В.В. ПОЧЕТУХА
канд. техн. наук
Д.А. РОМАНОВ
доктор техн. наук, доцент, старший научный сотрудник
А.Д. ФИЛЯКОВ
научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
Ю.Ф. ИВАНОВ
доктор физ.-мат. наук, доцент, главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (MO-AU)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА» ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ И АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящей статье было произведено электровзрывное напыление покрытий системы Mo-Au с последующей комплексной обработкой, включающей воздействие низкоэнергетичным импульсным электронным пучком и азотирование в плазме дугового разряда низкого давления. Толщина покрытия системы Mo-Au изменяется в пределах от 50 мкм до 100 мкм. Методами микрорентгеноспектрального анализа определен элементный состав покрытия. Выявлено легирование покрытия атомами меди из подложки. Методами рентгенофазового анализа выявлен многофазный состав покрытия (твердые растворы на основе меди и молибдена, CuAu, $Cu_{0.25}Au_{0.75}$). Методами просвечивающей электронной микроскопии определена структура покрытия. Обнаружено формирование в покрытии частиц нитридов меди и молибдена, размеры которых изменяются в пределах от 20 до 45 нм. Исследованы основные механические характеристики и трибологические свойства покрытия.

Ключевые слова: *электрический контакт, покрытие, золото, молибден, электровзрывное напыление, азотирование, электронно-пучковая обработка.*

V.V. POCHETUHA
Cand. of Techn. Sciences
D.A. ROMANOV
Doctor of Techn. Sciences, Associate Professor, Senior Researcher
A.D. FILYAKOV
Researcher
Siberian State Industrial University
Yu.F. IVANOV
Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor, Principle Researcher
Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS)

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE “COATING (MO-AU)/ (COPPER) SUBSTRATE” SYSTEM AFTER IRRADIATION WITH A PULSED ELECTRON BEAM AND NITRIDING IN A LOW-PRESSURE GAS DISCHARGE PLASMA

The electroexplosive spraying of Mo-Au coating and complex treatment including low energy impulse electron beam impact and nitriding by low-pressure arc discharging plasma. The thickness of the coating varies from 50μm to 100 μm. The coating elemental composition was obtained by X-ray microanalysis. It was found that coating alloyed by copper atoms from the substrate. The multi-phase composition of the coating was found by x-ray analysis. There is a solid solution based on copper and molybdenum, CuAu, $Cu_{0.25}Au_{0.75}$. The structure of the coating was investigated by transmission electron microscopy. The formation of copper and molybdenum nitrides was detected. Their size varies from 20 to 45 nm. The main mechanical properties and tribological characteristic were investigated.

Keywords: *electrical contact, coating, gold, molybdenum, electroexplosive spraying, nitriding, electron-beam treatment.*

DOI: 10.25791/pfim.02.2023.1256

Введение

Электрические контакты широко используются в различных силовых электронных устройствах для передачи энергии и сигналов. Высокая надежность работы электрических контактов является обязательным условием нормальной работы электрических систем. Надежные и эффективные электрические контакты необходимы как в простых электрических цепях, так и в сложных машинах и оборудовании. Их выход из строя оказывает непосредственное влияние на стабильность работы всей электрической системы. Для обеспечения высокой надежности электрический контакт должен обладать хорошими контактными характеристиками, износостойкостью, устойчивостью к воздействию высоких температур и агрессивных сред. [1,2].

Истирание или малоамплитудное перемещение контактов является одной из основных причин выхода из строя электрических контактов разъемов . Амплитуда фреттинга может составлять от нескольких микрометров до 100 мкм в электронных соединителях [3].

Для увеличение срока службы электрических разъемов, широко используются передовые технологии покрытий как одно из эффективных средств улучшения характеристик контактов, например, покрытия из благородных металлов, сплавов и композов [4].

Сочетание свойств, необходимых для безотказного функционирования электрических контактов, можно достичь при помощи композиционных материалов, содержащих матрицу из металла или сплава, армированного керамическими, металлическими или органическими соединениями, улучшающими такие свойства, как удельная прочность, жесткость, модуль упругости, износостойкость коррозионную стойкость, теплопроводность и т. д. [5]. Как правило, в основе таких материалов лежит матрица, основным свойством которой является высокая электропроводность и тугоплавкий компонент, играющий роль наполнителя с высокой износо- и электроэрозионной стойкостью. Композиты с металлической матрицей, армированные наночастицами, применяются в качестве материалов для электрических контактов благодаря низкой плотности, высокой удельной прочности и высокой износостойкости [6]. На сегодняшний день существует множество композитов н основе Al [7], Mg [8], Ti [9], Cu [10], Ni [11], Fe [12] и т. д.

Основной проблемой объемных композиционных материалов является хрупкость. К тому же электрическая эрозия в первую очередь разрушает поверхностный слой контакта. В связи с этим, в большинстве случаев экономически более целесообразно создавать покрытия на поверхности, чем полностью изготавливать деталь из композита с металлической матрицей.

В настоящее время, перспективной является разработка композитных покрытий, в на основе драгоценных металлов с хорошей проводимостью и тугоплавким наполннитетем.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе поставлена цель формирования, анализа структуры и свойств покрытия состава Mo-Au, сформированного на меди комплексным методом, сочетающим электровзрывное напыление, облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления.

Материал и методика исследования

Материалом исследования являлись образцы системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка». Их нанесение производили методом электровзрывного напыления на электровзрывной установке ЭВУ 60/10М. Покрытия наносили на образцы электротехнической меди (химический состав, масс. %: Cu 99,99; Fe 0,001; Ni 0,001; S 0,001; P 0,001; As 0,001; Pb 0,001; Zn 0,001; Ag 0,001; O 0,0005; Sb 0,0005; Bi 0,0005; Sn 0,0005). Медные образцы имели форму параллелепипеда с размерами 25x25x5 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности. Электровзрывное напыление проводили с использованием золотой фольги (химический состав, масс. %: Au 99,9; Pb 0,003; Fe 0,035; Sb 0,002; Bi 0,002; Cu 0,058) массой 781 мг. На поверхности фольги размещали молибденовый порошок (дисперсность частиц 1–5 мкм) массой 200 мг. Процесс осуществляли при следующих параметрах: время воздействия плазмы на поверхность образца ~ 100 мкс; поглощаемая плотность мощности на оси струи ~ 5,5 ГВт/м^2; давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности ~ 12,5 МПа; остаточное давление газа в рабочей камере ~100 Па; температура плазмы на срезе серебряного сопла ~10^4 К.

Комбинированную обработку образцов осуществляли на установке «КОМПЛЕКС». Обработку поверхности системы «покрытие/подложка» осуществляли низкоэнергетичным импульсным электронным пучком при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 60 Дж/см^2, длительность импульса пучка электронов 100 мкс, частота следования импульсов 0,3 с$^{-1}$, количество импульсов облучения 10. Азотирование проводили в плазме дугового разряда низкого давления с накаленным катодом (концентрация плазмы (10^{15}…10^{18}) м$^{-3}$ в объемах до нескольких м^3), который, обеспечивая генерацию потока газовой плазмы без микрокапель, позволяет осуществлять ионную очистку (травление) поверхности и разогревать обрабатываемую деталь до требуемой

температуры. Температура азотирования 520 ^{0}C, длительность азотирования 5 час. Механические свойства образцов характеризовали твердостью и модулем Юнга. Исследования проводили методом Виккерса на приборе TTX-NHT S/N: 01-04538 при максимальной нагрузке на индентор 50 мН и скорости нагрузки / разгрузки 100 мН/мин., пауза между нагрузкой и разгрузкой 5 с, алмазный наконечник Берковича. Трибологические свойства характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Испытания проводили в условиях сухого трения по схеме диск-палец на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека износа 2 мм, путь, пройденный контртелом, 100 м, скорость вращения образца 25 мм/с, нагрузка на индентор 5 Н, температура комнатная. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром. Анализ элементного и фазового состава, дефектной структуры осуществляли методами сканирующей (прибор MIRA 3 Tescan) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F, JEOL) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония); съемку осуществляли в медном отфильтрованном излучении Cu-Kα1; монохроматор СМ-3121. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Результаты исследования и их обсуждение

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры поперечных шлифов системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка». Анализируя результаты, представленные на рис. 1, можно отметить, что толщина покрытия изменяется в пределах от 50 мкм до 100 мкм (рис. 1, а).

На границе контакта покрытия и подложки формируется переходная зона, имеющая столбчатое (дендритное) строение (рис. 2, б). Это свидетельствует о сплавлении покрытия и подложки, т.е. о высокой адгезии на уровне когезии.

Покрытие имеет неоднородное строение (рис. 1, б-г). Судя по формирующемуся контрасту, можно предположить неоднородное распределение в покрытии атомов молибдена, золота и меди. Данное предположение нашло подтверждение при микрорентгеноспектральном анализе системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», осуществленном методом картирования и методом «по точкам» (рис. 3). Метод картирования позволил визуализировать неоднородное распределение атомов молибдена и золота, а именно, выявить островки молибдена в слое золота. Дополнительно к указанным элементам в покрытии выявлены включения, обогащенные атомами хрома и кислорода. Судя по их взаимному расположению, можно предположить наличие в покрытии окислов хрома. Образцы с покрытием подвергались азотированию. Можно отметить, что атомы азота преимущественно расположены в покрытии.

Методом микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» (рис. 3, а) проведены количественные исследования элементного состава системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка». Результаты исследований приведены в табл. 1. Анализируя полученные результаты, можно отметить, во-первых, присутствие атомов азота только в покрытии (области 1-9); во-вторых, наличие областей, обогащенных только атомами молибдена и азота (области 1 и 4); в-третьих, наличие областей, обогащенных атомами азота, меди и золота (области 2, 3, 5, 7-9); в-четвертых, факт присутствия атомов меди на всей толщине покрытия; и, в-пятых, отсутствие легирования подложки элементами покрытия и азотом.

Фазовый состав покрытия изучали методами рентгенофазового анализа. На рис. 4 приведена рентгенограмма, свидетельствующая о многофазности формируемого покрытия. Относительное содержание фаз и их характеристики приведены в табл. 2. Анализ результатов, представленных в табл. 2, свидетельствует о присутствии в покрытии как фаз на основе твердых растворов меди и молибдена, так и сплавов меди с золотом. Нитридные фазы методами рентгенофазового анализа не обнаружены, что может

Таблица 1

Результаты количественного анализа элементного состава системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», полученные методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» соответственно рис. 3, а.

Спектр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	0.5	0.4	0.9	1,0	0.7	0.00	0.6	0.7	0.5			
Cu		20.8	21.5		22.7	23.9	28.7	44.9	80.9	100.0	100.0	100.0
Mo	99.5			99.0								
Au		78.8	77.6		76.6	76.1	70.7	54.4	18.6			

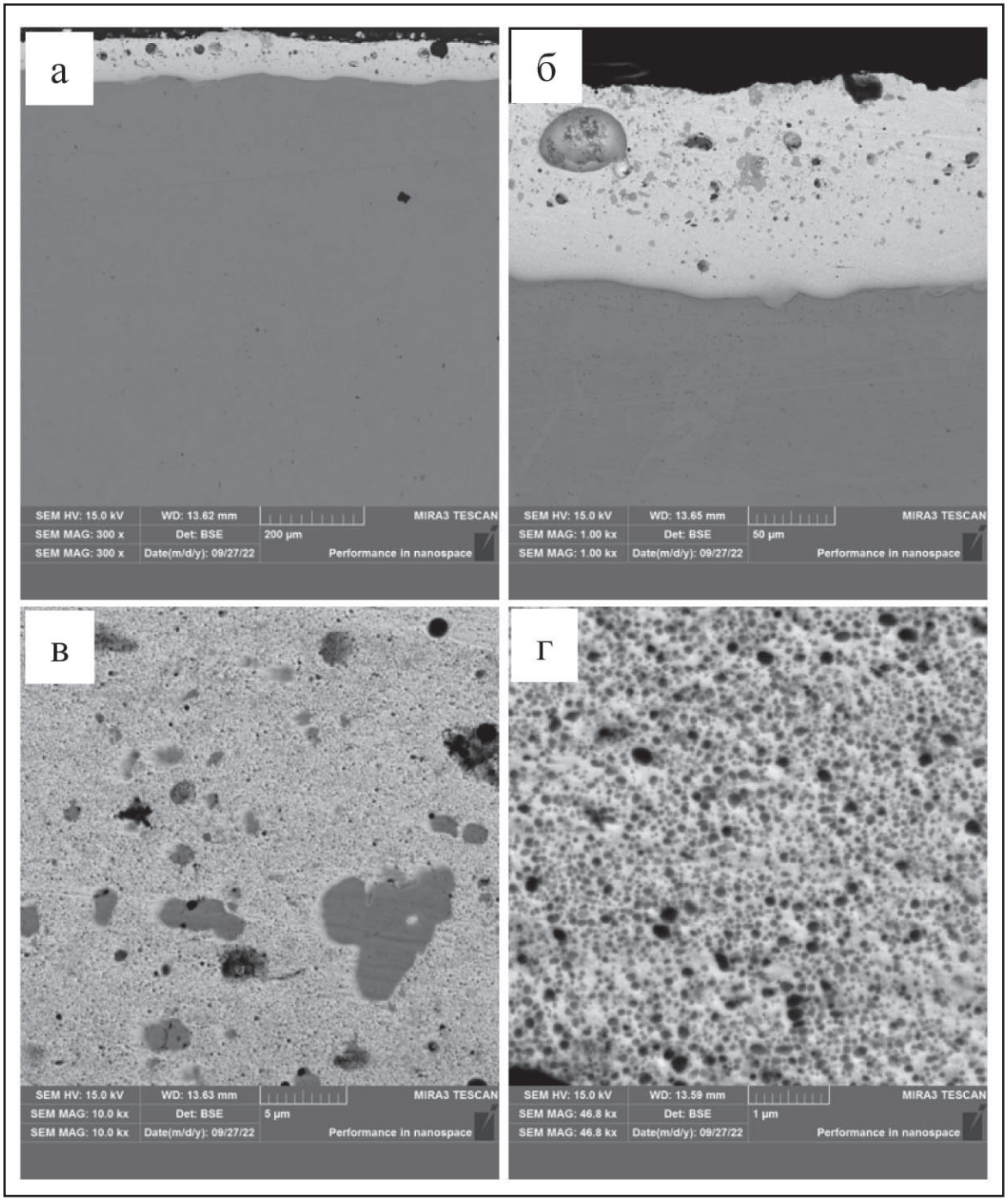

Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры шлифа системы «покрытие (Mo-Au)/ (медь) подложка», подвергнутой облучению импульсным электронным пучком и последующему азотированию

указывать как на малое количество данных фаз, так и на малые (наномасштаба) размеры частиц.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии анализировали элементный состав и морфологию фаз, состояние дефектной субструктуры. Элементный анализ участков фольги проводили методами микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 5 приведен один из вариантов такого анализа, свидетельствующий о существенно неоднородном распределении элементов покрытия. Формирующееся покрытие имеет морфологически сложное мультимодальное строение, представленное зернами меди, золота и молибдена микронных размеров (рис. 5, рис. 6, а), содержит включения глобулярной

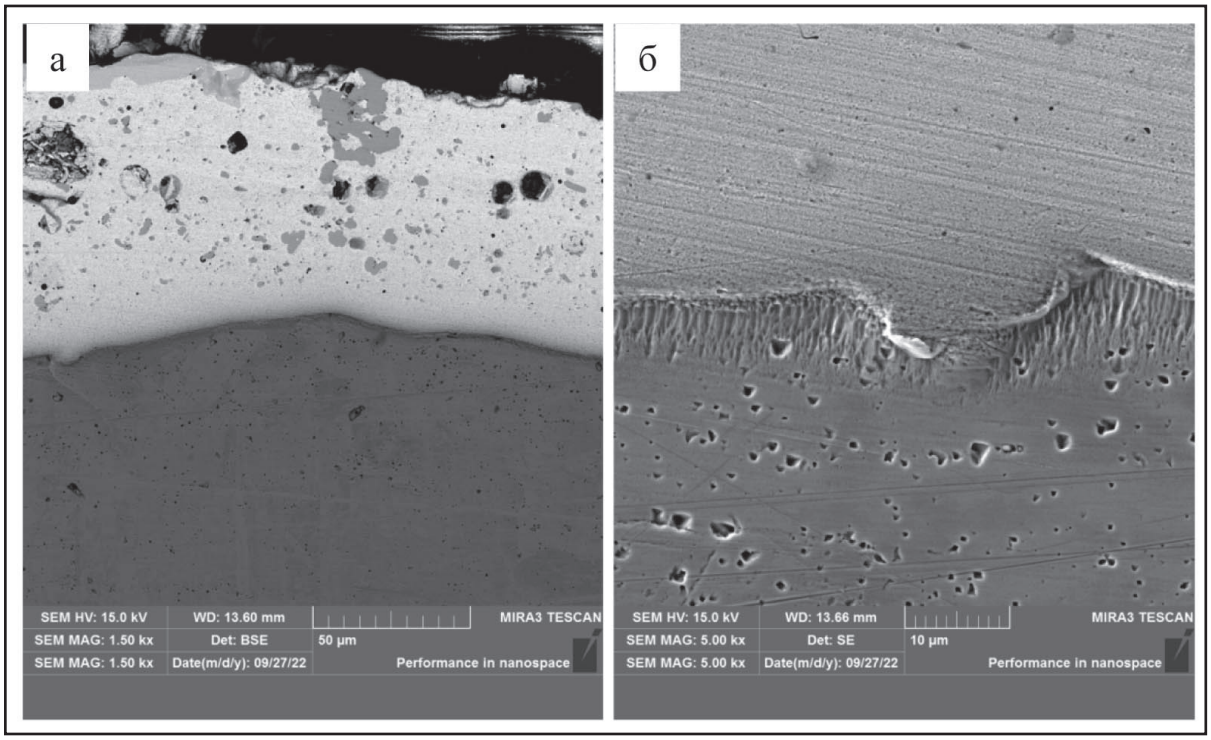

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения структуры переходной зоны, формирующейся в системе «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», подвергнутой облучению импульсным электронным пучком и последующему азотированию

формы, размеры которых изменяются в пределах десятков-сотен нанометров (рис. 6, б).

Фазовый состав покрытия исследовали, осуществляя анализ микроэлектронограмм и соответствующих темнопольных изображений. Примеры такого анализа приведены на рис. 7-рис. 9. Полученные результаты свидетельствуют о том, что покрытие является многофазным материалом, при этом фазовый состав покрытия зависит от места его анализа. Представленные на рис. 7 электронно-микроскопические изображения структуры покрытия свидетельствуют о наличии зерен золота размерами (0,5-0,8) мкм (рис. 7, в) и частиц нитридов меди и молибдена размерами (30-40) нм (рис. 7, г).

Представленные на рис. 8 электронно-микроскопические изображения структуры покрытия свидетельствуют о наличии зерен молибдена размерами (0,2-1) мкм (рис. 8, в) и частиц сплава CuAu размерами (25-45) нм (рис. 8, г).

Представленные на рис. 9 электронно-микроскопические изображения структуры покрытия демонстрируют формирование в покрытии зерен золота размерами десятки микрометров (рис. 9, г), содержащих частицы молибдена, CuAu, MoN и Cu_3Au, размеры которых изменяются в пределах (20-45) нм (рис. 9, в).

Механические свойства системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным

Таблица 2

Исследование фазового состава и структурных параметров образца системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию

образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, mas. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d*10^{-3}$
система «(Mo-Au)/(медь) подложка» после облучения электронным пучком и азотирования	Cu	3.72	a = 3.6308	16.72	0.002
	Mo	42.01	a = 3.1624	43.91	2.758
	$Cu_{0.25}Au_{0.75}$	26.2	a = 3.9789	19.19	1.697
	CuAu	28.07	a = 3.8036	8.12	5.217

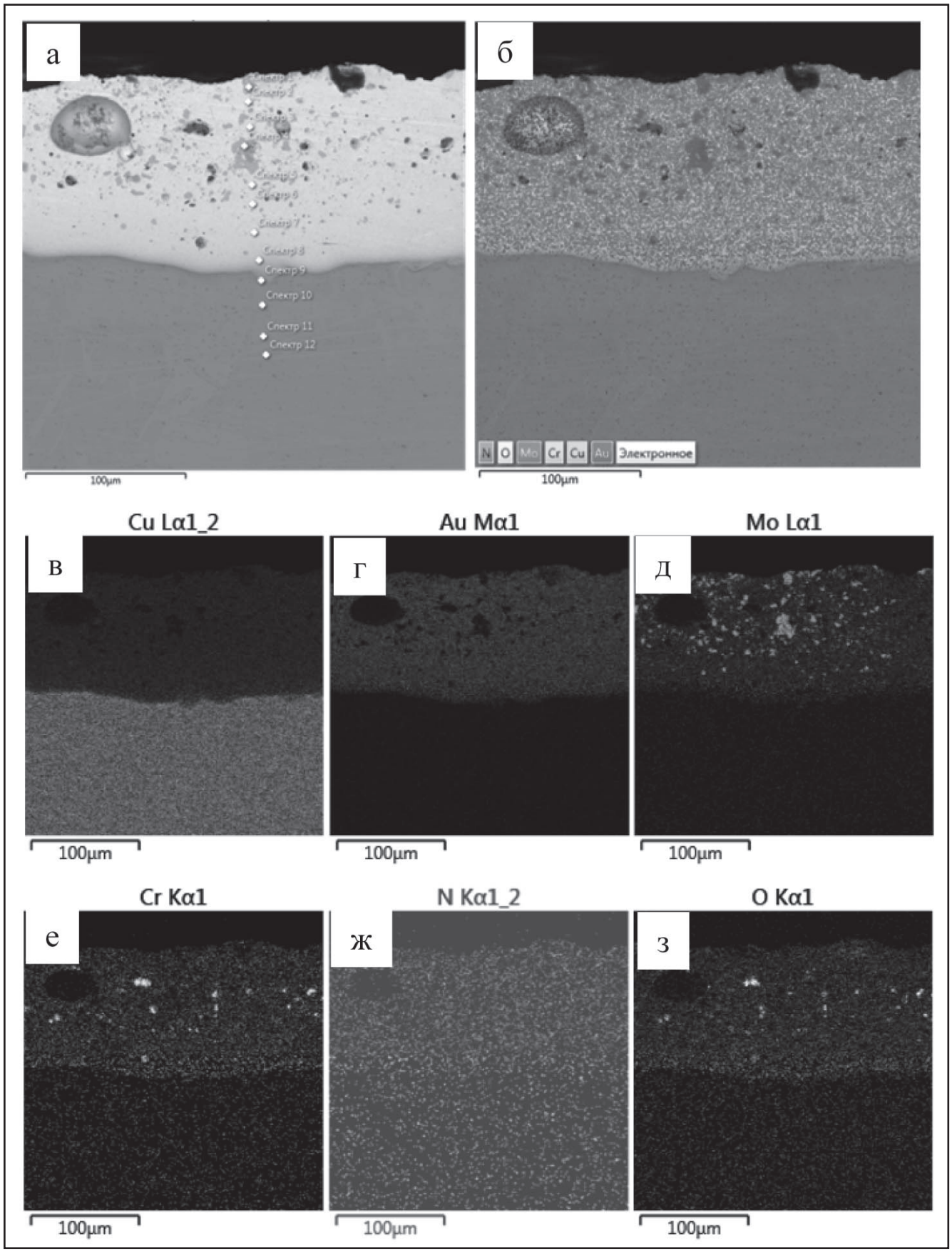

Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение (а) и изображения, полученные в характеристическом рентгеновском излучении химических элементов, формирующих систему «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка» (б-з); б – изображение, полученное путем наложения изображений (в-з)

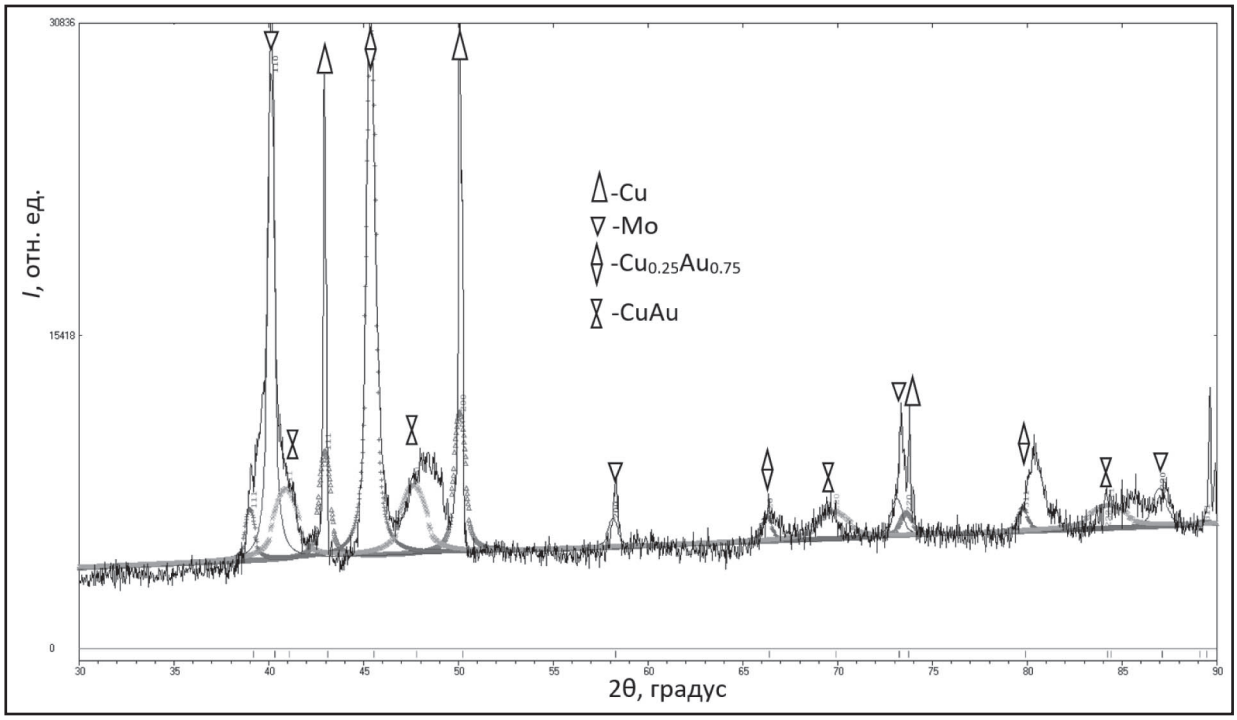

Рис. 4. Фрагмент рентгенограммы, полученной с системы «покрытие (Мо-Аи)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию

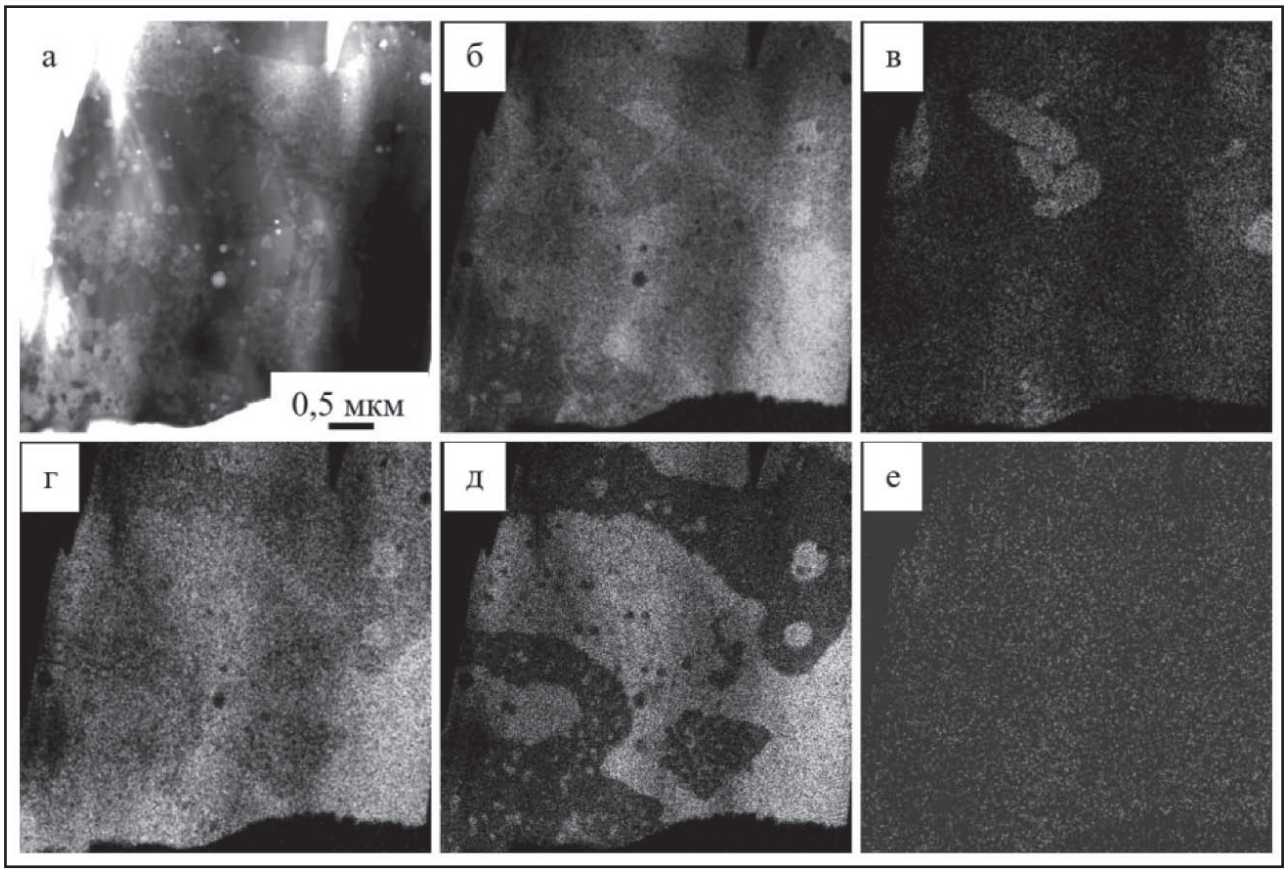

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры покрытия (а); б-е – изображение структуры участка фольги, представленное на (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов: б – меди, в – титана, г – молибдена, д – золота, е – азота

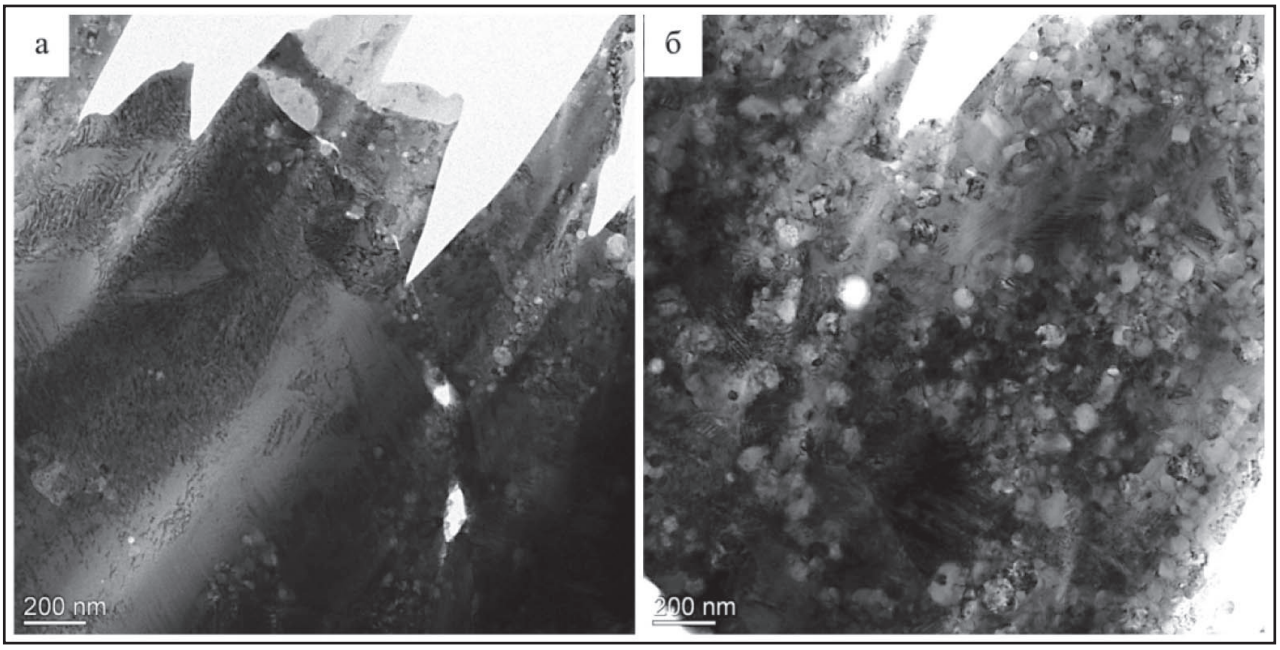

Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию

электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию, характеризовали твердостью и модулем Юнга. Результаты исследований, приведенные на рис. 10, показывают, что среднее значение микротвердости изменяется в пределах от 1090 МПа до 1200 МПа и снижается по мере удаления от поверхности покрытия (рис. 10, кривая 1). Модуль Юнга изменяется противоположным образом и линейно увеличивается при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки (рис. 10, кривая 2).

Трибологические свойства системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию, характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Установлено, что параметр износа покрытия $3{,}5*10^{-6}$ мм^3/Н*м, что более чем в 20 раз меньше параметра износа меди. Коэффициент трения покрытия 0,6, что в 2 раза больше коэффициента трения подложки.

Заключение

Осуществлена на установке «КОМПЛЕКС» в едином вакуумном пространстве комбинированная обработка образцов системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», сочетающая облучение низкоэнергетичным импульсным электронным пучком (18кэВ, 60 Дж/см^2, 100 мкс, 0,3 с$^{-1}$, 10 имп., 0,02 Па) и последующее азотирование в плазме дугового разряда низкого давления с накаленным катодом (520 ^{0}С, 5 час.). Показано, что толщина покрытия Mo-Au изменяется в пределах от 50 мкм до 100 мкм. На границе контакта покрытия и подложки выявлено формирование переходной зоны, имеющей столбчатое строение, свидетельствующее о сплавлении покрытия и подложки, т.е. о высокой адгезии на уровне когезии. Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлены островки молибдена в слое золота, что свидетельствует о неоднородном элементном составе покрытия. Выявлено легирование покрытия атомами меди (подложка) и отсутствие легирования подложки атомами покрытия. Методами рентгенофазового анализа выявлен многофазный состав покрытия (твердые растворы на основе меди и молибдена, CuAu, $Cu_{0.25}Au_{0.75}$). Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии дополнительно обнаружено формирование в покрытии частиц нитридов меди и молибдена, размеры которых изменяются в пределах (20-45) нм. Установлено, что среднее значение микротвердости изменяется в пределах от 1090 МПа до 1200 МПа и снижается по мере удаления от поверхности покрытия. Модуль Юнга изменяется противоположным образом и линейно увеличивается при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки. Показано, что параметр износа покрытия $3{,}5*10^{-6}$ мм^3/Н*м, что более чем в 20 раз меньше параметра износа меди. Коэффициент трения покрытия 0,6, что в 2 раза больше коэффициента трения подложки. Можно предположить, что высокие трибологические свойства формируемого покрытия обусловлены наличием наноразмерных частиц нитридных фаз.

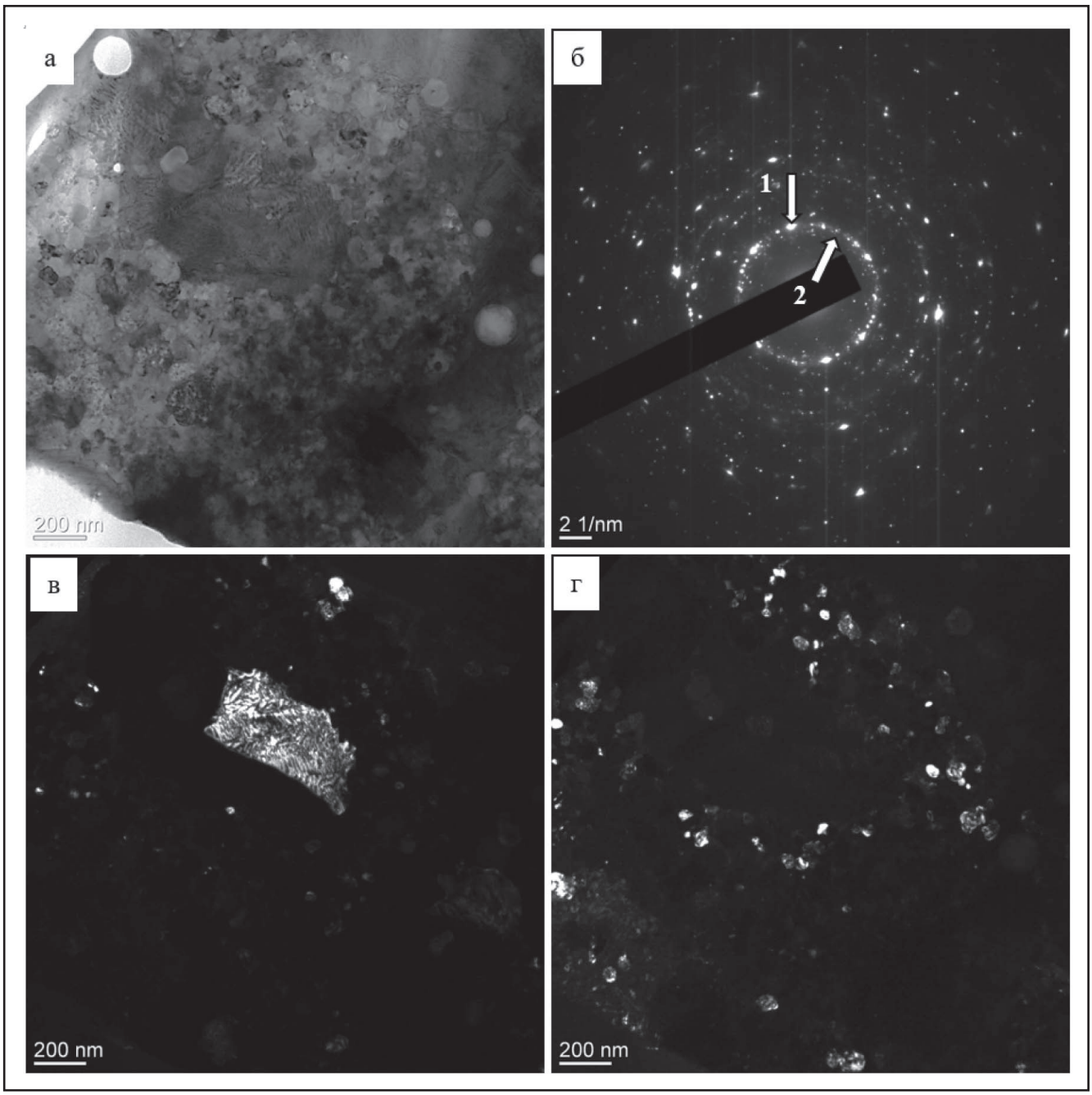

Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию; а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [111]Au (в) и [202]CuN_3 + [111]Mo_2N (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в); 2 – для (г)

Работа выполнена в рамках государственного задания 0809-2021-0013. Электровзрывное напыление произведено с использованием оборудования лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий СибГИУ.

Список литературы (References)

1. Zhang H., Wu X., Wang W. Modeling contact of Au-coated sphere with rigid flat: electrical contact resistance, adhesive wear and friction //International Journal of Mechanical Sciences. 2023. Pp. 108152.
2. Wang J., Zhao H., Wang J., et al. Effect of CuO additives on the formation of SnO2-rich layers in

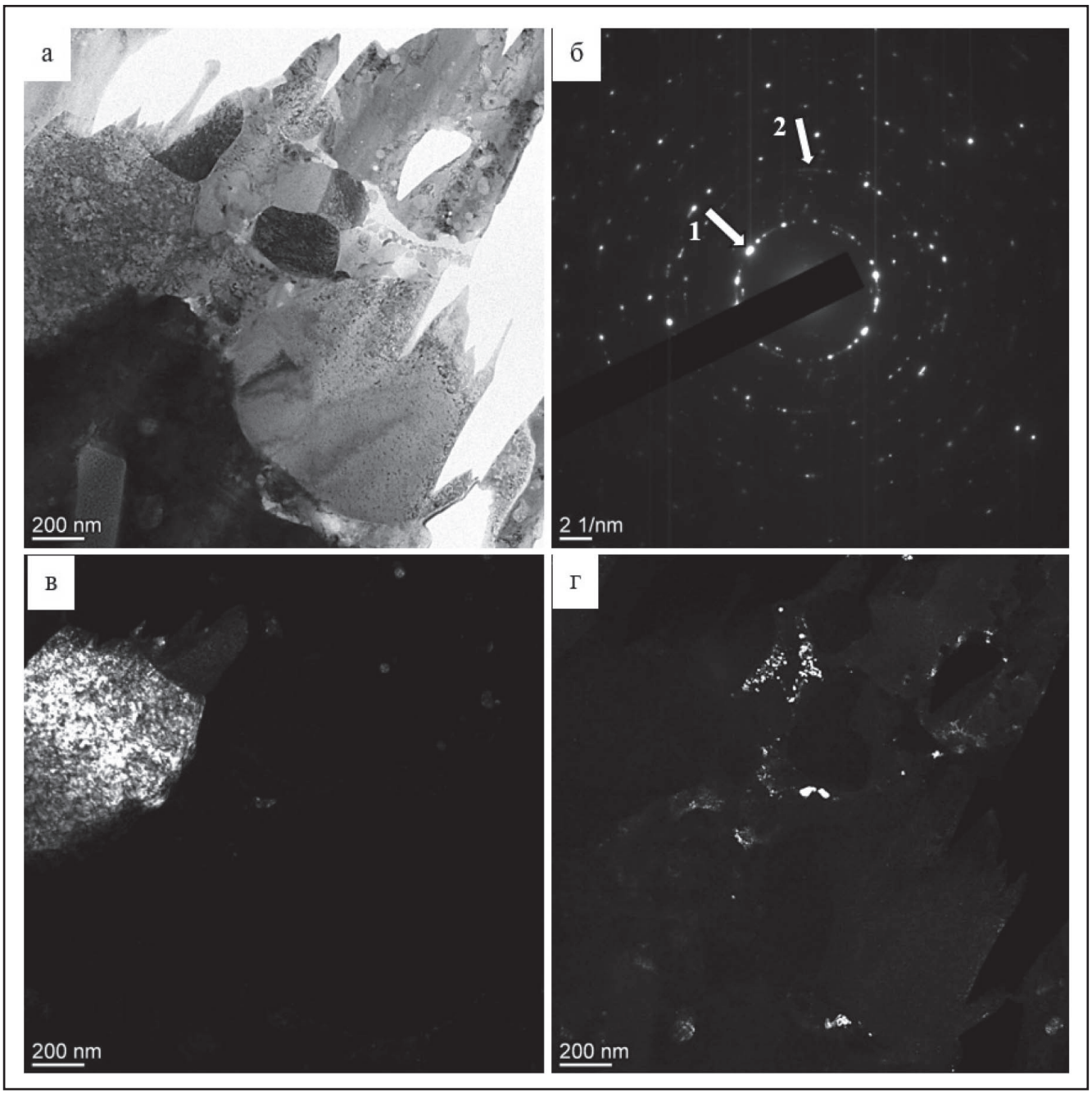

Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение структуры системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию; а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [110]Mo (в) и [1290]CuAu (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в); 2 – для (г)

Ag-SnO2 materials // Journal of Alloys and Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 770. Pp. 920–925.

3. Lin X., Hao H., Xie M. Fretting characteristics and environmental reliability of contacts with gold-plated PCB sample and different metal probe // Microelectronics Reliability. 2020. Vol. 109. Pp. 113653.
4. Kesim M.T., Yu H., Sun Y., et al. Corrosion, oxidation, erosion and performance of Ag/W-based circuit breaker contacts: A review // Corrosion Science. 2018. Vol. 135. Pp. 12–34.
5. Das S., Das S. Properties for Polymer, Metal and Ceramic Based Composite Materials // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2021. Pp. 815–821.

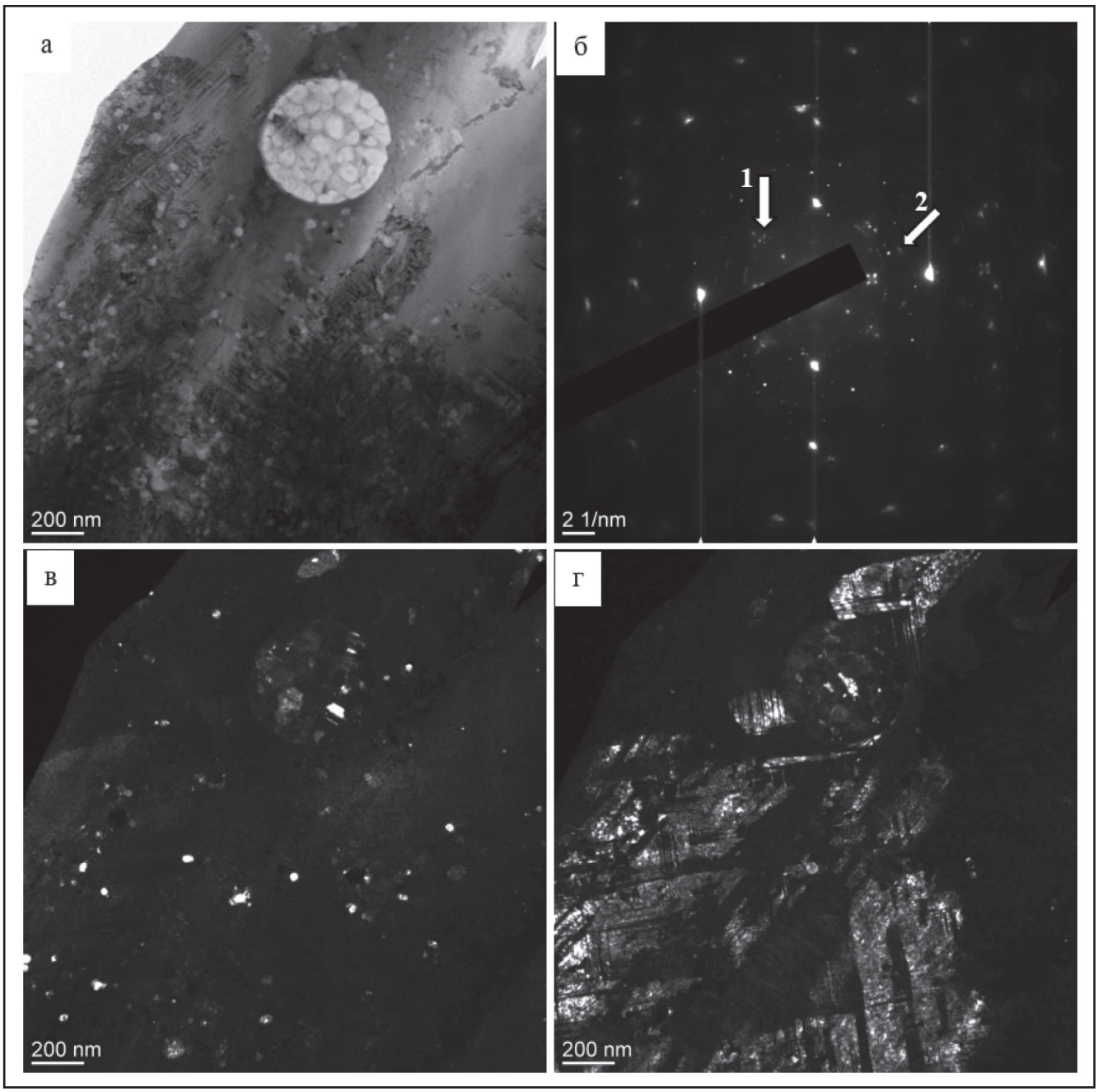

Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение структуры системы «покрытие (Mo-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию; а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [110]Mo + [1101]CuAu (в) и [200]Au + [101] MoN (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в); 2 – для (г)

6. Varo T. Canakci A. Effect of the CNT Content on Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Cu-Based Electrical Contact Materials Produced by Flake Powder Metallurgy // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015. Vol. 40. No. 9. Pp. 2711–2720.

7. Zang Y. Wanga Q., Chen G. et al. Mechanical, tribological and corrosion physiognomies of CNT-Al metal matrix composite (MMC) coatings deposited by cold gas dynamic spray (CGDS) process // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 403. Pp. 126380.

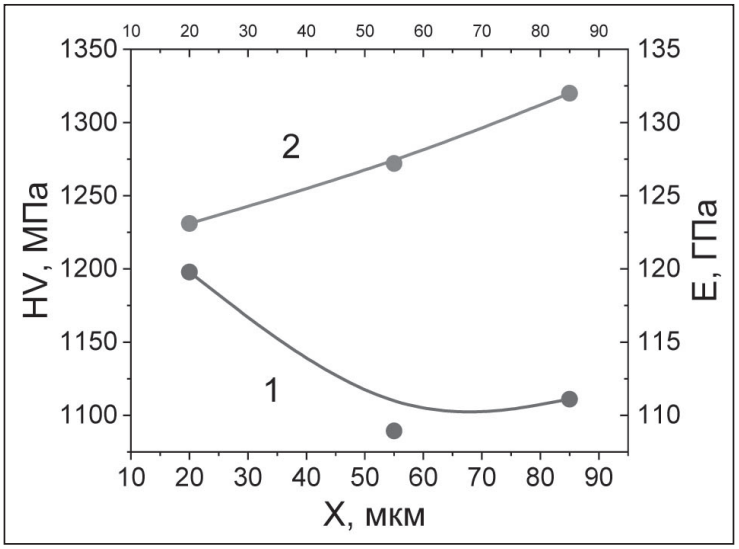

Рис. 10. Зависимости твердости (кривая 1) и модуля Юнга (кривая 2) от расстояния от поверхности покрытия

8. Singh H., Kumar S., Kumar D. The role of in-situ ceramic reinforcements on microstructure evolution and mechanical properties on developed hybrid Mg-MMCs // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 789. Pp. 139577.
9. Niknam, S. A., Kouam J., Songmene V., et al. Dry and Semi-Dry Turning of Titanium Metal Matrix Composites (Ti-MMCs) // Procedia CIRP. 2018. Vol. 77. Pp. 62–65.
10. Das, B. Roy S., Rai R., et al. Studies on Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness of Al-Cu-TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 45. Pp. 745–752.
11. Sundaramoorthy, R. Tong S. X., Parekh D. et al. Effect of matrix chemistry and WC types on the performance of Ni-WC based MMC overlays deposited by plasma transferred arc (PTA) welding // Wear. 2017. Vol. 376–377. Pp. 1720–1727.
12. Parswajinan C., Ramnath B. V., Vetrivel M. et al. Determination of Mechanical Behaviour of Fe-CNT MMC // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. No. 1. Pp. 1176–1185.

Сведения об авторах

Почетуха Василий Витальевич, канд. техн. наук
Романов Денис Анатольевич, доктор техн. наук, доцент, старший научный сотрудник
Филяков Артем Дмитриевич, научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Иванов Юрий Федорович, доктор физ.-мат. наук, доцент, главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
634055, Томская обл., г. Томск, пр-кт Академический, 2/3

Information about authors

Pochetuha Vasiliy Vitalevich, Cand. of Techn. Sciences
Romanov Denis Anatolevich, Doctor of Techn. Sciences, Associate Professor, Senior Researcher
Filyakov Artem Dmitrievich, Researcher
Siberian State Industrial University
654007, Kemerovo region, Novokuznetsk, st. Kirova, 42
Ivanov Yuriy Fedorovich, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor, Principle Researcher
Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS)
634055, Tomsk region, Tomsk, Akademichesky prospect, 2/3