

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ НИОБИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА МЕДНЫХ ПОДЛОЖКАХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

С.В. Юревич, В.Г. Залесский, И.Л. Поболь, М.Ю. Хома

Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Исследована морфология ниобиевых покрытий, полученных вакуумным электронно-лучевым термическим напылением на медных подложках с различной шероховатостью. Установлено, что при напылении покрытия толщиной 0,3 мкм на подложки с различным исходным состоянием шероховатость поверхности покрытия соответствует шероховатости подложки. При напылении покрытия 1 мкм на подложку с Rz 0,237–0,447 мкм и Ra 0,039–0,085 мкм верхняя граница диапазона значений Rz снижается в 1,2–1,5 раза, Ra – в 2 раза.

Ключевые слова: ниобий, медь, вакуумное термическое напыление, электронный луч, покрытие, шероховатость

SURFACE MORPHOLOGY OF NIOBIUM COATINGS OBTAINED BY ELECTRON BEAM PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION ONTO THE COPPER SUBSTRATES

S.V. Yurevich, V.G. Zaleski, I.L. Pobol, M.Yu. Homa

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

The surface morphology of the niobium coatings obtained by electron beam physical vapour deposition onto the copper substrates with various roughness is investigated. When $\approx 0.3 \mu\text{m}$ thickness coating is deposited on substrates with different surface condition, the roughness of the coating repeats the substrate roughness. When the $\approx 1 \mu\text{m}$ coating is deposited on the substrate with Rz 0.237–0.447 μm and Ra 0.039–0.085 μm , the upper limit of the Rz value range decreases in 1.2–1.5 times, Ra – in 2 times.

Keywords: niobium, copper, physical vapour deposition, electron beam, coating, roughness

E-mail: i.pobol@gmail.com, sergei.yurevich@gmail.com

Введение

Сверхпроводящие сверхвысокочастотные (СВЧ) резонаторы получают все большее применение в науке и технике (научно-исследовательские комплексы, ме-

дицина, промышленность, энергетика и др.) [1]. Обоснованность их применения связана с рядом преимуществ ускоряющих структур, использующих сверхпроводимость, перед «теплыми» ускоряющими элементами: высокий КПД преобразования энергии электромагнитного поля в энергию пучка, невысокая требуемая мощность питания, высокие ускоряющие градиенты. Основным материалом при создании сверхпроводящих ускоряющих элементов в настоящее время является ниобий высокой чистоты. Однако, технологии изготовления ниобиевых резонаторов и сам материал крайне дорогостоящие, что сдерживает их широкое распространение. Более экономичным способом изготовления сверхпроводящих резонаторов является нанесение тонких сверхпроводящих пленок на медную подложку. Наиболее изученным методом получения таких покрытий является магнетронное напыление ниобия на медную основу. Данный метод был успешно использован при изготовлении резонаторов для ряда научно-исследовательских ускорителей, наиболее масштабными среди которых являются Электрон-позитронный коллайдер (Large Electron-Positron collider, LEP) и Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) [2, 3]. Вместе с тем, медные резонаторы со сверхпроводящими покрытиями обладают относительно невысокими рабочими характеристиками по сравнению с резонаторами из чистого ниобия. В связи с этим разработка новых методов и технологий нанесения покрытий и поиску сверхпроводящих материалов, комплекс свойств тонких пленок, которые приблизятся к свойствам чистого ниобия, продолжается. Перспективным методом нанесения сверхпроводящих покрытий может стать вакуумное термическое напыление с электронно-лучевым испарением.

Анализ литературных источников показал, что при изучении процессов нанесения сверхпроводящих покрытий на плоские экспериментальные образцы из меди и полномасштабные медные резонаторы существует разница в качестве подготавливаемых поверхностей подложек. Она обусловлена трудностями выполнения высококачественной полировки геометрически сложной рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов. В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик шероховатости поверхности ниобиевых покрытий, нанесенных с помощью вакуумного термического напыления с электронно-лучевым испарением, на основу с различным состоянием исходной поверхности.

1. Анализ состояния исходных поверхностей медных подложек при напылении сверхпроводящих ниобиевых покрытий

В опубликованных литературных источниках при исследовании экспериментальных плоских образцов, подготовленных для нанесения сверхпроводящих покрытий, рекомендуют полировать медную подложку до среднего квадратического отклонения профиля поверхности Rq от 2 до 12 нм при измерении на площадке 2×2 мкм и от 9 до 81 нм – на площадке 50×50 мкм [4]. При нанесении ниобия методом магнетронного распыления на плоскую подложку отмечается получение покрытия со средним арифметическим отклонением профиля Ra от 2 до 10 нм [5] и до 1,6 нм [6].

Для сверхпроводящих резонаторов со сложной геометрической конфигурацией затруднительно получение такого высокого качества поверхности. Так, применительно к сверхпроводящим резонатором из листового ниобия требуется получение высоты неровностей профиля $Rz \leq 2$ мкм [7]. В работе [8] проведен анализ состояния поверхности резонаторов из листового ниобия, изготовленных различными производителями. Параметры шероховатости рабочей поверхности резонаторов находятся в пределах $Ra = 0,047–0,257$ мкм и $Rz = 0,201–1,210$ мкм. Наиболее высокое качество поверхности применительно

к сверхпроводящим резонаторам из листового ниобия было получено для эллиптических конструкций при абразивной полировке $Ra = 5$ нм при измерении на площадке 1 мм^2 [9], при абразивной полировке с использованием химической реактивной среды $Ra = 10$ нм [10]. Электролитической полировкой получают поверхность ниобия с $Ra = 0,1$ мкм [11, 12]. Большинство конструкций сверхпроводящих резонаторов (если не принимать во внимание эллиптические резонаторы) не являются телами вращения, что затрудняет не только абразивную, но часто и электролитическую полировку их рабочей поверхности. В таких ситуациях используется химическая полировка, при которой состояние поверхности сильно зависит от зеренной структуры металла и для ниобия, используемого для изготовления сверхпроводящих резонаторов, составляет порядка $Ra = 1$ мкм. При химическом и электролитическом полировании образуются неровности поверхности по границам соседних зерен металла, что обусловлено отличием скоростей стравливания материала зерен, имеющих различную ориентацию кристаллических решеток. Данная ситуация характерна также при подготовке для напыления ниобия медных резонаторов, рабочая поверхность которых имеет сложную пространственную геометрию. При подготовке медных четвертьволновых $101,28$ МГц резонаторов для линейного ускорителя HIE-ISOLDE в научно-исследовательском центре CERN (г. Женева, Швейцария) для магнетронного напыления ниобия химической полировкой была получена поверхность меди с $Ra = 0,8$ мкм [13]. При этом, после нанесения ниобиевого покрытия отмечается отличие структуры его поверхности и толщины (в несколько раз) на различных участках рабочей поверхности резонаторов.

2. Оборудование и материалы

В качестве подложки использовались плоские образцы из меди М0 (ГОСТ 859-2014) с размерами 20×20 , 15×15 и 15×4 мм и толщиной 4 мм. Подготовка поверхности образцов, на которую напылялся ниобий, осуществлялась путем механической полировки. Перед напылением поверхности образцов обезжиривалась этиловым спиртом.

В качестве мишени использовался особоочистый ниобий с параметром RRR 300–310 (фирма Ningxia OTIC). Химический состав ниобия согласно сертификату качества производителя представлен в табл. 1. Габариты листов в состоянии поставки составляли $290 \times 290 \times 2,8$ мм. Мишени вырезались с помощью прецизионной пилы с охлаждением проточной водой. Перед напылением поверхностный слой ниобиевых мишеней посредством травления в смеси кислот удалялся. Использовалась смесь плавиковой HF (38 %), азотной HNO_3 (65 %) и ортофосфорной H_3PO_4 (85 %) кислот в соотношении компонентов 1:1:2.

Табл. 1

Химический состав ниобия фирмы Ningxia OTIC

Элемент	Ta	W	Ti	Fe	Mo	Ni	H	N	O	C
Содержание, ppm (по массе)	76	10	5	5	10	5	1	5	5	10

Для вакуумного термического напыления использовались установка резистивного и электронно-лучевого испарения ВУ-1А (производитель – Сморгонский завод оптического станкостроения) и установка электронно-лучевой обработки, созданная в ФТИ НАН Беларуси на базе энергоблока ЭЛА-15. Технические характеристики установок и параметры процессов напыления представлены в табл. 2. Схемы процессов напыления на оборудовании ВУ-1А и ЭЛА-15 представлены на рис. 1.

Технические характеристики установок и параметры процессов напыления

	ВУ-1А				ЭЛА-15
Технические характеристики					
Ускоряющее напряжение, кВ	6, 12				60
Максимальная мощность, кВт	3, 6				15
Максимальный ток луча, мА	480 ± 20				250
Давление в камере, Па	4 · 10 ⁻³				3 · 10 ⁻³
Параметры напыления					
Ускоряющее напряжение, кВ	12				60
Мощность луча, кВт	1,68				3,48
Ток луча, мА	140				58
Давление в камере, Па	4 · 10 ⁻³				3 · 10 ⁻³
Расстояние до образца, мм	250				70
Время напыления, мин	60	120	210	240	10
Толщина покрытия, мкм	0,27	0,50	0,90	1,06	0,3

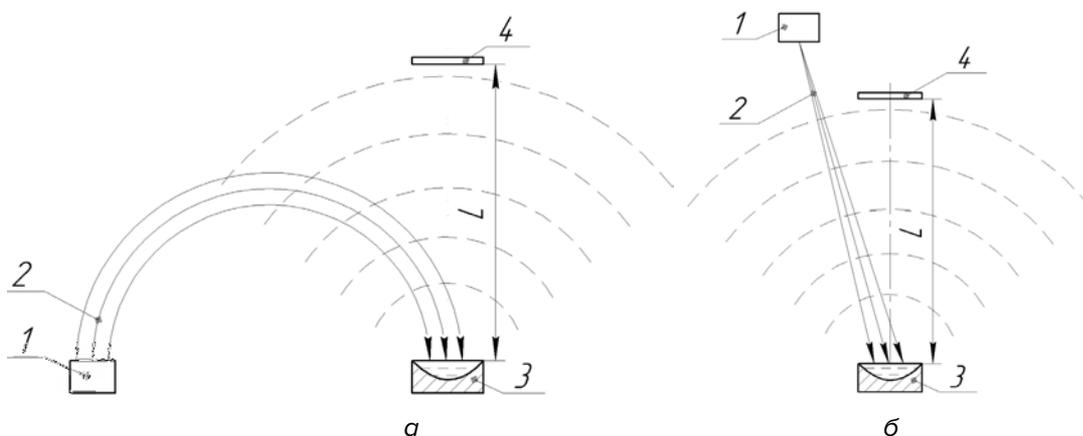


Рис. 1. Схемы процесса напыления ниобия на медную подложку на оборудовании ВУ-1А (а) и ЭЛА-15 (б):

1 – электронно-лучевая пушка; 2 – электронный луч;
3 – ниобиевая мишень; 4 – медная подложка

Измерение характеристик шероховатости (высоты неровностей профиля Rz , средних арифметических Ra и квадратичных Rq отклонений профилей) исходной поверхности медных подложек и ниобиевых покрытий проводилось с помощью профилографа/профилометра Surtronic 25 (тип датчика – индуктивный, материал щупа – алмаз, производитель – фирма Taylor Hobson). Использовался диапазон датчика 10 мкм; разрешение 0,01 мкм; длина трассы (базовая длина) 0,25 и 1,2 мкм. Предельная погрешность измерений 3 %. Для визуализации профилей поверхности и построения относительные опорные кривые профилей использовался программный комплекс TalyProfile Lite (фирма Taylor Hobson).

Толщины нанесенных ниобиевых покрытий определялись путем измерения высоты ступеньки, образуемой между ниобиевым покрытием и медной подложкой после удаления маскирующего покрытия, с помощью микроинтерферометра МИИ-4 (диапа-

зон измерения толщин пленок 0,1–0,8 мкм, максимальное увеличение 500) и методом степ-профилометрии с помощью профилографа/профилометра Surtronic 25.

Снимки поверхностей выполнялись на оптическом микроскопе МИ-1 (максимальное увеличение 1500).

3. Обработка режимов получения ниобиевых покрытий на медной подложке с помощью вакуумного термического напыления

Проведены исследования толщины ниобиевого покрытия S , наносимого на установке ВУ-1А при ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 12$ кВ и расстоянии L ниобиевой мишени до медной подложки, в зависимости от времени осаждения t и тока эмиссии $I_{\text{луча}}$ при постоянных остальных параметрах процесса. На рис. 2. представлена зависимость толщины покрытий от времени напыления для тока эмиссии 140 мА и расстояния от мишени до подложки 250 мм. При увеличении продолжительности процесса напыления толщина покрытия возрастает. Напыление с использованием электронно-лучевого испарения позволяет сформировать на поверхности меди тонкий слой ниобия толщиной от 0,27 мкм до 1,06 мкм за время от 1 часа до 4 часов. Для получения покрытий толщиной $\approx 0,3$ мкм с использованием приведенных выше режимов на оборудовании ВУ-1А время процесса составляет более 1 часа (мощность луча в процессе напыления составляла 1,68 кВт).

Выполнено напыление ниобия на установке ЭЛА-15 (мощностью луча в процессе напыления 3,48 кВт, расстояние L от ниобиевой мишени до медной подложки 70 мм). В данном случае формирование на медной подложке ниобиевого покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм происходило за время порядка 10 мин (остальные параметры процесса представлены в табл. 2). Увеличение скорости напыления должно привести к улучшению чистоты покрытий, т.к. уменьшается время поглощения примесных элементов из окружающей атмосферы.

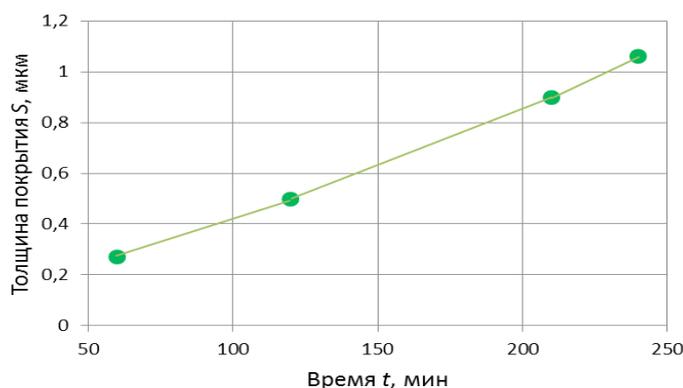


Рис. 2. Зависимость толщины нанесенного слоя ниобия на установке ВУ-1А от времени напыления: $U_{\text{уск}} = 12$ кВ; $I_{\text{луча}} = 140$ мА; $L = 250$ мм; $T_{\text{обр}} = 160 \pm 10$ °С; $P_{\text{нач}} = 4 \cdot 10^{-3}$ Па; $P_{\text{проц}} = 2 \cdot 10^{-2}$ Па

4. Изучение влияния исходной морфологии поверхности медной подложки и толщины покрытия на шероховатость поверхности ниобиевых покрытий

Проведены исследования структуры поверхности ниобиевых покрытий в зависимости от состояния исходной поверхности подложки и параметров процесса термического напыления. Изучались высота неровностей профиля Rz , средние арифметические Ra и квадратические Rq отклонения профилей исходной поверхности и поверхности нанесенных тонких пленок. При напылении (параметры процес-

са представлены в табл. 2.) ниобиевого покрытия толщиной $S \approx 0,3$ мкм на гладкую поверхность с высотой неровностей профиля Rz в пределах $0,040\text{--}0,045$ мкм изменения параметров шероховатости практически не наблюдается – диапазон Rz составляет $0,035\text{--}0,045$ мкм.

В табл. 3. представлены данные измерения параметров шероховатости исходной поверхности и поверхности с нанесенным ниобиевым покрытием. Используемый профилометр (Surtronic 25) в данном случае не позволил оценить параметры Ra и Rq , значения которых в данном случае находятся ниже разрешения профилографа – $0,01$ мкм.

Табл. 3

Шероховатость исходной поверхности подложки и нанесенного ниобиевого покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм (базовая длина – 250 мкм)

Параметр шероховатости	Подложка	Покрытие
Rz , мкм	$0,040\text{--}0,045$	$0,035\text{--}0,045$
Ra , мкм	$<0,01$	$<0,01$
Rq , мкм	$<0,01$	$<0,01$

При рассмотрении графических изображений профилей поверхностей до и после напыления при измерении на базовой длине $0,250$ мкм отличий не наблюдается (рис. 3). На базовой длине $1,2$ мм можно лишь отметить уменьшение пиковых выступов и впадин профиля.

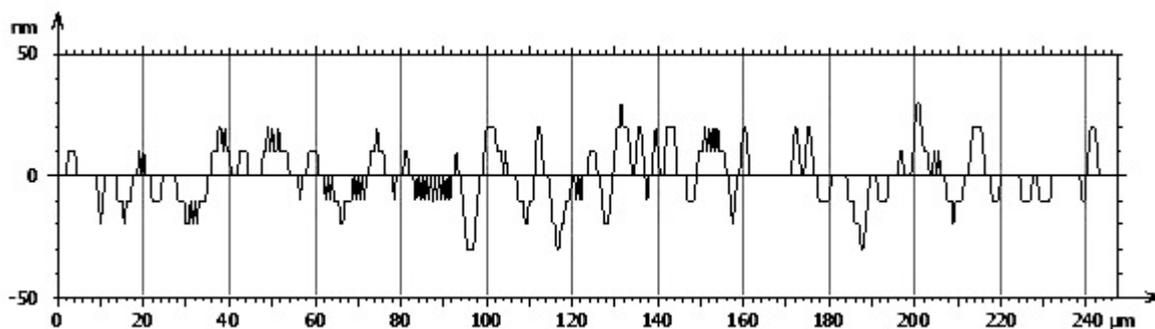


Рис. 3. Профиль поверхности ниобиевого покрытия на меди: $S \approx 0,3$ мкм

Разрешения оптического микроскопа (максимальное увеличение 1500) не достаточно для выявления структуры поверхности с рассматриваемыми параметрами шероховатости.

Таким образом, при вакуумном термическом напылении на подложку с шероховатостью поверхности (Rz в пределах $0,040\text{--}0,045$ мкм) поверхность ниобиевого покрытия повторяет профиль исходной поверхности.

Выполнены исследования характеристик шероховатости поверхности ниобиевых покрытий различной толщины, полученных при увеличении времени напыления при неизменных прочих параметрах процесса (согласно табл. 2) на подложку с исходной высотой неровностей профиля Rz в пределах $0,237\text{--}0,447$ мкм. Результаты исследований шероховатостей полученных поверхностей представлены в табл. 4.

Табл. 4

Шероховатость исходной поверхности подложки и нанесенных ниобиевых покрытий различной толщины (базовая длина 1,2 мкм)

Параметр	Подложка	Толщина ниобиевого покрытия, мкм			
		0,27	0,50	0,90	1,06
Rz , мкм	0,237–0,447	0,213–0,313	0,197–0,367	0,250–0,357	0,227–0,315
Ra , мкм	0,039–0,085	0,029–0,072	0,031–0,073	0,029–0,034	0,030–0,032
Rq , мкм	0,050–0,091	0,049–0,085	0,041–0,090	0,041–0,059	0,041–0,049

Анализ полученных зависимостей параметров шероховатости поверхности ниобиевых покрытий от толщины нанесенного слоя показывает, что при увеличении толщины покрытия уменьшается главным образом верхний предел значений высоты неровностей профиля поверхности, т.е. уменьшается высота максимальных выступов и впадин (рис. 4, а). При этом верхняя граница значений Rz из диапазона 0,237–0,447 мкм уменьшается практически в 1,2–1,5 раза уже при нанесении покрытия толщиной 0,27–0,50 мкм, соизмеримого с высотой неровностей профиля исходной поверхности, однако, в дальнейшем не претерпевает существенных изменений. Нижняя граница диапазона Rz сохраняется на том же уровне на всем диапазоне напыляемых толщин. Аналогичный характер имеют зависимости средних арифметических Ra и квадратических Rq отклонений профилей поверхностей полученных покрытий (рис. 4, б). Верхние пределы значений Ra и Rq при этом уменьшаются в 2 раза и приближаются к нижним пределам, которые, как в предыдущем случае, сохраняются на прежнем уровне.

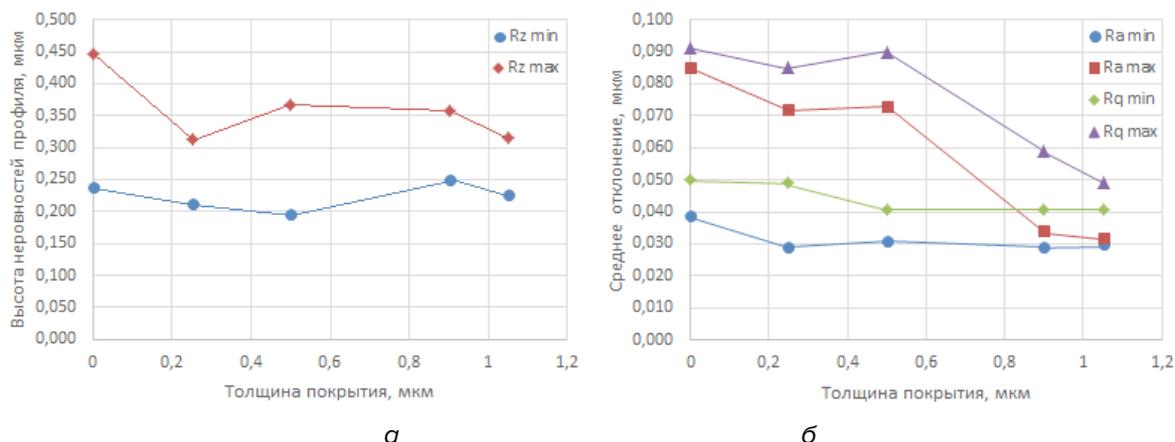


Рис. 4. Зависимости высоты неровностей профиля (а) и средних арифметического и квадратического отклонений (б) поверхности ниобиевого покрытия на меди от его толщины

На профиле поверхности ниобиевого покрытия толщиной 0,27 мкм с параметрами шероховатости из рассматриваемых диапазонов можно выделить протяженные неровности, внешне похожие на следы механической полировки – царапины. Они наблюдаются в виде отдельных выступов и впадин на графическом изображении профиля поверхности, который выполнен в поперечном по отношению к ним направлении (рис. 5). Аналогичный профиль имеет и исходная поверхность подложки.

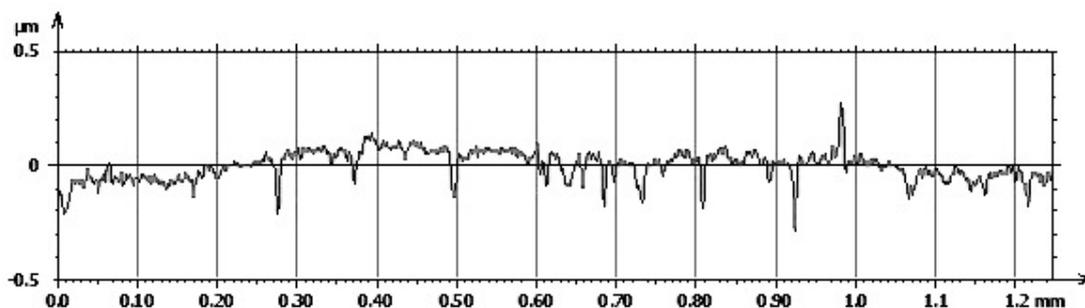


Рис. 5. Профиль поверхности ниобиевого покрытия на меди:
 $Rz = 0,263$ мкм; $Ra = 0,024$ мкм; $Rq = 0,049$ мкм, $S = 0,27$ мкм

Таким образом, термическое напыление ниобия на медную подложку с высотой неровностей профиля Rz 0,237–0,447 мкм и средним отклонением Ra 0,039–0,085 мкм ведет к сохранению неровностей поверхности в виде отдельных выступов и впадин при уменьшении верхних границ диапазонов Rz в $\approx 1,2$ –1,5 раза и Ra в ≈ 2 раза.

Проведены исследования поверхностей ниобиевых покрытий (параметры процесса напыления представлены в табл. 2), полученных на подложках из меди с высокой шероховатостью, высота неровностей профиля поверхности Rz которых составляла 0,41–2,66 мкм. Параметры шероховатости поверхностей подложек и ниобиевых покрытий измерялись в поперечном и продольном относительно протяженных неровностей направлениях (результаты измерений представлены в табл. 5). В данном случае наблюдается незначительное увеличение значений параметров шероховатости поверхности. На рис. 6 представлен профиль поверхности ниобиевого покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм.

Табл. 5

Шероховатость исходной поверхности подложки из меди и ниобиевого покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм (базовая длина 1,2 мкм)

Параметр	Подложка		Покрытие	
	направление измерения			
	поперек	вдоль	поперек	вдоль
Rz , мкм	1,42–2,66	0,407–0,687	1,05–2,72	0,603–0,683
Ra , мкм	0,234–0,309	0,067–0,140	0,21–0,331	0,083–0,096
Rq , мкм	0,303–0,414	0,086–0,170	0,256–0,446	0,110–0,158

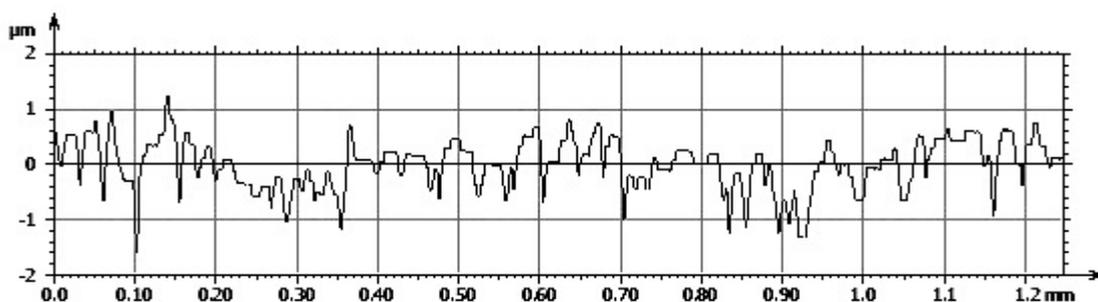


Рис. 6. Профиль поверхности ниобиевого покрытия на меди:
 $Rz = 1,68$ мкм; $Ra = 0,257$ мкм, $S \approx 0,3$ мкм

Полученные результаты позволяют выявить особенности роста ниобиевого покрытия на поверхности с большими неровностями. Как в поперечном, так и в продольном по отношению к протяженным неровностям поверхности направлениях для всех характеристик шероховатости наблюдается небольшое увеличение значений. Объяснением данного явления, видимо, является характер роста ниобиевого покрытия на участке с наличием местной неровности в виде протяженной впадины, сформированной из-за воздействия абразивной частицы в процессе механического полирования (рис. 7, а).

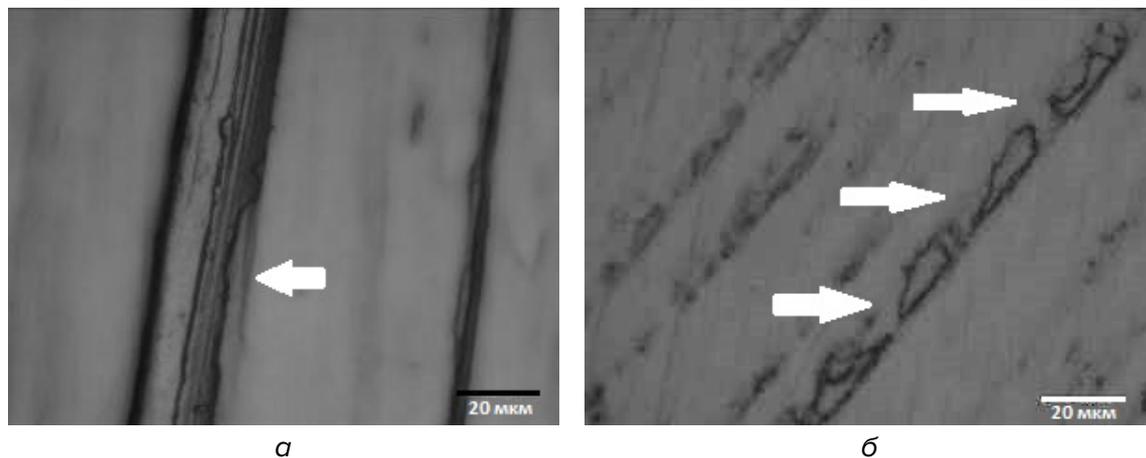


Рис. 7. Изображения поверхности ниобиевых покрытий, $\times 1000$

При сочетании определенных значений ширины и глубины впадины скорость роста покрытия на ее глубине ниже скорости роста покрытия на прилегающих к ней участках. Это приводит к увеличению значений параметров шероховатости поверхности в поперечном к продольной впадине направлении. При этом рост покрытия может начаться на локальном участке (склоне) боковой стенки впадины, что ведет к образованию перемычек (рис. 7, б), являющихся возможной причиной увеличения шероховатости поверхности в продольном к протяженным впадинам направлении.

Заключение

При вакуумном термическом напылении с электронно-лучевым испарением ниобиевых покрытий на медную подложку с различным состоянием исходной поверхности установлено, что при нанесении покрытия на поверхность с высотой неровностей профиля Rz менее $0,04$ мкм и средним арифметическим отклонением профиля Ra менее $0,01$ мкм шероховатость поверхности ниобиевого покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм соответствует шероховатости подложки. При напылении ниобия на медную основу с параметрами шероховатости $Rz = 0,237-0,447$ мкм и $Ra = 0,039-0,085$ мкм верхняя граница диапазона значений Rz снижается в $1,2-1,5$ раза при нанесении покрытия толщиной $0,27$ мкм, верхняя граница диапазона значений Ra – в 2 раза при толщине покрытия $0,5$ мкм. При дальнейшем увеличении толщины нанесенного слоя параметры шероховатости изменений не претерпевают и при толщине покрытия $1,06$ мкм составляют $0,227-0,315$ мкм и $0,030-0,032$ мкм соответственно. При напылении покрытия толщиной $\approx 0,3$ мкм на медную подложку с $Rz = 1,42-2,66$ мкм и $Ra = 0,234-0,309$ мкм, наблюдается незначительное увеличение значений параметров шероховатости поверхности, причиной чего является различие скоростей роста напыляемого покрытия на участках неровностей поверхности с различной высотой, главным образом на протяженных впадинах.

Исследования выполнены в рамках работ по договору с БРФФИ № Ф17Д–013 «Исследование особенностей получения и метрологии покрытия системы Nb и Nb₃Sn на основе из Си с целью создания сверхпроводящих высокочастотных резонаторов для ускорителей класса мега-сайенс».

REFERENCES

- 1 Padamsee, H. RF Superconductivity: Science, Technology and Applications [text] / H. Padamsee. – New York: John Wiley & Sons, 2009. – P. 464.
- 2 Benvenuti, C. Superconducting niobium sputter-coated copper cavity modules for the LEP energy upgrade [text] / C. Benvenuti [et al.] // Conf. Rec. of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC 1991): Accelerator Science and Technology, San Francisco, USA, May 6–9, 1991 / ed. L. Lizama, J. Chew. – Piscataway, 1991. – P. 1023–1025.
- 3 The Large Hadron Collider: conceptual design [text] / T.S. Pettersson, P. Lefevre (ed.). – Geneva, 1995. – P. 223.
- 4 Spradlin, J. Surface preparation of metallic substrates for quality SRF thin films [text] / J. Spradlin, A.–M. Valente-Feliciano, O. Trofimova // Proc. of 15th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF 2011), Chicago, USA, July 25–29, 2011 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.researchgate.net>. – Date of access: 01.12.17. – P. 936–939.
- 5 Tonini, D. Morphology of niobium films sputtered at different target – substrate angle [text] / D. Tonini [et al.] // Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Travemuende/Lubeck, Germany, September 8–12, 2003 [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: <http://srf.desy.de/fap/paper/ThP11.pdf>. – Date of access: 01.12.2017.
- 6 Hong, Ji Effect of ion bombardment on in-plane texture, surface morphology, and microstructure of vapor deposited Nb thin films [text] / Ji Hong [et al.] // Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 81, Issue 6754. – P. 6754–6761.
- 7 Saito, K. Surface smoothness for high gradient niobium SC RF cavities [text] / K. Saito // Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Travemuende/Lubeck, Germany, September 8–12, 2003 [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: <http://srf.desy.de/fap/paper/ThP15.pdf>. – Date of access: 19.01.2015.
- 8 Wu, G. Investigations of surface quality and SRF cavity performance [text] / G. Wu [et al.] // Proc. of Applied Superconductivity Conf. (APS 2010), Washington, USA, August 1–6, 2010 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206/1206.6331.pdf>. – Date of access: 09.12.2014.
- 9 Cooper, C.A. Mirror-smooth surfaces and repair of defects in superconducting RF cavities by mechanical polishing [text] / C.A. Cooper, L.D. Cooley // Superconductor Science and Technology. – 2012. – Vol. 26(1):015 011.
- 10 Wu, G. Review of SRF materials workshop / G. Wu [et al.] // Proc. of 13th Int. Workshop on RF Superconductivity, Beijing, China, October 14–19, 2007 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/srf2007/PAPERS/TU204.pdf>. – Date of access: 30.11.2017.
- 11 Saito, K. Superiority of electropolishing over chemical polishing on high gradients [text] / K. Saito [et al.] // Particle Accelerators. – 1998. – Vol. 60, Issues 1–4. – P. 193–217.
- 12 Baars, D. Crystal orientation effects during fabrication of single or multi-crystal Nb SRF cavities / D. Baars // Proc. of 13th Int. Workshop on RF Superconductivity, Beijing, China, October 14–19, 2007 [Electronic resource]. / Peking University. – P. 111–115. – Mode of access: <http://web5.pku.edu.cn/srf2007>. – Date of access: 20.01.2015.
- 13 Therasse, M. [et al.] Series superconducting cavity production for the HIE-ISOLDE project at CERN [text]. Proc. of the 27th International Linear Accelerator Conference (LINAC14), Geneva, Switzerland, August 31–September 5, 2014 / ed. C. Carli [et al.]. – Geneva: JACoW, 2014. – P. 1165–1167.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 15.05.18