



Получено: 25.12.2024 г. | Принято: 29.12.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.30.38>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНОГО ПРОВОДА Со-СПЛАВА 84КХСР ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Е.В.Гладких¹, к.ф.-м.н., науч. сотр., ORCID: 0000-0001-8273-3934

Г.Х.Султанова^{1, 2}, мл. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-4770-5724

А.А.Русаков¹, мл. науч. сотр., ORCID: 0000-0001-5702-1353

А.С.Усеинов³, к.ф.-м.н., зам. дир., ORCID: 0000-0002-9937-0954 / useinov@mail.ru

В.В.Молоканов⁴, к.т.н., вед. науч. сотр., ORCID: 0000-0003-4664-463X

А.В.Крутилин⁴, мл. науч. сотр., ORCID: 0000-0003-4223-6890

Н.А.Палий⁴, ст. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-1334-6014

Аннотация. Проведено исследование пространственного распределения механических свойств в "толстом" аморфном проводе Со-сплава 84КХСР. Конусный образец аморфного провода переменного диаметра (70–300 мкм) получен методом Улитовского-Тейлора за счет изменения скорости вытяжки в процессе получения провода. После удаления стеклянной оболочки и проведения проверки на соответствие структуры провода аморфному состоянию исследовали механические свойства образцов конусного провода диаметром 100 и 270 мкм методом инструментального индентирования. Установлено, что аморфный провод в интервале диаметров 70–300 мкм сохраняет стабильные значения твердости и модуля упругости в поперечном и продольном сечениях. Механические свойства проводов исследованных диаметров также практически не изменяются при перемещении от центра образцов к краю. Полученные данные свидетельствуют о высокой изотропности аморфной структуры провода переменного диаметра. Отмеченные более высокие значения твердости и модуля упругости в образце диаметром 270 мкм ($H=9,8$ ГПа, $E=212$ ГПа) по сравнению с образцом диаметром 100 мкм ($H=8,6$ ГПа, $E=163$ ГПа) могут быть обусловлены более интенсивным формированием кластерной структуры за счет снижения эффективной скорости охлаждения более "толстого" провода. Отмечено, что такие провода могут найти применение для изготовления новых видов медицинского инструмента.

Ключевые слова: "толстый" аморфный провод, инструментальное индентирование, твердость, модуль упругости

Для цитирования: Е.В. Гладких, Г.Х. Султанова, А.А. Русаков, А.С. Усеинов, В.В. Молоканов, А.В. Крутилин, Н.А. Палий. Исследование механических свойств аморфного провода Со-сплава 84КХСР переменного диаметра методом инструментального индентирования. НАНОИНДУСТРИЯ. 2025. Т. 18. № 1. С. 30–38. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.30.38>.

¹ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, г. Троицк, Москва, Россия / National Research Center "Kurchatov Institute" – Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Troitsk, Moscow, Russia

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)", г. Долгопрудный, Россия / Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)", Dolgoprudny, Russia

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина" Российской академии наук, г. Троицк, Москва, Россия / Federal State Institution of Science Institute for High Pressure Physics of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова" Российской академии наук, Москва, Россия / Federal State Institution of Science Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences (Baikov IMET RAS), Moscow, Russia



Received: 25.12.2024 | Accepted: 29.12.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.30.38>

Original paper

MECHANICAL PROPERTIES STUDY OF AMORPHOUS Co-ALLOY 84KHSR VARIABLE DIAMETER WIRE BY INSTRUMENTAL INDENTATION METHOD

E.V.Gladkikh¹, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Researcher, ORCID: 0000-0001-8273-3934

G.Kh.Sultanova^{1, 2}, Junior Researcher, ORCID: 0000-0002-4770-5724

A.A.Rusakov¹, Junior Researcher, ORCID: 0000-0001-5702-1353

A.S.Useinov³, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Deputy Director, ORCID: 0000-0002-9937-0954 / useinov@mail.ru

V.V.Molokanov⁴, Cand. of Sci. (Tech), Leading Researcher, ORCID: 0000-0003-4664-463X

A.V.Krutilin⁴, Junior Researcher, ORCID: 0000-0003-4223-6890

N.A.Palii⁴, Senior Researcher, ORCID: 0000-0002-1334-6014

Abstract. The study of spatial distribution of mechanical properties in a "thick" amorphous wire of Co-alloy 84KHSR has been carried out. A cone sample of amorphous wire of variable diameter (70–300 μm) was obtained by the Ulitovsky-Taylor method by varying the drawing speed during the wire production process. After removing the glass sheath and checking for the conformity of the wire structure to the amorphous state, the mechanical properties of the cone wire samples with diameters of 100 and 270 μm were studied by the instrumental indentation method. It was found that amorphous wire in the range of diameters 70–300 μm retains stable values of hardness and modulus of elasticity in cross and longitudinal sections. Mechanical properties of wires of the studied diameters also practically do not change when moving from the center of the samples to the edge. The obtained data indicate high isotropy of the amorphous structure of the wire of variable diameter. The noted higher values of hardness and modulus of elasticity in the 270 μm diameter sample ($H=9,8$ GPa, $E=212$ GPa) compared to the 100 μm diameter sample ($H=8,6$ GPa, $E=163$ GPa) may be due to a more intensive formation of the cluster structure due to a decrease in the effective cooling rate of the "thicker" wire. It was noted that such wires may find application in the manufacture of new types of medical instruments.

Keywords: "thick" amorphous wire, microwires, instrumented indentation, hardness, elastic modulus

For citation: E.V. Gladkikh, G.Kh. Sultanova, A.A. Rusakov, A.S. Useinov, V.V. Molokanov, A.V. Krutilin, N.A. Palii. Mechanical properties study of amorphous Co-alloy 84KHSR variable diameter wire by instrumental indentation method. NANOINDUSTRY. 2025. Vol. 18. No. 1. PP. 30–38. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.30.38>.

ВВЕДЕНИЕ

Аморфные провода на основе системы Co-Fe-Cr-Si-B имеют уникальный комплекс механических, магнитных, физических и коррозионных свойств [1–5]. Используемый для получения проводов в стеклянной оболочке метод Улитовского – Тейлора [6] позволяет фиксировать аморфное состояние провода при экстремально низких скоростях вытяжки за счет адиабатического сжатия расплава стеклянной оболочкой. При использовании сплавов на основе кобальта, обладающих высокой стеклообразующей способностью, этим методом можно получать протяженные провода

INTRODUCTION

Amorphous wires based on the Co-Fe-Cr-Si-B system have a unique complex of mechanical, magnetic, physical, and corrosion properties [1–5]. The Ulitovsky-Taylor method [6] used to produce wires in a glass sheath makes it possible to fix the amorphous state of the wire at extremely low drawing speeds due to adiabatic compression of the melt by the glass shell. When using cobalt-based alloys with high glass-forming ability, this method can produce long wires with amorphous structure and high mechanical properties in a wide range of diameters from 5 to 300 μm [7, 8]. Moreover, due to the controlled change of drawing speed it is



с аморфной структурой и высокими механическими свойствами в широком диапазоне диаметров от 5 до 300 мкм [7, 8]. Причем за счет контролируемого изменения скорости вытяжки имеется возможность получения аморфного провода с переменным по длине диаметром. Такой провод может представлять большой интерес при изготовлении новых видов медицинских инструментов для эндоваскулярных вмешательств: проводников, микроспиралей, стентов [4]. Аморфные провода больших диаметров на основе Co обладают высоким электрическим сопротивлением ($1,2-1,4 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), высокой прочностью на разрыв (2500–3000 МПа) в сочетании с высокой псевдопластичностью при изгибе. Высокая чувствительность электрического сопротивления аморфного провода к приложенным нагрузкам (коэффициент тензорезистивности K равен 2) в сочетании с высокой прочностью и коррозионной стойкостью открывает хорошие перспективы для использования таких аморфных проводов в качестве стресс-чувствительных элементов ответственных конструкций [8]. Практический интерес отмечен к аморфным проводам диаметром до 70 мкм, используемым для изготовления протяженных тензорезистивных датчиков [9–12]. Интересным представляется возможность изготовления магнитомягких аморфных микроспиралей переменной жесткости диаметром от 20 до 100 мкм [4].

Механические свойства проводов больших диаметров систематически не были исследованы. Для расширения потенциальных областей применения новой группы "толстых" аморфных проводов методом инструментального индентирования проведено исследование влияния напряжений, создаваемых стеклянной оболочкой и принятым способом закалки струи расплава, на уровень и характер распределения механических свойств по сечению и длине конусного аморфного провода модельного сплава 84KXCP с переменным диаметром 100–300 мкм.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изготовления микропровода использовали прекурсор – стержневую заготовку, полученную зонной плавкой, что исключало появление дефектов, внутренних пор и внешних раковин [13]. Образец конусного провода переменного диаметра получали методом Улитовского – Тейлора. Стержневую заготовку диаметром 4 мм Co-сплава 84KXCP подвергали расплавлению в стеклянной трубке

possible to obtain amorphous wires with variable diameter along the length. Such a wire can be of great interest to prepare the new types of medical instruments for endovascular interventions: conductors, microspirals, and stents [4]. Amorphous wires of large diameters based on Co have high electrical resistance ($1.2-1.4 \cdot 10^{-6}$ Ohm·m), high tensile strength (2500–3000 MPa) combined with high bending pseudoplasticity. The high sensitivity of the electrical resistance of amorphous wires to applied loads (strain resistance coefficient K , equals 2) combining with high strength and corrosion resistance opens good prospects for the use of such amorphous wires as stress-sensitive elements of critical structures [8]. Practical interest has been noted in amorphous wires up to 70 μm in diameter used for the fabrication of extended strain gauges [9–12]. The possibility of fabricating magnetically soft amorphous microspirals of variable stiffness with diameters from 20 to 100 μm is of interest [4].

The mechanical properties of large diameter wires have not been systematically studied. In order to expand the potential application areas of a new group of "thick" amorphous wires by the method of instrumental indentation, stresses influence made by the glass shell and the adopted method of melt jet quenching on the level and character of mechanical properties distribution along the cross-section and length of a cone amorphous wire of the model 84KHSR alloy with a variable diameter of 100–300 μm was studied.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

To prepare the microwires, a precursor was used – a rod billet obtained by zone melting, which excluded appearance of defects, internal pores and external sinks [13]. The cone wire sample of variable diameter was obtained by the Ulitovsky-Taylor method. A 4 mm diameter rod billet of 84KHSR Co-alloy was subjected to melting in a glass tube and joint drawing of the melt jet and softened glass on a rotating drum according to the mode ensuring the production of a continuous wire with a diameter of 70 μm with high technological properties. Then the drum rotation speed was sharply reduced to the value ensuring the process of obtaining a wire with a diameter of about 300 microns. The glass shell was mechanically removed from the obtained wire. For the purpose of research, the cone section of the wire obtained during the transition from a diameter of 70 μm to a diameter of 300 μm was cut off. From the obtained wire section, samples near diameters of 100 and 270 μm were cut off for research. The wire sections



и совместной вытяжке струи расплава и размягченного стекла на вращающемся барабане по режиму, обеспечивающему получение непрерывного провода диаметром 70 мкм с высокими технологическими свойствами. Далее резко снижали скорость вращения барабана до значения, обеспечивающего процесс получения провода диаметром около 300 мкм. С полученного провода механически удаляли стеклянную оболочку. Для проведения исследований отрезали конусный участок провода, полученный при переходе от диаметра 70 мкм на диаметр 300 мкм. С полученного участка провода отрезали образцы вблизи диаметров 100 и 270 мкм для проведения исследований. Участки провода вблизи выбранных диаметров успешно прошли технологическую пробу на способность к свободному изгибу на 90 градусов без разрушения. ДСК-анализ образцов провода двух выбранных диаметров, проведенный на дифференциальном сканирующем калориметре Setaram Setsys Evolution, показал наличие двух характерных совмещенных пиков экзоэффектов, отвечающих кристаллизации аморфной фазы. Результаты проверки подтвердили соответствие структуры провода аморфному состоянию на всем интервале диаметров провода, выбранном для исследования механических свойств методом инструментального индентирования.

Для проведения инструментального индентирования готовили срезы образцов аморфного провода двух выбранных диаметров в продольном и поперечном направлениях. Образцы были залиты в эпоксидные шайбы и отполированы при помощи шлифовально-полировального оборудования Tegra Pol-11 (Stuers, Дания).

Шероховатость образцов исследовали при помощи конфокального 3D-профилометра S Neox (Sensofar, Испания). Поле сканирования составляет 113×94 мкм. Использовался источник света с длиной волны 530 нм.

Исследование твердости и модуля упругости образцов аморфного провода осуществляли методом инструментального индентирования с использованием нанотвердомера "НаноСкан-4D" (Россия). Проведены несколько серий измерений с максимальной нагрузкой 10 мН. Использовался индентор с алмазной пирамидой типа Берковича [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения испытаний на нанотвердость, выполняемых с малой нагрузкой, необходима качественная пробоподготовка.

near the selected diameters successfully passed the technological test for ability to bend freely at 90 degrees without fracture. Analysis of the wire samples of two selected diameters, performed on a Setaram Setsys Evolution differential scanning calorimeter, showed presence of two characteristic combined exo-effect peaks corresponding to crystallisation of the amorphous phase. The test results confirmed compliance of the wire structure with the amorphous state over the entire range of wire diameters selected for the study of mechanical properties by the instrumental indentation method.

For instrumental indentation, slices of amorphous wire samples of two selected diameters were prepared in longitudinal and transverse directions. The samples were cast in epoxy washers and polished using Tegra Pol-11 grinding and polishing equipment (Stuers, Denmark).

Roughness of the samples was studied using a confocal 3D profilometer S Neox (Sensofar, Spain). The scanning field is 113×94 μm . A light source with a wavelength of 530 nm was used.

Hardness and modulus of elasticity of amorphous wire samples were studied by instrumental indentation method using NanoScan-4D nanohardness tester (Russia). Several series of measurements with a maximum load of 10 mN were carried out. An indenter with a diamond pyramid of Berkovich type was used [14].

RESULTS AND DISCUSSION

For nanohardness tests performed with low load, a high-quality sample preparation is necessary. The indentation depth should be at least 20 times the surface roughness of the sample [14–16]. The experimentally achieved surface roughness (R_a) after polishing the samples was less than 10 nm. The obtained result confirmed possibility of tool indentation at an indentation depth of 200 nm and more.

A series of prints was obtained by moving the indenter along and across the longitudinal axis of the specimen. Five tracks each with a distance between the prints of 6 μm were applied to the transverse and longitudinal slits of the wire with a diameter of 270 μm . The value of the applied load was 10 mN. Each track consisted of 45 prints, however the outermost ones were discarded due to the close proximity of the fill material which would have affected the measured mechanical property values. The obtained values of hardness and elastic modulus corresponding to the same coordinate along the track were averaged. The results of dependence of average

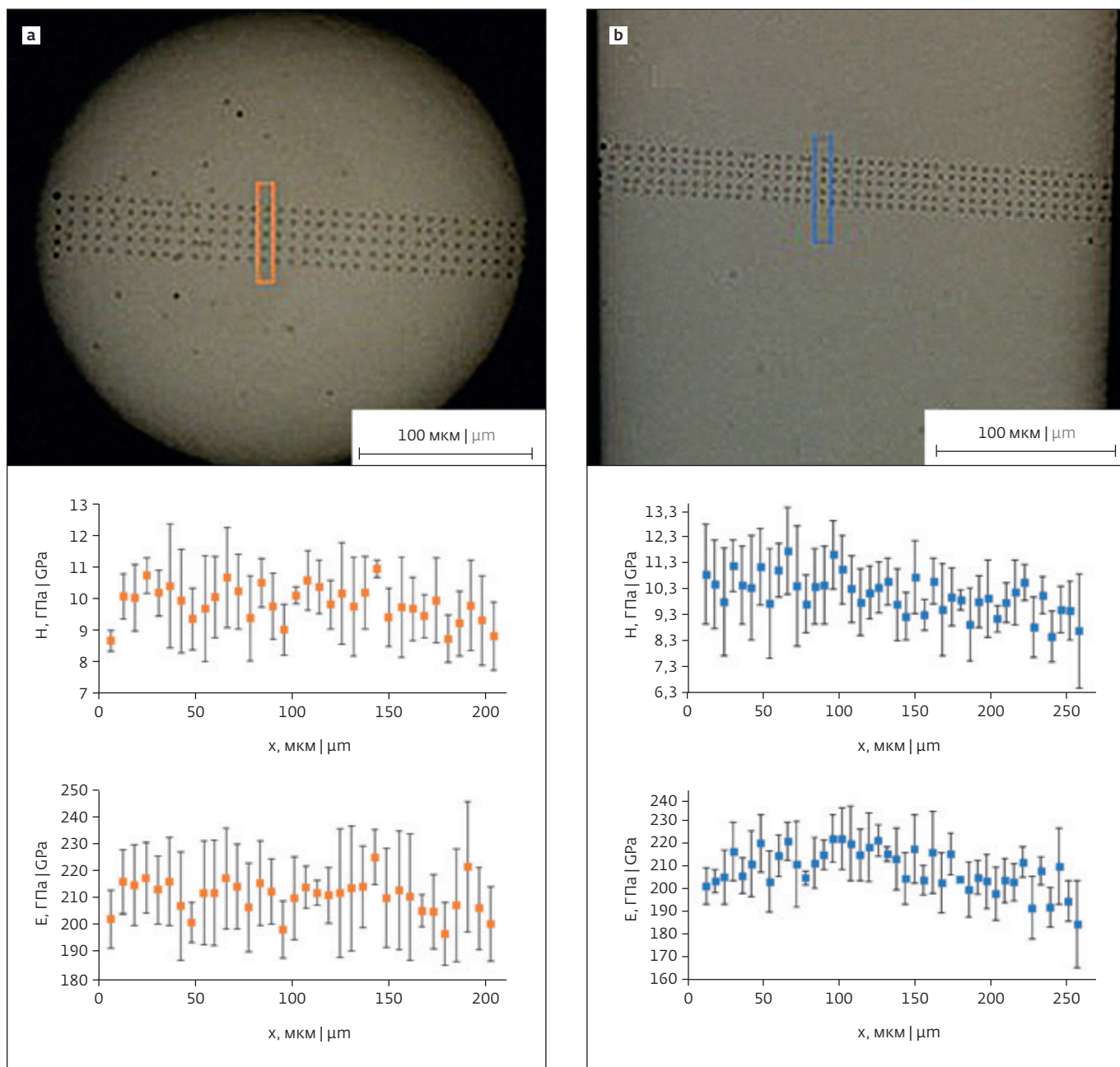


Рис.1. Вид сетки отпечатков от индентора на срезе образца аморфного провода сплава 84КХСР диаметром 270 мкм и распределение значений твердости и модуля упругости слева направо вдоль координаты X: а – поперечный срез; б – продольный срез

Fig.1. Grid view of indenter imprints on a 270 μm diameter amorphous wire sample cut of 84KHSR alloy and hardness and elastic modulus values distribution from left to right along the X coordinate: a – cross cut; b – longitudinal cut

Глубина индентирования должна как минимум в 20 раз превышать шероховатость поверхности образца [14–16]. Экспериментально достигнутая после полирования образцов шероховатость поверхности (Ra) составила менее 10 нм. Полученный результат подтвердил возможность проведения инструментального индентирования при глубине отпечатка 200 нм и более.

values of hardness and modulus of elasticity along the track coordinate are shown in Fig.1. It was found that, taking into account the standard deviation, the obtained values do not depend on the location of the hardness measurement location along the specimen surface for both vertical location of the wire in the casting and horizontal location. This indicates high homogeneity



Серию отпечатков получали при перемещении индентора вдоль и поперек продольной оси шлифа исследуемого образца. На поперечный и продольный шлиф провода диаметром 270 мкм были нанесено по пять дорожек с расстоянием между отпечатками 6 мкм. Величина прикладываемой нагрузки составила 10 мН. Каждая дорожка состояла из 45 отпечатков, однако крайние были отброшены из-за близкого расположения материала заливки, который бы повлиял на измеряемые значения механических свойств. Полученные значения твердости и модуля упругости, соответствующие одинаковой координате вдоль дорожки, усреднялись. Результаты зависимости средних значений твердости и модуля упругости вдоль координаты дорожки приведены на рис.1. Установлено, что с учетом среднеквадратичного отклонения полученные значения не зависят от расположения места измерения твердости вдоль поверхности образца как для вертикального расположения провода в заливке, так и для горизонтального расположения. Это свидетельствует о высокой однородности механических свойств образца аморфного провода диаметром 270 мкм.

Для выявления однородности механических свойств провода диаметром 100 мкм был проведен следующий эксперимент. На поверхности торцевого шлифа провода была нанесена сетка из отпечатков с интервалом 6 мкм (рис.2а). Нагрузка также составляла 10 мН. Полученные значения твердости и модуля упругости были представлены в зависимости от длины радиус-вектора, проведенного из центра торца к периферии. Полагали, что в случае наличия неоднородности механических свойств в зависимости от места нанесения отпечатка значения твердости и модуля упругости в центре и по краям провода были бы различны. Поскольку коэффициент наклона прямых, проведенных на графиках зависимости твердости (рис.2b) и модуля упругости (рис.2c) от радиус-вектора составляет менее 0,5% от величины свободного члена, то можно сделать вывод об однородности механических свойств, измеренных вдоль поперечного сечения провода диаметром 100 мкм. При этом заниженные значения модуля упругости на краях образца связаны с углом наклона края, образующегося при полировке.

На продольном образце провода диаметром 100 мкм выполнена серия измерений, аналогичная той, что была применена для исследования образцов провода толщиной 270 мкм, рис.1а: пять дорожек с расстоянием между

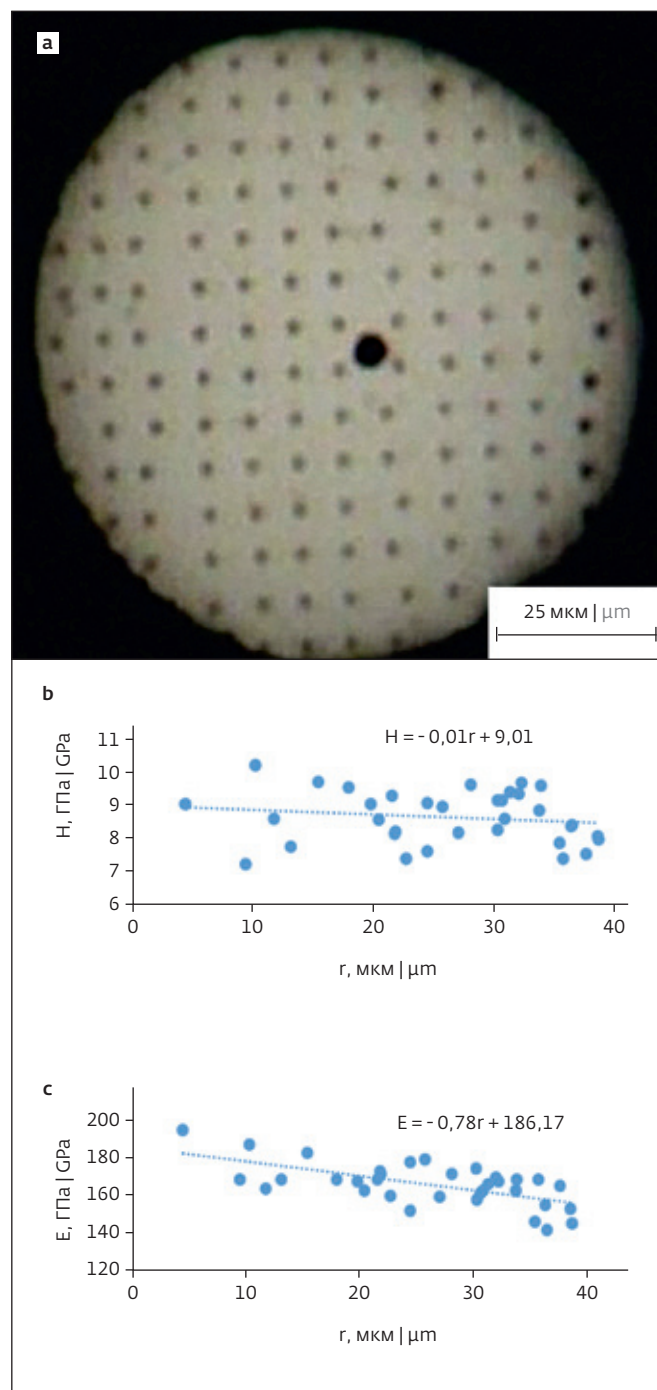


Рис.2. Вид сетки отпечатков от индентора на поперечном срезе образца аморфного провода сплава 84КХСР диаметром 100 мкм (а), распределение значений твердости в зависимости от длины радиус-вектора (b), распределение значений модуля упругости в зависимости от длины радиус-вектора (с)

Fig.2. Grid view of indenter imprints on a cross cut of a 100 μm diameter amorphous wire sample of 84KHSR alloy (a), hardness values distribution as a function of the radius-vector length (b), elastic modulus values distribution as a function of the radius-vector length (c)



отпечатками 6 мкм и приложенной нагрузкой 10 мН.

Результирующие значения твердости и модуля упругости на четырех образцах проводов диаметром 270 и 100 мкм, полученные путем усреднения всех измеренных значений, показаны на рис.3. В пределах погрешности (среднеквадратичного отклонения от среднего) значения как твердости, так и модуля упругости совпадают.

Из представленных результатов следует, что образцы аморфного провода диаметром 100 и 270 мкм сохраняют стабильные значения твердости и модуля упругости в поперечном и продольном сечениях. Механические свойства проводов исследованных диаметров также практически не изменяются при перемещении от центра образцов к краю. Установлено, что образец диаметром 270 мкм имеет более высокую твердость и модуль упругости по сравнению с образцом диаметром 100 мкм (рис.3), что может быть обусловлено более интенсивным протеканием процесса формирования кластеров в расплаве за счет снижения эффективной скорости закалки более "толстого" провода.

На продольном срезе образцов диаметром 100 мкм выполнены серии измерений с нагрузками 1, 2, 5, 10, 20 и 50 мН. Модуль упругости снижался с увеличением глубины индентирования, на малых нагрузках измеренные значения имели большой разброс, связанный с шероховатостью образца (при нагрузке 1 мН глубина индентирования составляет около 100 нм). Поэтому мы считаем, что более низкие значения твердости на данных образцах обусловлены влиянием мягкой эпоксидной смолы, в которую залиты образцы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода инструментального индентирования выполнено исследование влияния напряжений, создаваемых стеклянной оболочкой и принятым способом закалки струи расплава, на уровень и характер распределения механических свойств в коническом аморфном проводе переменного диаметра модельного сплава 84КХСР.

Установлено, что аморфный провод в интервале диаметров 70–300 мкм сохраняет стабильные значения твердости и модуля упругости в поперечном и продольном сечениях. Полученные данные свидетельствуют об изотропности проводов переменного диаметра с аморфной структурой. Более

of mechanical properties of the 270 μm diameter amorphous wire sample.

In order to reveal homogeneity of mechanical properties of a wire with a diameter of 100 μm , the following experiment was carried out. A grid of indentations at 6 μm intervals was applied on the surface of the wire end slit (Fig.2a). The load was also 10 mN. The obtained hardness values and elastic modulus were presented as a function of the length of the radius vector drawn from the centre of the end face to the periphery. It was assumed that in case of heterogeneity of mechanical properties depending on the imprint location, the hardness values and modulus of elasticity in the centre and at the edges of the wire would be different. Since the slope coefficient of the straight lines drawn in the plots of hardness (Fig.2b) and modulus of elasticity (Fig.2c) dependence on the radius vector is less than 0.5% of the value of the free term, it can be concluded that the mechanical properties measured along the cross-section of the wire with a diameter of 100 μm are homogeneous. At the same time, the underestimated values of the elastic modulus at the edges of the specimen are related to the angle of inclination of the edge formed during polishing.

On a longitudinal wire sample with a diameter of 100 μm , a series of measurements similar to that used for the study of 270 μm thick wire samples, Fig.1a, was performed: 5 tracks with a footprint spacing of 6 μm and an applied load of 10 mN.

The resulting values of hardness and modulus of elasticity on 4 wire samples of 270 and 100 μm diameter obtained by averaging all measured values are shown in Fig.3. Within the error limits (standard deviation from the mean), the values of both hardness and modulus of elasticity coincide.

From the presented results, it is observed that the amorphous wire samples with diameters of 100 and 270 μm maintain stable values of hardness and modulus of elasticity in cross and longitudinal sections. Mechanical properties of wires of the studied diameters also practically do not change when moving from the centre of the samples to the edge. It was found that the 270 μm diameter sample has higher hardness and elastic modulus compared to the 100 μm diameter sample (Fig.3), which may be due to a more intensive process of cluster formation in the melt due to decreasing of the effective quenching rate of a thicker wire.

A series of measurements with loads of 1, 2, 5, 10, 20 and 50 mN were performed on a longitudinal slice of 100 μm diameter specimens. The modulus of elasticity decreased with increasing indentation depth; at low loads the measured values



высокие значения твердости и модуля упругости в образце диаметром 270 мкм ($H=9,8$ ГПа, $E=212$ ГПа) по сравнению с образцом диаметром 100 мкм ($H=8$ ГПа, $E=163$ ГПа) могут быть обусловлены более интенсивным протеканием процесса формирования кластеров в расплаве за счет снижения эффективной скорости закалки более "толстого" провода.

Показано, что "толстые" аморфные провода Со-сплава 84КХСР сохраняют высокий уровень прочностных и упругих свойств в широком диапазоне диаметров. Такие провода переменного диаметра могут найти применение при изготовлении новых видов хирургических инструментов для проведения эндоваскулярных вмешательств, инструментов для проведения эндодонтических операций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФГБНУ ТИСНУМ "Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов". Авторы выражают благодарность М.И.Петржику за внимание к работе и ценные замечания при обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00320-24-00.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Qin F., Peng H.X.** Ferromagnetic microwires enabled multifunctional composite materials // Progress in Materials Science. 2013. V. 58. No. 2. PP. 183–259.
2. **Vazquez M.** Advanced magnetic microwires // Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials, 2007.
3. **Panina L., Dzhumazoda A., Nematov M. et al.** Soft magnetic amorphous microwires for stress and temperature sensory applications // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 23. P. 5089.
4. **Molokanov V.V., Moroz O.V., Krutilin A.V. et al.** Fabrication and physicomechanical prop-

had a large scatter due to specimen roughness (at a load of 1 mN the indentation depth is about 100 nm). Therefore, we believe that the lower hardness values on these samples are due to the soft epoxy resin influence where the samples are cast.

CONCLUSIONS

Using the instrumental indentation method, influence of stresses performed by the glass shell and the adopted method of melt jet quenching on the level and character of distribution of mechanical properties in a conical amorphous wire of variable diameter of the model 84KKHSR alloy has been studied.

It was found that amorphous wire in the diameter range of 70–300 μm maintains stable values of hardness and elastic modulus in cross and longitudinal sections. The obtained data testify to the isotropy of wires of variable diameter with amorphous structure. Higher values of hardness and modulus of elasticity in the 270 μm diameter sample ($H=9.8$ GPa, $E=212$ GPa) compared to the 100 μm diameter sample ($H=8$ GPa, $E=163$ GPa) may be due to a more intensive process of cluster formation in the melt due to decreasing the effective quenching rate of the thicker wire.

It is shown that "thick" amorphous wires of 84KKHSR Co-alloy retain a high level of strength and elastic properties in a wide range of diameters. Such wires of variable diameter can be used in the manufacturing of new types of surgical instruments for endovascular interventions, and instruments for endodontic operations.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out using the equipment of the Collective Use Centre of FGBNU TISNUM "Research of nanostructured, carbon and superhard materials". The authors express their gratitude to Petrzhik M.I. for attention to the work and valuable comments during the results discussion. The work was carried out within the framework of State Order No. 075-00320-24-00.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

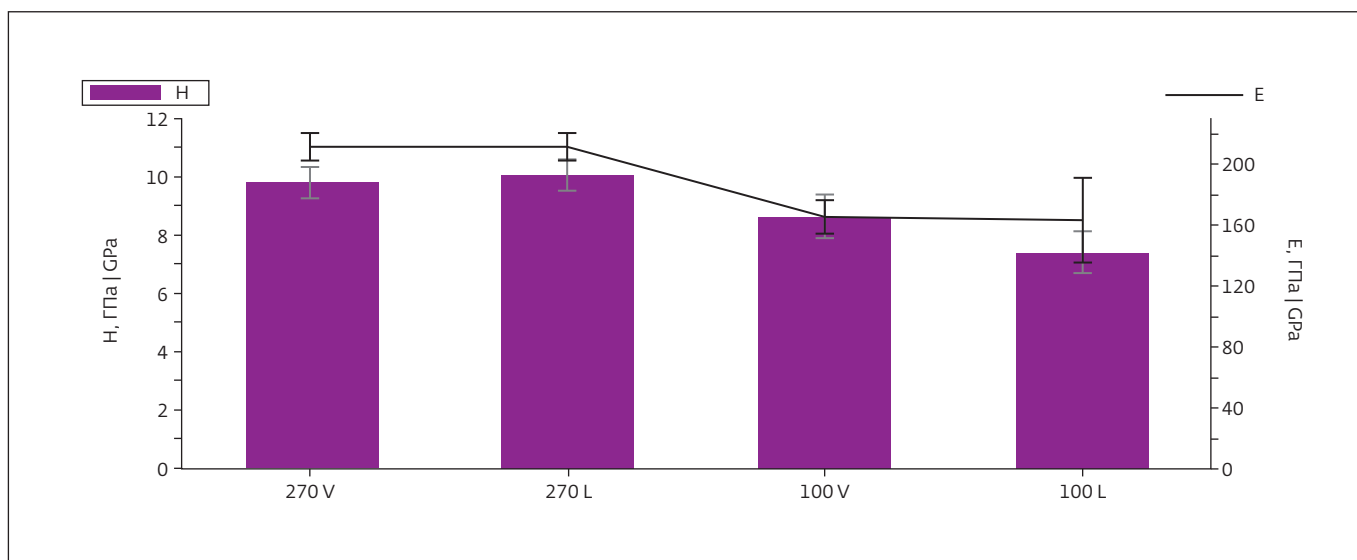


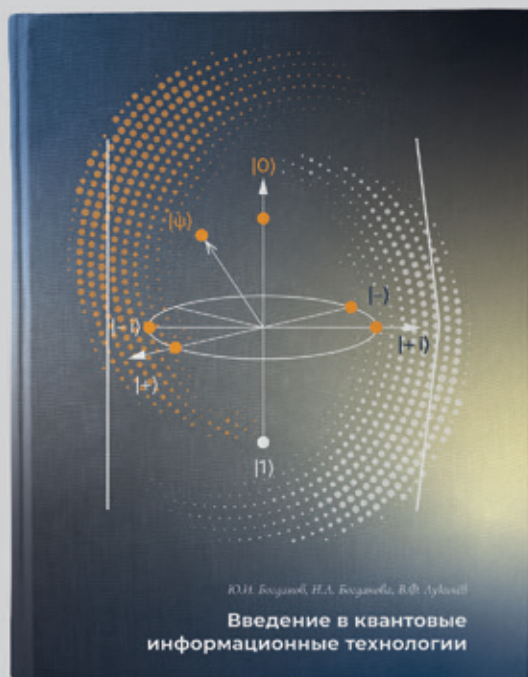
Рис.3. Диаграмма полученных значений твердости и модуля упругости на проводах с диаметром 270 и 100 мкм, расположенных поперек (V) или вдоль оси провода (L)

Fig.3. Diagram of hardness and modulus of elasticity obtained values on wires with a 270 μm and 100 μm diameter, located across (V) or along (L) the axis of the wire

- erties of amorphous microwires and microspirals // Russian Metallurgy (Metally). 2022. Vol. 2022. No. 4. PP. 300–308.
- Kostitsyna E.V., Gudoshnikov S.A., Popova A.V. et al. Mechanical properties and internal quenching stresses in Co-rich amorphous ferromagnetic microwires // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 707. PP. 199–204.
 - Ulitsky A.V., Malanski I.M., Avramenco A.I. Method of continuous casting of glass coated microwire. Patent No. 128427 (USSR). 15.05.60. Bulletin, 10. P. 14.
 - Molokanov V.V., Shalygin A.N., Umnov P.P. et al. Conditions for obtaining "thick" amorphous wires by the Ulitsky-Taylor method // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. PP. 463–466.
 - Алпатов А.А., Молоканов В.В., Крутилин А.В. и др. Протяженные тензорезистивные датчики на основе аморфных микропроводов для контроля состояния конструкций и сооружений // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем. 2023. С. 95–98.
 - Zhukova V., Corte León P., Blanco Aranguren J.M. et al. Development of magnetically soft amorphous microwires for technological applications // Chemosensors. 2022. Vol. 10. No. 1.
 - Гудошников С.А., Попова А.В., Фатеев В.М. и др. Датчик измерения механических деформаций. RU 2552124 С1. Опубликовано: 10.06.2015. Бюл. № 16.
 - Аксенов О.И., Аксенов А.А., Аронин А.С. Датчик измерения механических напряжений на основе микропроводов с положительной магнитострикцией. RU 2746765 С1. Опубликовано: 20.04.2021. Бюл. № 11.
 - Молоканов В.В., Алпатов А.А., Крутилин А.В. и др. Мониторинг состояния авиационно-космической техники с использованием тензодатчиков на основе аморфных ферромагнитных микропроводов // Сб. тезисов Международного аэрокосмического конгресса по авионавтике, 2023. С. 132–134.
 - Молоканов В.В., Дубов А.А., Ямчук А.В. и др. Анализ дефектов литых стержней околэвтектического Со-сплава до и после зонной плавки // Электрометаллургия. 2024. № 1. С. 16–23.
 - Коплак О.В., Дворецкая Е.В., Кравчук К.С. и др. Морфология и механические свойства микропроводов PrDyFeCoB // Физика твердого тела. 2020. Т. 62. № 12. С. 2026–33.
 - Усеинов А.С., Кравчук К.С., Гладких Е.В. и др. Измерение механических свойств методом инструментального индентирования в широком диапазоне температур // НАНОИНДУСТРИЯ. 2021. Т. 14. № 2. С. 108–116. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.2.108.116>
 - BS EN ISO 14577: 2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Ю.И. Богданов, Н.А. Богданова,
В.Ф. Лукичёв

Введение в квантовые информационные технологии

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 468 с.
ISBN 978-5-94836-704-0

Цена 1600 руб.

Книга посвящена квантовым информационным технологиям, представляющим собой новую быстро развивающуюся область науки и техники, основанную на использовании квантовых систем для реализации принципиально новых методов передачи сообщений и вычислений (квантовые каналы связи, квантовая криптография, квантовый компьютер). Книга основана на курсах, читаемых авторами в МГУ им. М.В. Ломоносова, НИУ МИЭТ, МФТИ и НИЯУ МИФИ.

Книга рассчитана на студентов, магистрантов и аспирантов, получающих образование в области физико-математических наук и высоких технологий. Настоящее издание будет также интересно широкому кругу научных работников и инженеров различных специальностей, активно интересующихся развитием передовых научных направлений и технологий.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphere.ru
sales@technosphere.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphere.ru