

УДК 539.213.1 : 548.4

© 1991

СТРУКТУРА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ АМОРФНОЙ СРЕДЫ

В. С. Бойко, Л. Ф. Кривенко, О. В. Черный, А. М. Бовда

Исследуются геометрия полос сдвига и пространственная протяженность пластической зоны, возникающей при микроиндентировании ленты аморфных сплавов $\text{Cu}_{50}\text{Y}_{50}$, $\text{Cu}_{66}\text{Y}_{34}$ и $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$. В сплаве $\text{Cu}_{26}\text{Y}_{74}$, в дифрактограмме которого присутствуют линии, относящиеся к кристаллическим фазам, имеет место хрупкое разрушение. В аморфном сплаве $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ возникновению радиальных полос сдвига предшествует появление круговых полос сдвига при существенно меньших нагрузках. Обнаружено своеобразное запоминание аморфной средой поля деформаций предыдущего нагружения. С помощью пробных отпечатков удается выявить размер пластической зоны R вокруг исходного отпечатка ($R \sim 60$ мкм). В предположении, что на границе пластической зоны внешние напряжения сравниваются с пределом текучести среды σ_T , оценивается величина σ_T ($\sigma_T \sim 10^3$ МПа). Анализируется возможность использования микроиндентирования для получения макроскопических механических характеристик аморфных сред.

Высказанные в свое время предположения о том, что пластическая деформация аморфных сред осуществляется путем перемещения своеобразных линейных дефектов [1, 2], подтверждаются рядом экспериментальных работ. Авторы [3, 4] на основании, в частности, и собственных исследований внутреннего трения аморфных материалов, приходят к выводу, что дислокационный подход наиболее адекватно описывает пластичность этих материалов. В работе [5] показано, что полосы сдвига, обнаруженные авторами при микроиндентировании аморфного сплава $\text{Cu}_{57}\text{Ti}_{43}$ с 10 % Nb, ведут себя как скопления объектов, обладающих дальнедействующими упругими полями и допускающих описание в терминах плоских скоплений дислокаций.¹ Возникновение полос сдвига при локальном нагружении сферическим индентором и индентором Виккерса металлического стекла $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$ наблюдалось в [7]. Показано, что при этом под поверхность образуются обширные зоны пластической деформации. Вынос материала из-под индентора происходит по криволинейным траекториям, близким к траекториям максимальных скалывающих напряжений.

В данной работе исследуются геометрия полос сдвига и пространственная протяженность пластической зоны, возникающей при микроиндентировании аморфной среды. Наблюдались полосы сдвига с различными траекториями развития. Обнаружено своеобразное влияние пластической зоны на траектории полос сдвига, образующихся при повторном нагружении. При выборе объекта исследования учитывалось, что представляет интерес задача изучения возможности использования аморфных сплавов для получения высокотемпературных сверхпроводников. Благодаря высокой степени перемешивания атомов разного сорта аморфные ленты представляются идеальной «подложкой» для изготовления высокотемпературных сверхпроводников путем контролируемого окисления.

¹ Заметим, что к такому же выводу приводит и модель формирования полос сдвига в аморфных материалах, рассмотренная в дальнейшем в работе [6].

Для исследования были выбраны аморфные сплавы $\text{Cu}_{26}\text{Y}_{74}$, $\text{Cu}_{50}\text{Y}_{50}$, $\text{Cu}_{66}\text{Y}_{34}$, которые используются в этих целях (толщина ленты 20—90 мкм, ширина 0.2 см). Исследовалась также лента аморфного сплава $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ (толщина 30 мкм, ширина 1 см). Локальное нагружение проводилось путем микроиндентирования на приборе ПМТ-3 с использованием алмазной пирамиды при комнатной температуре.

Если в случае сплава $\text{Cu}_{26}\text{Y}_{74}$ микроиндентирование сопровождается образованием микротрещин вокруг отпечатка и полосы сдвига не наблюдаются, то в сплаве $\text{Cu}_{50}\text{Y}_{50}$ веер полос сдвига вокруг отпечатка возникает при нагрузке на индентор $P=1$ Н в 30 % случаев, а в сплаве $\text{Cu}_{66}\text{Y}_{34}$ — в 50 % случаев. Из результатов рентгенофазового анализа следует, что все образцы сплавов $\text{Cu}_{50}\text{Y}_{50}$ и $\text{Cu}_{66}\text{Y}_{34}$ находятся в аморфном состоянии.

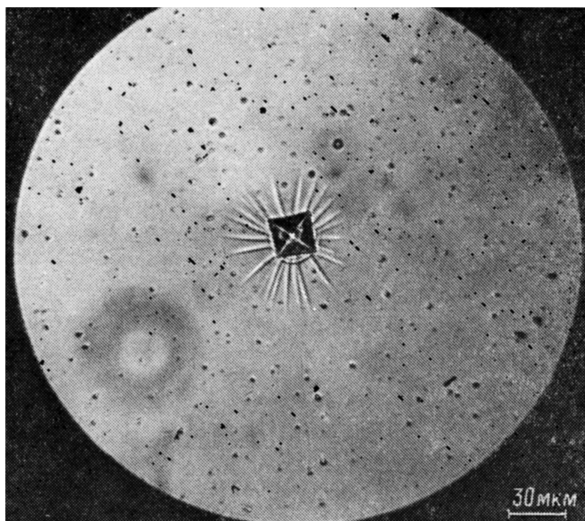


Рис. 1. Поверхность аморфного сплава $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ после микроиндентирования. Вокруг отпечатка алмазной пирамиды видны радиальные и круговые полосы сдвига.

На дифрактограмме сплава $\text{Cu}_{26}\text{Y}_{74}$ наряду с наличием диффузного размытого максимума, характерного для аморфного состояния, присутствуют линии, относящиеся к фазам YCu и Y . Следует также отметить, что и ход кривых зависимости электросопротивления от температуры в сплавах $\text{Cu}_{50}\text{Y}_{50}$, $\text{Cu}_{66}\text{Y}_{34}$ характерен для аморфных металлических сплавов, а в сплаве с большим содержанием иттрия ($\text{Cu}_{26}\text{Y}_{74}$) на соответствующих кривых появляются линейные участки, присущие аморфным сплавам с наличием кристаллической фазы.

Рост хрупкости материала по мере увеличения кристаллической фазы, по-видимому, связан, как это отмечалось в [5], с тем, что вязкость разрушения в аморфном состоянии в несколько раз больше, чем в кристаллическом. (Это, в частности, подтверждается экспериментами по регистрации акустической эмиссии [5]).

В сплаве $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ возникновение радиальных полос сдвига наблюдается при $P \geq 2$ Н практически во всех случаях индентирования. Наиболее интересной особенностью пластической деформации сплава $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ является возникновение не только радиальных, но и круговых полос сдвига (рис. 1). Возникновение круговых полос сдвига происходит при нагрузках, существенно меньших, чем радиальные (для круговых $P=0.5$ Н, тогда как для радиальных $P=2$ Н). Обычно возникают 1—2 круговые полосы; при больших нагрузках диаметр возникающей полосы сдвига больше. При одной и той же нагрузке на индентор наблюдаются отпечатки как с одной, так и с двумя круговыми полосами сдвига. В некоторых случаях вблизи вершины отпечатка при $P=2$ Н можно наблюдать плавный переход от незавершенной круговой полосы сдвига к радиальной.

Образование круговых полос сдвига, по-видимому, является одним из наиболее ярких проявлений принципиального отличия геометрии пластической деформации аморфной среды от кристаллической в случае локального нагружения. В аморфной среде мы наблюдаем прямую связь между тензорами напряжений и деформаций. В кристаллической же среде мы, как правило, имеем дело с участками плоскостей скольжения, определяемыми кристаллографией. Наличие круговых полос сдвига при микроиндентировании — еще одно свидетельство в пользу вывода [7] о криволинейных траекториях выноса материала при сдвигообразовании в аморфной среде. Сами эти траектории скорее всего имеют вид траекторий поля главных касательных напряжений, возникающих вблизи индентора (см. рис. 15, в работы [8]). По-видимому, круговые полосы стартуют из

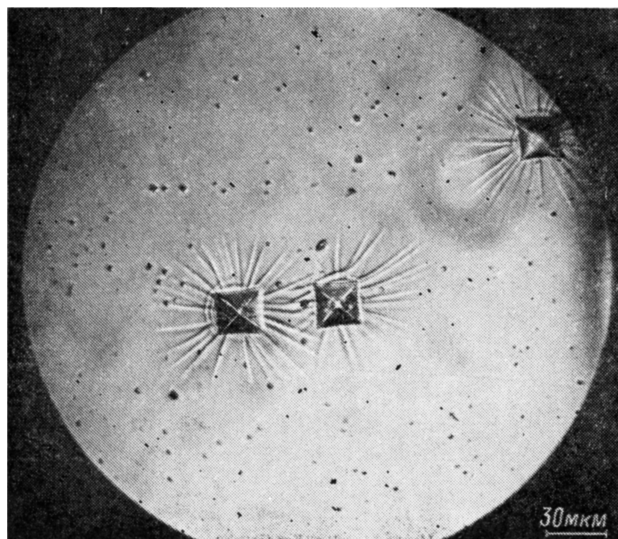


Рис. 2. Полосы сдвига, возникающие вблизи пластической зоны исходного индентора при повторном микроиндентировании аморфного сплава $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$.

Слева — исходный отпечаток, справа — два пробных отпечатка.

областей, непосредственно прилегающих к внедряемому в материал индентору, и по криволинейным траекториям, близким к траекториям главных касательных напряжений, выходят на поверхность. Ясно, что на поверхности одна полоса должна отстоять от другой на расстояние порядка глубины отпечатка. Это и наблюдается в эксперименте.

Наблюдение зависимости траектории полос сдвига от конфигурации внешнего упругого поля позволило надеяться на обнаружение аналогичного влияния внутренних упругих полей, создаваемых пластической зоной вокруг отпечатка индентора. С этой целью проводилось исследование взаимодействия полос сдвига, возникших от различных отпечатков: Вокруг исходного отпечатка наносился ряд «пробных» отпечатков и анализировалось распространение возникающих при этом полос сдвига. Отметим, что никакого изменения в форме и размерах полос сдвига исходного отпечатка при этом заметить не удалось. Этот факт можно трактовать как проявление процессов, аналогичных «старению» дислокаций в кристаллических материалах. Авторы [3] на основании данных внутреннего трения также приходят к выводу о протекании процессов старения дислокаций в аморфной среде.

Наиболее интересной особенностью проведенных наблюдений является обнаружение своеобразного запоминания аморфной средой поля деформаций предыдущего нагружения. При нанесении пробного отпечатка вблизи исходного выявляются полосы сдвига, начальная часть траектории которых направлена радиально по отношению к центру исходного

отпечатка. Затем происходит искривление траектории полосы, в результате чего она ставится радиально направленной по отношению к центру «пробного» отпечатка (рис. 2). По-видимому, при индентировании возникает пластическая зона, только некоторая часть которой сосредоточена в визуально регистрируемых полосах сдвига. К подобному же результату приводит исследование пластической зоны с помощью послойного сравнения [7].

Выявление с помощью пробных отпечатков исходного поля деформаций, вызванного предыдущим нагружением, позволяет оценить характерный размер связанной с ним пластической зоны. Оказалось, что начиная с некоторого расстояния ($R > 60$ мкм) не наблюдалось изменения траекторий вновь возникающих полос сдвига, т. е. размер пластической зоны вокруг отпечатка индентора $R \approx 60$ мкм (размер половины диагонали отпечатка ~ 15 мкм). Можно предположить, что на границе пластической зоны внешние упругие напряжения при локальном нагружении сравниваются с локальным значением предела текучести среды σ_t . Оценивая эту величину как $\sigma_t \sim P/R^2$ [9], получаем, что $\sigma_t \sim 10^2$ МПа. Отметим, что такой же порядок величины имеют стартовые напряжения $\sigma_{ст}$, необходимые для начала движения тех объектов, которые мы называем дислокациями в аморфной среде (об определении $\sigma_{ст}$ см. [5]). Это неудивительно, поскольку, как отмечено в [6], в неоднородном режиме пластического деформирования эти напряжения совпадают.

Таким образом, суммируя результаты, полученные в [5] и в данной работе, отметим, что имеется возможность с помощью микроиндентирования определить такую макроскопическую механическую характеристику аморфной среды как предел текучести. Во-первых, по данным о нагрузке и длине радиальной полосы сдвига $\sigma_{ст} \sim P/Ld$ (d — диаметр отпечатка); во-вторых, по определению размеров пластической зоны R с помощью пробных отпечатков для проведения оценки $\sigma_t \sim P/R^2$.

Пользуемся случаем выразить признательность В. З. Бенгусу, Ю. С. Боярской, Н. А. Тяпуниной и их сотрудникам за полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Gilman J. J. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 2. P. 675—679.
- [2] Gilman J. J. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 4. P. 1625—1633.
- [3] Золотухин И. В., Белявский В. И., Хоник В. А., Рябцева Т. Н. // ФММ. 1989. Т. 68. № 1. С. 185—191.
- [4] Белявский В. И., Хоник В. А., Рябцева Т. Н. // Металлофизика. 1989. Т. 11. № 3. С. 106—111.
- [5] Бойко В. С., Кривенко Л. Ф., Черный О. В., Бовда А. М. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 9. С. 2841—2843.
- [6] Овидько И. А. // ФММ. 1989. Т. 67. № 4. С. 649—654.
- [7] Donovan P. E. // J. Mater Sci. 1989. V. 24. N 2. P. 523—535.
- [8] Evans A. G., Wilshaw T. R. // Acta Met. 1976. V. 24. N 10. P. 939—956.
- [9] Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 224 с.

Харьковский
физико-технический институт АН УССР

Поступило в Редакцию
21 июня 1990 г.