

Научная статья

УДК 669.14:669.15-194.55

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Г.С. Севальнев¹, Д.Ю. Нефедкин¹, К.В. Дульнев¹, М.А. Скорицова¹

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

Аннотация. Проведены металлографические и дюрOMETрические исследования, а также испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения мартенситостареющей стали 21НКМТ после различных видов термической обработки. Установлено, что наименьшей интенсивностью изнашивания обладают образцы после закалки и однократного старения, при этом наибольшей твердостью 630 HV обладают образцы после двукратного старения. Применение двукратного старения и перестаривания стали 21НКМТ приводит к увеличению интенсивности изнашивания на 12–33 %.

Ключевые слова: мартенситостареющие стали, твердость, износостойкость, размер зерна, старение, коэффициент трения, интерметаллиды

Для цитирования: Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Скорицова М.А. Исследование характеристик мартенситостареющей стали при триботехническом нагружении // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.

Scientific article

STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF MARAGING STEEL UNDER TRIBOTECHNICAL LOADING

G.S. Sevalnev¹, D.Yu. Nefedkin¹, K.V. Dulnev¹, M.A. Skorikova¹

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

Abstract. Metallographic and durometric studies and wear tests under dry sliding friction conditions of maraging steel 21NKMT after various types of heat treatment were carried out. It has been established that the samples after quenching and single aging have the lowest wear rate, while the samples after two-times aging have the highest hardness of 630 HV. The use of two-fold aging and overaging of 21NKMT steel leads to an increase in wear intensity by 12–33%.

Keywords: maraging steels, hardness, wear resistance, grain size, aging, friction coefficient, precipitation particles, intermetallics

For citation: Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Skorikova M.A. Study of the characteristics of maraging steel under tribotechnical loading. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.

Введение

Для эффективной работы тяжело нагруженных элементов подвижных механизмов в условиях экстремальных нагрузок (контактная деформация, совмещенная с температурным воздействием) требуются материалы с высокими механическими и триботехническими характеристиками [1–5]. Для обеспечения конкурентоспособности готового изделия немаловажное значение должна иметь стоимость материала, однако не всегда этот параметр обеспечивается при конечной реализации.

Одними из наиболее подходящих материалов для обеспечения требований к тяжело нагруженным деталям являются сплавы на основе железа, сочетающие высокий комплекс характеристик, а также достаточно низкую стоимость [6–11].

Специализированные агрегаты могут применяться в качестве подвижных механизмов сложнопрофильных или тонкостенных изделий, ввиду чего для снижения коробления при термической обработке, а также для упрощения их изготовления необходимо использовать стареющие сплавы.

Один из показателей, по которому можно оценивать износостойкость материала, – твердость. При этом износостойкость является структурно-зависимой характеристикой и не всегда увеличение твердости приводит к снижению интенсивности изнашивания [12, 13].

Высокую твердость и износостойкость могут обеспечивать стареющие сплавы за счет формирования мелкодисперсных упрочняющих фаз в процессе старения. Стареющими сплавами на основе железа являются стали, относящиеся к мартенситостареющему и аустенитно-ферритному классам [14–18]. Однако для аустенитно-ферритного класса высокие значения твердости достигаются путем формирования в структуре охрупчивающей σ -фазы, которая в большинстве случаев приводит к негативному влиянию на показатель износостойкости. Мартенситостареющие стали системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti лишены данного недостатка, однако обладают высокой стоимостью из-за дорогостоящих легирующих элементов. Благодаря мелкозернистой структуре, которая формируется при горячей обработке давлением и термической обработке, и выделению интерметаллидов $Me_3(Ti, Mo)$, $MeTi$, фаз Лавеса (Fe_2Mo) в структуре стали при старении никель-кобальтового мартенсита замещения твердость может достигать 58 HRC по шкале Роквелла [19–23].

Главными достоинствами мартенситостареющих сталей при высоком уровне прочностных и пластических характеристик являются сквозная прокаливаемость, отсутствие фазовых превращений при деформационном нагружении ввиду отсутствия метастабильной аустенитной структуры, а также возможность реализации эливарных свойств после полного цикла термической обработки.

В связи с вышеперечисленными достоинствами мартенситостареющих сталей данный класс материалов может использоваться для изготовления специальных пар трибосопряжения. Цель данной работы – исследование триботехнических характеристик мартенсито-стареющей стали 21HKMT в зависимости от вида термической обработки для оценки возможности применения данного класса материалов в парах трения.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из мартенситостареющей стали 21HKMT [24] системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti, вырезанные из горячекатаного полуфабриката, полученного методом радиально-сдвиговой прокатки. Образцы представляли собой диски $\varnothing 30 \times 7$ мм. Исследования проводили на образцах после горячей пластической деформации, закалки с температуры $A_{c3} + 100$ °C и закалки, совмещенной со старением. Старение образцов проводили по типовым режимам для мартенситостареющих сталей в интервале температур 450–550 °C по следующим режимам:

- однократное старение для достижения высокой твердости;
- двукратное старение с достариванием на второй ступени;

– перестаривание с целью незначительного снижения твердости и оценки структурной зависимости триботехнических характеристик.

Металлографический анализ структур стали 21НКМТ после упрочняющей термической обработки проводили на оптическом инвертированном микроскопе при увеличении $\times 1000$. Твердость HV_1 определяли по методу Виккерса с помощью твердомера при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75. Твердость HRC определяли по методу Роквелла с помощью твердомера при нагрузке 150 кг (1500 Н) в соответствии с ГОСТ 9013–59.

Исследования триботехнических характеристик проводили в условиях сухого трения скольжения по схеме «шарик–диск» при линейной скорости перемещения образца относительно контртела $\sim 0,18$ м/с и нагрузке 10 Н с использованием трибометра. Контртелом являлся шарик диаметром 6 мм из хромистой стали ШХ15-ШД (аналог – сталь AISI 52100) твердостью 64 HRC. Для определения среднего значения и амплитуды колебаний коэффициента трения использовали график кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения при фрикционном взаимодействии образца и контртела. Интенсивность изнашивания W ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) рассчитывали по формуле [13]

$$W = \frac{ls}{PL},$$

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

Износ объема поверхности контртела $\Delta V_{\text{шар}}$ рассчитывали по формуле

$$\Delta V_{\text{шар}} = \pi \cdot h^2 \left(r - \frac{1}{3} h \right),$$

где $h = r - \left(r^2 - \left[\frac{d}{2} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, d – диаметр пятна износа, мм; r – радиус шарика, мм; h – толщина изношенного сегмента, мм.

Интенсивность изнашивания контртела $W_{\text{контр}}$ рассчитывали по формуле, аналогичной формуле для образца:

$$W_{\text{контр}} = \frac{\Delta V_{\text{шар}}}{PL}.$$

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

Результаты и обсуждение

Все исследуемые образцы изготовлены из прутка после радиально-сдвиговой прокатки в горячем состоянии с температуры аустенизации. Структура прутка после радиально-сдвиговой прокатки состоит из мелкозернистой структуры (рис. 1, а). Средний размер зерна при такой структуре составляет ~ 34 мкм.

Применение последующей закалки привело к укрупнению зеренной структуры и увеличению среднего размера зерна до 72 мкм (рис. 1, б). ДюрOMETрический анализ образцов показал, что увеличение зеренной структуры после закалки также способствовало снижению твердости на 12 % – с 344 ± 6 до 308 ± 8 HV.

Такое резкое укрупнение зерна может быть связано с рядом факторов:

- во время термической обработки в результате длительной выдержки при температуре закалки частично произошла собирательная рекристаллизация;
- вырезка образца произведена из сегмента прутка с изначально крупным зерном с последующим его ростом при термической обработке.

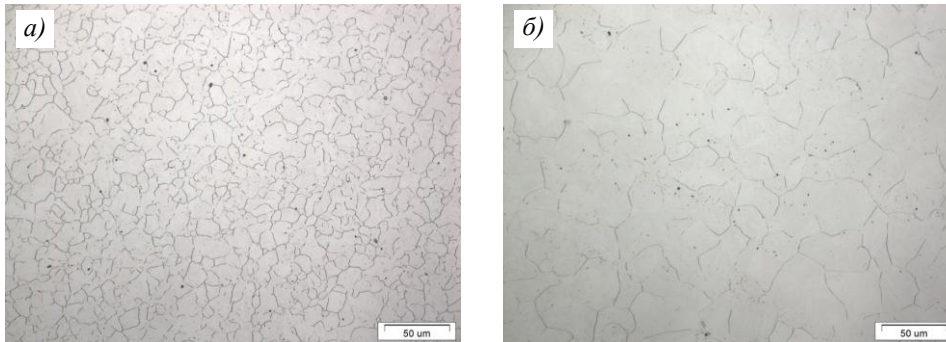


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из мартенситостаряющей стали 21HKMT после радиально-сдвиговой прокатки (а) и последующей закалки (б)

Обеспечение высокой твердости у мартенситостаряющих сталей реализуется за счет старения, в связи с чем проведены термическая обработка с классическим старением для сталей системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti, достаривание путем двукратного старения для получения более высоких значений твердости и перестаривание для оценки влияния снижения твердости на интенсивность изнашивания. Результаты исследования структуры с применением оптической микроскопии представлены на рис. 2. Сформированная мелкозернистая мартенситная структура также подтверждает, что образец после закалки вырезан с изначально крупной структурой. Однако в рамках данных исследований это не оказывает существенного влияния на определяемые характеристики.



Рис. 2. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из мартенситостаряющей стали 21HKMT после однократного старения (а), двукратного старения (б) и перестаривания (в)

Анализ изменения твердости образцов после радиально-сдвиговой прокатки, закалки и в зависимости от режима старения показал, что максимальная твердость 630 ± 10 HV формируется при двукратном старении (рис. 3). Применение для данной стали классической обработки с однократным старением для достижения высокого комплекса механических характеристик обеспечило формирование твердости на 5 % меньше по сравнению с двукратным старением (595 ± 4 HV), а перестаривание сопровождается коагуляцией упрочняющих фаз и реализацией ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения, что приводит к снижению твердости на 10 % по сравнению с однократным старением и на 15 % по сравнению с двукратным старением (545 ± 6 HV).

Для оценки износостойкости образцов из мартенситостаряющей стали 21HKMT проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения. Анализ кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения при испытании позволил установить, что однофазная структура как в случае радиально-сдвиговой прокатки (1), так и в случае закалки (2) формирует достаточно стабильный коэффициент трения пары трибосопряжения (рис. 4, а). Применение старения для выделения интерметаллидов также реализует достаточно стабильный коэффициент трения, однако

процесс перестаривания приводит к его дестабилизации (рис. 4, б). Предположительно это связано с протеканием ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения, коагуляцией упрочняющих фаз и разупрочнением. Анализ среднего значения коэффициента трения, а также амплитуды колебания коэффициента трения также показывает, что при всех режимах, кроме перестаривания, все значения приблизительно равны, а перестаривание приводит к увеличению среднего коэффициента трения на 10 % и амплитуды колебаний – на 70 % (рис. 5).

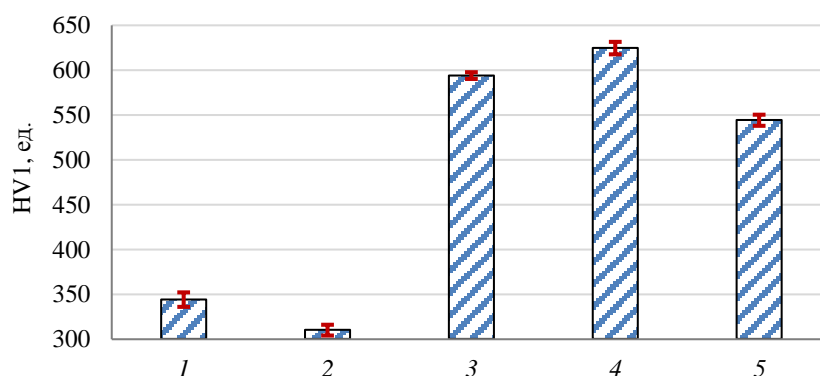


Рис. 3. Твердость образцов из мартенситостареющей стали 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

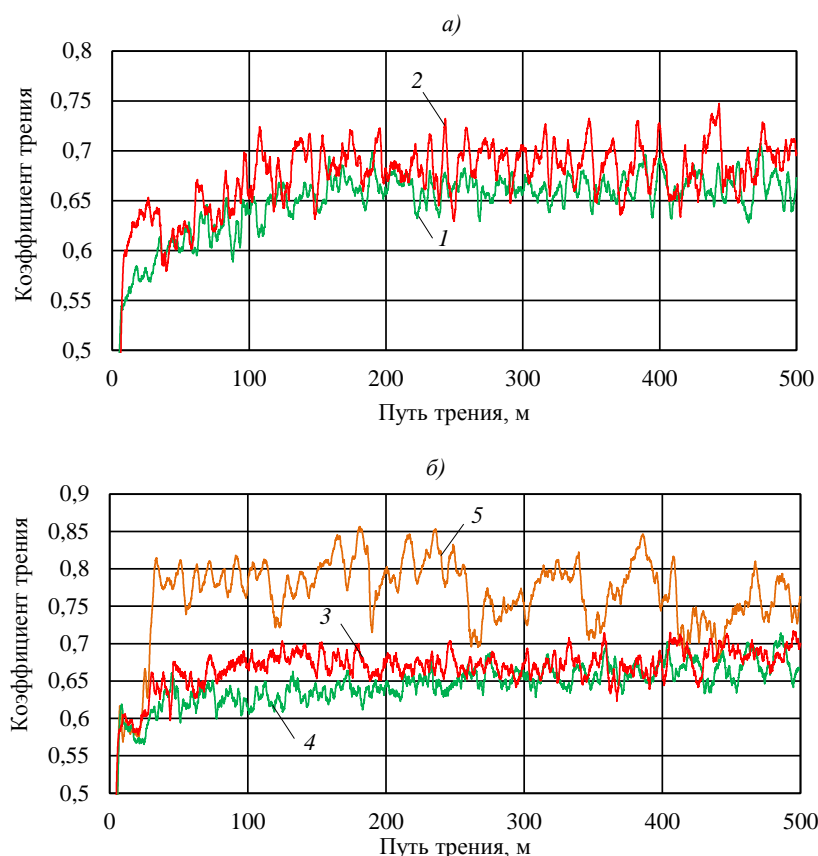


Рис. 4. Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

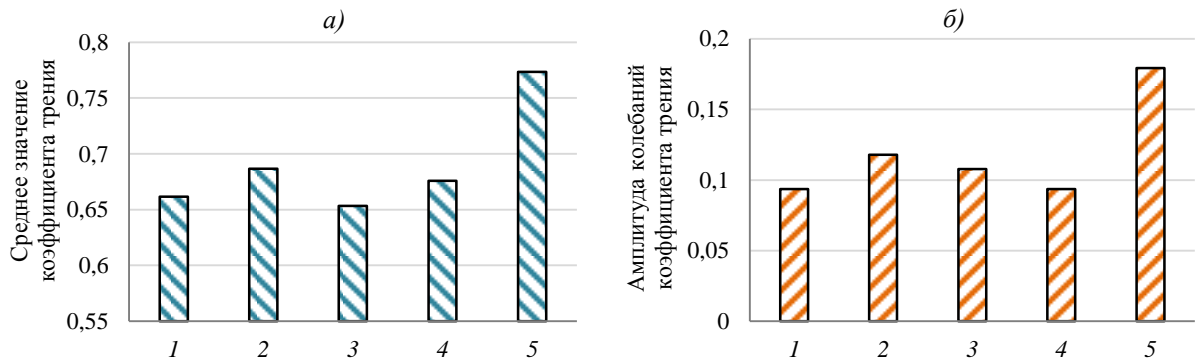


Рис. 5. Среднее значение коэффициента сухого трения скольжения (а) и амплитуды колебания коэффициента трения (б) контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКТМ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

Анализ интенсивности изнашивания в условиях сухого трения скольжения образцов и контртела после испытаний позволил установить, что наименьшим показателем обладает образец, претерпевший однократное старение (рис. 6) Радиально-сдвиговая прокатка обладает интенсивностью изнашивания на 20 % меньше ($1,41 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), чем образцы после закалки ($1,72 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), что, по-видимому, связано с меньшим размером зерна и увеличенной плотностью дефектов по сравнению с закаленным образцом. Старение после закалки привело к снижению интенсивности изнашивания на 85 % ($9,2 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), двукратное старение – на 39 % ($1,24 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), перестаривание – на 65 % ($1,04 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). Относительно однократного старения интенсивность изнашивания после двукратного старения и перестаривания увеличивает интенсивность изнашивания на 12–33 %. Несмотря на то что при двукратном старении достигается наибольшее повышение твердости, уменьшение интенсивности изнашивания среди упрочняющих обработок является наименьшим. По-видимому, это связано с чрезмерным упрочнением интерметаллидными фазами мартенситной матрицы, в результате чего происходит процесс микровыкрашивания поверхности, что также указывает на более высокую интенсивность изнашивания контртела по сравнению с другими процессами упрочнения.

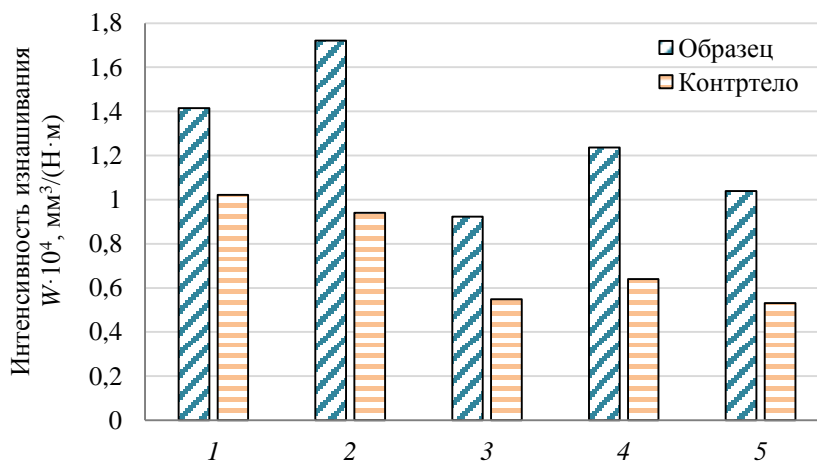


Рис. 6. Интенсивность изнашивания контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКТМ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

При проведении сравнительного анализа интенсивности изнашивания относительно других марок сталей [13] – например, мартенситного и аустенитно-мартенситного классов – мартенситостареющая сталь марки 21НКМТ после закалки и однократного старения обладает меньшей интенсивностью изнашивания в 1,9–2,3 раза по сравнению со сталями ВНС30-Ш и ВНС72-Ш с твердостью 520–540 НV. В данном случае обеспечение меньшей интенсивности изнашивания реализуется за счет значительного растворения легирующих элементов в матрице и дальнейшего выделения мелкодисперсных упрочняющих интерметаллидных фаз, которые могут вносить значительный вклад в сопротивление контактно-деформационным нагрузкам. В случае сталей ВНС30-Ш и ВНС72-Ш упрочнение происходит за счет образования пересыщенного элементами внедрения и легирующими элементами мартенсита закалки, который является более напряженным и может претерпевать более интенсивное изнашивание при фрикционном взаимодействии.

В работах [13, 25–27] показано, что износостойкость как для сталей различных классов, так и для механизмов упрочнения является структурно-зависимой характеристикой и не полностью зависит от формируемой твердости образцов. Если рассматривать возможность применения мартенситостареющих сталей в тяжело нагруженных парах трения, то формируемая интенсивность изнашивания ниже, чем у сталей аустенитного класса, но выше, чем у сталей перлитного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов. Из-за высокой стоимости материала нецелесообразно использовать его в трибосопряжении для простых изделий, однако в случае изготовления крупногабаритной детали, в которой необходимо обеспечить высокий уровень прочностных и триботехнических характеристик пары трения с учетом высокой технологичности материала при изготовлении изделия, мартенситостареющие стали становятся незаменимым материалом.

Заключения

Разработка современных тяжело нагруженных агрегатов с целью улучшения технических характеристик конечных изделий сопровождается необходимостью использования более высокопрочных и технологичных материалов.

Для деталей и сложнопрофильных пар трибосопряжения, работающих в экстремальных условиях интенсивного изнашивания, требуется применение технологичных материалов с высокой износостойкостью. Высоким уровнем прочностных и пластических характеристик, сквозной прокаливаемостью, а также высокой технологичностью при изготовлении конечного изделия обладают мартенситостареющие стали, основным недостатком которых является высокая стоимость в связи с содержанием дорогостоящих легирующих элементов, таких как никель, кобальт и титан. После полного цикла термической обработки мартенситостареющие стали обладают достаточно высокой твердостью – не менее 52 HRC (>550 НV).

Для оценки возможности применения мартенситостареющих сталей в составе пары трибосопряжения исследованы образцы после горячей деформации и термической обработки. С помощью металлографического анализа образцов установлено, что закалка после горячей радиально-сдвиговой прокатки приводит к увеличению среднего размера зерна с 34 до 72 мкм. Структура при последующем старении включает мартенсит замещения и интерметаллидные упрочняющие фазы. Максимальной твердостью 630±10 НV обладают образцы после двукратного старения, однократное старение формирует твердость 595±4 НV, перестаривание: 545±6 НV.

Для оценки износостойкости образцов из мартенситостареющей стали 21НКМТ проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения. По результатам испытаний установлено, что, несмотря на высокий показатель твердости, образцы после двукратного старения обладают интенсивностью изнашивания на 39 % меньше по сравнению с закаленными образцами с твердостью 308±8 НV. Наименьшая интенсивность

изнашивания у образцов после однократного старения: $9,2 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Перестаривание мартенситной структуры приводит к снижению твердости на 15 %, в результате чего увеличивается интенсивность изнашивания образцов из мартенситостареющей стали 21НКТМТ.

Сравнительный анализ интенсивности изнашивания с коррозионностойкими сталями марок ВНС30-Ш и ВНС72-Ш показал, что формирование мартенситной структуры, упрочненной интерметаллидными фазами, обеспечивает интенсивность изнашивания в 1,9–2,3 раза меньше по сравнению с более напряженным мартенситом, пересыщенным легирующими элементами внедрения.

Список источников

1. Коробова Е.Н., Севальнев Г.С., Громов В.И., Леонов А.В. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
2. Gloeckner P., Rodway C. The evolution of reliability and efficiency of aerospace bearing systems // Engineering. 2017. Vol. 9. No. 11. P. 962–991.
3. Krishna S.C., Tharian K.T., Chakravarthi K.V. A. et al. Heat treatment and thermo-mechanical treatment to modify carbide banding in AISI 440C steel: a case study // Metallography, Microstructure, and Analysis. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 108–115.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
5. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
6. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В., Крылов С.А., Тонышева О.А. Разработка и исследование высокопрочной коррозионностойкой стали для деталей подшипников // Metallurg. 2019. № 11. С. 39–44.
7. 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.
8. Банных И.О., Ашмарин А.А., Бецофен С.Я. и др. Оптимизация химического состава и параметров термомеханической обработки трип сталей на основе новых методов рентгеновской тензометрии, текстурного и фазового анализов // Металлы. 2022. № 6. С. 66–72.
9. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Effect of the Quenching Temperature on the Structure and Mechanical Properties of Martensitic–Ferritic Corrosion-Resistant Nitrogen-Bearing 08Kh17N2AF Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2023. No. 6. P. 629–637.
10. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content // Russian Metallurgy (Metally). 2023. No. 6. P. 649–656.
11. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. No. 11. P. 1598–1605.
12. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 240 с.
13. 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: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
14. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали в авиационной промышленности // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 24–28.
15. Стивен У. Мартенситостареющие стали // Высокопрочные стали: сб. статей. М: Металлургия, 1969. С. 235–257.
16. Еднерал А.Ф., Кардонский В.М., Перкас М.Д. Структурные изменения при старении безуглеродистого железоникелевого мартенсита // Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения: сб. статей. М.: Наука, 1972. С. 63–79.

17. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситностареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 223с.
18. 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> (дата обращения: 05.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-14.
19. Горохов А.Ю. Влияние структуры стали ВКС-210 на дефект модуля упругости при усталостном воздействии // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 3-1. С. 52–54.
20. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости // Металловедение и термическая обработка металлов. 1991. № 8. С. 40–41.
21. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // Труды ВИАМ. 2013. № 7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.02.2024).
22. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
23. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. М.: Металлургия, 1973. 208 с.
24. Ошурина Л.А. Анализ применения датчиков параметров на основе эливарного сплава 21НКМТ // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 169–171.
25. García-León R.A., Martínez-Trinidad J., Campos-Silva I. et al. Wear maps of borided AISI 316L steel under ball-on-flat dry sliding conditions // Materials Letters. 2021. Vol. 282. P. 128842.
26. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Effect of Preliminary Treatment on Tribotechnical Characteristics of Nitrided Structural Steels // Metal Science and Heat Treatment. 2023. Vol. 65. No. 1-2. P. 34–41.
27. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Journal of Friction and Wear. 2023. Vol. 44. No. 6. P. 333–345.

References

1. Korobova E.N., Sevalnev G.S., Gromov V.I., Leonov A.V. Steels for the manufacture of roller bearings for special purposes (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
2. Gloeckner P., Rodway C. The evolution of reliability and efficiency of aerospace bearing systems. *Engineering*, 2017, vol. 9, no. 11, pp. 962–991.
3. Krishna S.C., Tharian K.T., Chakravarthi K.V.A. et al. Heat treatment and thermo-mechanical treatment to modify carbide banding in AISI 440C steel: a case study. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 108–115.
4. Geller Yu.A. *Tool steels*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 525 p.
5. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
6. Bakradze M.M., Voznesenskaya N.M., Leonov A.V., Krylov S.A., Tonysheva O.A. Development and research of high-strength corrosion-resistant steel for bearing parts. *Metallurg*, 2019, no. 11, pp. 39–44.
7. 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.
8. Bannykh I.O., Ashmarin A.A., Betzofen S.Ya. et al. Optimization of chemical composition and parameters of thermomechanical processing of TRIP steels based on new methods of X-ray tensiometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
9. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Effect of the Quenching Temperature on the Structure and Mechanical Properties of Martensitic–Ferritic Corrosion-Resistant Nitrogen-Bearing 08Kh17N2AF Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 6, pp. 629–637.
10. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 6, pp. 649–656.

11. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, no. 11, pp. 1598–1605.
12. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G. *Wear resistance of structural materials*. Moscow: Publ. house of Bauman Moscow State Technical Univ., 2011, 240 p.
13. 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: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
14. Pokrovskaya N.G., Markova E.S., Shalkevich A.B. High-strength structural martensitic aging steels in aircraft construction. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 24–28.
15. Stephen W. Martensitic aging steels. *High-strength steels*. Moscow: Metallurgiya, 1969, pp. 235–257.
16. Edneral A.F., Kardonsky V.M., Perkas M.D. Structural changes during aging of carbon-free iron-nickel martensite. *Imperfections of the crystal structure and martensitic transformations*. Moscow: Nauka, 1972, pp. 63–79.
17. Perkas M.D., Kardonsky V.M. *High-strength maraging steels*. Moscow: Metallurgy, 1970, 223 p.
18. 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> (accessed: January 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-14.
19. Gorokhov A.Yu. Effect of VKS-210 steel structure on the defect of elastic modulus under fatigue impact. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2015, no. 3-1, pp. 52–54.
20. Perkas M.D., Strug M.D., Rusanenko V.V. Elinvar martensitic-aging steels with a high elastic limit. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1991, no. 8, pp. 40–41.
21. Markova E.S., Yakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shalkevich A.B. Technological features of the production of maraging steel VKS-180. *Trudy VIAM*, 2013, no. 7, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 10, 2024).
22. *Structural materials: reference book*. Ed. B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p.
23. Sadovsky V. D. *Structural heredity in steel*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 208 p.
24. Oshurina L.A. Analysis of the application of parameter sensors based on 21NKMT elinvar alloy. *Innovatsii i investitsii*, 2021, no. 3, pp. 169–171.
25. García-León R.A., Martínez-Trinidad J., Campos-Silva I. et al. Wear maps of borided AISI 316L steel under ball-on-flat dry sliding conditions. *Materials Letters*, 2021, vol. 282, p. 128842.
26. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Effect of Preliminary Treatment on Tribotechnical Characteristics of Nitrided Structural Steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, vol. 65, no. 1-2, pp. 34–41.
27. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media. *Journal of Friction and Wear*, 2023, vol. 44, no. 6, pp. 333–345.

Информация об авторах

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

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Скорикова Марина Алексеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Marina A. Skorikova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.07.2024.
The article was submitted 18.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 31.07.2024.