

УДК 620.178.162.4:669.15-194.56

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗНАШИВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ВНС-53

@2023 г. Г.С. Севальнёв^{1*}, М.Э. Дружинина^{1*}, Н.М. Вознесенская^{1*}, Д.Н. Романенко^{1*},
И.И. Самойлова^{2*}, Р.У. Кадыров^{2*}

^{1*}НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва

E-mail: sevalnevgs@gmail.com

^{2*}МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Поступила в редакцию 21 ноября 2022 г.

После доработки 28 апреля 2023 принята к публикации 12 мая 2023 г.

Исследованы триботехнические характеристики высокоазотистой аустенитной стали ВНС-53 в условиях сухого трения скольжения в контакте со сталью ШХ15-ШД. Отмечено, что в тонком приповерхностном слое наклеп происходит без реализации мартенситного превращения, в результате чего твердость увеличивается более чем на 90%. Установлено, что данная сталь обладает меньшим коэффициентом трения и имеет больший прирост твердости в зоне контакта поверхностей по сравнению со сталью 08X18H10T.

Ключевые слова: высокоазотистые стали; аустенитная сталь; наклеп; износостойкость; трение; сталь марки ВНС-53.

В современном машиностроении для изготовления подшипников скольжения в зависимости от назначения используются разные материалы, в том числе коррозионно-стойкие аустенитные стали типа 08X18H10T и 12X18H10T, обеспечивающие возможность работы в условиях коррозионно-агрессивных сред [1—4].

В сталях типа 12X18H10T в результате закалки с температур 1050—1150 °С формируется аустенитная структура, характеризующаяся сочетанием высоких показателей коррозионной стойкости и прочностных свойств на уровне: $\sigma_B = 550—650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 225—315$ МПа, $\delta_5 = 46—74\%$ [5]. Однако в условиях интенсивного изнашивания такие стали, проявляя свои достоинства, показывают и недостатки. Аустенитные стали с метастабильным аустенитом обладают склонностью к деформационному упрочнению, причем данный эффект реализуется не только путем поверхностного наклепа, но и в результате фазового превращения. Исследования, проведенные на коррозионно-стойкой стали AISI 304, показали, что во время испытания на изнашивание вследствие холодной дефор-

мации метастабильная аустенитная фаза частично трансформируется в мартенсит, т.е. реализуется трип-эффект, в результате чего происходит упрочнение поверхностного слоя в зоне контакта. С увеличением нагружения (пластическая деформация) степень превращения аустенита в мартенсит возрастает. С образованием мартенсита деформации повышается твердость поверхности и, как следствие, износостойкость изделия, однако увеличение содержания мартенсита приводит к снижению коррозионной стойкости стали, в частности снижается стойкость к питтинговой коррозии [6—12].

При рассмотрении положительного влияния на уровень физико-механических свойств сталей разных систем легирования интерес представляет введение высоких концентраций азота. Анализ научно-технической литературы показывает, что легирование стали азотом приводит к повышению ее механических свойств, стойкости к коррозии в разных агрессивных средах [13—15]. Такие стали широко используются при изготовлении подшипников качения и скольжения [16]. Легирование коррозионно-стойких ста-

лей аустенитного класса азотом позволяет обеспечить стабильную аустенитную структуру, высокий уровень механических характеристик и стойкость к питтинговой коррозии. Известно о значительном повышении износостойкости сталей ряда структурных классов в результате легирования азотом [17—19]. В частности, в сталях мартенситного класса азот не только повышает устойчивость аустенита, но и способствует твердорастворному упрочнению мартенсита и остаточного аустенита, формированию нитридов и карбонитридов, что увеличивает износостойкость материала.

В составе стали ВНС-53 (08X21Г11АН6) нет таких дорогостоящих элементов, как титан, кобальт и никель, но содержится около 0,5—0,6 мас. % азота, что гарантирует высокую стабильность аустенитной матрицы [13—15]. Формирование такой системы легирования обеспечивает повышение предела прочности до $\sigma_b = 800—900$ МПа и увеличение коррозионной стойкости в коррозионно-агрессивных средах по сравнению с серийно используемыми аустенитными сталями типа 08X18Н10Т и 12X18Н10Т.

Поскольку азот как легирующий элемент сталей разных классов позволяет обеспечить достаточно низкий стабильный коэффициент трения и более высокую износостойкость, поставленная в данной работе задача исследования фрикционного взаимодействия высокоазотистой аустенитной стали ВНС-53 в условиях сухого трения скольжения является актуальной.

Материалы и методика эксперимента. Объектами исследования в данной работе служили образцы высокоазотистой (0,5—0,6 мас. % N) коррозионно-стойкой стали ВНС-53 (08X21Г11АН6), полученные из прутков диаметром 20 мм, подвергнутых радиально-сдвиговой деформации на стане поперечно-винтовой прокатки. В качестве образца сравнения для исследования были использованы прутки из коррозионно-стойкой аустенитной стали 08X18Н10Т, которые находились в состоянии поставки (после закалки).

Перед исследованиями образцы подвергали закалке с температуры 1100 °С, что является классической обработкой для аустенитных сталей подобной системы легирования [5, 6]. Исследования микроструктуры после термической обработки проводили с использованием металлографического опти-

ческого микроскопа Olympus GX51. Для выявления микроструктуры шлифы травили электролитически с использованием раствора щавелевой кислоты.

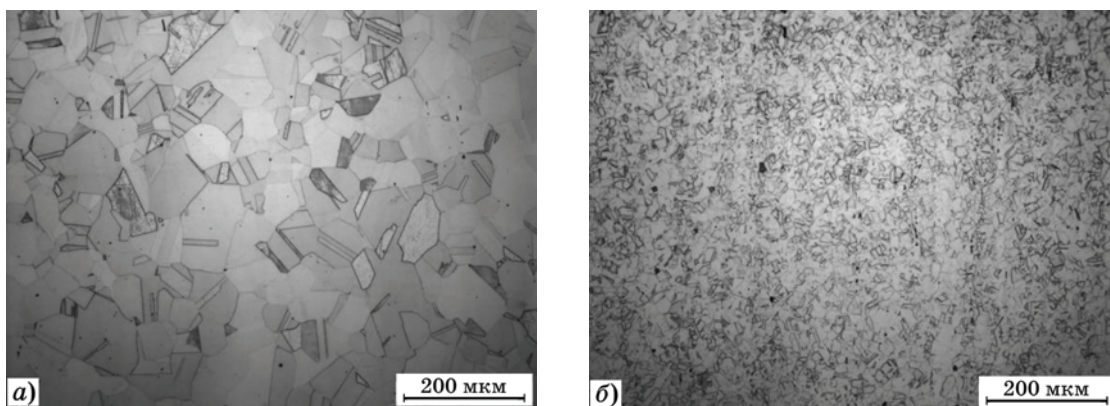
Испытания на изнашивание проводили на трибометре Nanovea T-50 в условиях сухого трения скольжения по схеме стержень—диск. Шарик из подшипниковой стали ШХ15-ШД диаметром 6 мм и твердостью 940 HV был использован в качестве контртела. Нагрузка на шарик составляла 10 Н, линейная скорость скольжения образца относительно контртела была равна 0,16 м/с, путь трения $l = 1000$ м. Измерение твердости образцов до и после испытания на изнашивание проводили на твердомере Durascan-20 при нагрузке 2 Н (200 гс).

Рентгеновскую съемку для определения фазового состава выполняли на дифрактометре Empyrean с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в CuK_α -излучении. Дифрактограммы расшифровывали с применением встроенного программного обеспечения. Съемку проводили в интервале углов 40—55°, в котором возникает наибольшая интенсивность по пикам α - и γ -фаз.

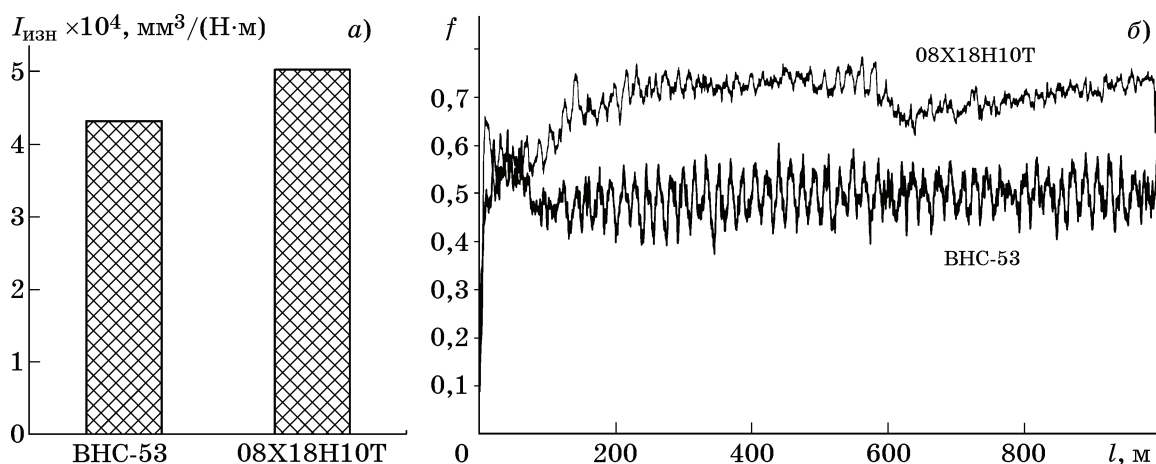
Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Анализ микроструктуры (фиг. 1, а) показал, что в результате закалки стали ВНС-53 (08X21Г11АН6) формируется аустенитная структура с уровнем твердости 295 $HV_{0,2}$. Сталь 08X18Н10Т обладает аналогичными характеристиками, однако имеет более мелкодисперсную структуру аустенита (фиг. 1, б). Средняя площадь зерна в образцах стали ВНС-53 после термической обработки составляет 176 мкм^2 , а в образцах стали 08X18Н10Т — 1,15 мкм^2 .

По результатам испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения в паре трения со сталью ШХ15-ШД интенсивность изнашивания стали ВНС-53 на 15% меньше по сравнению со сталью 08X18Н10Т (фиг. 2, а). Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения позволила установить, что у азотистой стали ВНС-53 среднее значение коэффициента трения $f = 0,5$ с достаточно стабильной амплитудой колебаний, в то время как у стали



Фиг. 1. Микроструктуры сталей ВНС-53 (а) и 08X18H10T (б) после термической обработки



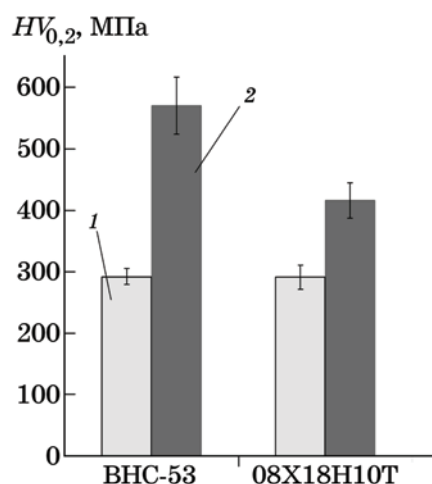
Фиг. 2. Интенсивность $I_{изн}$ изнашивания (а) и кинетика изменения коэффициента f сухого трения скольжения (б) образцов сталей ВНС-53 и 08X18H10T (l — путь трения)

08X18H10T среднее значение коэффициента трения $f = 0,7$ (фиг. 2, б). Анализ диаграммы на фиг. 2, б также показал, что приработка пары трения ВНС-53/ШХ15-ШД наступила через 100 м пути трения l , в то время как для пары трения 08X18H10T/ШХ15-ШД этот показатель в 6 раз выше (приработка через 600 м пути трения).

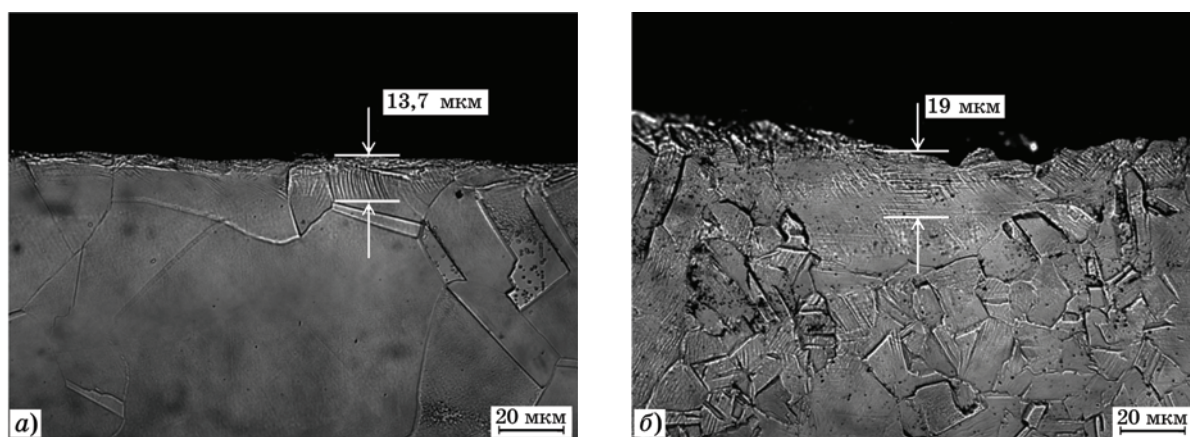
Известно [8], что стали с метастабильным аустенитом в процессе контактного взаимодействия склонны к проявлению трип-эффекта, в результате чего в области, соответствующей дорожке скольжения, образуется мартенсит с более высокими значениями твердости, чем в основном металле. Исследования показали, что система легирования стали ВНС-53 обеспечивает высокую стабильность аустенитной структуры, в том числе и в процессе высоких контактных нагрузок.

Результаты измерений твердости в области дорожек скольжения на образцах после испытаний показали, что для стали ВНС-53 твердость увеличилась на 96%, в то время как для стали 08X18H10T — на 43%

(фиг. 3). По результатам металлографического анализа металла в зоне контакта в обеих сталях в этой зоне формируется поверхностный слой, отличающийся по структуре от сердцевины (фиг. 4). Однако в образцах



Фиг. 3. Микротвердость в области сердцевины (1) и дорожки скольжения (2) после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения образцов сталей ВНС-53 и 08X18H10T



Фиг. 4. Микроструктуры в зоне контакта образцов сталей ВНС-53 (а) и 08X18N10T (б) после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения в парах трения с контртелом из стали ШХ15-ШД

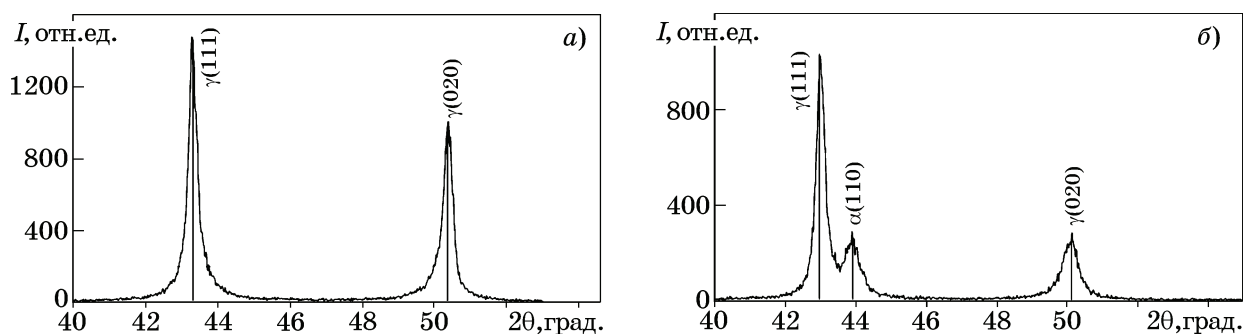
азотистой аустенитной стали слой имел толщину 13,7 мкм (фиг. 4, а), а в образцах аустенитной стали 08X18N10T — 19 мкм. Кроме того, на дорожке скольжения на образцах стали 08X18N10T наблюдается выкрашивание, в то время как на образцах стали ВНС-53 данный эффект отсутствует. Образование слоя большей толщины на образцах стали 08X18N10T объясняется низким содержанием элементов внедрения в ее составе и, как результат, снижением сопротивления холодной пластической деформации.

Для точного определения природы сформированного слоя проведен рентгеноструктурный микроанализ металла в области дорожек скольжения. По полученным дифрактограммам установлено, что сталь ВНС-53 за счет системы легирования и достаточно высокой стабильности аустенитной структуры не склонна к протеканию мартенситного превращения (фиг. 5, а), а высокая степень упрочнения поверхности в результате контактного взаимодействия — результат интенсивной пластической деформации поверхностных слоев и суммарного содержания элемен-

тов внедрения углерода и азота (~0,6 мас.%) в химическом составе стали.

Модифицированный слой, сформированный на стали 08X18N10T, включает пик мартенситной фазы $\alpha(110)$, что подтверждает протекание мартенситного превращения при контактном взаимодействии (фиг. 5, б).

Результаты проведенных исследований подтверждаются данными работ [21, 22], в которых рассматриваются испытания на изнашивание азотсодержащих сталей аустенитного класса 04X20N6Г11М2А0.4БФ-Ш и 03X20N14Г6М2А0.3БФ по режимам адгезионного и абразивного изнашивания. При фрикционном взаимодействии в условиях сухого трения скольжения реализуется преимущественно ротационный механизм пластической деформации, который характеризуется значительными (на десятки градусов) относительными разворотами структурных элементов, сформированных в материале в процессе скольжения и двойникования [21]. Реализация такого механизма при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения обеспечивает более высокую



Фиг. 5. Дифрактограммы в области дорожки скольжения на образцах сталей ВНС-53 (а) и 08X18N10T (б) после испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения

износостойкость за счет поверхностно-пластического деформирования, повышения плотности дислокаций до уровня $(2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и повышения твердости в зоне трибоконтакта до 600—750 *HV* (более чем в 2—3 раза по сравнению с закаленным состоянием). Также важную роль в формировании уровня износостойкости играет содержание азота в твердом растворе, обеспечивающего интенсивное упрочнение поверхности в процессе пластической деформации.

Стоит также отметить работу [23], в которой исследуется износостойкость в условиях абразивного изнашивания азотистых сталей мартенситного (0X18A4 и 0X18A7) и аустенитного (0X18A12, 0X21A13 и 0X24A12) классов. Показано, что по сравнению со сталью 110Г13, претерпевающей трип-эффект в процессе фрикционного взаимодействия, мартенситно-аустенитная 0X18A7 и аустенитная 0X24A12 стали после термической обработки обладают более высокой износостойкостью при абразивном изнашивании (в 1,6—1,7 раз). Повышение износостойкости в данном случае обеспечивается высокой концентрацией элемента внедрения — азота, а также механизмами дисперсионного твердения и дестабилизации аустенита, приводящими к развитию превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ в процессе испытания. Для сталей аустенитного класса 0X18A12, 0X21A13, 0X24A12 особенности изменения износостойкости тесно связаны как с исходным уровнем твердости перед испытанием, определяемым той или иной стадией распада аустенита в процессе старения, так и с вероятностью того, что в данном структурном состоянии возможно фрикционное упрочнение за счет действия абразивных частиц на рабочую поверхность [23].

Выводы. 1. По результатам исследований микроструктуры после закалки установлено, что в образцах стали ВНС-53 (08X21Г11АН6) формируется полностью аустенитная структура со значением твердости 295 *HV*_{0,2}. Результаты испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения позволили выявить, что высокоазотистая сталь ВНС-53 обладает меньшими значениями среднего коэффициента трения и интенсивности изнашивания, а также ускоренной приработкой в отличие от стали 08X18Н10Т.

2. В зоне контактного взаимодействия пары трения ВНС-53/ШХ15-ШД происходит

прирост твердости стали ВНС-53 более чем на 90%. При этом мартенсит в поверхностном слое не образуется. Указанный прирост обусловлен интенсивным деформационным упрочнением поверхностных слоев твердорастворным упрочнением стали ВНС-53 элементами внедрения — углеродом и азотом ($\% \text{C} + \% \text{N} \approx 0,6$).

3. Результаты фазового состава, полученные с применением метода рентгенофазового микроанализа, позволили установить, что в процессе контактного взаимодействия при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения стабильная аустенитная структура стали ВНС-53 не претерпевает мартенситного превращения, в отличие от стали 08X18Н10Т, испытанной при тех же условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов, Е.Н. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионно-стойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) / Е.Н. Каблов, М.М. Бакрадзе, В.И. Громов, Н.М. Вознесенская, Н.А. Якушева // *Авиац. матер. и технол.* 2020. №1. С.3—11. DOI : 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Якушева, Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники / Н.А. Якушева // *Авиац. матер. и технол.* 2020. №2. С.3—9. DOI : 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
3. Конструкционные материалы : справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. — М. : Машиностроение, 1990. 688 с.
4. Материалы в машиностроении. Выбор и применение : справочник : в 5 т. / под ред. И.В. Кудрявцева. — М. : Машиностроение, 1967. Т.2. 496 с. ; Т.3. 446 с.
5. Сталь марки 12X18Н10Т // Центральный металлургический портал: [сайт]. URL: https://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T (дата обращения: 07.07.2022).
6. Химушин, Ф.Ф. Нержавеющие стали / Ф.Ф. Химушин. — М. : Металлургия, 1967. 800 с.
7. Sevalnev, G.S. Improvement of austenitic steel tribological properties by deformational cutting / G.S. Sevalnev, D.V. Tsukanov, N.N. Zubkov [et al.] // *Metallurgist*. 2021. V.65. №1—2. P.169—176.
8. Севальнёв, Г.С. Исследование триботехнических характеристик коррозионно-стойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения / Г.С. Севальнёв, Т.Г. Севальнёва, А.Г. Колмаков [и др.] // *Тр. ВИАМ [электрон. науч.-технич. журн.]* 2021. №10. Ст.1. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.11.2022). DOI : 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
9. Zandrahimi, M. The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel / M. Zandrahimi, M.R. Bateni, A. Poladi, J.A. Szpunar // *Wear*. 2007. №263. P.674—678.
10. Li, Z.X. Deformation-induced martensite in 304

- stainless steel during cavitation erosion : Effect on passive film stability and the interaction between cavitation erosion and corrosion / Li Z.X., Zhang L.M., Udoh I.I. [et al.] // *Tribology Intern.* 2022. V.167. Art.107422.
11. *Ozgowicz, W.* Effect of deformation-induced martensite on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of X5CrNi18-8 stainless steel / W. Ozgowicz, A. Kurc, M. Keiuk // *Arch. Mater. Sci. Eng.* 2010. №43/1. P.42—53.
 12. *Парменова, О.Н.* Влияние холодной деформации на коррозионную стойкость аустенитных сталей в морской воде / О.Н. Парменова // *Уральская школа молодых металлургов : сб. матер. и докл. XIX Междунар. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов — молодых ученых.* — Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та. 2018. С.332—333.
 13. *Кушнерева, Д.С.* Исследование свойств новых высокопрочных нержавеющей сталей / Д.С. Кушнерева, Г.В. Сапожников // *Хим. физика и мезоскопия.* 2019. Т.21. №1. С.39—44.
 14. *Рашев, Ц.В.* Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением / Ц.В. Рашев. — София : Изд-во «Проф. Марин Дринов», 1995. 272 с.
 15. *Lee, T.H.* Deformation twinning in high-nitrogen austenitic stainless steel / Lee T.H., Oh C.S., Kim S.J., Takaki S. // *Acta Materialia.* 2007. V.55. №11. P.3649—3662.
 16. *Qiao, Y.* Effect of solution treatment on cavitation erosion behavior of high-nitrogen austenitic stainless steel / Qiao Y., Chen J., Zhou H. [et al.] // *Wear.* 2019. V.424. P.70—77.
 17. *Qiao, Y.X.* Friction and wear behaviors of a high nitrogen austenitic stainless steel Fe-19Cr-15Mn-0,66 N / Qiao Y.X., Sheng S.L., Zhang L.M. [et al.] // *J. Mining Metallurgy. Section B : Metallurgy.* 2021. V.57. №2. P.285—293.
 18. *Blinov, V.M.* Tensile fracture of austenitic corrosion-resistant steels with an overequilibrium nitrogen content and various vanadium contents / V.M. Blinov, E.I. Lukin, E.V. Blinov [et al.] // *Russian Metallurgy (Metally).* 2021. Is.10. P.1265—1269. DOI : 10.1134/S0036029521100062
 19. *Свяжин, А.Г.* Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства / А.Г. Свяжин, Л.М. Капуткина // *Изв. вузов. Чер. металлургия.* 2019. №62(3). С.173—187. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-3-173-187>.
 20. *Коробова, Е.Н.* Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) / Е.Н. Коробова, Г.С. Севальнев, В.И. Громов, А.В. Леонов // *Тр. ВИАМ (электрон. науч.-технич. журн.).* 2021. №11. Ст.1. URL : <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
 21. *Коршунов, Л.Г.* Структура и трибологические свойства азотсодержащих нержавеющей аустенитных сталей / Л.Г. Коршунов, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Черненко [и др.] // *Вопр. материаловедения.* 2012. №3. С.136—145.
 22. *Korshunov, L.G.* Effect of alloying and heat treatment on the structure and tribological properties of nitrogen-bearing stainless austenitic steels under abrasive and adhesive wear / L.G. Korshunov, Y.N. Goikhenberg, N.K. Chernenko // *Metal Sci. Heat Treat.* 2007. V.49. №5. P.217—226.
 23. *Банных, О.А.* О взаимосвязи износостойкости с фазовым составом и механическими свойствами новых высокоазотистых железохромистых сплавов / О.А. Банных, В.М. Блинов, М.В. Костина [и др.] // *Металлы.* 2000. №2. С.57.