

УДК 539.2

ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОГО АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© И.В. Ушаков

Ushakov I.V. Formation of mechanical characteristics of thin amorphous-nanocrystalline metallic alloy by im-pulse laser radiation. The article examines the regularities of mechanical properties optimization of thin amorphous-nanocrystalline metallic alloys by impulse laser radiation. The features of plasticity increasing of amorphous-nanocrystalline metallic alloys have been experimentally determined. The possibility of selected laser treatment of inhomogeneous nanoareas in thin amorphous-nanocrystalline metallic alloys have been discussed.

Аморфно-нанокристаллические металлические сплавы являются перспективными материалами, находящими все более широкое практическое применение [1–3]. В то же время, комплекс характеристик таких материалов не является оптимальным, а следовательно, аморфно-нанокристаллические металлические сплавы нуждаются в дополнительной обработке [4, 5]. Известно, что аморфно-нанокристаллические материалы, получаемые контролируемой кристаллизацией из аморфного состояния, могут иметь высокие значения микротвердости. К сожалению, высокая микротвердость таких материалов может сочетаться с околонулевой пластичностью. Как следствие, такие материалы нуждаются в дополнительной обработке, позволяющей повысить пластические характеристики материала без значительного снижения микротвердости.

Существенным требованием к технологии обработки аморфно-нанокристаллических материалов является возможность проводить обработку материала без разрушения наноструктурного состояния.

В настоящее время известно, что использование лазерного излучения позволяет реализовать уникальные режимы обработки, с возможностью выборочного воздействия на разнообразные дефекты. В работах [6–11] отмечается, что лазерный луч, с его энергетическими, спектральными, пространственными и временными характеристиками может использоваться для эффективного управления самыми разнообразными процессами в твердом теле. Для большой совокупности процессов оказывается возможным подобрать режим воздействия, позволяющий избирательно влиять на процессы в твердом теле и создавать многочисленные сложные структуры. В твердом теле, при различных параметрах облучения в результате самоорганизации возникает последовательный ряд сменяющих друг друга форм. В нем существует сложная система взаимосвязей, нелинейных взаимодействий, обратных связей, неустойчивостей, включающая в себя огромный объем информации.

Особенность лазерного луча в том, что он может нести большой объем информации, необходимый для включения тех или иных процессов. Каждый элемент

структуры, каждая система дефектов имеет свои особенности, свои каналы воздействия, что открывает возможности получения структур с заданными свойствами.

Лазерное формирование свойств дефектных областей в массивных непрозрачных материалах возможно за счет косвенных воздействий. Для непрозрачных материалов, размер которых хотя бы в одном направлении достаточно мал (наночастицы, тонкие пленки), возможности прямой лазерной обработки достаточно велики. Для таких материалов возможно сочетание прямого и косвенного воздействия лазерного излучения.

Таким образом, в полной мере реализовать возможности селективной лазерной обработки возможно на материале, размер которого хотя бы в одном направлении достаточно мал.

Целью работы явилось исследование закономерностей оптимизации механических свойств тонких аморфно-нанокристаллических металлических сплавов импульсным лазерным излучением наносекундного диапазона.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование проведено на аморфном металлическом сплаве толщиной 30 мкм и следующего состава (83,7 % Co + 3,7 % Fe + 3,2 % Cr + 9,4 % Si (вес.%)). Перед испытанием образцы переводили в аморфно-нанокристаллическое состояние с использованием печного отжига при температурах до 1150 К [12]. Отжиг проводили как в атмосфере, так и в вакуумной установке в остаточной среде аргона, скорость нагрева и охлаждения образцов ≈ 5 мин.

Лазерную обработку образцов аморфного и аморфно-нанокристаллического металлического сплава осуществляли с использованием следующих оптических квантовых генераторов (ОКГ): (1) ОКГ ELS-01, $\nu_{\text{имп}}$ до 50 Гц, $\lambda = 1064$ нм, $E_{\text{имп}} = 50\text{--}100$ мДж, $\tau \approx 15\text{--}20$ нс, ОКГ ELS-03, $\lambda = 532$ нм, $\nu_{\text{имп}}$ до 100 Гц, $\tau \approx 15\text{--}20$ нс, $E_{\text{имп}} \approx$ от 15 до 20 мДж. Установка LS 2137, $\lambda = 1064$ нм,

$E_{\text{имп}} \approx 250$ мДж, $\tau \approx 0,5 - (15-17)$ нс. Используемая техника обеспечивала получение импульсов длительностью $\approx 20-30$ наносекунд и плотностью мощности до 10^{12} Вт/см². Использование лазерных импульсов наносекундной длительности обусловлено тем, что при использовании импульсов большей длительности не удастся осуществить выборочной обработки аморфной и нанокристаллической составляющей [13]. Определение пластических свойств осуществляли как традиционным *U*-методом, так и с помощью метода локального нагружения [14, 15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важной особенностью импульсного лазерного излучения является возможность осуществления контролируемого по времени и распределению температуры отжига тонкого аморфного и аморфно-нанокристаллического металлического сплава, с малой границей между исходным и обработанным материалом [13, 16]. Использование наносекундных импульсов позволяет реализовать новые режимы воздействия с возможностью выборочной обработки структуры на наноуровне. Обработка предварительно отожженных образцов, в зависимости от параметров излучения, может приводить к избирательной обработке нано-областей материала.

Использование наносекундных импульсов позволяет увеличить точность обработки, осуществлять обработку поверхностных слоев ленты аморфно-нанокристаллического металлического сплава. Установлено, что лазерная обработка образцов импульсами наносекундной длительности, подвергнутых предварительной термической печной обработке, приводит к изменению микротвердости и пластичности. Даже при использовании импульсов миллисекундной длительности граница между модифицированным и исходным материалом в пределах точности механических испытаний составляет порядка десятка микрометров [13, 16]. Использование импульсов наносекундной длительности позволяет уменьшить границу между исходным и модифицированным материалом как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Толщина прогретого слоя в вертикальном направлении, по толщине образца, по литературным данным, составляет 10–20 мкм [17–19]. При использовании наносекундных импульсов отсутствует долгосуществующая плазма, основными модифицирующими факторами является термический прогрев и ударная волна.

Используя лазерное импульсное облучение образцов аморфного металлического сплава, можно осуществлять локализованную, контролируемую по времени (десятки наносекунд) и распределению температуры (до единиц микрометров) обработку аморфного металлического сплава, с малой границей между исходным и обработанным материалом.

Согласно современным представлениям, аморфный металлический сплав в условиях печного отжига проходит сложные стадии кристаллизации. В работах [20–23] отмечается, что в зависимости от конкретных условий, таких как скорость нагрева и температура отжига, в одном и том же сплаве может наблюдаться образование разных кристаллических фаз. Причем кристаллиза-

ция обычно протекает с образованием одной или нескольких метастабильных фаз. В результате отжига аморфного сплава возможно формирование нанокристаллического материала, с размером зерен в десятки нанометров, разделенных аморфной фазой. Такое строение объясняет многие физические свойства сплава (например, микротвердость, термическую стабильность).

Согласно имеющимся результатам рентгеноструктурных исследований используемый в данной работе аморфный металлический сплав после печного отжига приобретает аморфно-нанокристаллическую структуру. Экспериментально установлено, что из исследуемого аморфного сплава при отжиге формируется нанокристаллический материал, с размером зерен в десятки нанометров, разделенных аморфной фазой [24].

В результате лазерной обработки, сопровождающейся кратковременным повышением температур до 2000–5000 К, формированием значительных механических напряжений и шокового давления до 100 Кбар, происходит эволюция нанокристаллов и разделяющей их аморфной матрицы. Под влиянием схожих условий воздействия (ударная волна, кратковременное повышение температуры) аморфная матрица и нанокристаллы претерпевают различные изменения. Энергетически выгодная структура нанокристаллов претерпевает меньшие преобразования. Обработка затрагивает в первую очередь аморфную матрицу, вызывая, с одной стороны, изменения структуры материала, а с другой – способствуя снижению механических напряжений, аннигиляции дефектов на границе аморфного и нанокристаллического материала. Подтверждением предложенного механизма могут служить данные рентгеноструктурного анализа. Рентгенограммы аморфно-нанокристаллического материала до и после лазерной обработки, приводящей к двух-трехкратному возрастанию пластических свойств, определяемых методом локального нагружения [15], при сохранении высокой микротвердости остаются практически неизменными, фиксируя неизменное состояние нанокристаллической составляющей.

Таким образом, реализовать возможности селективной лазерной обработки возможно на сплаве, переведенном методом печного отжига в аморфно-нанокристаллическое состояние. Наличие термостабильной аморфной матрицы создает предпосылки для лазерного модифицирования [24]. Максимальное значение микротвердости достигается при температурах отжига $T_1 \approx 770$ К и $T_2 \approx 925$ К. Оптимальные результаты получены при последовательной сканирующей обработке образца импульсами наносекундной длительности на ОКГ ELS-01 и ELS-03, при использовании пятна облучения с диаметром 0,1–0,2 мм. Максимально отмеченное увеличение пластических характеристик для T_1 в два-три раза, для T_2 – примерно в три раза, при практически неизменном значении микротвердости (рис. 1).

Режимы лазерной обработки необходимо подбирать в зависимости от предварительной печной термообработки. Физический механизм повышения пластических свойств может быть также связан с особенностями многократной сканирующей обработки. Обработка поверхности некоторых образцов осуществлялась в несколько проходов. При обработке в первый

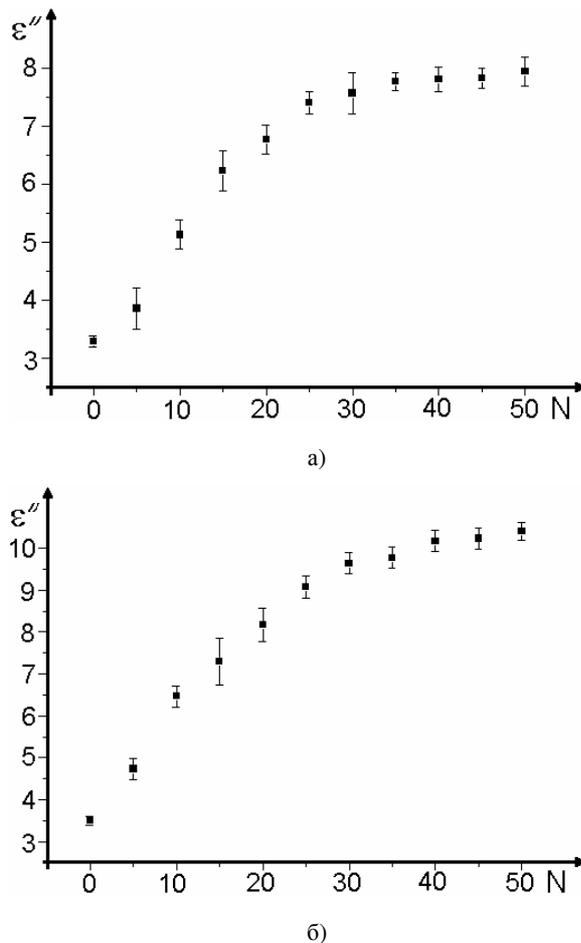


Рис. 1. Пластическая характеристика ϵ'' (относительные единицы) после N циклов сканирующей обработки: а) увеличение ϵ'' для температуры отжига $T_1 = 770$ К (первый максимум микротвердости); б) для $T_2 = 925$ К (второй максимум микротвердости)

проход на поверхности формировалась матрица облученных участков «сот». При втором проходе облучали пропущенные и пограничные участки. В результате при испытании локальным нагружением формирующиеся трещины имеют сложную траекторию, отличную от прямой и соответственно более длинную. В результате увеличивается энергоемкость разрушения материала, затрудняется хрупкое разрушение, и повышаются пластические характеристики материала.

Таким образом, использование лазерных технологий при обработке аморфных и аморфно-кристаллических наноматериалов дает дополнительные возможности управления структурой и свойствами таких материалов благодаря разному воздействию излучения на аморфную и нанокристаллическую составляющую, принципиально отличая возможности печной и лазерной обработки тонких аморфно-нанокристаллических металлических сплавов.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследованы основные закономерности селективной лазерной обработки аморфно-нанокристаллического металлического сплава, с термо-

стабильной аморфной матрицей, заключающиеся в преимущественном воздействии лазерного излучения на аморфную матрицу. Обсуждена методика контролируемого перевода исходно аморфного металлического сплава в нанокристаллическое состояние и методика последующего лазерного модифицирования. Показано, что избирательность лазерной обработки аморфно-нанокристаллического материала импульсами наносекундной длительности обусловлена различным влиянием комплексного воздействия ударной волны и кратковременного повышения температуры на нанокристаллическую и аморфную составляющие.

2. Установлено, что при лазерной обработке аморфно-нанокристаллического металлического сплава серией импульсов наносекундной длительности возможна избирательная обработка аморфных прослоек, увеличивающая их пластические свойства, при практически неизменном значении механических характеристик нанокристаллов. Результатом обработки является двух-трехкратное возрастание пластических характеристик, при сохранении максимального значения микротвердости.

3. Экспериментально установленная возможность избирательного воздействия лазерного излучения на наноразмерные дефектные области в тонком аморфно-нанокристаллическом металлическом сплаве демонстрирует возможность целенаправленного подбора параметров лазерного излучения с целью оптимизации обработки неоднородных наноразмерных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Аморфные металлические сплавы // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 9. С. 75–110.
2. Андриевский Р.А. Получение и свойства нанокристаллических тугоплавких соединений // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 5. С. 431–448.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, получаемые интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000.
4. Гуткин М.Ю., Овдийко И.А. Физическая механика деформируемых наноструктур: Т. 1. Нанокристаллические материалы. СПб.: Янус, 2003.
5. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
6. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3–32.
7. Бахарев М.С., Миркин Л.И., Шестериков С.А., Юмашева М.А. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
8. Иванов А.А., Алфимов М.В., Желтиков А.М. Фемтосекундные импульсы в нанопотонике // УФН. 2004. Т. 174. № 7. С. 743–763.
9. Емельянов В.И., Еремин К.И. Самоорганизация связанных температурно-деформационных полей на поверхности твердых тел, облучаемых лазером // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 2. С. 154–158.
10. Александров А.П., Бабин А.А., Киселев А.М. Формирование микроструктур в As_2S_3 последовательно фемтосекундных лазерных импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 5. С. 398–400.
11. Вережкин Ю.К., Дауме Э.Я., Петряков В.Н., Гуцин Ю.Ю., Тихов С.В. Самоорганизация нанометровых островков на поверхности монокристаллов кремния и арсенида галлия, стимулированная пространственно-периодическим лазерным излучением // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 17. С. 83–88.
12. Kalabushkin 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. 174–179.
13. Ушаков И.В. Особенности импульсной лазерной обработки аморфного металлического сплава 82K3XCP с разной начальной температурой // Вестн. Тамб. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2007. Т. 12. Вып. 2. С. 163–167.
14. Ушаков И.В., Федоров В.А., Пермякова И.Е. Определение пластичности металлического стекла микроиндентированием на под-

- ложках // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 7. С. 43–47.
15. 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.
 16. Ушаков И.В. Закономерности локального деформирования и разрушения тонких лент металлического стекла 82К3ХСР при импульсной лазерной обработке // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 24–28.
 17. Садовский В.Д., Счастливцев В.М., Табачникова Т.И., Яковлева И.Л. Лазерный нагрев и структура стали. Свердловск: УрО АН СССР, 1989.
 18. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. М.: Изд-во МГУ, 1975.
 19. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
 20. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Зверькова И.И., Гуров А.Ф., Кирьянов Ю.В. Образование, структура и микротвердость нанокристаллических сплавов Ni-Mo-W // ФТТ. 1998. Т. 40. № 1. С. 10–16.
 21. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Зверькова И.И., Гуров А.Ф., Кирьянов Ю.В., Молоканов В.В. Начальные стадии распада аморфной фазы в массивном металлическом стекле Cr-Cu-Ti // ФТТ. 1999. Т. 41. № 7. С. 1129–1133.
 22. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Игнатьева Е.Ю. Метастабильная фаза, образующаяся при кристаллизации аморфного сплава Ni₇₀Mo₁₀P₂₀ // ФТТ. 2006. Т. 48. № 1. С. 114–119.
 23. Akhista Inouse. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys // Acta materialia. 2000. V. 48. P. 279–306.
 24. Ушаков И.В., Калабушкин А.Е., Поликарпов В.М., Тимовец Ю.Ф. Взаимосвязь между механическими характеристиками и структурным состоянием аморфно-нанокристаллического металлического сплава 82К3ХСР, выявляемая микроиндентированием на полимерных подложках и рентгеноструктурным анализом // Деформация и разрушение материалов: тр. 1-й междунар. конф. DFM2006. М., 2006. Т. 1. С. 408–410.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Автор признателен доц. О.Р. Людчику за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-01-00215.

Поступила в редакцию 24 ноября 2007 г.