентрацией свободного объема. Одновременно с этим в области, охваченной неомогенной деформацией, идет процесс разупорядочения, вызванный дилатацией в локализованных полосах адиабатического сдвига, которые генерируются на микронных технологических неоднородностях рельефа поверхности. В зависимости от соотношения объемных долей областей неупругой деформации (понижения свободного объема) и локализованной пластической деформации экспериментально могут быть получены различные выводы о структурном упорядочении АМС. В структуре АМС возможны перегруппировки атомов на масштабе  $\sim 10$  Å типа «фазового перехода» высокого давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Murr L. E., Inal O. T., Wang S. H. Sci. and Engng, 1981, 49, 57.
2. Murr L. E.—Тр. II совещания по обработке металлов взрывом.—Новосибирск, 1981.
3. Iwasaki H., Wang Wen-Kui, He Shou-An e. a. Acta Phys. Sinica, 1984, 33, 7, 914.
4. Исхаков Р. С., Кирко В. И., Кузовников А. А. и др. Тез. докл. III Всесоюз. семинара по аморфному магнетизму.—Самарканд, 1983.
5. Дураченко А. М., Малиночка Е. Я. Там же.
6. Дураченко А. М., Малиночка Е. Я., Журавлев В. А. Тез. II Всесоюз. совещания «Физика и химия аморфных металлических сплавов».—М.: Наука, 1985.
7. Самойлович С. С., Тюриков С. Б., Журавлев В. А. Там же.
8. Ishakov V. S., Kirko V. I., Kuzovnikov A. A. e. a. Intern. Conf. «Explomet 85». Portland, 1985.
9. Исхаков Р. С., Кузовников А. А., Карпенко М. М. ФТТ, 1986, 28, 2, 590.
10. Исхаков Р. С., Кирко В. И., Кузовников А. А. и др.—Тр. IX Междунар. конф. по высокоэнергетическому воздействию на материалы, 1986.
11. Дураченко А. М., Малиночка Е. Я., Ветошкин И. Д. и др. Металлофизика, 1986, VIII, 4, 107.
12. Роман О. В., Судник Л. В., Барай М. Ю. и др. Тез. II Всесоюз. совещания «Физика и химия аморфных металлических сплавов».—М.: Наука, 1985.
13. Дураченко А. М., Малиночка Е. Я., Маркелов И. Д. Изв. АН СССР. Металлы, 1986, 2, 170.
14. Показитов В. С. Докл. АН СССР, 1985, 275, 1, 79.
15. Уонг Дж.—В кн.: Металлические стекла. Ионная структура, электронный перепос и кристаллизация/Под ред. Г. И. Гюнттеродта и Г. Бека.—М.: Мир, 1983.
16. Юдин В. В., Матюхин А. В. и др. Поверхность, 1985, 12, 54.
17. Чириков П. В., Савин В. В., Кривандин А. Ю.—В кн.: Аморфные металлические сплавы/Под ред. Ю. А. Скакова.—М.: Металлургия, 1983.
18. Исхаков Р. С., Попов Г. В., Карпенко М. М. ФММ, 1983, 56, 1, 85.

19. Золотарев С. Н., Новиков С. Н. Тез. Всесоюз. научной конф. «Проблемы исследования структуры аморфных металлических сплавов». — М., 1984.
20. Глезер А. М., Молотиллов Б. В., Утевская О. Л. — В кн.: Аморфные металлические сплавы/Под ред. Ю. А. Скакова. — М.: Металлургия, 1983.
21. Сандитов Д. С., Баргенов Г. М. Физические свойства неупорядоченных структур. — Новосибирск: Наука, 1982.
22. Кузовников А. А., Никифоров Н. В. Тез. I Научно-практической конференции, посвященной памяти Л. В. Киренского. — Красноярск, 1985.
23. Романова В. С., Полькин И. С. и др. Тез. Всесоюз. научной конф. «Проблемы исследования структуры аморфных металлических сплавов». — М., 1984.
24. Ogawa Y., Endo S., Kiritani M. Jap. J. Appl. Phys., 1984, 23, 2, 142.

Поступила в редакцию 10/III 1987

## КОСое СОУДАРЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

В. С. Суров

(Челябинск)

Известно, что при высокоскоростном соударении металлических пластин существуют различные режимы взаимодействия — с волнообразованием на границе соединения пластин, со струеобразованием и др. [1]. Однако до сих пор отсутствует единая точка зрения на происходящие при этом процессы. В настоящей работе предпринята попытка описания в рамках модели идеальной сжимаемой среды некоторых явлений, сопутствующих высокоскоростному соударению металлических пластин.

**Постановка задачи, математическая модель.** В момент времени  $t = 0$  пластины соприкасаются в точке  $O$  друг с другом (рис. 1). Систему координат свяжем с точкой  $O$ , ось координат  $Ox$  расположим вдоль поверхности нижней пластины. В этой системе координат  $xOy$  скорость верхней пластины  $\vec{v}_0$  направлена под углом  $\psi$  к оси  $Oy$ . Угол между пластинами равен  $\varphi$ . При высокоскоростном ударе металлических пластин, например при сварке взрывом, в окрестности линии контакта развиваются столь высокие давления, что вполне допустимо пренебречь прочностными свойствами металлов, влиянием массовых и вязких сил. Уравнения, соответствующие принятой модели, имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i u_i}{\partial x} + \frac{\partial \rho_i v_i}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \rho_i u_i}{\partial t} + \frac{\partial (p_i + \rho_i u_i^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho_i u_i v_i}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \rho_i v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i u_i v_i}{\partial x} + \frac{\partial (p_i + \rho_i v_i^2)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial e_i}{\partial t} + \frac{\partial (e_i + p_i) u_i}{\partial x} + \frac{\partial (e_i + p_i) v_i}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  — компоненты вектора скорости;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $e$  — полная энергия единицы массы металла;  $t$  — время; индексы  $i = 1, 2$  относятся соответственно к верхней и нижней пластинам. Уравнения (1) записаны в безразмерном виде: координаты отнесены к толщине верхней пластины  $\delta$ , скорость — к модулю вектора скорости удара  $|\vec{v}_0|$ , плотность — к начальной плотности верхней пластины  $\rho_{01}$ , давление — к  $\rho_{01} |\vec{v}_0|^2$ , время — к  $\delta / |\vec{v}_0|$ .

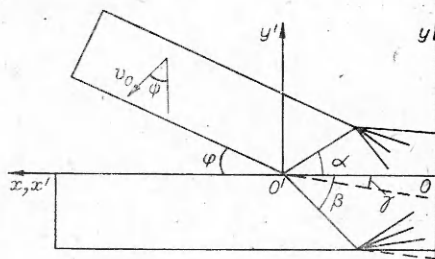


Рис. 1. Схема соударения пластин.