

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-15

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ВНС32-ВИ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Г.С. Севальнев¹, М.Э. Дружинина¹, К.В. Дульнев¹, А.Н. Мосолов¹, Л.П. Фомина², И.А. Чирков²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Проведено исследование микроструктуры, твердости и триботехнических характеристик бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ после упрочняющей термической обработки и заключительного ионного азотирования. Установлено, что микроструктура образцов, обработанных по различным режимам, практически не отличается, а толщина диффузионного слоя составляет 100 мкм. Исследование распределения легирующих элементов показало, что в поверхности преобладают Cr, Mo и Nb, имеющие высокое сродство к азоту. Лучшими триботехническими свойствами обладали образцы, для которых процесс дисперсионного твердения совмещался с заключительным ионным азотированием.

Ключевые слова: бериллий, бериллийсодержащая сталь, твердость, износостойкость, коэффициент трения, δ -феррит

Для цитирования: Севальнев Г.С., Дружинина М.Э., Дульнев К.В., Мосолов А.Н., Фомина Л.П., Чирков И.А. Повышение триботехнических характеристик бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ путем модификации поверхности // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-15.

Scientific article

IMPROVEMENT OF THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF BERYLLIUM-CONTAINING STEEL VNS32-VI BY SURFACE MODIFICATION

G.S. Sevalnev¹, M.E. Druzhinina¹, K.V. Dulnev¹, A.N. Mosolov¹, L.P. Fomina², I.A. Chirkov²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. Microstructure, hardness and tribotechnical characteristics of beryllium-containing steel VNS32-VI were studied after strengthening heat treatment and final ion nitriding. It was found that the microstructure of samples processed according to various methods does not differ, and the thickness of the diffusion layer is 100 μm . The alloying element distribution study showed that the surface was dominated by Cr, Mo and Nb having a high affinity for nitrogen. The best tribotechnical properties were possessed by samples for which the dispersion hardening process was combined with final ion nitriding.

Keywords: beryllium, beryllium-containing steel, hardness, wear resistance, friction coefficient, δ -ferrite

For citation: Sevalnev G.S., Druzhinina M.E., Dulnev K.V., Mosolov A.N., Fomina L.P., Chirkov I.A. Improvement of the tribotechnical characteristics of beryllium-containing steel VNS32-VI by surface modification. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-15.

Введение

В современном машиностроении все чаще возникает проблема высокого трения и износа в результате контакта деталей машин, надежность и ресурс работы которых зависят от характеристик применяемых материалов. Для работы в таких системах материалы должны обладать высокими показателями твердости, прочности, контактной выносливости, устойчивости к воздействию различных коррозионных сред. Повышение триботехнических характеристик материалов, используемых в узлах трения, является одной из важнейших задач, решение которой чаще всего реализуется путем подбора режимов термической обработки или создания модифицированного слоя повышенной твердости методами химико-термической обработки.

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» наиболее перспективными материалами, эксплуатируемыми в тяжелонагруженных условиях, являются высокопрочные комплексно-легированные стали [1–5]. Особое место среди данных материалов занимают стали, формирование прочностных свойств которых происходит за счет механизма дисперсионного твердения, что позволяет достичь их высоких значений. Коррозионностойкая дисперсионно-твердеющая сталь марки 32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ (ВНС32-ВИ) имеет развитую систему легирования, включающую бериллий, а также сильные карбидообразующие элементы, такие как хром, титан, молибден и ниобий, наличие которых обеспечивает высокие механические свойства благодаря образованию мелкодисперсных включений (карбидов и NiBe). Бериллийсодержащая сталь марки ВНС32-ВИ предназначена для производства прецизионных, износостойких деталей высокой прочности, которые подвергаются воздействию трения и износа в узлах авиационной техники, оборудовании химического и энергетического машиностроения [6–12].

Из-за высокого содержания углерода и карбидообразующих элементов, а также элементов, приводящих к реализации механизма дисперсионного твердения, сталь марки ВНС32-ВИ после полного цикла упрочняющей термической обработки обладает высокой хрупкостью и удовлетворительной коррозионной стойкостью, что может негативно влиять на эксплуатацию изделий при интенсивном изнашивании в условиях экстремальных нагрузок и коррозионно-активных сред [13]. Снижение негативного влияния воздействия эксплуатационных факторов возможно путем модификации поверхности с использованием механизмов изменения ее структуры методами механического воздействия или химического состава путем химико-термической обработки.

Наиболее перспективными методами для упрочнения поверхности деталей в авиационном машиностроении являются вакуумные процессы химико-термической обработки, такие как цементация и азотирование. Вакуумная цементация обеспечивает равномерное насыщение углеродом сталей аналогичной системы легирования, что приводит не только к повышению твердости, износостойкости и контактной выносливости, но и к увеличению скорости коррозии при работе в условиях агрессивных сред. Поверхностное насыщение сталей азотом благоприятно влияет на уровень износостойкости, контактной выносливости, а также способствует увеличению коррозионной стойкости, в том числе и для коррозионностойких сталей после дисперсионного твердения [14–19]. Помимо указанных процессов высокой эффективностью обладает процесс модификации поверхности комплексно-легированных коррозионностойких сталей с использованием бора в качестве насыщающего элемента. Диффузионное насыщение поверхности бором позволяет повысить триботехнические характеристики и коррозионную стойкость, однако заключительной обработкой для стали ВНС32-ВИ является

дисперсионное твердение при высокой температуре, что может приводить к деградации износостойкого борированного слоя. Несмотря на это, дисперсионно-твердеющая сталь ВНС32-ВИ обладает различными механизмами упрочнения при термической обработке, в том числе и закалкой на мартенситную структуру с достаточным уровнем твердости без реализации механизма дисперсионного твердения, что предположительно позволит обеспечить достаточную вязкость сердцевины при высокой износостойкости, твердости и коррозионной стойкости борированного слоя.

Процесс азотирования связан с рядом технологических трудностей, возникающих на стадии заключительной обработки коррозионностойких сталей. Из-за высокого содержания хрома азотирование в тлеющем разряде может приводить к формированию охрупчивающей нитридной сетки, снижающей коррозионную стойкость изделия и приводящей к отслаиванию поверхностного слоя. Для достижения больших толщин диффузионных слоев при азотировании требуется высокая длительность технологического процесса в связи с относительно низкой диффузионной активностью азота в температурном интервале 400–600 °С. Тонкие диффузионные слои способны обеспечить достаточно высокую износостойкость, однако обладают низким сопротивлением ударным, изгибным и вибрационным нагрузкам.

Сталь ВНС32-ВИ упрочняется посредством закалки и последующего дисперсионного твердения и обладает высокой теплостойкостью, что позволяет использовать азотирование в технологическом процессе в качестве заключительной обработки. Однако для достижения высокого уровня механических характеристик возможно применение процессов как дисперсионного твердения, совмещенного с процессом азотирования стали, так и химико-термической обработки после полного цикла упрочняющей термической обработки. Стали различных систем легирования с упрочнением путем механизма дисперсионного твердения обрабатывают за счет различных комбинаций технологического процесса, что позволяет снижать трудоемкость и добиваться более высоких механических и триботехнических характеристик [20–22].

Цель данной работы – повышение триботехнических характеристик бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ путем модификации поверхности с применением азотирования в тлеющем разряде на различных этапах технологического процесса.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись плоские цилиндрические образцы диаметром 30×5 мм из стали ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ) [12], полученные из горячекатаных прутков. Для изготовления прутков полученный слиток, выплавленный методом вакуумной индукционной выплавки в печи ВИАМ-2002 в Воскресенском экспериментальном технологическом центре (ВЭТЦ) НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, подвергали ковке и последующей горячей деформации методом радиально-сдвиговой деформации на стане поперечно-винтовой прокатки. Химический состав образцов соответствовал требованиям ТУ 14-1-3695–84 «Прутки горячекатаные и кованые из коррозионностойкой стали марки 32Х13Н6К3М2БДЛТ (СЭС1-ВИ, ВНС32-ВИ). Опытно-промышленная партия».

Для исследования оптимального механизма структурообразования при азотировании, использовали следующие схемы упрочняющей обработки:

– классический режим, включающий полный цикл упрочняющей обработки – закалку в масле, обработку холодом (ОХ) и последующее дисперсионное твердение (ДТ) – закалка + ОХ + ДТ;

– неполный цикл, включающий закалку в масле и обработку холодом с заключительным низким отпуском с целью снятия остаточных напряжений при термической обработке – закалка + ОХ;

– полный цикл с температурой старения ниже температуры дисперсионного твердения (НДТ) на 100 °С – закалка + ОХ + НДТ.

Металлографические исследования микроструктуры после термической обработки и последующего ионного азотирования проводили с использованием металлографического оптического микроскопа Olympus GX-51 при увеличении $\times 200$.

Для выявления микроструктуры шлифы, полученные по классической методике, травили химически в реактиве Марбле (20 г сернокислой меди, 100 мл соляной кислоты, 100 мл дистиллированной воды). Анализ структуры, распределения азота и других легирующих элементов по толщине диффузионного слоя проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU8010 в режиме вторичных и обратно отраженных электронов при рабочих увеличении $\times 2500$ и ускоряющем напряжении 15 кВ. Определение химического состава и структурных составляющих осуществляли с помощью приставки для проведения микрорентгеноспектрального анализа с применением программного обеспечения AZtec.

Ионное азотирование выполняли выше температуры полного дисперсионного твердения на 20 °С в течение 12 ч. Такой выбор температуры не приводит к перестариванию и значительному разупрочнению сердцевины в условиях длительных выдержек при химико-термической обработке. Для депассивации и насыщения поверхности азотом использовали азотно-водородную смесь в соотношении элементов 15:4 соответственно.

Исследования твердости сердцевины и распределения микротвердости от поверхности к сердцевине образцов из стали ВНС32-ВИ после различных видов термической обработки и последующего ионного азотирования проводили на твердомере Durascan 20 при нагрузке 1 Н (100 г).

Сталь ВНС32-ВИ предназначена для работы в условиях фрикционного взаимодействия с другими материалами, обладающими высокой твердостью и износостойкостью. Для оценки износостойкости сформированного за счет химико-термической обработки модифицированного диффузионного слоя необходимо рассмотреть высокий уровень контактного нагружения с использованием высокотвердого материала. В связи с этим для исследования фрикционного взаимодействия при трибонагружении в условиях сухого трения скольжения пары из стали ВНС32-ВИ с высокотвердой оксидной керамикой ZrO_2 проведены испытания на изнашивание по схеме «стержень–диск», где в качестве контртела использовали минимальную площадь контактной поверхности для реализации высоких контактных напряжений. Испытания осуществляли на трибометре Nanovea T-50. Контртелом являлся шарик диаметром 10 мм с твердостью 1400 НВ. Скорость скольжения образца относительно контртела при нагрузке 10 Н составила $\sim 0,1$ м/с. Оценку характера фрикционного взаимодействия проводили по взаимному износу образца и контртела относительно начальной площади контакта, который регистрируется с помощью датчика линейного перемещения LVDT. Количественную оценку износостойкости при испытаниях на изнашивание в условиях сухого трения скольжения проводили по скорости изнашивания образца W и контртела $W_{\text{контр}}$ ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$). Данные величины рассчитывали по следующим формулам [23]:

$$W = sl/(PL),$$

где l – длина окружности дорожки износа, мм; s – площадь сечения канавки износа, мм^2 ; P – нагрузка, Н; L – путь трения, м;

$$W_{\text{контр}} = \Delta V_{\text{шар}}/(PL),$$

где $\Delta V_{\text{шар}}$ – износ объема поверхности контртела, мм^3 .

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Сталь марки ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ) содержит в химическом составе много активных нитридообразующих элементов и углерод в количестве ~0,3 % (по массе), упрочняется за счет механизма дисперсионного твердения, в результате чего идеально подходит для упрочнения методом ионного азотирования.

Микроструктура после различных режимов термической обработки и заключительного ионного азотирования состоит из диффузионного слоя толщиной ~100 мкм, мартенсита, δ -феррита и карбидов различного стехиометрического состава (рис. 1). Значительного различия микроструктур в зависимости от режима предварительной термической обработки не обнаружено.

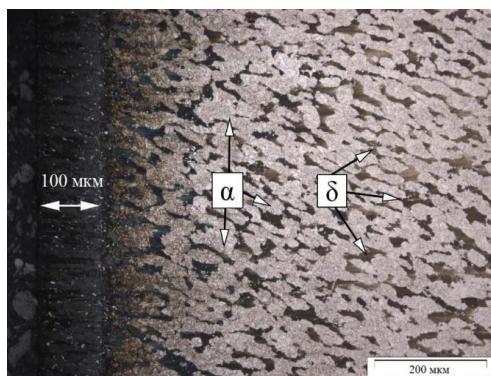


Рис. 1. Микроструктура ($\times 200$) стали ВНС32-ВИ после термической обработки и заключительного ионного азотирования

По анализу распределения микротвердости от поверхности к сердцевине установлено, что наименьшей твердостью обладает диффузионный слой, полученный после классической обработки, включающей закалку, обработку холодом и заключительное дисперсионное твердение (рис. 2). Наилучшим распределением микротвердости в рамках данных исследований обладали образцы, подвергнутые полному циклу обработки с температурой старения ниже дисперсионного твердения на 100 °С.

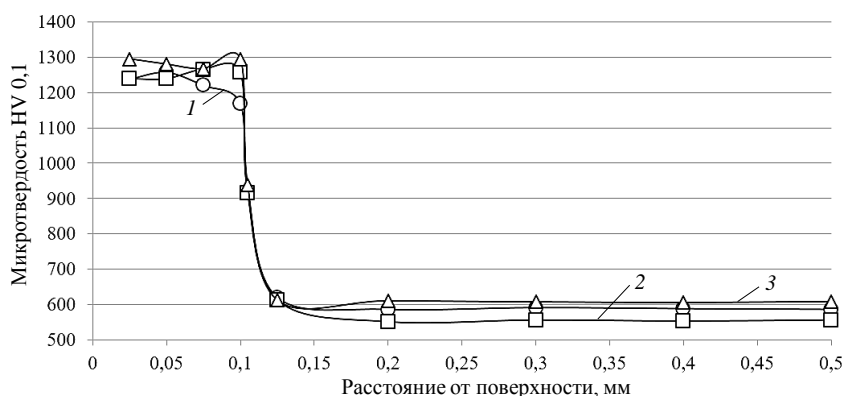


Рис. 2. Распределение микротвердости в стали ВНС32-ВИ после различных видов обработки и заключительного ионного азотирования: 1 – закалка + ОХ + ДТ; 2 – закалка + ОХ; 3 – закалка + ОХ + НДТ

Детальное исследование микроструктуры с применением электронной микроскопии позволило установить, что на некоторых образцах в диффузионном слое коррозионностойкой бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ формируются подповерхностные

трещины (рис. 3), что является распространенной проблемой при насыщении хромосодержащих сталей с концентрацией данного легирующего элемента >13 % (по массе) [24]. Наибольшее количество дефектов поверхностного слоя обнаружено после классического режима, что может быть связано с перераспределением хрома и образованием высокой доли нитридов с дальнейшим формированием нитридной сетки и охрупчиванием диффузионного слоя.

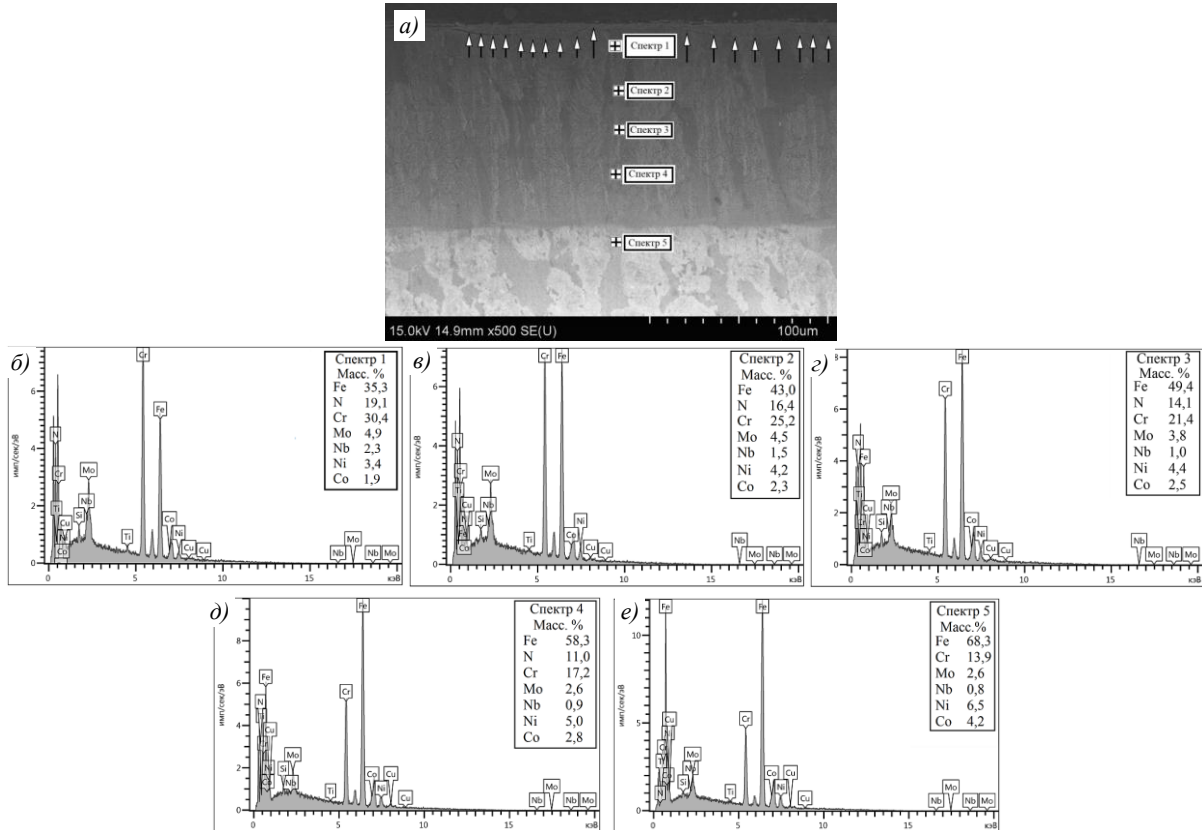


Рис. 3. Микроструктура (*a* – $\times 500$; стрелками указан контур микротрещины) и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения участков в структуре диффузионного слоя (*b–d*) и основного металла (*e*)

Известно, что в двухфазных сталях в структуре δ -феррита растворено больше α -стабилизирующих легирующих элементов, а также высокотемпературная модификация феррита лучше насыщается при азотировании [24–29]. В связи с тем, что в структуре стали присутствует высокое содержание δ -феррита с объемноцентрированной кубической (ОЦК) кристаллической решеткой, проведено исследование распределения легирующих элементов по толщине диффузионного слоя с применением рентгеноспектрального микроанализа. Исследование выполняли по пяти полям размером 20×40 мкм.

По результатам исследований установлено снижение концентрации азота от поверхности образца к сердцевине, что является закономерным при формировании диффузионных слоев при химико-термической обработке (рис. 3 и 4, *a*). Однако в поверхностном слое присутствуют завышенная концентрация легирующих элементов хрома и молибдена, стабилизирующих ОЦК-кристаллическую решетку, и низкое содержание никеля и кобальта, стабилизирующих гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку, по сравнению с марочным составом (рис. 4). Такое распределение легирующих элементов может быть связано с высоким сродством Cr, Mo и Nb

к азоту, диффузионное перераспределение которых произошло в результате взаимодействия с ионизированным азотом. Анализ химического состава в сердцевине (спектр 5) показал концентрацию легирующих элементов, соответствующую марочному составу.

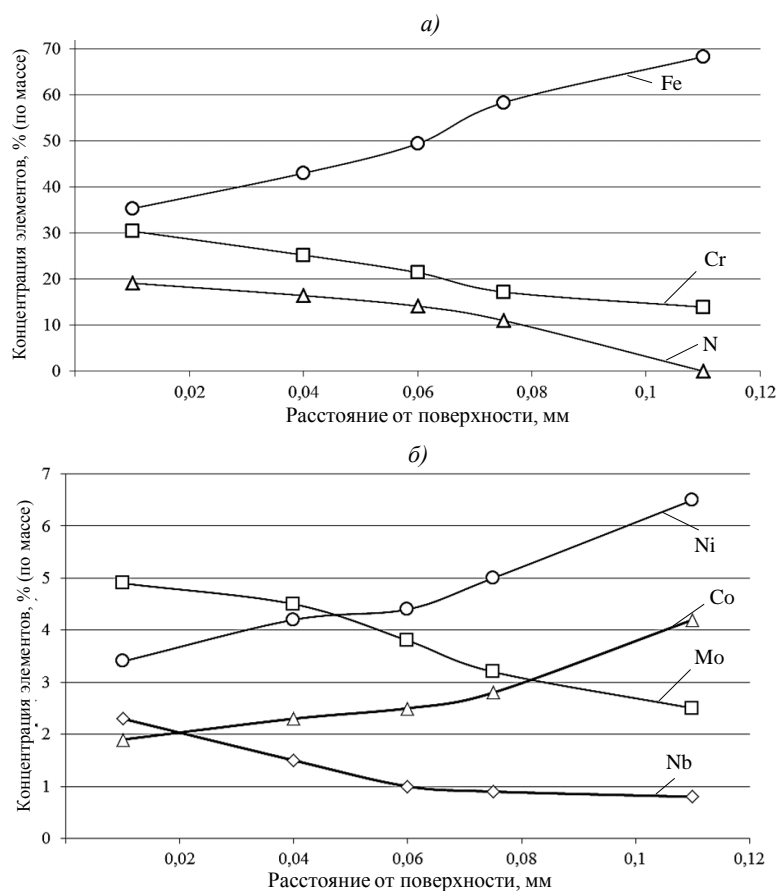


Рис. 4. Распределение железа и легирующих элементов от поверхности к сердцевине: *a* – Fe, Cr, N; *б* – Mo, Ni, Nb, Co

Результаты испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения по схеме «стержень–диск» позволили установить, что наименьшей интенсивностью изнашивания обладают образцы после закалки, обработки холодом и последующего ионного азотирования (ИА), совмещающего процесс насыщения азотом с дисперсионным твердением (рис. 5). Интенсивность изнашивания образцов, обработанных по схеме «закалка + ОХ + ИА», на 23–30 % ниже по сравнению с другими процессами. По сравнению с образцами из стали ВНС32-ВИ, упрочненными по стандартной технологии [13], включающей закалку, обработку холодом и низкий отпуск, интенсивность изнашивания образцов после всех комбинаций процессов, включающих ионное азотирование, ниже в 2–2,8 раз.

Образцы, обработанные по схеме «закалка + ОХ + ДТ + ИА», обладали наименьшей износостойкостью. При исследовании кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения в процессе испытания зафиксирована высокая амплитуда колебаний коэффициента трения (μ) – от 0,64 до 1,00 (рис. 6), что может свидетельствовать о постоянном выкрашивании диффузионного слоя при контактом взаимодействии поверхностей трения с последующим попаданием продуктов износа в зону контакта. Детальное исследование диффузионного слоя с применением электронной

микроскопии подтвердило выдвинутое предположение – в структуре слоя по всему объему обнаружены микротрещины (рис. 7).

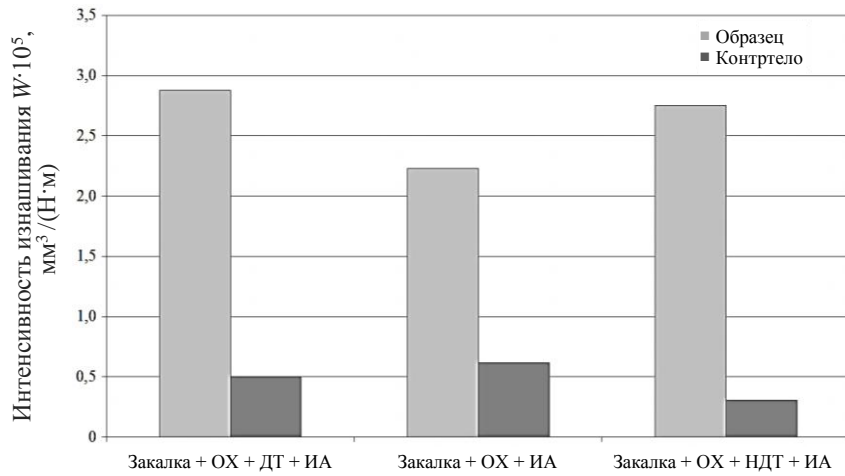


Рис. 5. Интенсивность изнашивания образцов из стали ВНС32-ВИ после различных обработок и испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения в паре трения с контртелами из высокотвердой оксидной керамики ZrO_2

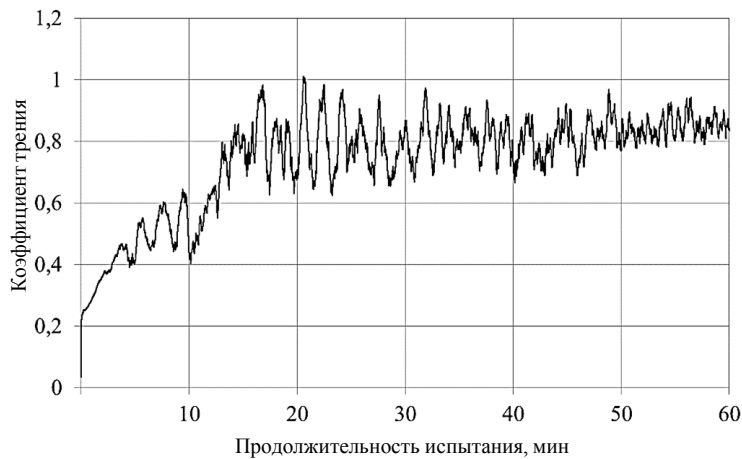


Рис. 6. Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения образцов из стали ВНС32-ВИ, обработанных по схеме «закалка + ОХ + ДТ + ИА»

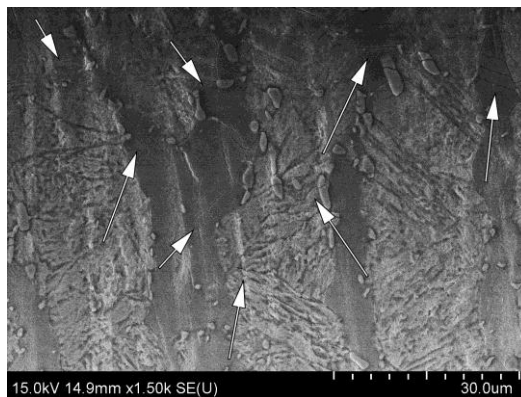


Рис. 7. Микроструктура диффузионного слоя образцов, обработанных по схеме «закалка + ОХ + ДТ + ИА» (стрелками показаны микротрещины)

Образцы после полного цикла обработки с неполным дисперсионным твердением обладали менее хрупким диффузионным слоем и более стабильным коэффициентом трения, среднее значение которого на участке стационарного режима трения (после 20 мин испытания) составило $\mu = 0,75$ (рис. 8). Время приработки с выходом на стационарный режим трения образцов после обработок с неполным и полным дисперсионным твердением в среднем составило ~ 19 мин.

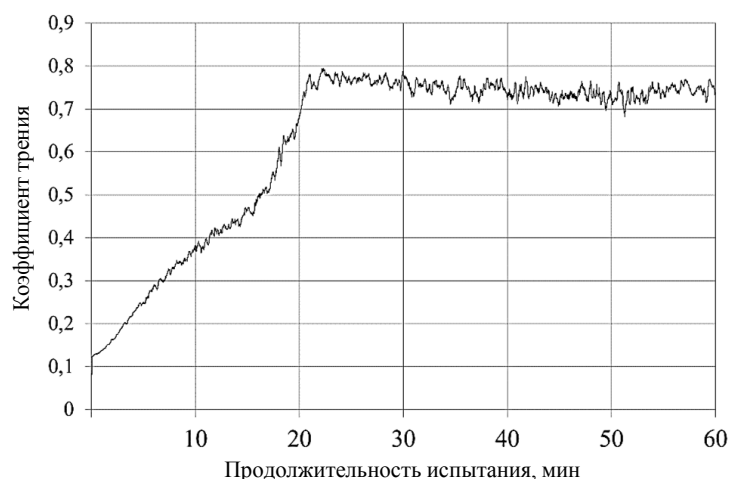


Рис. 8. Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения образцов из стали ВНС32-ВИ, обработанных по схеме «закалка + ОХ + НДТ + ИА»

Высокое сопротивление интенсивному изнашиванию показали образцы, дисперсионное твердение которых совмещено с процессом ионного азотирования. До 30 мин испытания сохранялся коэффициент трения $< 0,55$ с низкой амплитудой колебаний (рис. 9).

Интенсивность изнашивания контртела в паре трения с образцами, обработанными по классическому режиму с последующим ионным азотированием, выше, чем у образцов, подвергнутых неполному дисперсионному твердению, что связано с высокой хрупкостью диффузионного слоя (рис. 5). Наибольшей интенсивностью изнашивания обладали контртела в паре с образцами после совмещенного дисперсионного твердения с ионным азотированием из-за более высокого уровня твердости и пластичности диффузионного слоя по сравнению с другими обработками.



Рис. 9. Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения образцов из стали ВНС32-ВИ, обработанных по схеме «закалка + ОХ + ДТ + ИА»

Заключения

Коррозионностойкие комплексно-легированные бериллийсодержащие стали, устойчивые к воздействию агрессивных сред и работающие при температурах до 450 °С, являются перспективными материалами в авиационном машиностроении. Разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ бериллийсодержащая сталь марки ВНС32-ВИ обладает высоким уровнем твердости и износостойкости и упрочняется за счет мартенситного превращения и дисперсионного твердения, что позволяет проводить дополнительную модификацию поверхности при температурах >450 °С.

Металлографический анализ и распределение микротвердости по толщине образцов, подвергнутых ионному азотированию после различных режимов термической обработки, позволили установить, что режим обработки практически не влияет на формирование конечной структуры поверхности и сердцевины образца, а также на толщину диффузионного слоя, размер которого составил ~100 мкм. Исследования концентраций азота и легирующих элементов по толщине диффузионного слоя с применением рентгеноспектрального анализа показали, что в поверхности образца после азотирования преобладают азот и элементы, имеющие высокое сродство к азоту и стабилизирующие ОЦК-кристаллическую решетку железа, – Cr, Mo, Nb, содержание которых при продвижении к сердцевине снижалось до значений концентраций марочного состава. Содержание Ni и Co, стабилизирующих ГЦК-кристаллическую решетку железа, было минимальным у поверхности и повышалось при продвижении к сердцевине образца.

Образцы, обработанные по схеме «закалка + ОХ + ДТ + ИА», обладали наименьшей износостойкостью в связи с образованием микротрещин в поверхности и высокой хрупкостью диффузионного слоя. В свою очередь это вызывало высокое колебание значений коэффициента сухого трения скольжения из-за выкрашивания поверхности и попадания продуктов износа в зону контакта. Высокое сопротивление интенсивному изнашиванию показали образцы, дисперсионное твердение которых совмещено с процессом ионного азотирования. Коэффициент трения <0,55 с низкой амплитудой колебаний сохранялся до 30 мин испытания.

С учетом результатов проведенных исследований рекомендуется при обработке поверхности бериллийсодержащих сталей, упрочняемых за счет дисперсионного твердения, совмещать процессы модификации поверхности (например, азотирование) с заключительным этапом упрочняющей обработки для получения качественных диффузионных слоев.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
5. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.

6. Папиоров И.И. Бериллий в сплавах: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
7. Жубаев А.К., Бектурган Н.Б., Куватбаева К.К., Нуртазина А.С. Исследование фазово-структурного состояния нержавеющей стали с бериллием // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014. Т. 14. № 3. С. 70–73.
8. Дворецков Р.М., Волкова О.С., Радзиковская В.Н., Бурова В.Н. Определение бериллия в современных авиационных материалах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // *Труды ВИАМ*. 2016. № 4 (40). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
9. Naik V.G., Sivasubramanian N. Applications of beryllium and its alloys // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1994. Vol. 13. No. 1. P. 243–251.
10. Папиоров И.И. Структура и свойства сплавов бериллия: справочник. М.: Энергоиздат, 1981. 368 с.
11. Щербаков А.И., Мосолов А.Н., Калицев В.А. Восстановление технологии получения бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ // *Труды ВИАМ*. 2014. № 5. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-1-1.
12. Нержавеющая дисперсионно-твердеющая сталь: а. с. 541374 СССР. № 2120727/01; заявл. 03.04.75; опубл. 15.05.91.
13. Мосолов А.Н., Севальнев Г.С., Крылов С.А., Скугорев А.В., Чирков И.А. Исследование структуры и свойств бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 1.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.
14. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Алексеева М.С., Громов В.И. Влияние вакуумной химико-термической обработки на износостойкость сталей ВКС-7 и ВКС-10 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
15. Czerwinski F. Heat treatment – Conventional and Novel Applications. London: IntechOpen, 2012. 422 p.
16. Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
17. Александров В.Г., Базанов Б.И. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения. М.: Транспорт, 1979. 263 с.
18. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1965. 493 с.
19. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1950. 432 с.
20. Yao J., Yan F., Chen B. et al. Dual-strengthening of steel surface and bulk via synergistic effect of plasma nitriding: a case study of M50 steel // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 409. P. 126910.
21. Ooi S., HKDH B. Duplex hardening of steels for aeroengine bearings // *Iron and Steel Institute of Japan International*. 2012. Vol. 52. No. 11. P. 1927–1934.
22. Streit E., Trojahn W. Duplex Hardening for Aerospace Bearing Steels // *ASTM special technical publication*. 2002. Vol. 1419. P. 386–398.
23. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Язвицкий М.Ю. Влияние фазового состава аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш на характеристики сухого трения скольжения в трибоконтакте со сталью ШХ15 // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 10. С. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
24. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
25. Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., перераб. М.: Metallurgia, 1966. Т. 2. 532 с.
26. Петрова Л.Г., Александров В.А., Зюзин Д.М. Регулируемые процессы азотирования коррозионностойких сталей // *Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета)*. 2003. № 1. С. 20–26.
27. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
28. Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Исследование структурного состояния и износостойкости азотированных сплавов железа с разными типами кристаллической решетки // *Вестник научно-технического развития*. 2019. № 9. С. 21–29.

29. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временных параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
5. Ospennikova O.G. Implementation results of the strategic directions on creation of new generation of heat-resisting cast and wrought alloys and steels for 2012–2016. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
6. Papirov I.I. *Beryllium in alloys: a reference book*. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 184 p.
7. Zhubaev A.K., Bekturgan N.B., Kuvatbaeva K.K., Nurtazina A.S. Investigation of the phase-structural state of stainless steel with beryllium. *Fundamentalnye problemy radioelektronogo priborostroyeniya*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 70–73.
8. Dvoretsov R.M., Volkova O.S., Radzikovskaya V.N., Burova V.N. Determination of beryllium in modern aviation materials by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, paper no. 5. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
9. Naik B.G., Sivasubramanian N. Applications of beryllium and its alloys. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 243–251.
10. Papirov I.I. *Structure and properties of beryllium alloys: a reference book*. Moscow: Energoizdat, 1981, 368 p.
11. Cherbakov A.I., Mosolov A.N., Kalicev V.A. Recovery of technology for the beryllium-containing steel VNS-32-VI obtaining. *Trudy VIAM*, 2014, no. 05, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-1-1.
12. *Stainless PH steel: certificate of authorship 541374 USSR*, no. 2120727/01; filed 03.04.75; publ. 15.05.91.
13. Mosolov A.N., Sevalnev G.S., Krylov S.A., Skugorev A.V., Chirkov I.A. Study of the structure and properties of beryllium-containing steel VNS32-VI. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.
14. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Alekseeva M.S., Gromov V.I. Influence of vacuum chemical and thermal processing on wear resistance of VKS-7 and VKS-10 steels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
15. Czerwinski F. *Heat treatment – Conventional and Novel Applications*. London: IntechOpen, 2012, 422 p.
16. *Structural materials: a reference book*. Ed. B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p.
17. Aleksandrov V.G., Bazanov B.I. *Reference book on aviation materials and technology of their application*. Moscow: Transport, 1979, 263 p.

18. Minkevich A.N. *Chemical-thermal treatment of metals and alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 493 p.
19. Minkevich A.N. *Chemical-thermal treatment of steel*. Moscow: Mashgiz, 1950, 432 p.
20. Yao J., Yan F., Chen B. et al. Dual-strengthening of steel surface and bulk via synergistic effect of plasma nitriding: a case study of M50 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 409, p. 126910.
21. Ooi S., HKDH B. Duplex hardening of steels for aeroengine bearings. *Iron and Steel Institute of Japan International*, 2012, vol. 52, no. 11, pp. 1927–1934.
22. Streit E., Trojahn W. Duplex Hardening for Aerospace Bearing Steels. *ASTM special technical publication*, 2002, vol. 1419, pp. 386–398.
23. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Yazvitsky M.Yu. Influence of the phase composition of austenitic-martensitic trip-steel VNS9-Sh on the characteristics of dry sliding friction in tribocontact with steel ShKh15. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2021, no. 10, pp. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
24. Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Yu.S., Panayoti T.A. *Ionic chemical-thermal treatment of alloys*. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 1999, 400 p.
25. Goodremont E. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2. 532 p.
26. Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Zyuzin D.M. Regulated processes of nitriding of corrosion-resistant steels. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2003, no. 1, pp. 20–26.
27. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Nitriding of steel*. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 256 p.
28. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Investigation of the structural state and wear resistance of nitrided iron alloys with different types of crystal lattice. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2019, no. 9, pp. 21–29.
29. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 14, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дружинина Марина Эдуардовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мосолов Алексей Николаевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Людмила Петровна, доцент, к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauvan@bmstu.ru

Чирков Иван Александрович, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauvan@bmstu.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina E. Druzhinina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey N. Mosolov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ludmila P. Fomina, Associate Professor, Candidate of Science (Tech.), Bauman Moscow State Technical University, bauvan@bmstu.ru

Ivan A. Chirkov, student, Bauman Moscow State Technical University, bauvan@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 07.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.07.2022.
The article was submitted 07.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 12.07.2022.