

**Фазообразование в системе Nb-Cu-Ti, сформированной на подложке
вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом**

Н.А. Прокопенко¹, Е.А. Петрикова¹, О.С. Толкачев¹, А.А. Клопотов², Ю.Ф. Иванов¹

¹ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН

634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3

²ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2

yufi55@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.135

Аннотация: Многослойные системы, включающие интерфейсы между различными металлами, считаются новым семейством материалов с широким спектром применений (электронные устройства, материалы для аэрокосмических и ядерных установок, где необходимы исключительные механические, электрические и термические свойства в условиях высокой деформации и высокотемпературных термоциклических воздействий). Целью настоящей работы являлось исследование элементного и фазового состава, субструктуры, механических и трибологических свойств бинарных (*Nb – Cu*) пленок, легированных атомами титана, сформированных на твердой подложке вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом. Эксперименты по нанесению тонких пленок и покрытий проводили на ионно-плазменной установке «КВИНТА», разработанной в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН. Показано, что в процессе образования пленки *Nb – Cu* легируются атомами титана, поступающими в результате диффузии из подложки (ВТ1-0). Установлено, что пленки являются слоистым двухфазным (медь и ниобий) аморфно-кристаллическим материалом. Микротвердость пленок составляет 6,8 ГПа, что кратно (более чем в 5 раз) превышает микротвердость поликристаллического ниобия; параметр износа (величина, обратная износостойкости) $k = 2,2 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, что в 24,6 раза меньше параметра износа чистой меди.

Ключевые слова: система «пленка/подложка», вакуумно-дуговой плазменно-ассистированный метод, фазовый состав, дефектная субструктура, микротвердость, износостойкость.

Прокопенко Никита Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН

Петрикова Елизавета Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН

Толкачев Олег Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН

Клопотов Анатолий Анатольевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры Прикладной механики и материаловедения ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Иванов Юрий Федорович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН

Original paper

Phase formation in the Nb-Cu-Ti system formed on a substrate by vacuum-arc plasma-assisted method

N.A. Prokopenko¹, E.A. Petrikova¹, O.S. Tolkachev¹, A.A. Klopotov², Yu.F. Ivanov¹

¹Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.135

Abstract: Multilayer systems including interfaces between different metals are considered to be a new family of materials with a wide range of applications (electronic devices, materials for aerospace and nuclear installations, where exceptional mechanical, electrical and thermal properties are required under conditions of high deformation and high-temperature thermal cycling). The aim of this work was to study the elemental and phase composition, substructure, mechanical, and tribological

© Н.А. Прокопенко, Е.А. Петрикова, О.С. Толкачев, А.А. Клопотов, Ю.Ф. Иванов, 2025

properties of binary ($Nb - Cu$) doped with titanium atoms films formed on a solid substrate by the vacuum-arc plasma-assisted method. Experiments on the deposition of thin films and coatings were carried out on the ion-plasma setup «KVINTA» developed in the Laboratory of Plasma Emission Electronics of the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the RAS. It is shown that during the formation of the $Nb - Cu$ films, they are doped with titanium atoms entering as a result of diffusion from the substrate (Grade 2). It was established that the films are a layered two-phase (copper and niobium) amorphous-crystalline material. The microhardness of the films is 6,8 GPa, which is many times (more than 5 times) higher than the microhardness of polycrystalline niobium; the wear parameter (the value reciprocal of wear resistance) $k = 2,2 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, which is 24,6 times less than the wear parameter of pure copper.

Keywords: film/substrate system, vacuum arc plasma-assisted method, phase composition, defect substructure, microhardness, wear resistance.

Nikita A. Prokopenko – Junior Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the RAS, ORCID: 0000-0002-9381-872X

Elizaveta A. Petrikova – Junior Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the RAS, ORCID: 0000-0002-1959-1459

Oleg S. Tolkachev – Junior Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the RAS, ORCID: 0000-0001-7816-9920

Anatoly A. Klopotov – Dr. Sc., Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Building, ORCID: 0000-0002-3690-0436

Yuri F. Ivanov – Dr. Sc., Chief Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the RAS, ORCID: 0000-0001-8022-7958

Поступила в редакцию/received: 09.07.2025; после рецензирования/revise: 02.08.2025; принята/accepted 07.08.2025.

1. Введение

Многослойные системы, включающие интерфейсы между различными металлами, считаются новым семейством материалов с высоким потенциалом для широкого спектра применений. К ним относятся, например, электронные устройства, а также материалы для аэрокосмических и ядерных установок, где необходимы исключительные механические, электрические и термические свойства в условиях высокой деформации и высокотемпературных термоциклических воздействий [1-5].

Композитный многослойный материал с пластинчатой структурой $Nb-Ti/Nb/Cu$ используется для производства сверхпроводящих кабелей [6, 7], в технологии МРТ, ядерно-магнитной резонансной (ЯМР) спектроскопии [8] и ускорителях частиц [9, 10]. В таком композите Cu играет теплопроводящую роль, а твердый раствор $Nb-Ti$ является сверхпроводящей частью. Ниобий между двумя слоями используется для предотвращения перекрестной диффузии и возможного образования интерметаллических фаз в системе $Cu-Ti$ [11-13], упрочняющих и одновременно охрупчивающих композитный материал [14-16]. Трехкомпонентные сплавы $Nb-Cu-Ti$ могут быть также использованы в медицине для изготовления высокопрочных зубных протезов и кламмеров [17, 18].

Теоретически рассчитанное изотермическое сечение системы $Cu-Nb-Ti$ при температуре 800°C (см. рис. 1) было представлено в работе

[11]. Особенностью этой трехкомпонентной системы является с одной стороны то, что атомные радиусы элементов *Nb* (0,146 нм) и *Ti* (0,147 нм) очень близки, а третий элемент *Cu* (0,126 нм) имеет атомный радиус намного меньше, чем у *Nb* и *Ti*. В результате растворимость *Cu* ограничена в *Nb* и *Ti*.

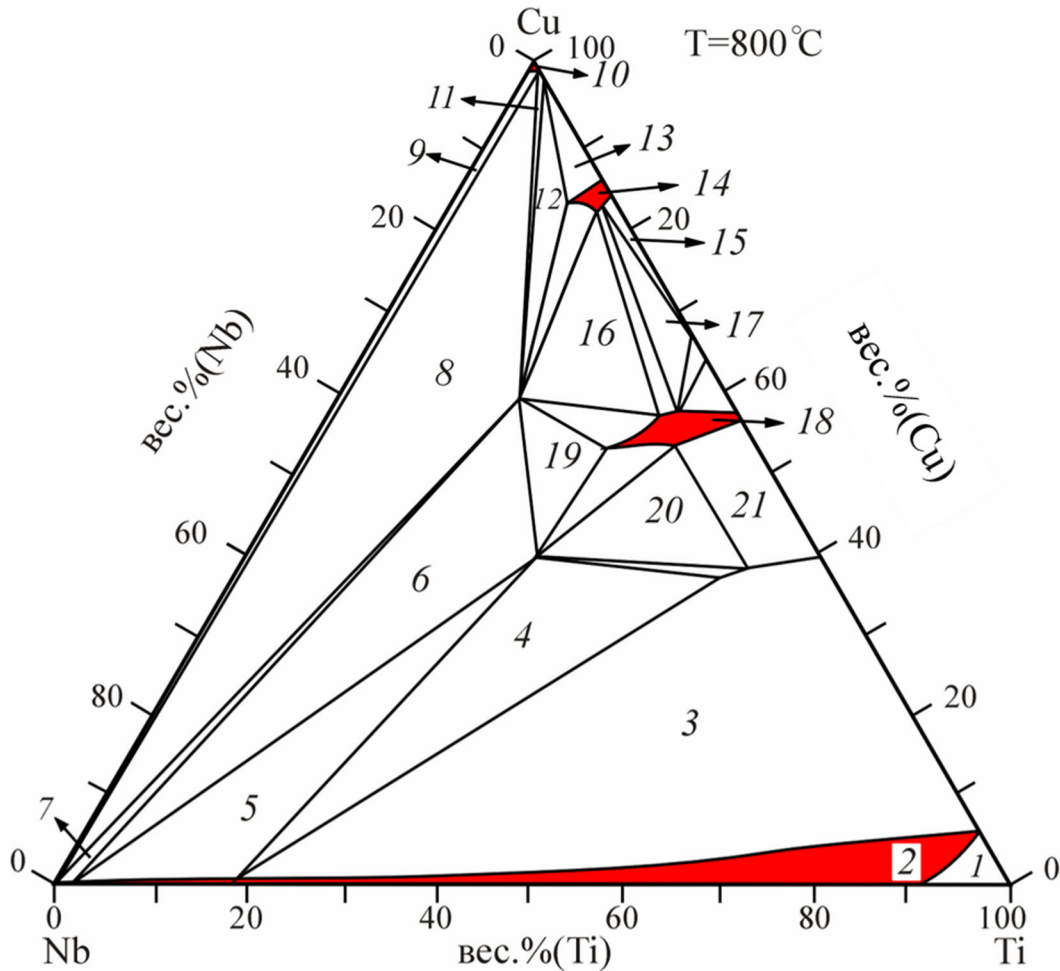


Рис. 1. Изотермическое сечение при температуре 800°C системы *Cu–Nb–Ti* [11]. Цифрами обозначены фазовые области: 1 – $\beta(Nb,Ti)+\alpha(Nb,Ti)$; 2 – $\beta(Nb,Ti)$; 3 – $\beta(Nb,Ti)+CuTi_2$; 4 – $\beta(Nb,Ti)+CuTi_2+Cu_2NbTi_2$; 5 – $\beta(Nb,Ti)+Cu_2NbTi_2$; 6 – $\beta(Nb,Ti)+Cu_2NbTi_2+Cu_{12}Nb_3Ti_5$; 7 – $\beta(Nb,Ti)+Cu_{12}Nb_3Ti_5$; 8 – $\beta(Nb,Ti)+Cu_{12}Nb_3Ti_5+\alpha(Cu)$; 9 – $\beta(Nb,Ti)+\alpha(Cu)$; 10 – $\alpha(Cu)$; 11 – $\alpha(Cu)+Cu_{12}Nb_3Ti_5$; 12 – $\alpha(Cu)+Cu_{12}Nb_3Ti_5+Cu_4Ti$; 13 – $\alpha(Cu)+Cu_4Ti$; 14 – Cu_4Ti ; 15 – $Cu_4Ti+Cu_3Ti_2$; 16 – $CuTi+Cu_4Ti+Cu_{12}Nb_3Ti_5$; 17 – $Cu_4Ti+Cu_3Ti_2+CuTi$; 18 – $CuTi$; 19 – $CuTi+Cu_{12}Nb_3Ti_5+Cu_2NbTi_2$; 20 – $CuTi+Cu_{12}Nb_3Ti_5+Cu_2NbTi_2$; 21 – $CuTi+Cu_2Ti$. Красным цветом выделены однофазные области.

С другой стороны, сильное различие в электронных конфигурациях между атомами *Nb*, *Ti* и *Cu* приводит к разному типу двухкомпонентных диаграмм состояний [17]. В системе *Nb–Ti* после кристаллизации из

жидкого состояния происходит образование твердого раствора на основе ОЦК решетки $\beta(Nb,Ti)$ -фаза. При понижении температуры в твердом состоянии в системе образуется широкая двухфазная область твердых растворов $\beta(Nb,Ti)+\alpha(Nb,Ti)$. Двойная диаграмма системы $Nb-Cu$ характеризуется вырожденной перетектикой $L+\beta(Nb)\leftrightarrow\alpha(Cu)$ и наблюдается сильная несмешиваемость в твердом состоянии. В системе $Cu-Ti$ образуются интерметаллические соединения, а именно, Ti_2Cu , $CuTi$, Ti_3Cu_4 , Ti_2Cu_3 , $TiCu_2$, которые образуются разными способами: перитектическими реакциям и при конгруэнтной кристаллизации.

В работах [19, 20] фазовые равновесия тройной системы $Cu-Nb-Ti$ были исследованы с помощью термодинамического моделирования в сочетании с ключевыми экспериментами. Сплавы были приготовлены для определения изотермических сечений системы $Cu-Nb-Ti$ в широком диапазоне температур, сочетая рентгеновскую дифракцию (XRD) и сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (SEM/EDS). Псевдотройная фазовая диаграмма $Cu-Nb-Ti_2Cu$ была построена с использованием результатов рентгеновской дифрактометрии. В образцах были выявлены три фазы сплава ($\alpha-Ti$, $\beta-Ti$ и Ti_2Cu). Кроме того, было отмечено наличие областей сосуществования двух фаз ($\alpha+Ti_2Cu$, $\alpha+\beta$ и $\beta+Ti_2Cu$) и области сосуществования трех фаз ($\alpha+\beta+Ti_2Cu$). Тройных соединений в исследованных сплавах обнаружено не было.

Целью настоящей работы являлось исследование элементного и фазового состава, субструктуры, механических и трибологических свойств бинарных ($Cu-Nb$) пленок, легированных атомами титана, сформированных на твердой подложке вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом.

2. Материал и методика исследования

Материалом исследования являлись тонкие (2-3 мкм) пленки системы $Cu-Nb-Ti$. В качестве материала подложки использовали образцы технически чистого титана марки ВТ1-0. Образцы имели форму пластинок с размерами $15\times 15\times 10$ мм. Эксперименты по нанесению пленок проводили на ионно-плазменной установке «КВИНТА», разработанной в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Часть пленок, использованных для определения микротвердости и износостойкости, была нанесена на твердый сплав ВК8.

Формирование пленки осуществляли осаждением из многоэлементной газо-металлической плазмы, созданной при одновременном вакуумно-дуговом испарении катодов состава Nb и Cu в

режиме с плазменным ассистированием в атмосфере аргона. После очистки в ультразвуковой ванне со спиртом образцы (подложки) крепились на подложкодержатель и располагались напротив дуговых испарителей на расстоянии 16 см. Вакуумная камера с образцами откачивалась турбомолекулярным насосом до предельного давления $2,5 \times 10^{-2}$ Па. Затем происходил напуск аргона до давления 0,3 Па, включался протяженный генератор газовой плазмы «ПИНК-П» с выходной апертурой (40×400) мм и проводилась очистка путем ионно-плазменного травления поверхности образцов плазмой аргона на протяжении 20 минут. При этом ток разряда плазмодгенератора «ПИНК-П» составлял $I_{PINK} = 50$ А, а напряжение импульсно-периодического смещения $U_{offset} = -500$ В с коэффициентом заполнения импульса $Q = 50\%$. Температура образцов при очистке поверхности за 20 минут достигала 450°C. После очистки включался электродуговой испаритель с ниобиевым катодом (ток разряда $I_D = 75$ А). В течение 2 минут при напряжении смещения –900 В поверхность подложек бомбардировалась высокоэнергетическими ионами ниобия. По истечении 2-х минут напряжение смещения уменьшалось до $U_{offset} = -35$ В, коэффициент заполнения импульса увеличивался до $Q = 85\%$, включался электродуговой испаритель с медным катодом (ток разряда $I_D = 75$ А) и на подложку наносилась пленка *Cu-Nb*. С целью равномерного осаждения пленки образцы вращались вокруг своей оси со скоростью 6 оборота в минуту, поочередно попадая в область потока атомов меди или ниобия. Время напыления пленки *Cu-Nb* 60 мин; температура подложки на момент выключения плазмодгенераторов (окончания процесса напыления) 320°C. Отметим, что ранее нами вакуумно-дуговым испарением катодов в режиме с плазменным ассистированием в атмосфере аргона был осуществлен синтез на твердой подложке пленок толщиной до 5 мкм на основе высокоэнтропийных сплавов *AlNbTiZrCu* [21] и *TiNbZrTaHfCu* [22], а также синтезированы аморфно-кристаллические борсодержащие пленки [23].

Исследование структуры и элементного состава образцов осуществляли методами сканирующей (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F JEOL) электронной микроскопии. Фольги для исследования пленок методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии изготавливали ионным утонением (Ion Slicer EM-091001S, утонение реализуется ионами аргона) пластинок, вырезанных из массивных образцов на установке Isomet Low Speed Saw перпендикулярно поверхности пленок, что позволило проследить изменение структуры, элементного и фазового состава материала по мере

удаления от поверхности напыления. Анализ прочностных характеристик пленок осуществляли определением микротвердости (прибор ПМТ-3М), исследование трибологических характеристик пленок (определение износостойкости) осуществляли на приборе TRIBOtechnic (условие сухого трения при комнатной температуре).

3. Результаты исследования и обсуждение

Методами микрорентгеноспектрального анализа определен элементный состав пленки, сформированной вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным распылением двух катодов (ниобий и медь) на образцах (подложка) технического чистого титана марки ВТ1-0. Выявлено присутствие в пленке атомов ниобия, меди и титана (см. рис. 2). Можно предположить, что присутствие в пленке атомов титана обусловлено его диффузией в процессе напыления пленки при сравнительно высокой (350-420°C) температуре и большой длительности процесса (62 мин).

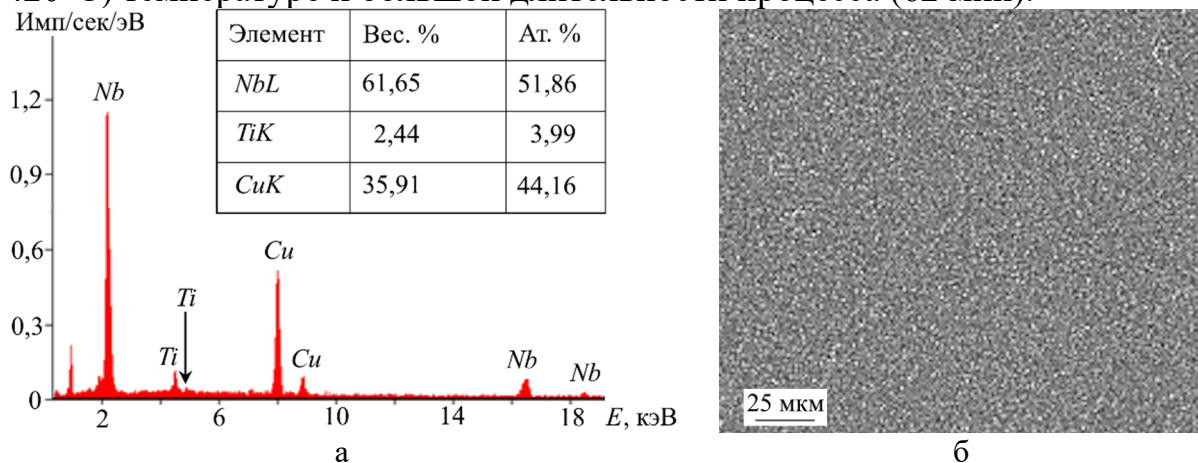


Рис. 2. Энергетические спектры (а), полученные с участка поверхности пленки, изображенной на (б). В таблице представлены результаты анализа элементного состава данного участка пленки.

Методом картирования осуществлена визуализация распределения элементов в объеме пленки (см. рис. 3). Отчетливо видно, что атомы титана формируют подложку и присутствуют в пленке. Появление атомов титана в пленке обусловлено, как отмечалось выше, процессами его диффузии в растущую пленку. Между пленкой и подложкой располагается тонкий (35 нм) подслой, обогащенный атомами ниобия. Данный подслои напылялся для увеличения силы адгезии системы «пленка/подложка». В объеме пленки атомы титана, ниобия и меди распределены однородно.

Дефектную субструктуру и фазовый состав системы «пленка/подложка» изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. На рис. 4 представлено электронно-микроскопическое изображение системы «пленка/подложка» в области

контакта пленки с подложкой. Отчетливо видно, что напыление в течение 2 мин. ниобия приводит к формированию переходного подслоя, имеющего столбчатую структуру (см. рис. 4 а, в). Размеры кристаллитов, образующих столбики, изменяются в пределах 0,5-0,7 нм (см. рис. 4 г).

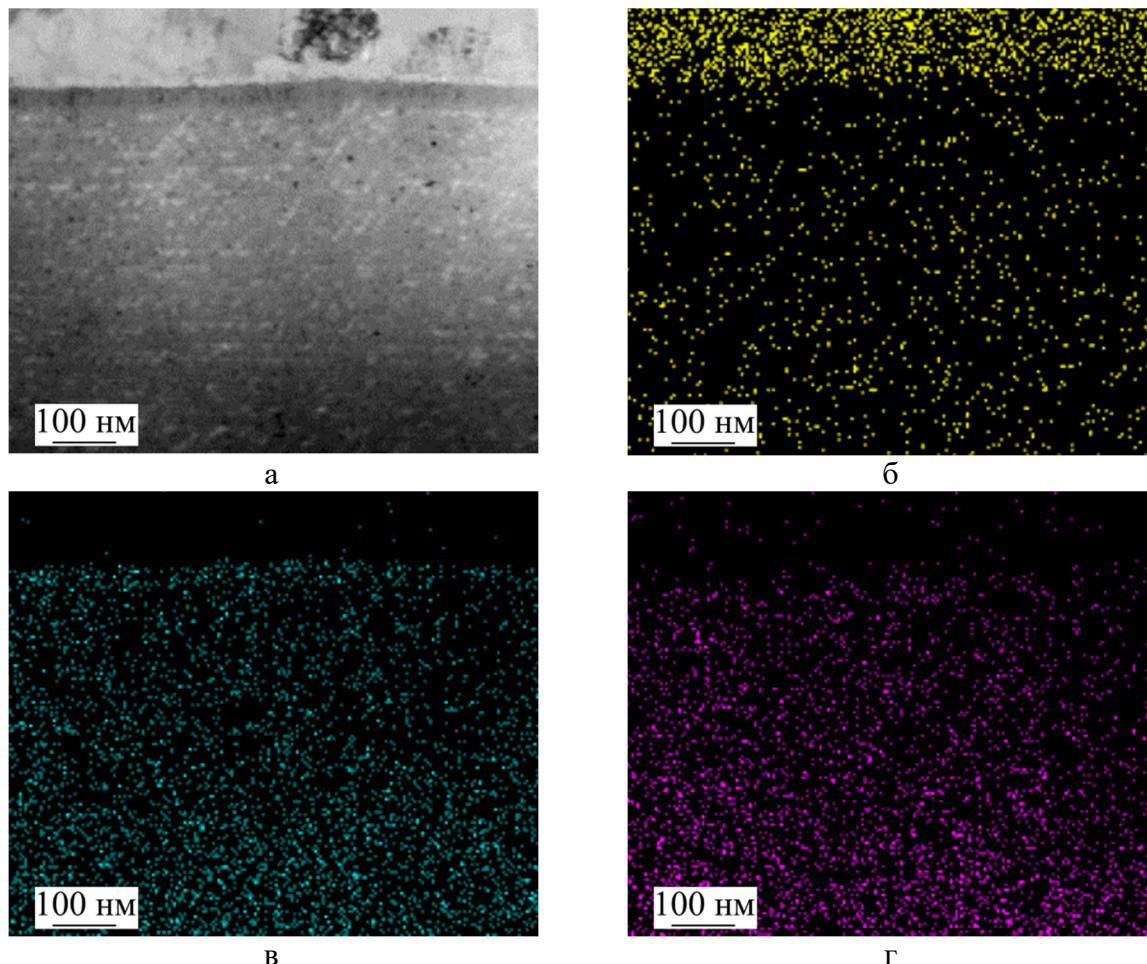


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение пленки (а); б-г – изображение участка пленки, приведенного на (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов *Ti* (б), *Nb* (в), *Cu* (г).

Формирование подслоя сопровождается имплантацией атомов ниобия в подложку. Толщина формирующегося в подложке подслоя 9,5-10 нм (см. рис. 4 а, подслоем указан черными стрелками). Размеры кристаллитов, формирующих данный подслоя, изменяются в пределах 1-2 нм (см. рис. 4 в, г). Микроэлектронограмма (см. рис. 4 б), полученная с данного участка фольги, имеет кольцевое строение, что однозначно указывает на нанокристаллическую структуру материала.

Индицирование микроэлектронограммы показало, что первое дифракционное кольцо (см. рис. 4 б, указано стрелкой) сформировано отражением от кристаллической решетки ниобия и от кристаллической решетки α -*Ti*. Следуя равновесной диаграмме состояния системы *Nb-Ti*

[17], можно предположить, что концентрация атомов ниобия в переходном подслое со стороны подложки не превышает 2 ат.%. В этом случае может быть сформирован твердый раствор ниобия в α -Ti.

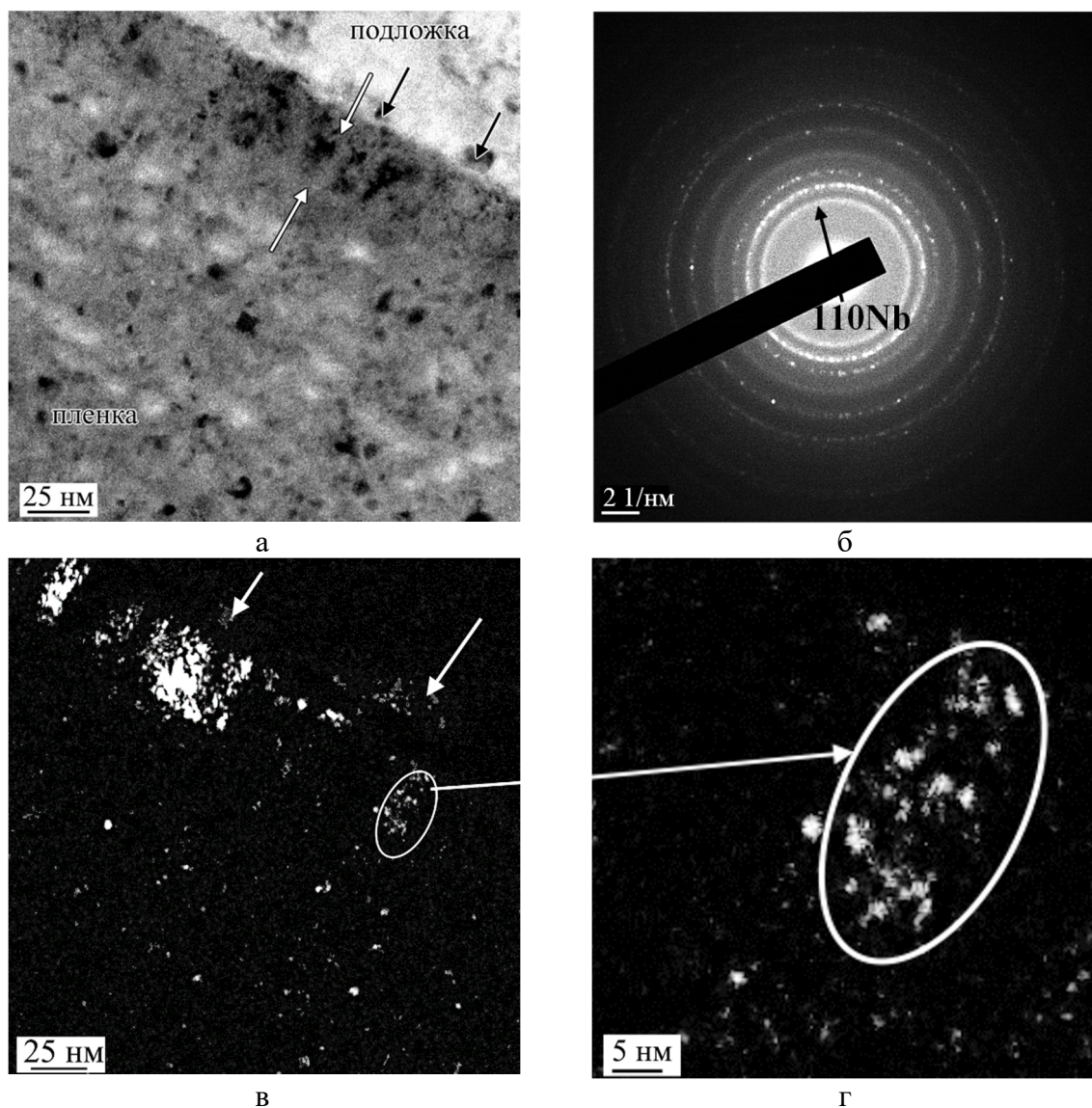


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры пленки $Nb-Cu$ в зоне контакта с подложкой; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[110] Nb + [100] \alpha-Ti$. На (а) белыми стрелками указан переходный подслой, напыленный на подложку, черными стрелками – подслоем, сформировавшийся в подложке; на (в) – указан подслоем, сформировавшийся в подложке.

Формирующаяся при напылении пленка имеет слоистое строение (см. рис. 5 а), что обусловлено использованным в работе способом напыления – два работающих одновременно плазмодгенератора металлической плазмы и вращение подложкодержателя с образцами вокруг своей оси.

Толщина слоев ниобия изменяется в пределах от 2 нм до 5,5 нм (см.

рис. 5 в, г). Толщина разделяющих их слоев достигает 7 нм. Темнопольное изображение участка фольги, полученное в рефлексе кристаллической решетки ниобия, показывает, что кристаллиты, формирующие данные слои, имеют размеры, изменяющиеся в пределах от 1,5 нм до 4,5 нм (см. рис. 5 в, г). Темнопольное изображение участка фольги, полученное в рефлексе кристаллической решетки меди, выявило наличие частиц размерами до 10 нм (см. рис. 5 д) и крапчатую структуру типа «соль/перец» с размером элементов контраста 1-1,5 нм (см. рис. 5 е). Столь малые размеры структуры позволяют высказать предположение об аморфно-кристаллическом состоянии формируемой пленки.

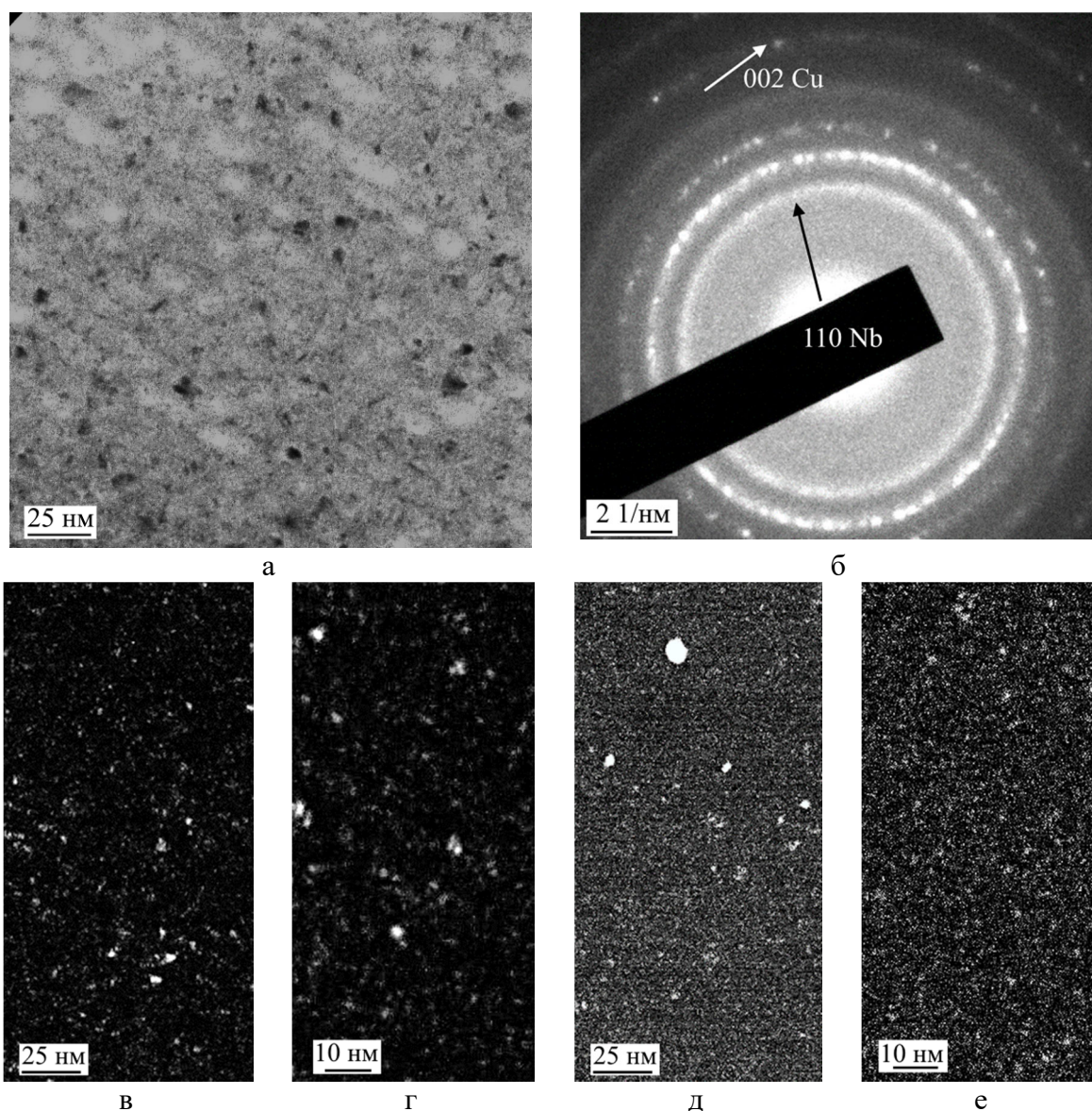


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры пленки $Nb-Cu$; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в-е – темные поля, полученные в рефлексах $[110] Nb$ (в, г) и $[002] Cu$ (д, е).

Согласно результатам анализа элементного состава, исследуемые в работе пленки имеют относительно малую концентрацию титана (≈ 4 ат.%) и соизмеримое содержание атомов *Cu* и *Nb* (~ 39 ат.% *Cu* и 50% *Nb*). Из анализа строения тройной диаграммы состояний системы *Cu–Nb–Ti* (см. рис. 1) и данных по двойным диаграммам состояний [17], образующих эту систему, можно сделать вывод, что при равновесных условиях при таком химическом составе возможно образование смеси двух фаз $\beta-(Nb,Ti)$ и Cu_2Ti . Здесь фаза $\beta-(Nb,Ti)$ является твердым раствором *Nb* и *Ti* с ОЦК кристаллической решеткой, так как *Nb* и *Ti* неограниченно смешиваются в β -фазе. Интерметаллическое соединение Cu_2Ti имеет тетрагональную кристаллическую решетку с пространственной группой $I4/mmm$. В настоящей работе фаза Cu_2Ti не была обнаружена, что может быть обусловлено как малым ее количеством, так и трудностью анализа микроэлектронограмм, сформированных существенно размытыми рефлексами.

Осуществлен анализ прочностных (определена микротвердость) и трибологических (определен параметр износа) свойств системы «пленка/подложка». Установлено, что микротвердость пленок составляет 6,8 ГПа, что кратно (более чем в 5 раз) превышает микротвердость поликристаллического ниобия; параметр износа (величина, обратная износостойкости) $k = 2,2 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, что в 24,6 раза меньше параметра износа чистой меди.

4. Заключение

Вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на поверхности образцов технически чистого титана марки ВТ1-0 и твердого сплава ВК8 сформированы тонкие (2-3 мкм) пленки *Cu–Nb*. Показано, что в процессе образования пленка *Cu–Nb* легируется атомами титана, поступающими из подложки (ВТ1-0). Установлено, что пленки являются слоистым двухфазным (медь и ниобий) аморфно-кристаллическим материалом. Микротвердость пленок составляет 6,8 ГПа, что кратно (более чем в 5 раз) превышает микротвердость поликристаллического ниобия; параметр износа (величина, обратная износостойкости) $k = 2,2 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, что в 24,6 раза меньше параметра износа чистой меди.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0006).

Библиографический список:

1. Beyerlein, I.J. Structure–property–functionality of bimetal interfaces / I.J. Beyerlein, N.A. Mara, J. Wang et al. // JOM. – 2012. – V. 64. – I. 10. – P. 1192-1207. DOI: 10.1007/s11837-012-0431-0.

2. **Gao, Y.** Radiation tolerance of Cu/W multilayered nanocomposites / Y. Gao, T. Yang, J. Xue et al. // *Journal of Nuclear Materials*. – 2011. – V. 413. – I. 1. – P. 11-15. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.03.030.
3. **Ma, G.C.** Fundamental effects of hydrogen on cohesion properties of Cu/W interfaces / G.C. Ma, J.L. Fan, H.R. Gong et al. // *Solid State Communications*. – 2017. – V. 250 – P. 79-83. DOI: 10.1016/j.ssc.2016.11.018.
4. **Zheng, S.** High-strength and thermally stable bulk nanolayered composites due to twin-induced interfaces / S. Zheng, I.J. Beyerlein, J.S. Carpenter et al. // *Nature Communications*. – 2013. – V. 4 – I. 1. – Art. 1696. – 8 p. DOI: 10.1038/ncomms2651.
5. **Primorac, M.M.** Elevated temperature mechanical properties of novel ultra-fine grained Cu-Nb composites / M.M. Primorac, M.D. Abad, P. Hosemann et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – V. 625. – P. 296-302. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.020.
6. **Park, S.-M.** Effect of ECAP on change in microstructure and critical current density of low temperature superconducting monowire / S.-M. Park, Y.-S. Oh, S.-J. Kim et al. // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2019. – V. 20. – I. 9. – P. 1563-1572. DOI: 10.1007/s12541-019-00164-3.
7. **Zhang, P.** NbTi superconducting wires and applications / P. Zhang, J. Li, Q. Guo et al. // In book: *Titanium for Consumer Applications. Real World Use of Titanium*. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – Ch. 15. – P. 279-296. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00010-1.
8. **Banno, N.** High-temperature-tolerable superconducting Nb-alloy and its application to Pb- and Cd-free superconducting joints between NbTi and Nb₃Sn wires / N. Banno, K. Kobayashi, A. Uchida, H. Kitaguchi // *Journal of Materials Science*. – 2021. – V. 56. – I. 36. – P. 20197-20207. DOI: 10.1007/s10853-021-06585-8.
9. **Davies, T.** Atmospheric oxidation of NbTi superconductor / T. Davies, C.R.M. Grovenor, S.C. Speller // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – V. 848. – Art. № 156345. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156345.
10. **Karasev, Yu.V.** The superconducting NbTi wire for the CBM dipole magnet / Yu.V. Karasev, V.Y. Korpusov, A.V. Malchenkov et al. // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2022. – V. 35. – I. 3. – P. 705-710. DOI: 10.1007/s10948-022-06143-6.
11. **Karpati, V.** On formation of intermetallic compounds at the Copper / Niobium-Titanium interface / V. Karpati, J. Korozs, G. Kaptay, V. Mertinger // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – V. 918. – Art № 165567. – 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165567.
12. **Bozic, D.** Multiple strengthening mechanisms in nanoparticle-reinforced copper matrix composites / D. Bozic, J. Stasic, B. Dimcic et al. // *Bulletin of Materials Science*. – 2011. – V. 34. – I. 2. – P. 217-226. DOI: 10.1007/s12034-011-0102-8
13. **Akbarpour, M.R.** Wear performance of novel nanostructured Ti-Cu intermetallic alloy as a potential material for biomedical applications / M.R. Akbarpour, S.M. Javadhesari // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 669. – P. 882-886. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.020.
14. **Barna, D.** Conceptual design of a high-field septum magnet using a superconducting shield and a canted-cosine-theta magnet / D. Barna, M. Novák, K. Brunner et al. // *Review of Scientific Instruments*. – 2019. – V. 90. – I. 5. – Art. 053302. – 7 p. DOI: 10.1063/1.5096020.
15. **Barannikova, S.** Fine structural characterization of the elements of a Nb-Ti superconducting cable / S. Barannikova, G. Schlyakhova, O. Maslova et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – V. 8. – I. 1. – P. 323-332. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.02.004.
16. **Hillmann, H.** Fabrication of superconducting material / H. Hillmann // In book: *Superconductor Materials Science: Metallurgy, Fabrication, and Applications*. NATO Advanced Study Institutes Series; ed. by S. Foner, B.B. Schwartz. – Boston: Springer, 1981. – V. 68. – P. 275-388. DOI: 10.1007/978-1-4757-0037-4_5.
17. **Takahashi, M.** Mechanical properties and microstructures of dental cast Ti-6Nb-4Cu, Ti-18Nb-2Cu, and Ti-24Nb-1Cu alloys / M. Takahashi, M. Kikuchi and Y. Takada // *Dental Materials Journal* – 2016. – V. 35. – I. 4. – P. 564–570. DOI: 10.4012/dmj.2015-354.
18. **Zhao, Z.** Microstructure, corrosion and anti-bacterial investigation of novel Ti-xNb-yCu alloy for biomedical implant application / Z. Zhao, W. Xu, H. Xin, F. Yu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022 – V. 18. – P. 5212-5225. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.158.
19. **Sato, K.** Construction of Ti-Nb-Ti₂Cu pseudo-ternary phase diagram / K. Sato, M. Takahashi and Y. Takada // *Dental Materials Journal*. – 2020. – V. 39. – I. 3. – P. 422-428. DOI: 10.4012/dmj.2018-394.
20. **Takahashi, M.** Mechanical properties of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications / M. Takahashi, K. Sato, G. Togawa and Y. Takada // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2022. – V. 13. – I. 4. – Art. № 263. – 12 p. DOI: 10.3390/jfb13040263.
21. **Иванов, Ю.Ф.** Особенности структурно-фазового состояния пленки на основе высокоэнтропийного сплава AlNbTiZrCu, синтезированной путем осаждения многоэлементной металлической плазмы / Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Абзаев, А.А. Клопотов и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 693-707. DOI: 10.26456/pcasenn/2021.13.693.

22. **Иванов, Ю.Ф.** Рентгеновские дифракционные исследования процесса роста тонких пленок высокоэнтропийного сплава TiNbZrTaHfCu in situ с использованием синхротронного излучения / Ю.Ф. Иванов, Ю.Х. Ахмадеев, А.А. Клопотов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 140-153. DOI: 10.26456/pcasenn/2024.16.140
23. **Иванов, Ю.Ф.** Аморфно-кристаллические борсодержащие покрытия, сформированные ионно-плазменным методом / Ю.Ф. Иванов, А.А. Клопотов, В.В. Шугуров и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 725-735. DOI: 10.26456/pcasenn/2023.15.725.

References:

1. Beyerlein I.J., Mara N.A., Wang J. et al. Structure–property–functionality of bimetal interfaces, *JOM*, 2012, vol. 64, issue 10, pp. 1192-1207. DOI: 10.1007/s11837-012-0431-0.
2. Gao Y., Yang T., Xue J. et al. Radiation tolerance of Cu/W multilayered nanocomposites, *Journal of Nuclear Materials*, 2011, vol. 413, issue 1, pp. 11-15. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.03.030.
3. Ma G.C., Fan J.L., Gong H.R. et al. Fundamental effects of hydrogen on cohesion properties of Cu/W interfaces, *Solid State Communications*, 2017, vol. 250, pp. 79-83. DOI: 10.1016/j.ssc.2016.11.018.
4. Zheng S., Beyerlein I.J., Carpenter J.S. et al. High-strength and thermally stable bulk nanolayered composites due to twin-induced interfaces, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, issue 1, art.№ 1696, 8 p. DOI: 10.1038/ncomms2651.
5. Primorac M.M., Abad M.D., Hosemann P. et al. Elevated temperature mechanical properties of novel ultra-fine grained Cu-Nb composites, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 625, pp. 296-302. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.020.
6. Park S.-M., Oh Y.-S., Kim S.-J. et al. Effect of ECAP on change in microstructure and critical current density of low temperature super-conducting monowire, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, vol. 20, issue 9, pp. 1563-1572. DOI: 10.1007/s12541-019-00164-3.
7. Zhang P., Li J., Guo Q. et al. NbTi superconducting wires and applications, *Titanium for Consumer Applications. Real World Use of Titanium*. Amsterdam, Elsevier, 2019, chapter 15, pp. 279-296. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00010-1.
8. Banno N., Kobayashi K., Uchida A., Kitaguchi H. High-temperature-tolerable superconducting Nb-alloy and its application to Pb- and Cd-free superconducting joints between NbTi and Nb3Sn wires, *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, issue 36, pp. 20197-20207. DOI: 10.1007/s10853-021-06585-8.
9. Davies T., Grovenor C.R.M., Speller S.C. Atmospheric oxidation of NbTi superconductor, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 848, art. no. 156345, 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156345.
10. Karasev Yu.V., Korpusov V.Y., Malchenkov A.V. et al. The superconducting NbTi wire for the CBM dipole magnet, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022, vol. 35, issue 3, pp. 705-710. DOI: 10.1007/s10948-022-06143-6.
11. Karpati V., Korozs J., Kaptay G., Mertinger V. On formation of intermetallic compounds at the Copper / Niobium-Titanium interface, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 918, art. no. 165567, 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165567
12. Bozic D., Stasic J., Dimcic B. et al. Multiple strengthening mechanisms in nanoparticle-reinforced copper matrix composites, *Bulletin of Materials Science*, 2011, vol. 34, issue 2, pp. 217-226. DOI: 10.1007/s12034-011-0102-8.
13. Akbarpour M.R., Javadhesari S.M. Wear performance of novel nanostructured Ti-Cu intermetallic alloy as a potential material for biomedical applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 669, pp. 882-886. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.020.
14. Barna D., Novák M., Brunner K. et al. Conceptual design of a high-field septum magnet using a superconducting shield and a canted-cosine-theta magnet, *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, issue 5, art. no. 053302, 7 p. DOI: 10.1063/1.5096020.
15. Barannikova S., Schlyakhova G., Maslova O. et al. Fine structural characterization of the elements of a Nb-Ti superconducting cable, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, issue 1, pp. 323-332. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.02.004.
16. Hillmann H. Fabrication technology of superconducting material, *Superconductor Materials Science: Metallurgy, Fabrication, and Applications. NATO Advanced Study Institutes Series*, ed. by S. Foner, B.B. Schwartz. Boston, Springer, 1981, vol. 68, pp. 275-388. DOI: 10.1007/978-1-4757-0037-4_5.
17. Takahashi M., Kikuchi M. and Takada Y. Mechanical properties and microstructures of dental cast Ti-6Nb-4Cu, Ti-18Nb-2Cu, and Ti-24Nb-1Cu alloys, *Dental Materials Journal*, 2016, vol. 35, issue 4, pp. 564-570. DOI: 10.4012/dmj.2015-354.

18. Zhao Z., Xu W., Xin H., Yu F. Microstructure, corrosion and anti-bacterial investigation of novel Ti-xNb-yCu alloy for biomedical implant application, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 5212–5225. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.158.
19. Sato K., Takahashi M., Takada Y. Construction of Ti-Nb-Ti₂Cu pseudo-ternary phase diagram, *Dental Materials Journal*, 2020, vol. 39, issue 3, pp. 422-428. DOI: 10.4012/dmj.2018-394.
20. Takahashi M., Sato K., Togawa G. and Takada Y. Mechanical properties of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications, *Journal of Functional Biomaterials*, 2022, vol. 13, issue 4, art. no. 263, 12 p. DOI: 10.3390/jfb13040263.
21. Ivanov Y.F., Abzaev Yu.A., Klopotov A.A. et.al. Osobennosti strukturno-fazovogo sostoyaniya plenki na osnove vysokoentropijnogo splava AlNbTiZrCu, sintezirovannoj putem osazhdeniya mnogoelementnoj metallicheskoj plazmy [Features of the structural phase state of a film based on a high-entropy AlNbTiZrCu alloy synthesized by deposition of a multi-element metal plasma], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp.693-707. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.693. (In Russian).
22. Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.Kh., Klopotov A.A. et al. Rentgenovskie difraktsionnye issledovaniya protsessa rosta tonkikh plenok vysokoentropijnogo splava TiNbZrTaHfCu in situ s ispol'zovaniem sinkhrotronnogo izlucheniya [X-ray diffraction studies of the growth process of thin films of high-entropy TiNbZrTaHfCu alloy in situ using synchrotron radiation], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp.140-153. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.140. (In Russian).
23. Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Shugurov V.V. et al. Amorfno-kristallicheskie borsoderzhashchie pokrytiya, sformirovannye ionno-plazmennym metodom [Amorphous-crystalline boron-containing coatings formed by the ion-plasma], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp.725-735. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.725. (In Russian).