

05

## Неоднородность пластической деформации аморфных сплавов на основе железа

© М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Поступило в Редакцию 23 мая 2003 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2003 г.

Изучена анизотропия пластической деформации аморфных сплавов на основе железа. Объяснение данному явлению дано на основании представлений о внутренних напряжениях в аморфных лентах.

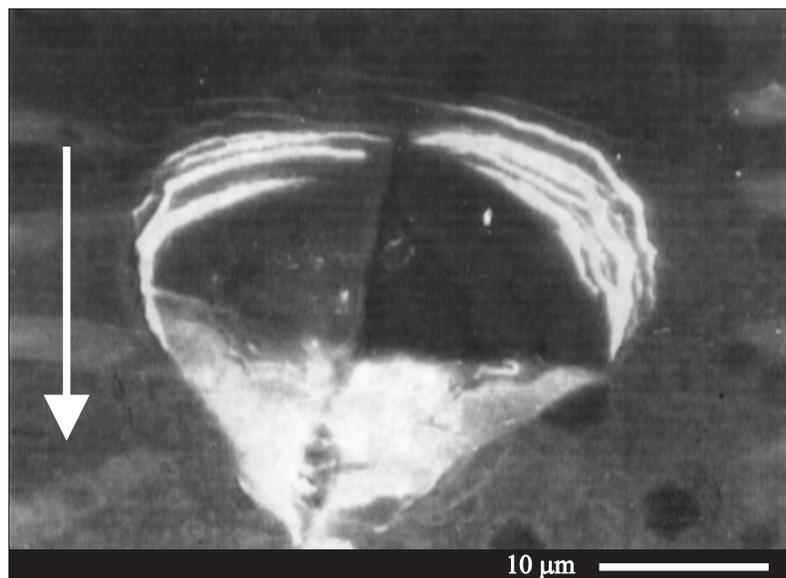
В работах [1,2] изучались закономерности формирования полос сдвига у индентора на поверхности аморфных сплавов. Данная работа посвящена исследованию нового эффекта неоднородности пластической деформации в изотропных аморфных средах.

Исследовались аморфные сплавы систем  $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$ ,  $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$ ,  $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$  (в wt.%), которые получались методом быстрой закалки расплава на наружную сторону медного диска [1,2]. Толщина лент варьировалась в пределах 50–80  $\mu m$ . Скорость охлаждения лент составляла  $8 \cdot 10^5$  °C/s.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом  $CuK_{\alpha}$ -излучении в следующем режиме: напряжение 30 kV, ток 20 mA, скорость счетчика 2 K/min.

Изучение структуры проводили на оптическом микроскопе „Neophot-21“ и электронном растровом микроскопе CamScan-4.

Исследование пластической деформации полученных сплавов проводилось с помощью методики локального деформирования, суть которой заключалась в том, что поверхность аморфного сплава деформировалась алмазной пирамидой Виккерса прибора ПМТ-3 [1,2]. Далее с помощью оптического микроскопа (более детально — с помощью электронного микроскопа) изучалась деформационная картина у инден-



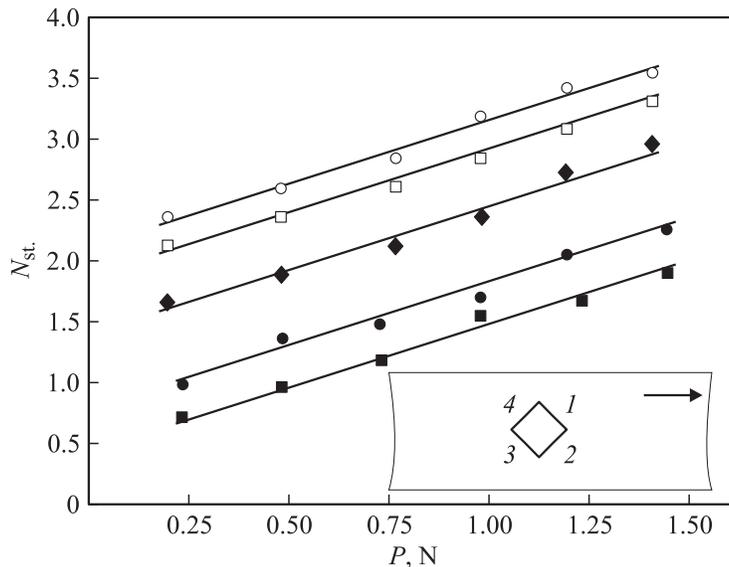
**Рис. 1.** Полосы сдвига у отпечатка пирамиды Виккерса. Снимок сделан с помощью электронного микроскопа CamScan-4. Стрелкой отмечено направление отливки ленты.

тора. В данной работе фиксировалось среднее число  $N_{st}$  полос сдвига, возникающих у каждой грани индентора.

Отпечаток индентора при нагрузке на него от 0.25 до 1.50 N наносился на поверхность ленты по отношению к направлению отливки так, как это показано на рис. 1. Исследовалась сторона лент, контактировавшая при их получении с воздухом. Для анализа выбирались только те отпечатки, размеры диагоналей которых были приблизительно одинаковы.

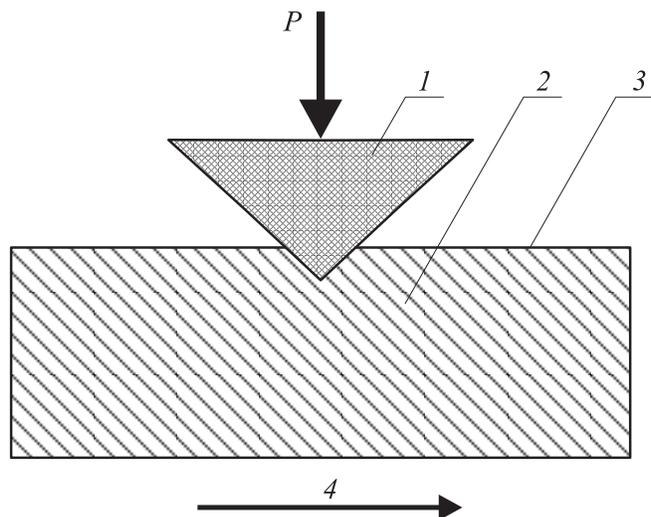
Рентгеноструктурный анализ показал, что исходные исследуемые сплавы рентгеноаморфны. Это проявилось в отсутствии на рентгенограммах пиков, кроме типичного размытого пика, соответствующего (011)  $\alpha$ -Fe.

Типичная деформационная картина, возникающая у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности аморфного сплава на основе железа, представлена на рис. 1. При нагрузках на индентор до 1.5 N



**Рис. 2.** Зависимости среднего числа полос сдвига типа полуколец от нагрузки на индентор у сплава  $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$ ; ◆ — среднее значение; у граней ● — 1; ■ — 2; ○ — 3; □ — 4. На врезке дано схематическое изображение расположения отпечатка пирамиды Виккерса на аморфной ленте по отношению к помеченному стрелкой направлению отливки ленты: 1, 2, 3 и 4 — области, в которых велось наблюдение за количеством возникающих полос сдвига.

у исследуемых сплавов  $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$ ,  $\text{Fe}_{71.7}\text{-Ni}_{6.0}\text{-Co}_{2.4}\text{-Cr}_{7.5}\text{-Mo}_{7.9}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{0.5}$ ,  $\text{Fe}_{86}\text{-P}_{9.8}\text{-C}_{1.0}\text{-Si}_{0.9}\text{-Al}_{1.7}\text{-B}_{0.6}$  имеют место только полосы сдвига в виде полуколец. Наблюдаемых в [1,2] полос сдвига типа лучей обнаружено не было. Однако было замечено, что у отпечатков, нормально нанесенных на поверхность лент так, как это показано на рис. 1, у различных граней индентора число полос сдвига различно. Причем у одних и тех же граней среднее количество полос сдвига от отпечатка к отпечатку сохранялось в рамках погрешности измерений. Эти результаты представлены на рис. 2 на примере сплава  $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$



**Рис. 3.** Схематическое изображение плоскостей действия сдвиговых напряжений в аморфной ленте: 1 — индентор; 2 — плоскости скольжения; 3 — аморфная лента; 4 — направление отливки;  $P$  — нагрузка на индентор.

Для исследуемых сплавов зависимость  $N_{st} = f(P)$  линейная. При фиксированной нагрузке на индентор наибольшее количество полос сдвига возникает у сплава системы  $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$ , а наименьшее — у сплава  $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-V_{0.6}$ . Это говорит о том, что наибольшая негетогенная пластичность присуща сплаву  $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$ , у которого массовая доля неметаллических включений наименьшая. У сплава же  $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-V_{0.6}$  доля неметаллических включений наибольшая. Это говорит о том, что негетогенная пластичность аморфных сплавов на основе железа, имеющих сложный состав, определяется металлическими связями, в то время как неметаллические добавки способствуют увеличению хрупкости.

Линейный вид имеют и зависимости  $N_{st} = f(P)$  для полос сдвига у каждой грани индентора Виккерса. У граней 1 и 2 (рис. 2) число полос сдвига меньше, чем у граней 3 и 4 (рис. 2). Причем это наблюдается у отпечатков с равными по величине диагоналями, что указывает на

перпендикулярное к поверхности перемещение индентора. Определяющим фактором в распределении полос сдвига у граней индентора явилось направление отливки лент. В связи с этим можно заключить, что из-за несколько различной скорости охлаждения аморфных лент на сторонах, соприкасавшихся при получении с медным охлаждающим диском и воздухом, в ленте формируются внутренние напряжения, плоскости действия сдвиговых напряжений которых направлены под углом к поверхности так, как это показано на рис. 3. Напряженное состояние у индентора таково [3], что у одних граней направление сдвиговых напряжений совпадает с направлением этих напряжений в аморфной ленте, а у других — нет. Такая ситуация возможна только у граней 3 и 4. Поэтому у этих граней и облегчен процесс формирования полос сдвига типа полуколец. Таким образом, эффект анизотропии пластической деформации изотропных аморфных сплавов объясняется наличием в них внутренних напряжений, влияющих на характер негетерогенной пластической деформации.

Если на одной из поверхностей при получении аморфной ленты температура  $T$ , а на другой —  $T_0$ , то тензор деформации имеет вид [4]:

$$u_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{3} (T - T_0), \quad (1)$$

где  $\alpha_{ik}$  — некоторый тензор второго ранга, симметричный по индексам  $i, k$ .

Согласно подходу Прандтля [5–7] для расчета напряжений в тонкой пластине, сжимаемой равномерно распределенными по ее поверхностям силами, скальвающие напряжения могут быть найдены из соотношения

$$\tau_{xy} = k(H/h), \quad (2)$$

где  $k$  — константа материала;  $H$  — ширина ленты;  $h$  — толщина ленты.

Таким образом, методом локального деформирования поверхности было установлено, что негетерогенная пластическая деформация в аморфных сплавах на основе железа в различных направлениях развивается с разной интенсивностью. Это связано с внутренними напряжениями, сформированными в лентах в процессе их получения.

## Список литературы

- [1] *Верещагин М.Н., Шепелевич В.Г., Остриков О.М., Цыбранкова С.Н.* // Физика металлов и металловедение. 2002. Т. 93. № 5. С. 101–104.
- [2] *Верещагин М.Н., Шепелевич В.Г., Остриков О.М., Цыбранкова С.Н.* // Кристаллография. 2002. Т. 47. № 4. С. 691–696.
- [3] *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
- [4] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
- [5] *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
- [6] *Соколовский В.В.* Теория пластичности. М.: Высш. школа, 1969. 608 с.
- [7] *Савенко В.С., Углов В.В., Остриков О.М., Ходоскин А.П.* // Физика металлов и металловедение. 1998. Т. 85. № 5. С. 96–105.