

3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. // Деформация и разрушение материалов. - 2010. № 1. - С. 38.
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Скородумов С.В. // Изв. Вузов. Черн. Мет.–2010.– № 11. С. 35.
5. Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А., Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Чернобаева А.А., Кузько Е.И., Хорева Е.Г. // Изв. Вузов. Черн. Мет.–2009.–№ 9.–С. 23.
6. Никулин С.А., Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Ли Э.В., Кузько Е.И., Салихов Т.Ш., Арсенкин А.М. // Металлург.–2011.–№ 10.–С.72.

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МНОГОКОМПОНЕНТНОГО АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА

Ушаков И.В., Сафронов И.С., Людчик О.Р. \*\*

*Московский государственный горный университет, г. Москва, РФ,*  
[ushakoviv@mail.ru](mailto:ushakoviv@mail.ru)

*Тамбовский государственный университет им. Г.П. Державина, г. Тамбов, РФ*  
[safronovfamili@rambler.ru](mailto:safronovfamili@rambler.ru)

\*\* *Белорусский государственный университет, г. Минск.*  
[lvudchik@tut.by](mailto:lvudchik@tut.by)

### Аннотация

Экспериментально исследован характер деформирования и разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллического металлического сплава подвергнутого обработке импульсным лазерным излучением. Выявлена специфика развития разрушения инициированного локальным нагружением в области лазерной обработки и на ее границе. Показана возможность одновременного повышения пластичности и микротвердости на границе зоны лазерной обработки.

Аморфные и аморфно-нанокристаллические металлические сплавы являются перспективными материалами с уникальным набором физических и химических свойств. Получение таких материалов происходит в результате быстрой закалки из расплава и последующей обработки. Данные материалы могут обладать рядом полезных эксплуатационных характеристик, например: высокой магнитной проницаемостью, околонулевой магнитострикцией, высокой твердостью и пр. [1]. В то же время комплекс свойств аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов не является оптимальным. В результате лазерной обработки удастся обеспечить оптимизацию механических характеристик аморфно-нанокристаллического металлического сплава [2]. Целью данной работы является изучение особенностей изменения механических свойств и закономерностей разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллических металлических сплавов в результате импульсной лазерной обработки.

### Методика эксперимента

Исследования проводили на аморфном металлическом сплаве  $Co_{71,66}V_{4,73}Fe_{3,38}Cr_{3,14}Si_{17,09}$  (Ашинский металлургический завод). Для перевода материала в аморфно-нанокристаллическое состояние, образцы подвергали печному отжигу в температурном интервале 703-923 К.

Отожженные образцы наносили на полимерную подложку с металлическим основанием. В качестве полимерной подложки использовали полиэфирную шпатлевку со стекловолокном. Микротвердость подложки  $\approx 3,6 \times 10^8$  Па. Подложка достаточно пластична и упруга, что исключает разрушения при надавливании пирамидкой и обеспечивает возможность восстановления после снятия значительной нагрузки. Методика подготовки образцов и механических испытаний подробно описана в [3].

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-2. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, в исследуемых образцах присутствует нанокристаллическая составляющая, подробно структура исследуемых образцов описана в [4].

Использовали оптический квантовый генератор ELS-01 (LotisTII). Технические характеристики:  $\lambda = 1064$  нм, энергия импульса излучения 50–100 мДж,  $\tau \approx 15$ –20 нс, диаметр пятна на поверхности непрозрачных материалов 50–500 мкм, частота следования импульсов  $\nu = 1$ –50 Гц. Скорость движения облучаемого образца  $10^{-2}$  м/с. Механические испытания осуществляли на микротвердомере ПМТ-3.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

При одиночном воздействии лазерного импульса образуется округлая оплавленная зона, при движении образца получают наложенные друг на друга округлые области. Серия лазерных импульсов формирует на движущейся поверхности образца зону из оплавленных областей образующих в совокупности зону лазерной обработки шириной 480 мкм и длиной до 10 мм. Расстояние между наплавами в зоне составляет  $\approx 175$  мкм.

Образец подвергали локальному нагружению пирамидкой Виккерса. Микроинdentирование проводили непосредственно в зоне облучения и за ее пределами (на исходном материале) на расстоянии до 800 мкм от центра зоны облучения. Сила надавливания индентора на образец, при определении микротвердости, составляла 0,98 Н. Для определения характера разрушения нагрузку увеличивали до 2,94 Н.

Выявлены закономерности разрушения образца и формирования трещин в области лазерного отжига, на краю области обработки и в исходном материале. Трещины формируются преимущественно за пределами зоны обработки и на ее границе. Внутри зоны вероятность формирования трещин мала.

Трещины, формирующиеся в зоне облучения, являются кольцевыми, их размер приблизительно равен диагонали отпечатка, на рисунке 1 показана трещина характерная для разрушения в зоне облучения.

При микроинdentировании образца на границе зоны облучения происходит формирование трещин другого характера. В частности, развиваются трещины огибающие область разрушения, которые могут образовывать кольцевые трещины. Возможно формирование спиралевидных трещин.

Развитие трещин возникающих при инdentировании границы зоны облучения имеет свои особенности. Трещина зарождается в одной из вершин диагоналей отпечатка, развиваясь по его периметру. Дойдя до границы зоны облучения, трещина останавливается. Указанные разрушения возникают в случае повышенной энергоемкости разрушения материала в области остановки трещины, что может быть связано как с изменением структуры материала, так и с наплавом материала в результате выдавливания расплавленного вещества из области облучения на край зоны обработки. На границе зоны облучения микротвердость имеет максимальное значение в среднем на 10–15% больше, чем микротвердость в исходном материале равная 11–13 ГПа (в зависимости от температуры отжига).



Рис. 1. Разрушение в центральных областях зоны облучения. Нагрузка на индентор 2,94 Н. Стрелкой показана трещина



Рис. 2. Характер развития трещин на границе зоны облучения. Нагрузка на индентор 2,94 Н. Черные стрелки указывают на остановившиеся трещины. Белой стрелкой указана граница зоны облучения (ширина границы зоны облучения может достигать 25-30 мкм)

За пределами зоны облучения, где материал не затронут непосредственным контактом с лазерным излучением, происходили обширные разрушения в месте надавливания индентором с образованием большой и развитой системы трещин. Пластичность материала в данной области очень мала, в то же время микротвердость имеет значение близкое к максимальному. В данных областях возможно возникновение трещин развивающихся на расстоянии до 600 мкм вдоль линии отжига.

#### Выводы

1. Лазерная обработка дает возможность оптимизировать механические характеристики аморфно-нанокристаллического металлического сплава за счет увеличения пластичности материала и увеличения микротвердости на границе зоны облучения.
2. Формирование разрушения инициированного в исходном материале на расстоянии 100–300 мкм от области облучения имеет специфику связанную с ориентацией формирующихся макротрещин вдоль области лазерной обработки, что связано с полем меха-

нических напряжений возникающем в результате эволюции структуры и формирования наплава материала.

3. Показана возможность получения «композиционной структуры» — объединение наплава пластичного материала с твердым, хрупким аморфно-нанокристаллическим металлическим сплавом, что и приводит к локальному повышению микротвердости и пластичности.

#### Список литературы

1. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.
2. Ушаков И.В. Импульсная лазерная обработка материалов содержащих неоднородные нано- и микрообласти // Тяжелое машиностроение. 2010 г. № 8. С. 34-37.
3. Ушаков И.В., Поликарпов В.М. / Механические испытания тонких лент металлического стекла инденторами различной геометрической формы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 69. № 7. С. 43-47.
4. Kalabushkina A.E., Ushakov I.V., Polikarpov V.M., Titovets Y.F. / Revealing of qualitative correlation between mechanical properties and structure of amorphous-nanocrystalline metallic alloy 82K3XCP by microindentation on substrates and x-ray powder diffraction // Proc. SPIE. 2007, v. 6597. P. 65970P1-65970P6.

### О ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СТРУКТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ

Никифоренко В.Н.

*Институт измерительной техники «Циклон», г. Харьков*  
[iitevcclone@ukr.net](mailto:iitevcclone@ukr.net)

Локальные зоны, возникающие при деформации твердого тела на различных структурных уровнях, полностью определяют метастабильность его физических свойств [1-4]. В частности, структурная неустойчивость, наблюдающаяся при этом, может сопровождаться аннигиляцией дислокаций [1] и квантовым гравитационным взаимодействием [2] на дислокационно-ядерном наноуровне [4].

В связи с повышенной локализацией наблюдаемых явлений на наноуровне возможно изменение энергии внутри дислокационных ядер, которое находит свое отражение при исследовании нелинейностей электропроводности и, в том числе, микроконтактных спектров (МКС) монокристаллов цинка.

Отличительной особенностью МКС, обусловленных дипольными гексагональными сетками дислокаций (спектр 1, 2), являются в первую очередь аномалии, наблюдающиеся при энергии  $E_d = 1,5\text{мэВ}$  [5] и характеризующиеся частотой колебаний  $\omega_0 = 3,5 \cdot 10^{11}\text{Гц}$ , близкой к параметру сверхтонкого расщепления  $\nu_0 = 2 \cdot 10^{11}\text{Гц}$ , определенному в работах [6,7]. Частота  $\nu_0$  жестко связана с временем жизни позитрона ( $e^+$ ), источником которого могут быть дислокационные ядра.

Отсюда следует предположение о существовании в локализованной зоне, вероятных, связанных электрон-позитронных ( $ee^+$ ) состояний, движение и взаимодействие которых, может отразиться на аномалиях МКС при  $T \rightarrow 0$ . Поскольку  $e^+$  является первоосновой антивещества, то, очевидно, представляет интерес исследование поведения пар  $ee^+$ , результатом которого могут быть опыты по неустойчивости МКС с гексагональными дислокационными сетками [8]. При этом изменение энергии в дислокационных ядрах может происходить путем квазисвободных соударений позитрона и электрона. Так как, аномалии