

УДК 669.14.018.8

*Г.С. Севальнев¹, Т.Г. Севальнева¹, А.Г. Колмаков², К.В. Дульнев¹, С.А. Крылов¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ
МЕХАНИЗМОМ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11

Исследованы структура, фазовый состав и твердость коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения. Установлено, что после упрочняющей обработки стали марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш имеют приблизительно одинаковую твердость с содержанием мартенсита 50, 90 и 75 % (объемн.) соответственно. Результаты трибологических испытаний на изнашивание в условиях сухого трения свидетельствуют, что лучшей износостойкостью обладает сталь марки ВНС9-Ш с TRIP-эффектом. Сталь марки ВНС30-Ш с дисперсионным твердением и ВНС72-Ш с закалкой на мартенсит обладают практически одинаковой износостойкостью.

Ключевые слова: трение, износ, трибология, мартенсит, твердость, фрикционное взаимодействие.

*G.S. Sevalnev¹, T.G. Sevalneva¹, A.G. Kolmakov², K.V. Dulnev¹, S.A. Krylov¹***STUDY OF THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS
OF CORROSION-RESISTANT STEELS WITH DIFFERENT
MECHANISMS OF VOLUMETRIC HARDENING**

The structure, phase composition and hardness of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening was studied. It was found that after hardening treatment of steel VNS9-Sh, VNS30-Sh, VNS72-Sh have approximately the same hardness with a volumetric martensite content of 50, 90 and 75 %, respectively. According to the results of tribological tests for wear under dry friction conditions, it was found that VNS9-Sh steel with the TRIP effect has the best wear resistance. VNS30-Sh steel with precipitation hardening and VNS72-Sh steel with martensite hardening have approximately the same wear resistance.

Keywords: friction, wear, tribology, martensite, hardness, frictional interaction.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН [Institute of Metallurgy and Materials Science. AA Baykova RAS]; e-mail: imet@imet.ac.ru

Введение

Комплексно-легированные коррозионностойкие стали являются одним из наиболее востребованных материалов в современном авиационном машиностроении. Поскольку наряду с повышенной коррозионной стойкостью они обладают высоким уровнем механических характеристик [1–5], область применения данных сталей – широкая. Например, их используют в различных узлах агрегатов: от высоконагруженных деталей до подвижных механизмов, испытывающих интенсивный износ и контактную усталость.

Влияние структурообразования на уровень механических свойств коррозионно-стойких сталей системы легирования Cr–Ni–Mo при работе в условиях статического нагружения широко изучено. Однако постоянное повышение требований к материалу и изменение условий эксплуатации под действием динамических нагрузок требует дальнейших исследований механизмов формирования структуры и свойств, предпочтительных для конкретного узла агрегата.

При разработке новых высокопрочных коррозионно-стойких сталей в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [6, 7] особое внимание следует уделить возможности их работы не только в условиях агрессивных сред, но и при интенсивном изнашивании и контактной усталости [8–10]. Однако при одинаковой твердости износостойкость сталей будет значительно различаться в связи со структурной чувствительностью данной характеристики при изнашивании в условиях сухого трения [11]. Механизм объемного упрочнения таких сталей будет иметь большое значение при работе в паре трения.

Цель данной работы – анализ влияния механизма объемного упрочнения коррозионно-стойких сталей на формирование триботехнических свойств при работе в условиях сухого трения скольжения в паре со сталью марки ШХ15.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионно-стойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из коррозионно-стойких сталей марок ВНС9-Ш (23X15H5AM3-Ш), ВНС30-Ш (ЭП866-Ш, 15X16K5H2MBФAB-Ш) и ВНС72-Ш (15X15H4ГAM-Ш) [12–15].

Металлографический анализ структур сталей после упрочняющей термической обработки и исследования дорожек износа проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 при увеличениях $\times 50$, $\times 500$ и $\times 1000$. Для выявления структуры изготовленные микрошлифы подвергали электролитическому травлению в 10 %-ном растворе щавелевой кислоты.

Для исследования твердости проводили дюрометрический анализ на твердомере DuraScan-20 при нагрузке 10 Н в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Объемную долю мартенсита оценивали по количеству магнитной фазы, определяемому методом Штеблея по намагниченности насыщения в установке баллистического типа.

Исследования триботехнических характеристик образцов из сталей марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш осуществляли путем испытания образцов на изнашивание в условиях сухого трения скольжения с использованием трибометра Nanovea T-50. Испытания проводили по схеме «стержень–диск» (*pin-on-disk*) при линейной скорости вращения образца $\sim 0,1$ м/с и нагрузке на стержень 10 Н. Контртелом при испытаниях являлся шарик диаметром 6 мм из хромистой стали марки ШХ15-ШД (зарубежный аналог – сталь марки AISI 52100), термообработанной на твердость 64 HRC. Для оценки характера износа и вида фрикционного взаимодействия при трении использовали диаграмму, полученную с датчика LVDT, который показывает износ материала образца и контртела относительно начальной площади контакта. Скорость износа W (в $\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) рассчитывали по формуле

$$W = s \cdot \frac{l}{P \cdot L},$$

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

Результаты и обсуждение

Объектами для исследований механического поведения при трибонагружении выбраны три коррозионностойкие стали с различным механизмом объемного упрочнения [16]. Высокий уровень механических характеристик стали марки ВНС9-Ш (с прочностью 1750 МПа) достигается за счет интенсивной пластической деформации, в результате чего формируется TRIP-эффект (Transformation Induced Plasticity – пластичность, наведенная превращением), следствием которого является превращение метастабильного аустенита в мартенсит [12, 13]. Благодаря данному механизму упрочнения в сталях с таким эффектом формируется высокий уровень не только прочностных, но и пластических характеристик.

Сталь марки ВНС30-Ш подвергается закалке на мартенситную структуру с последующим двойным отпуском для реализации механизма дисперсионного твердения и выделения интерметаллидных фаз. Применение такого механизма упрочнения в большинстве случаев не способствует существенному увеличению твердости, однако в значительной степени повышает пределы прочности и текучести. В парах трения выделение мелкодисперсных интерметаллидных фаз оказывает как положительное, так и отрицательное воздействие, поскольку такие фазы могут способствовать армированию мартенситной матрицы и в то же время являться концентраторами напряжений.

Система легирования стали марки ВНС72-Ш, включающая упрочнение мартенсита за счет совместного воздействия углерода и азота, позволяет достичь повышенного уровня механических свойств. Высокое содержание азота (в пределах от 0,16 до 0,21 % (по массе)) позволяет совместно с такими легирующими элементами, как хром, никель и молибден, обеспечивать наряду с повышенной прочностью высокие характеристики пластичности и ударной вязкости.

Микроструктуры коррозионностойких сталей представлены на рис. 1. Структура стали марки ВНС9-Ш после холодной пластической деформации состоит из мартенсита и аустенита (рис. 1, *а*). После термической обработки структура сталей марок ВНС30-Ш и ВНС72-Ш состоит из мартенсита и аустенита (рис. 1, *б*, *в*). Благодаря дисперсионному твердению структура стали марки ВНС30-Ш дополнительно насыщена карбонитридами хрома типа Cr(C, N) и ванадия типа V(C, N), увеличивающих прочностные характеристики.

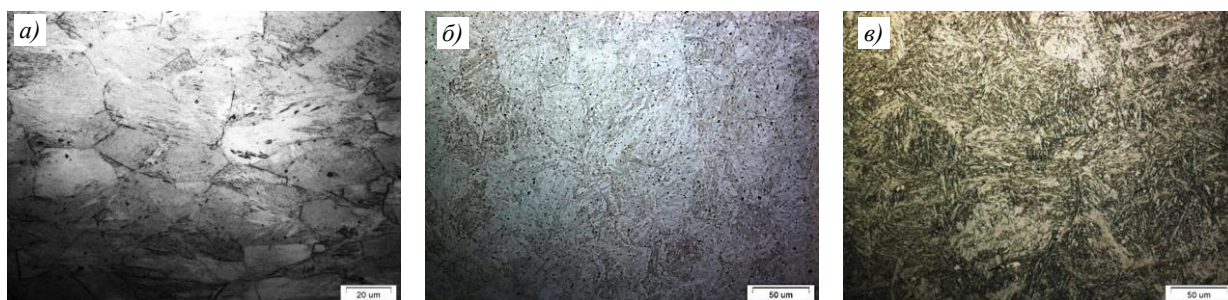


Рис. 1. Микроструктуры сталей марок ВНС9-Ш (*а* – $\times 1000$), ВНС30-Ш (*б* – $\times 500$) и ВНС72-Ш (*в* – $\times 500$)

Методом фазового магнитного анализа исследовано соотношение аустенита и мартенсита в коррозионнотойких сталях. По результатам измерения намагниченности насыщения установлено, что в сталях марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш содержание мартенсита составляет: 50, 90 и 75 % (объемн.) соответственно (рис. 2). Результаты исследования твердости образцов свидетельствуют, что после упрочняющих обработок коррозионнотойкие стали имели приблизительно одинаковую твердость, несмотря на различный фазовый состав (рис. 3).

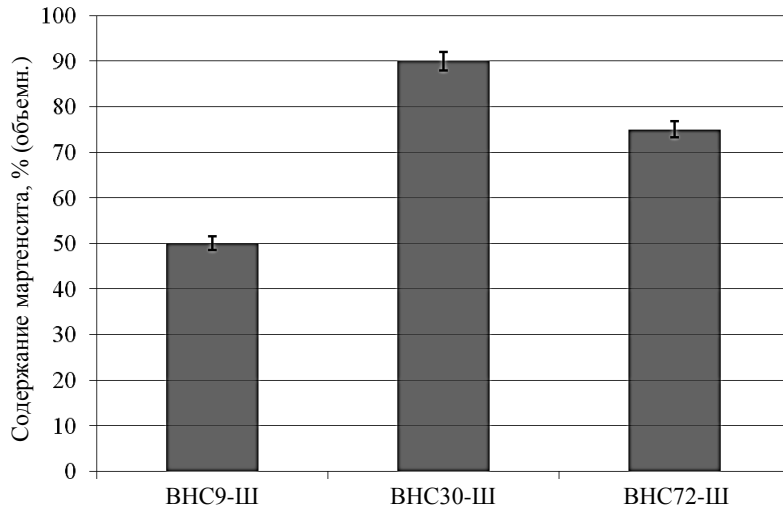


Рис. 2. Содержание мартенсита в коррозионнотойких сталях марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш после упрочняющей обработки

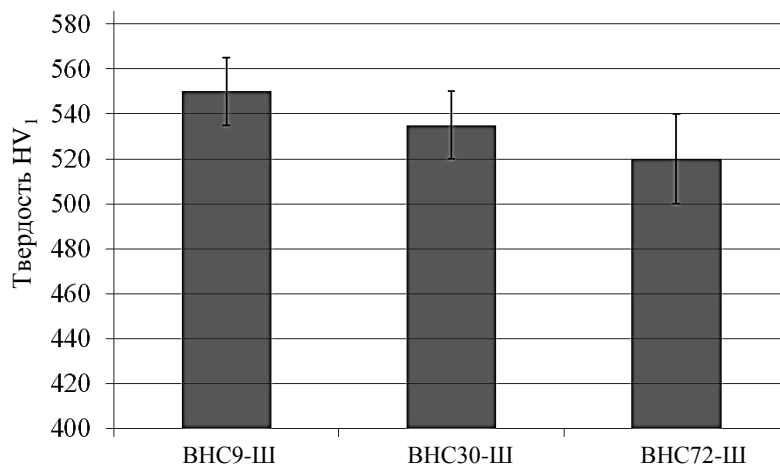


Рис. 3. Твердость коррозионнотойких сталей марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш после упрочняющей обработки

Механическое поведение в условиях трибонагружения сталей в паре трения с контртелом из стали мартенситного класса марки ШХ15-ШД оценивали по характеру изменения коэффициента трения во время испытания в условиях сухого трения скольжения, а также по характеру перемещения датчика LVDT относительно начальной плоскости контакта, дающего информацию по взаимному износу контактирующих тел в паре трения.

Анализ результатов испытаний в условиях сухого трения показал следующее: механизмы фрикционного взаимодействия стали марки ВНС9-Ш, обладающей

TRIP-эффектом, и стали марки ВНС30-Ш, упрочняемой дисперсионным твердением посредством выделения интерметаллидных фаз, имеют схожий характер трения (рис. 4). При данном трибосопряжении со сталью мартенситного класса происходит активное разрушение поверхностных пленок образца и контртела с последующим массопереносом продуктов трения в зону трибоконтакта сталей (рис. 5, а, б). Для стали марки ВНС72-Ш, подвергаемой термической обработке на мартенситную структуру, характерен механизм пластического оттеснения материала из зоны контакта (рис. 4 и 5, в).

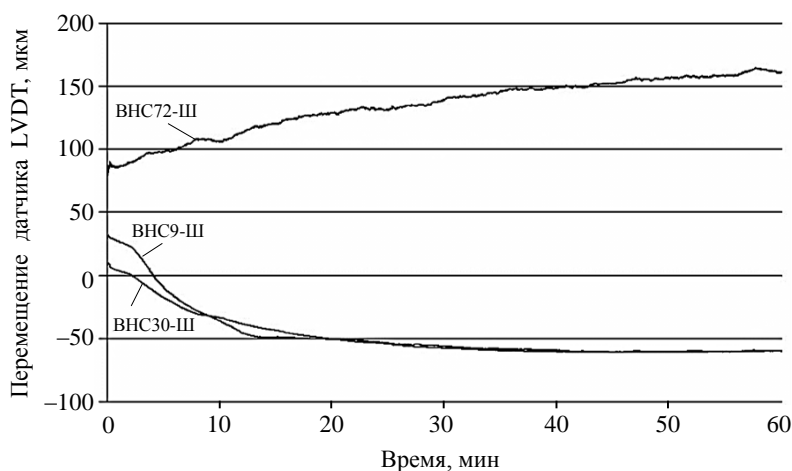


Рис. 4. Изменение положения датчика LVDT во времени при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения



Рис. 5. Микроструктуры ($\times 50$) дорожек износа после испытания на изнашивание в условиях сухого трения сталей марок ВНС9-Ш (а), ВНС30-Ш (б) и ВНС72-Ш (в)

Анализ изменения коэффициента трения при испытаниях в условиях сухого трения скольжения позволил установить, что сталь марки ВНС30-Ш, упрочняемая по механизму дисперсионного твердения, прирабатывается быстрее, чем сталь марки ВНС9-Ш, обладающая TRIP-эффектом (рис. 6). Многократное деформационное воздействие в зоне контакта приводит к постоянному образованию мартенсита деформации в результате TRIP-эффекта. Постоянное образование мартенсита деформации в зоне трибоконтакта стали марки ВНС9-Ш оказывает положительное влияние на уровень износостойкости, однако время приработки до выхода на установившийся режим составило 24 мин, что почти в 2,5 раза больше, чем у стали марки ВНС30-Ш (~10 мин). Следует отметить, что при испытаниях на изнашивание сталь марки ВНС30-Ш обладала стабильным средним коэффициентом трения скольжения (~0,4), в то время как у стали марки ВНС9-Ш этот коэффициент составил ~0,6.

Для образцов из стали марки ВНС72-Ш, после упрочняющей обработки имеющих структуру мартенсита, полученного путем закалки, коэффициент трения, среднее

значение которого, так же как и в случае стали марки ВНС9-Ш, составило $\sim(0,57-0,6)$, имел высокую амплитуду по сравнению со сталью марки ВНС30-Ш (рис. 7). Время приработки для стали марки ВНС72-Ш составило ~ 30 мин.

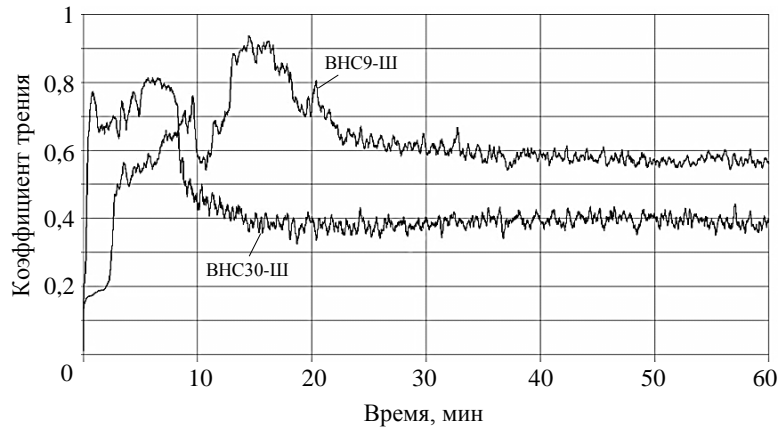


Рис. 6. Изменение коэффициента трения во времени при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения сталей марок ВНС9-Ш и ВНС30-Ш

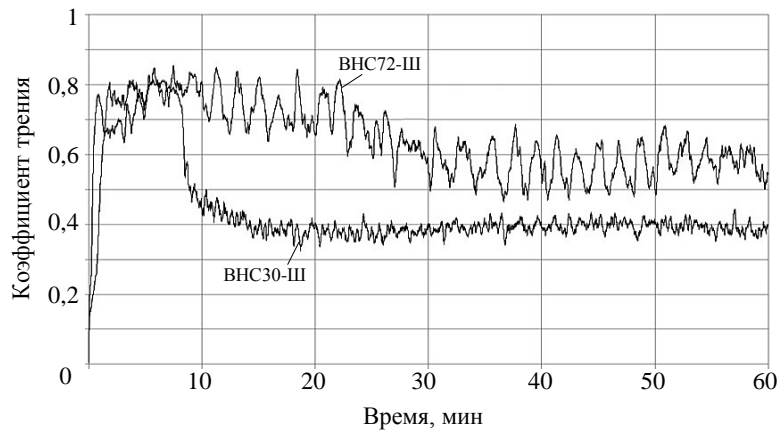


Рис. 7. Изменение коэффициента трения во времени при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения сталей марок ВНС30-Ш и ВНС72-Ш

Расчет скорости износа для образцов из коррозионностойких сталей после испытания показал, что наилучшей износостойкостью обладают образцы из стали марки ВНС9-Ш, упрочняемой за счет TRIP-эффекта (рис. 8). По сравнению со сталью марки ВНС30-Ш, упрочняемой дисперсионным твердением, скорость износа стали марки ВНС9-Ш меньше в 3,4 раза, а по сравнению со сталью марки ВНС72-Ш, упрочненной путем закалки на мартенсит, — в 4 раза. Такое снижение скорости износа связано с постоянным упрочнением стали во время пластической деформации, реализуемым при постоянном вдавливании контртела при испытании на изнашивание. Скорость износа стали марки ВНС30-Ш за счет дисперсионного твердения и выделения мелкодисперсных карбонитридных фаз меньше на 20 % по сравнению со сталью марки ВНС72-Ш. Тем не менее коэффициент трения стали марки ВНС30-Ш при выходе на установившийся режим после приработки при трибосопряжении со сталью марки ШХ15 меньше, чем у сталей марок ВНС9-Ш и ВНС72-Ш, и составил 0,4, что является немаловажным фактором при взаимодействии пары трения.

Для косвенного подтверждения повышения износостойкости путем формирования TRIP-эффекта при интенсивной пластической деформации в зоне контакта проведены измерения твердости дорожек износа после испытаний на всех марках сталей. По результатам анализа измерений установлено, что твердость стали марки ВНС9-Ш в зоне контакта трибосопряжения увеличилась с 550 до 740 НV (на 35 %), что может свидетельствовать о прохождении мартенситного превращения (рис. 9).

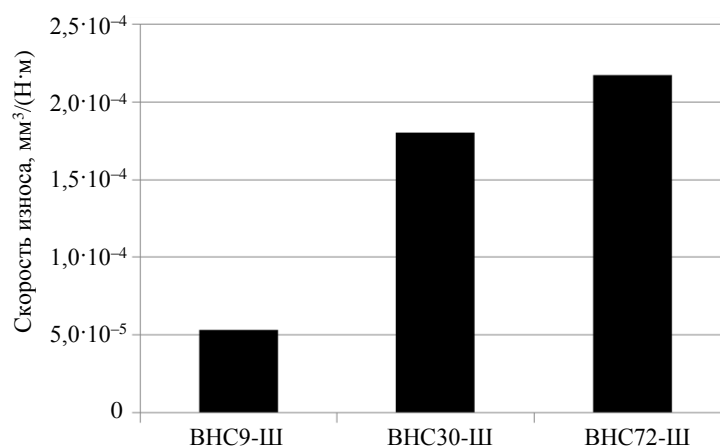


Рис. 8. Скорость износа коррозионностойких сталей марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения

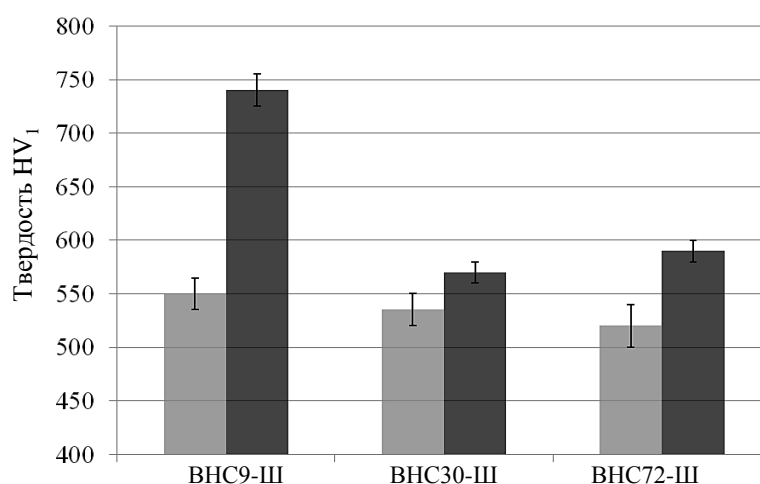


Рис. 9. Результаты измерения твердости образцов из сталей марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш до (■) и после испытаний на изнашивание (■) в условиях сухого трения

Аналогичные измерения проведены для дорожек износа сталей марок ВНС30-Ш и ВНС72-Ш. По результатам измерений установлено, что твердость стали марки ВНС30-Ш увеличилась с 535 до 570 НV, а стали марки ВНС72-Ш – с 520 до 590 НV. Такое незначительное повышение твердости может свидетельствовать лишь о протекании поверхностной пластической деформации образцов в зоне контакта трибосопряжения.

Результаты проведенных исследований показывают, что наиболее перспективной коррозионностойкой сталью для работы в условиях интенсивного изнашивания является сталь марки ВНС9-Ш благодаря упрочнению при интенсивной пластической деформации путем реализации TRIP-эффекта.

Заключения

Узлы современных агрегатов в авиационном машиностроении нередко работают в условиях экстремальных нагрузок и могут подвергаться интенсивному изнашиванию, что приводит к преждевременному выходу из строя узла агрегата или всего изделия. Исследование механизмов фрикционного взаимодействия пары трения является актуальной задачей в настоящее время.

Современные представления об износостойкости во многом строятся на гипотезе о повышении износостойкости при увеличении твердости контактируемых поверхностей. Однако данная характеристика является структурно зависимой величиной: высокая твердость не обязательно приведет к повышенной износостойкости.

Коррозионностойкие стали являются одним из перспективных материалов, которые способны работать в условиях как статических, так и динамических нагрузок, что позволяет широко использовать их в условиях авиационного машиностроения.

Проведен сравнительный анализ коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения и получения высокого уровня прочностных свойств. По результатам исследования структуры и фазового состава установлено, что содержание мартенсита в структуре сталей марок ВНС9-Ш, ВНС30-Ш и ВНС72-Ш составляет: 50, 90 и 75 % (объемн.) соответственно. В структуре стали марки ВНС30-Ш также присутствуют мелкодисперсные карбонитридные избыточные фазы. Анализ результатов измерения твердости образцов позволил установить, что после упрочняющей обработки рассматриваемые марки сталей имели приблизительно одинаковую твердость.

Результаты трибологических испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения свидетельствуют, что у сталей марок ВНС9-Ш и ВНС30-Ш реализуется механизм фрикционного взаимодействия путем разрушения поверхностных пленок с последующим массопереносом материала трения в зону контакта, а у стали марки ВНС72-Ш – механизм упругого отеснения материала из зоны контакта. Самым низким коэффициентом трения (~0,4) и самым малым временем приработки (~10 мин) среди исследуемых марок сталей обладает сталь марки ВНС30-Ш.

Анализ скорости износа позволил установить, что наилучшая износостойкость у стали марки ВНС9-Ш, которая обладает механизмом упрочнения при интенсивной пластической деформации путем реализации TRIP-эффекта. Для косвенного подтверждения данного эффекта проведены измерения твердости дорожки износа после испытаний. По результатам измерений установлено, что твердость после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения увеличилась на 35 %, что может свидетельствовать о протекании мартенситного превращения.

Проведенные исследования представленных коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения позволили установить, что наилучшие результаты при работе в экстремальных условиях и интенсивного изнашивания показала сталь, обладающая TRIP-эффектом. Практически одинаковая твердость и различное содержание мартенсита исследуемых сталей подтвердили структурную зависимость данной характеристики при трибологических испытаниях.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.

3. Shi F., Tian P.C., Jia N. et al. Improving intergranular corrosion resistance in a nickel-free and manganese-bearing high-nitrogen austenitic stainless steel through grain boundary character distribution optimization // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 107. P. 49–59.
4. 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: 01.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-3-9.
5. Bannykh O., Blinov V., Lukin E. High-strength economically alloyed corrosion-resistant steels with the structure of nitrogen martensite // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 130. No. 1. P. 012001.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
8. Романенко Д.Н., Севальнев Г.С., Леонов А.А. и др. Повышение трибологических характеристик стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-13-21.
9. Sevalnev G.S., Tsukanov D.V., Zubkov N.N. et al. Improvement of Austenitic Steel Tribological Properties by Deformational Cutting // *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. P. 169–176. DOI: 10.1007/s11015-021-01145-6.
10. Kolmykov V.I., Romanenko D.N., Abyshev K.I., Bedin V.V. Efficiency of surface hardening by carburizing steel objects operating under abrasive wear conditions // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51. No. 1–2. P. 58–61.
11. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И. Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 600 с.
12. Terent'ev V.F., Ashmarin A.A., Blinova E.N. et al. Mechanical properties and structure of a VNS9-Sh steel as functions of the tempering temperature // *Russian metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 2019. No. 4. P. 403–408.
13. Бецофен С.Я., Ашмарин А.А., Терентьев В.Ф. и др. Фазовый состав и остаточные напряжения в поверхностных слоях трип-стали ВНС9-Ш // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 6. С. 12–20.
14. Жегина И.П., Луценко А.Н., Мубояджян С.А., Белоус В.Я., Котельникова Л.В. Характер разрушения стали ЭП866-Ш с покрытиями // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 4. С. 150–156.
15. Тоньшева О.А. Особенности формирования структуры и свойств при выплавке, термической обработке и пластической деформации коррозионностойких свариваемых хромоникелевых сталей, легированных азотом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 138 с.
16. *Материаловедение: учебник для вузов* / под ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 648 с.