

Научная статья

УДК 669.725

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ВНС32-ВИ***А.Н. Мосолов¹, Г.С. Севальнев¹, С.А. Крылов¹, А.В. Скугорев¹, 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 структуры, твердости и триботехнических характеристик бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ после упрочняющей термической обработки. Металлографический анализ позволил установить, что структура данной стали состоит из мартенсита, δ -феррита и упрочняющих фаз: NiBe, Cr₂₃C₆ и (Nb, Ti)C₂. Результаты исследований триботехнических характеристик свидетельствуют, что скорость изнашивания у стали ВНС32-ВИ, по сравнению с подшипниковой сталью 95Х18-Ш, на 15–20 % меньше при испытаниях в условиях сухого трения скольжения в паре трения со сталью мартенситного класса ШХ15-ШД.

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

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.

Scientific article

**STUDY OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF BERYLLIUM-CONTAINING STEEL VNS32-VI***A.N. Mosolov¹, G.S. Sevalnev¹, S.A. Krylov¹, A.V. Skugorev¹, 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», Moscow, Russia; e-mail: bauman@bmstu.ru

Abstract. The structure, hardness, and tribotechnical characteristics of beryllium-containing steel VNS32-VI after hardening heat treatment have been studied. Metallographic analysis made it possible to establish that the structure of VNS32-VI consists of martensite, δ -ferrite and strengthening phases: NiBe, Cr₂₃C₆ and (Nb, Ti)C₂. Based on the results of studies of tribotechnical characteristics, it was found that, compared with bearing steel 95Kh18-Sh, the wear rate of VNS32-VI steel by 15–20 % less when tested under conditions of dry sliding friction in a pair of friction with steel of the martensitic class ShKh15-SHD.

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

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.

Введение

В современных технических системах автоматического управления с использованием гидроавтоматики в золотниковых деталях авиационного двигателя реализуется процесс фрикционного взаимодействия, способный приводить к износу узла. От бесперебойной и надежной работы формируемой пары трения зависит ресурс узлов системы автоматического управления газотурбинным двигателем. Для обеспечения высокой надежности работы данные детали изготавливают из материалов с комплексом специальных свойств: высокими прочностными характеристиками и износостойкостью при фрикционном взаимодействии, а также с достаточной коррозионной стойкостью.

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» перспективными материалами, обеспечивающими требуемый комплекс механических характеристик и способными работать в условиях экстремальных нагрузок, являются комплексно-легированные стали [1–12]. При реализации механизма упрочнения за счет мартенситного превращения и дисперсионного твердения при температурах в интервале 400–600 °С комплексно-легированные стали способны работать в условиях интенсивного изнашивания и контактной усталости, что наиболее важно при фрикционном и кавитационном взаимодействии пары трения в среде жидкости.

Выпускаемые в настоящее время отечественные стали типа 95X18-Ш, 110X18М-ШД и их зарубежные аналоги 440В, 440С не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к деталям и узлам перспективных изделий авиационной техники по ресурсным показателям в агрессивной среде, точности и надежности работы систем топливорегулирующей аппаратуры и др. Применение перспективных высокопрочных коррозионностойких сталей типа ВНС72-Ш с развитой системой легирования не обеспечивает достаточного уровня износостойкости, что в значительной степени может снизить точность показаний и надежность автоматических систем управления.

Необходимого уровня требуемых характеристик достигают благодаря применению сталей системы Fe–Cr–Ni и дополнительному легированию элементами, обеспечивающими упрочнение твердого раствора и дисперсионное твердение. На базе исследований, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, были разработаны бериллийсодержащие стали ЭИ928, ЭП354 и ВНС13, выпускавшиеся до 1990-х гг. Применение бериллия в качестве легирующего элемента благоприятно сказывается на уровне механических характеристик и существенно улучшает износостойкость, стойкость к коррозии и модуль упругости [13–28]. Совокупность исследований и полученных результатов позволила разработать бериллийсодержащую сталь ВНС32-ВИ (32X13N6K3M2BDLT-ВИ), обладающую высокой износостойкостью и способную работать в условиях агрессивных сред топливорегулирующей аппаратуры, гидросистем авиационной и ракетной техники [29, 30].

Помимо положительного влияния на уровень характеристик сплавов на основе железа, бериллий также может оказывать отрицательное воздействие на формирование структуры и уровень механических свойств. Развитая система легирования стали ВНС32-ВИ, включающая высокое содержание сильных α -стабилизирующих элементов хрома, молибдена, ниобия и титана, в совокупности с бериллием приводит к возникновению в структуре δ -феррита, который оказывает негативное влияние на уровень прочностных и пластических характеристик. С точки зрения триботехнического назначения δ -феррит обладает высокой стабильностью, так как является высокотемпературной модификацией железа, что практически не сказывается на работе пары трения.

Цель данной работы – исследование структуры и свойств бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ, а также оценка фрикционного взаимодействия со стальным и керамическим контртелом.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы, вырезанные из прутков стали ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ) [30]. Химический состав образцов соответствовал требованиям ТУ 14-1-3695–84 «Прутки горячекатаные и кованные из коррозионностойкой стали марки 32Х13Н6К3М2БДЛТ (СЭС1-ВИ, ВНС32-ВИ). Опытно-промышленная партия».

Выплавку стали ВНС32-ВИ проводили в Воскресенском экспериментальном технологическом центре (ВЭТЦ) НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с емкостью тигля 35 кг. Заливку слитков стали выполняли в конусную чугунную изложницу с надставкой. Горячую деформацию слитков для получения прутков осуществляли методом поперечно-винтовой прокатки.

Металлографический анализ структур стали после упрочняющей термической обработки и исследования дорожек износа проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 50$, $\times 500$, $\times 1000$. Для выявления структуры изготовленные микрошлифы травили электролитически в 10 %-ном растворе щавелевой кислоты. Определение структурных составляющих проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU8010 в режиме вторичных и обратноотраженных электронов при рабочих увеличениях $\times 2500$ и ускоряющем напряжении 15 кВ с приставкой для проведения микрорентгена спектрального анализа с применением программного обеспечения AZtec. Для анализа распределения легирующих элементов в структуре матрицы выполняли поэлементное картирование энергодисперсионных спектров.

ДюрOMETрические исследования образцов из стали ВНС32-ВИ после полного цикла упрочняющей термической обработки проводили на твердомере Durascan 20 при нагрузках 0,5; 1 и 10 Н (50, 100 и 1000 г) по ГОСТ 2999–75.

Для оценки механизма фрикционного взаимодействия пары трения из стали ВНС32-ВИ со сталью мартенситного класса ШХ15-ШД и оксидной керамикой ZrO_2 проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения по схеме «стержень–диск». В качестве прибора использовали трибометр Nanovea T-50, позволяющий проводить испытания в условиях сухого и граничного трения, а также в условиях погружения пары трения полностью в смазочный материал. Для оценки износостойкости выбраны следующие параметры испытания: скорость движения при испытании на изнашивание $\sim 0,1$ м/с; нагрузка на стержень с контртелом в виде шарика 1000 г (10 Н). В качестве контртела использовали сталь марки ШХ15-ШД диаметром 6 мм с твердостью поверхности 990 НВ и оксидную керамику ZrO_2 диаметром 10 мм с твердостью поверхности 1400 НВ. Оценку характера фрикционного взаимодействия проводили по взаимному износу образца и контртела относительно начальной площади контакта, который регистрировали с помощью датчика линейного перемещения LVDT. Количественную оценку износостойкости при испытаниях на изнашивание в условиях сухого трения скольжения осуществляли по скорости износа образца W и контртела $W_{\text{контр}}$ ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$). Данные величины рассчитывали по следующим формулам [7]:

$$W = s \cdot (l/P \cdot L),$$

где l – длина окружности дорожки износа, мм; s – площадь сечения канавки износа, мм²; P – нагрузка, Н; L – путь трения, м;

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

где $\Delta V_{\text{шар}}$ – износ объема поверхности контртела, мм³.

Результаты и обсуждение

Коррозионностойкая бериллийсодержащая сталь ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ) включает углерод в количестве 0,32 % (по массе) и имеет высокое содержание активных карбидообразующих элементов, таких как хром, молибден, ниобий и титан, в результате чего после термической обработки одним из ведущих механизмов упрочнения является образование мелкодисперсных карбидов. Для повышения активности дисперсионного твердения сталь также содержит бронзу и кобальт, способствующие ускорению диффузионных процессов в стали.

Исследования, проведенные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области упрочнения дисперсионно-твердеющих сплавов системы Ni–Be [13], а также обзор научно-технической литературы по упрочнению сплавов на основе алюминия, меди, никеля и железа [14–28] позволили установить, что добавление бериллия в мартенситно-стареющие и высоконикелевые стали приводит к формированию упрочняющих фаз NiBe при отпуске в интервале температур 400–500 °С. Это дает возможность разрабатывать бериллийсодержащие стали, работающие при температурах до 450 °С.

После термической обработки, включающей закалку, обработку холодом и дисперсионное твердение, в структуре стали присутствуют мартенсит, δ -феррит, мелкодисперсные избыточные фазы, а также включения NiBe размером от 1 до 10 мкм (рис. 1). В структуре стали также присутствуют избыточные фазы остроугольной формы размером от 5 до 25 мкм. Анализ микроструктуры по серии изображений позволил рассчитать количество δ -феррита в структуре стали, содержание которого изменяется в пределах от 20 до 30 %. Для более точного определения содержания δ -феррита необходимо проводить исследования с помощью дополнительных методов.

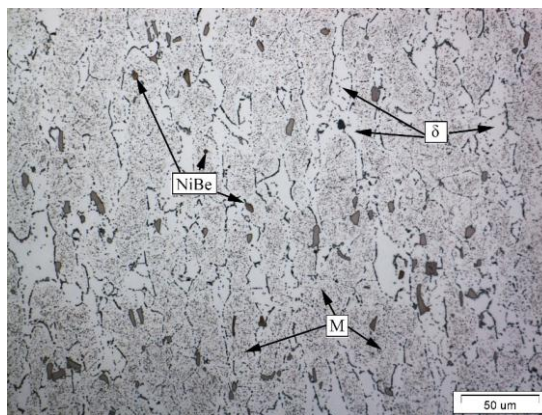


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$) стали ВНС32-ВИ после полного цикла упрочняющей термической обработки

Для определения состава крупных избыточных фаз выполнен рентгеноспектральный микроанализ с применением энергодисперсионного картирования химических элементов в исследуемой области. По результатам анализа микроструктуры (рис. 2, а) и определения стехиометрического состава избыточных фаз установлено, что фазами являются карбиды (Nb, Ti)C₂ (рис. 2, б).

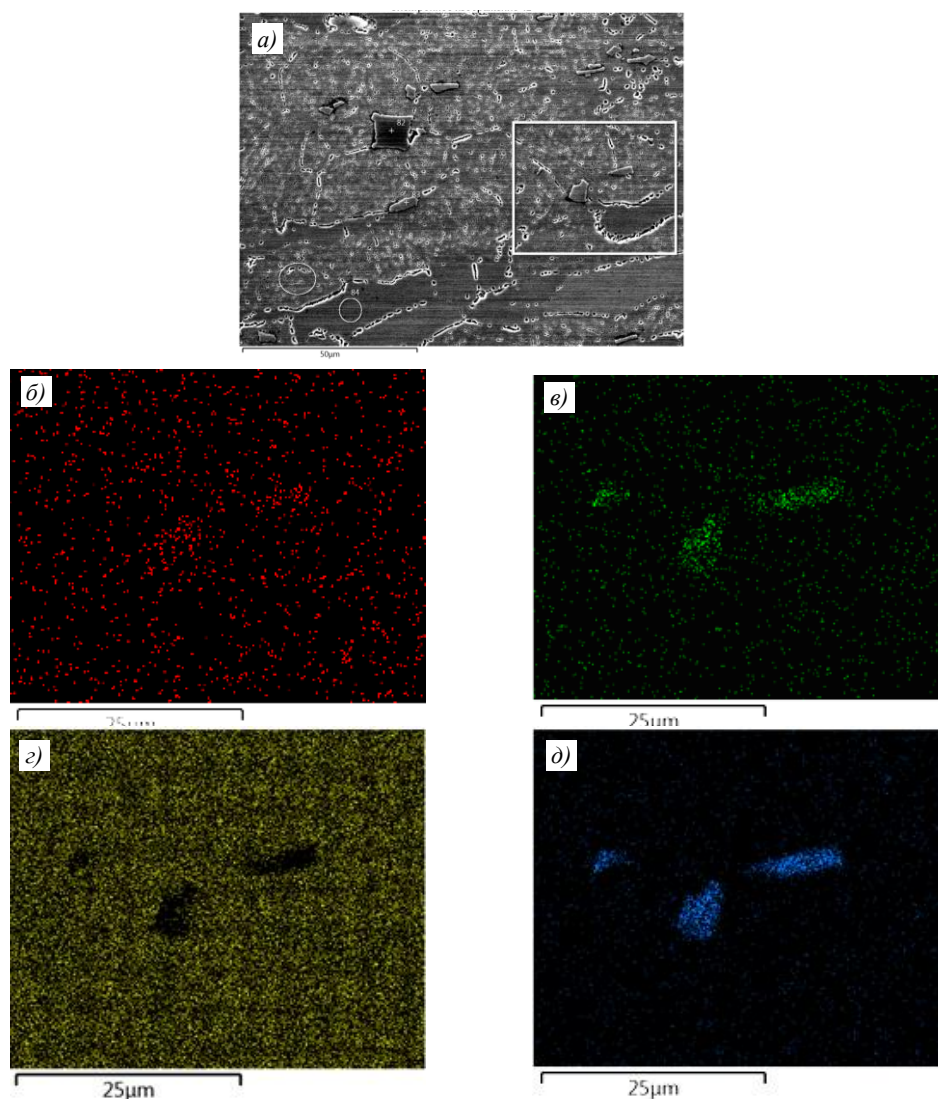


Рис. 2. Электронное изображение структуры (а) и карты энергодисперсионных спектров по химическим элементам С (б), Ti (е), Fe (з) и Nb (д) стали ВНС32-ВИ

В структуре, помимо крупных, присутствуют и мелкодисперсные фазы преимущественно глобулярной формы, которые располагаются как в теле, так и по границе зерна. Определение химического состава фазы с помощью локального анализа, а также расчет стехиометрического состава позволили выявить, что мелкодисперсными избыточными фазами являются карбиды хрома Cr_{23}C_6 (рис. 3). Вследствие формирования мелкодисперсных частиц >1 мкм характеристическое рентгеновское излучение в спектре 92 захватывает не только частицу, но и матрицу.

После упрочняющей термической обработки твердость образцов составила 830 HV. Исследование распределения твердости по структурным составляющим позволило установить, что δ -феррит обладает твердостью 930 HV, в то время как мартенсит с наличием мелкодисперсных избыточных фаз в теле зерна имеет твердость 810 HV. Высокая твердость фазы δ -феррита обусловлена повышенной растворимостью в нем легирующих элементов Cr и Mo, способствующих упрочнению объемноцентрированной кристаллической решетки железа.

Основная область применения стали ВНС32-ВИ – в парах трения, способных работать в условиях интенсивного изнашивания при экстремальных температурах до

450 °С и воздействии коррозионно-активной среды. Аналогичной сталью, которая способна работать в подобных условиях, является сталь мартенситного класса 95X18-Ш, однако термическая обработка в интервале температур 400–500 °С приводит к ее разупрочнению и снижению твердости с 58 до 54–55 HRC.

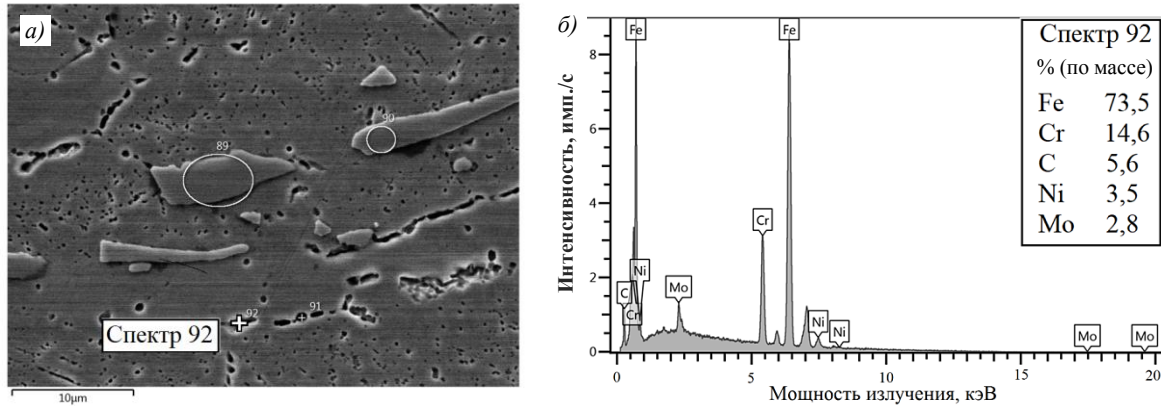


Рис. 3. Электронное изображение структуры (а) и энергодисперсионный спектр характеристического рентгеновского излучения фазы $Cr_{23}C_6$ и матрицы (б)

Анализ механизма фрикционного взаимодействия стали ВНС32-ВИ проводили при испытаниях в условиях сухого трения скольжения в паре трения со сталью мартенситного класса ШХ15-ШД, а также с оксидной керамикой ZrO_2 . Результаты испытаний пары трения стали ВНС32-ВИ с шариком диаметром 6 мм из стали ШХ15-ШД (рис. 4) свидетельствуют, что фрикционное взаимодействие сталей в условиях сухого трения скольжения сопровождается достаточно быстрой приработкой (3–4 мин), а также относительно низким средним коэффициентом трения ($\mu \approx 0,4$) при данной схеме нагружения. Формирование высокотвердых структур высокоотпущенного мартенсита и стабильного δ -феррита может оказывать положительное влияние на фрикционное взаимодействие со сталями мартенситного класса высокой твердости. Изменение положения датчика взаимного износа относительно начальной площади контакта свидетельствует о постоянном упругом выдавливании продуктов износа из зоны контакта. Это также подтверждается исследованиями дорожки скольжения после испытаний на изнашивание, на которой отсутствуют значительные следы наволакивания продуктов износа (рис. 5).

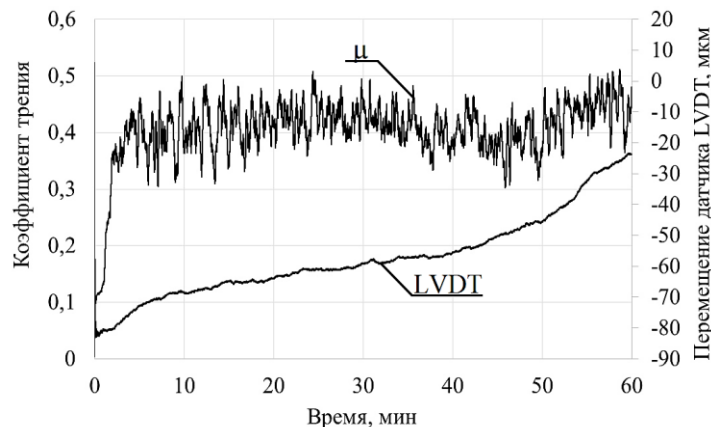


Рис. 4. Изменение коэффициента трения μ во времени и положения датчика взаимного износа LVDT при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения стали ВНС32-ВИ в паре трения со сталью ШХ15-ШД



Рис. 5. Вид дорожки износа ($\times 100$) после испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения стали ВНС32-ВИ в паре трения со сталью ШХ15-ШД

При испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ в паре трения с шариком из оксидной керамики ZrO_2 получен совершенно противоположный результат. Приработка пары трения происходит в два этапа с входом на площадку стационарного режима трения с высоким коэффициентом трения ($\mu \approx 0,8$) в течение 7 мин и последующим его ускоренным ростом (до 1,17) в течение 3 мин (рис. 6). Такие высокие значения коэффициента трения могут быть связаны с довольно высокой хрупкостью δ -феррита, а также с расположением мелкодисперсных карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зерен, в результате чего могут происходить хрупкое скалывание поверхности и образование абразива, попадающего в зону трибоконтакта. В то же время изменение положения датчика LVDT свидетельствует о постоянном наволакивании материала в зоне трибоконтакта. Металлографическое исследование дорожки скольжения показывает отсутствие налипших продуктов износа на дорожку скольжения (рис. 7), однако на ней присутствуют многочисленные поры, что может подтверждать предположение о скалывании поверхности и образовании абразивных частиц из продуктов износа, задерживающихся в зоне контакта и повышающих коэффициент трения.

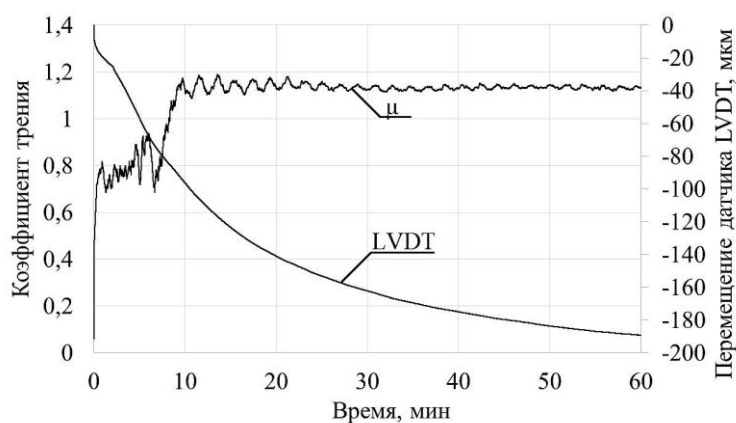


Рис. 6. Изменение коэффициента трения μ во времени и положения датчика взаимного износа LVDT при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения стали ВНС32-ВИ в паре трения с оксидной керамикой ZrO_2

Анализ полученных результатов скорости износа бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ в паре трения со сталью ШХ15-ШД показывает, что износостойкость стали ВНС32-ВИ в аналогичных условиях испытаний больше скорости износа стали 95X18-Ш на 15–20 %, в то время как сталь 95X18-Ш после закалки, обработки холодом и низкого

отпуска имеет высокую твердость 800 HV (рис. 8). Несмотря на высокие значения коэффициента трения в паре трения с оксидной керамикой, скорость изнашивания стали ВНС32-ВИ меньше в 6 раз, чем при испытании в паре трения со сталью ШХ15-ШД. Это, по-видимому, связано с высокой стабильностью структуры δ -феррита, являющегося высокотемпературной модификацией железа. Процесс износа при работе пары трения подчиняется адгезионно-деформационной теории, в которой реализуются два компонента – адгезионное взаимодействие с поверхностью и ее значительные деформации. Обладая высокими стабильностью и твердостью, δ -феррит в паре трения сопротивляется как адгезионному, так и деформационному воздействию, что может приводить к значительному снижению износа поверхности при работе в паре трения с керамическими материалами.

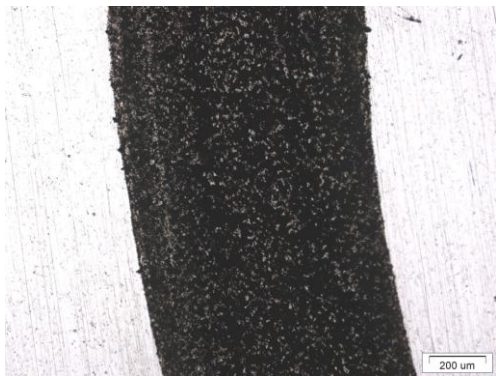


Рис. 7. Вид дорожки износа ($\times 100$) после испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения стали ВНС32-ВИ в паре трения с оксидной керамикой ZrO_2

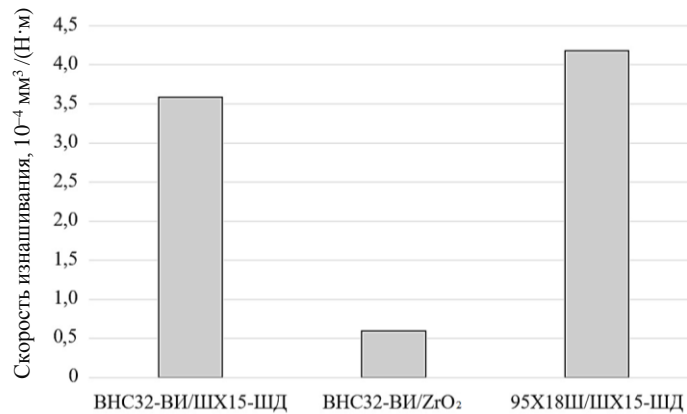


Рис. 8. Скорости изнашивания образцов (в числителе) с различными образцами (в знаменателе) в паре трения после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения

Анализ полученных результатов скорости износа контртела (рис. 9) показывает, что уровень фрикционного взаимодействия в паре трения ВНС32-ВИ/ШХ15-ШД более высокий, чем в паре трения 95X18-Ш/ШХ15-ШД, что может повысить ресурс работы изделия.

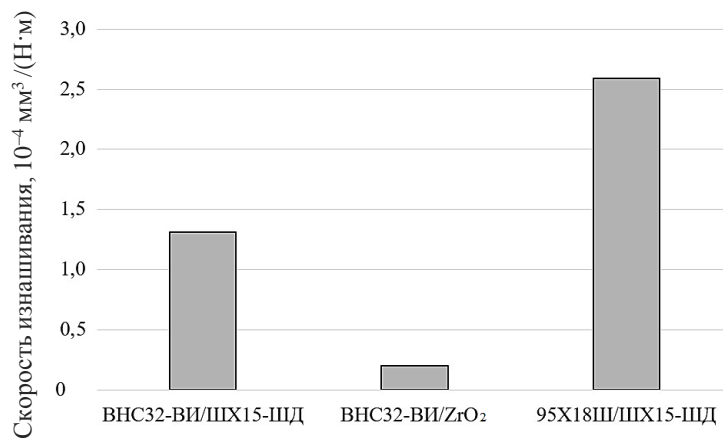


Рис. 9. Скорости изнашивания контртел (в знаменателе) с различными образцами (в числителе) в паре трения после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения

Заключения

Для обеспечения высокой надежности работы узлов современных технических систем автоматического управления с использованием гидроавтоматики требуются стали, обладающие повышенной износостойкостью, стойкостью к коррозионно-агрессивным средам и способные работать при температурах до 450 °С.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана бериллийсодержащая сталь ВНС32-ВИ, обладающая высоким уровнем твердости и износостойкости, упрочняемая за счет мартенситного превращения и дисперсионного твердения. По результатам металлографического анализа установлено, что в структуре стали ВНС32-ВИ присутствуют δ -феррит, мартенсит и упрочняющие фазы NiBe, Cr₂₃C₆ и (Nb, Ti)C₂. Благодаря формированию такой структуры твердость стали ВНС32-ВИ после полного цикла упрочняющей термической обработки составляет 830 HV.

Результаты испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения свидетельствуют, что сталь ВНС32-ВИ в паре трения со сталью ШХ15-ШД обладает относительно низким коэффициентом трения ($\mu \approx 0,4$) при испытаниях по схеме «стержень–диск» и скоростью изнашивания на 15–20 % меньше по сравнению со скоростью изнашивания стали 95X18-Ш, испытанной при тех же условиях. Анализ результатов испытаний стали ВНС32-ВИ в паре трения с оксидной керамикой ZrO₂ позволил установить более высокое значение коэффициента трения ($\mu \approx 1,17$), большее время приработки, однако скорость изнашивания оказалась в 6 раз меньше по сравнению с парой трения «сталь–сталь». Такие результаты, по-видимому, связаны с высокими стабильностью и твердостью δ -феррита как структурной составляющей.

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. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. № 3. С. 8–13.
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. Блинов В.М., Лукин Е.И., Блинов Е.В. и др. Особенности разрушения при растяжении коррозионностойких аустенитных сталей со сверхравновесным содержанием азота и различным содержанием ванадия // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 4. С. 10–14. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-4-10-14.
6. 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.
7. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // *Труды ВИАМ*. 2021. № 10 (104). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
8. 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.
9. 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.

10. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шестаков И.И., Елисеев Э.А. Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и свойства высокопрочной коррозионностойкой стали аустенито-мартенситного класса 17X13H4K6CAM3ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-11-16.
11. Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А., Леонов А.В., Дульнев К.В. Влияние водорода на свойства высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС65-Ш (18X13H4K4C2AM3-Ш) и пути устранения водородной хрупкости // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-3-9.
12. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тоньшева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Севальнев Г.С., Громов В.И., Елисеев Э.А., Леонов А.В. Влияние термической обработки на формирование структуры и свойств в никель-бериллиевом сплаве 97НЛ-ВИ // *Труды ВИАМ*. 2018. № 6 (66). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-3-11.
14. Папилов И.И. Бериллий в сплавах: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
15. Фридляндер И.Н., Яценко К.П., Терентьева Т.Е., Хелковский-Сергеев Н.А. Бериллий – материал современной техники. М.: Металлургия, 1992. 128 с.
16. Shatinskii V.F., Zbozhnaya O.M. The impregnation of 1Kh18N8T steel by beryllium and the corrosion resistance of the coating in molten lithium // *Material Science*. 1974. No. 8. P. 573–575.
17. 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.
18. Дворецков Р.М., Волкова О.С., Радзиковская В.Н., Бутова 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: 12.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
19. Naik B.G., Sivasubramanian N. Applications of beryllium and its alloys // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1994. Vol. 13. No. 1. P. 243–251.
20. Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы меди. М.: Металлургия, 1979. 336 с.
21. Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы. М.: Металлургия, 1965. 363 с.
22. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
23. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / под ред. Н.Х. Абрикосова. М.: Наука, 1979. 248 с.
24. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
25. Тихонов Б.С. Низколегированные сплавы на основе меди. М.: Цветметинформация, 1977. 75 с.
26. Папилов И.И. Структура и свойства сплавов бериллия: справочник. М.: Энергоиздат, 1981. 368 с.
27. Международный транслятор современных сталей и сплавов. М.: Наука и техника, 1993. Т. 3: Международная инженерная энциклопедия / под ред. В.Л. Кершенбаума. 640 с.
28. Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. / пер. с нем. А.С. Займовского, М.Л. Бернштейна, В.С. Меськина. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 2. 540 с.
29. 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.
30. Высокопрочная бериллийсодержащая сталь: пат. 2600467 Рос. Федерация. № 2015125065/02; заявл. 25.06.15; опубл. 20.10.16.

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. Russia Needs New Generation Materials. *Redkiye zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
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. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. Tensile fracture features of corrosion-resistant austenitic steels with superequilibrium nitrogen content and different vanadium content. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2021, no. 4, pp. 10–14. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-4-10-14.
6. 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, pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
7. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104). paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 16 October, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
8. 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.
9. 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.
10. Tonysheva O.A., Voznesenskaya N.M., Shestakov I.I., Eliseyev E.A. Influence of modes of high-temperature thermomechanical processing on structure and properties of high-strength corrosion-resistant steel of austenitic-martensitic class 17X13H4K6CAM3ч. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 11–16. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-16.
11. Voznesenskaya N.M., Tonusheva O.A., Leonov A.V., Dulnev K.V. Hydrogen influence on high-strength corrosion-resistant steel VNS65-Sh properties and ways of elimination of hydrogen embrittlement. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-3-9.
12. Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Pokrovskaya N.G., Tonysheva O.A. High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Eliseyev A., Leonov A.V. Influence of heat treatment on the formation of structure and properties in the nickel-beryllium alloy 97NL-VI. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-3-11.
14. Papirova I.I. *Beryllium in alloys*: reference book. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 184 p.
15. Fridlyander I.N., Yatsenko K.P., Terenteva T.E., Helkovsky-Sergeev N.A. *Beryllium is the material of modern technology*. Moscow: Metallurgiya, 1992, 128 p.
16. Shatinskii V.F., Zbozhnaya O.M. The impregnation of 1Kh18N8T steel by beryllium and the corrosion resistance of the coating in molten lithium. *Material Science*, 1974, no. 8, pp. 573–575.
17. 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 radioelektronного priborostroyeniya*, 2014. vol. 14, no. 3, pp. 70–73.
18. 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: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
19. 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.
20. Pastukhova Zh.P., Rakhshadt A.G. *Spring copper alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 336 p.
21. Rakhshadt A.G. *Spring alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1965, 363 p.
22. Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands*: reference book. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 336 p.

23. *Double and multi-component systems based on copper*: reference book. Ed. N.Kh. Abrikosov. Moscow: Nauka, 1979, 248 p.
24. Smiryagin A.P., Smiryagina N.A., Belova A.V. *Industrial non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 488 p.
25. Tikhonov B.S. *Low alloys based on copper*. Moscow: Tsvetmetinformatsiya, 1977, 75 p.
26. Papirov I.I. *Structure and properties of beryllium alloys*: reference book. Moscow: Energoizdat, 1981, 368 p.
27. *International translator of modern steels and alloys*. Moscow: Nauka i tekhnika, 1993, vol. 3: International engineering encyclopedia. Ed. V.L. Kershenbaum. 640 p.
28. Goodremont E. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., rev and add. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 540 p.
29. 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.
30. *High-strength beryllium-containing steel*: pat. 2600467 Rus. Federation, no. 2015125065/02; filed 25.06.15; publ. 20.10.16.

Информация об авторах

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

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

Крылов Сергей Алексеевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скугоров Александр Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

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

Sergei A. Krylov, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Skugorev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 18.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.02.2022.

The article was submitted 18.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 28.02.2022.