

Влияние наноструктурирующей фрикционной обработки на микромеханические и коррозионные свойства стабильной аустенитной хромоникелевой стали

© 2021

*Скорынина Полина Андреевна**^{1,5}, младший научный сотрудник
Макаров Алексей Викторович^{1,2,6}, доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения,
заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств
Березовская Вера Владимировна^{3,7}, доктор технических наук, профессор
Меркушкин Евгений Анатольевич^{3,8}, кандидат технических наук, доцент
Чекан Николай Михайлович^{4,9}, кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов

¹Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)

⁴Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск (Беларусь)

*E-mail: polina.skorynina@mail.ru

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8904-7600>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-3375>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-8818>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3339-9922>

Аннотация: Фрикционная обработка является эффективным методом повышения прочности и износостойкости аустенитных хромоникелевых сталей. Ранее авторами было установлено, что высокий уровень механических свойств метастабильных аустенитных сталей достигается при интенсивном развитии деформационного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения. Однако наличие мартенсита деформации в структуре аустенитной стали может отрицательно влиять на ее антикоррозионные свойства. Актуальным направлением исследований является поиск возможностей повысить прочностные характеристики стабильной аустенитной хромоникелевой стали с сохранением высокой стойкости к коррозионному разрушению. В настоящей работе для оценки механических характеристик стали 03X16N14M3T в закаленном состоянии и после фрикционной обработки применяли метод измерения твердости по восстановленному отпечатку и метод инструментального микроиндентирования, позволяющий записывать диаграммы нагружения и разгрузки индентора. Стойкость стали к коррозионному разрушению исследовали при испытаниях на общую коррозию. Проводили сравнение скорости коррозии аустенитной стали после шлифования, электрополирования и фрикционной обработки. С применением растровой электронной микроскопии и оптической профилометрии изучали поверхности стали, подвергнутые указанным обработкам, и определяли их шероховатость. Наноструктурирующая фрикционная обработка обеспечивает упрочнение поверхности стабильной аустенитной стали до 570 HV 0,025. Показана высокая эффективность применения фрикционной обработки для повышения характеристик прочности и сопротивления поверхностного слоя стали упругому и пластическому деформированию. Установлено, что аустенитная сталь характеризуется близкими величинами скорости коррозии $k_m = (3,26 - 3,27) \cdot 10^5$ г/(см²·ч) после электролитического полирования (структура крупнокристаллического аустенита) и после фрикционной обработки (субмикро/нанокристаллическая структура аустенита), в то время как механическое шлифование приводит к двукратному росту скорости коррозии стали 03X16N14M3T вследствие возникновения на шлифованной поверхности микротрещин и вырывов металла. Обоснована определяющая роль качества формируемой различными обработками поверхности (шероховатость, наличие дефектов сплошности) в обеспечении коррозионной стойкости нержавеющей стали.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь 03X16N14M3T; фрикционная обработка; микроиндентирование; шероховатость; коррозионная стойкость.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790148-1 и ИФМ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020190116-6 при поддержке гранта РФФИ и БРФФИ (проект № 20-58-00057).

Исследования фазового анализа и микромеханических характеристик проведены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Авторы выражают глубокую благодарность за участие в работе к.т.н. А.Л. Осинцевой.

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Скорынина П.А., Макаров А.В., Березовская В.В., Меркушкин Е.А., Чекан Н.М. Влияние наноструктурирующей фрикционной обработки на микромеханические и коррозионные свойства стабильной аустенитной хромоникелевой стали // *Frontier Materials & Technologies*. 2021. № 4. С. 80–88. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-80-88.

ВВЕДЕНИЕ

Хромоникелевые аустенитные стали являются востребованными конструкционными материалами в химической, нефтегазодобывающей и медицинской отраслях промышленности, а также в тепловой и атомной энергетике, поскольку к их основным преимуществам относятся высокая технологичность и стойкость к коррозионному износу, в том числе и при воздействии различных агрессивных сред [1; 2]. В то же время для аустенитных сталей характерны низкие характеристики прочности и износостойкости, которые не улучшаются при термической обработке [3; 4].

Устранение основных недостатков аустенитных сталей при одновременном сохранении антикоррозионных свойств позволит значительно расширить область их применения. Появится возможность использовать аустенитные Cr-Ni стали в производстве изделий, работающих не только в коррозионных, но и в абразивных средах, а также в условиях трения и высоких механических нагрузок.

Фрикционная обработка скользящим индентором склонных к адгезии аустенитных сталей является эффективным методом финишной обработки, который позволяет создавать на их поверхности субмикро- и нанорельеф при отсутствии трещин и микровырывов материала [5; 6]. Фрикционная обработка обеспечивает формирование нанокристаллических структур трения в приповерхностном слое [6; 7] и, как следствие, способствует повышению прочностных и трибологических характеристик аустенитных сталей [5; 7; 8]. Так, диспергирование структуры поверхностного слоя стали AISI 316L до нанокристаллического состояния (с размером зерен ~40 нм) способствовало росту ее износостойкости в условиях сухого трения и трения со смазкой [9].

Известно, что значительный вклад в упрочнение и обеспечение износостойкости метастабильных (с содержанием 8–10 % Ni в составе) аустенитных сталей вносит деформационное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение [5; 7; 10]. Однако наличие α' -мартенсита в структуре может привести к снижению стойкости аустенитной стали к коррозии. Например, возникновение точечной коррозии на поверхности нержавеющей стали может быть связано с наличием электрохимической гетерогенности, которая обусловлена появлением новой фазовой составляющей [11; 12]. В этой связи актуальным является рассмотрение особенностей фрикционной обработки Cr-Ni аустенитной стали, обладающей высокой стабильностью к деформационным превращениям за счет повышенного содержания в составе Ni (14 масс. %).

К другим факторам, определяющим коррозионное поведение стали, подвергнутой деформационной обработке (шероховатость, топография сформированной поверхности (шероховатость, наличие или отсутствие дефектов). В работе [11] показано, что коррозия развивается главным образом за счет появления питтингов вблизи уже имеющихся дефектов на поверхности деформированной стали 12X18H10T. Снижение шероховатости

поверхности образцов в результате ультразвуковой ударной обработки стало главной причиной повышения сопротивления нержавеющей стали AISI 304 коррозионному разрушению в среде 3,5 % NaCl [13]. И напротив, рост шероховатости поверхности стали AISI 316L в результате дробеструйной обработки привел к снижению ее коррозионной стойкости [14]. Это объясняется тем, что шероховатость определяет реальную (а не геометрическую) площадь поверхности, подвергаемой влиянию коррозионной среды: чем ниже шероховатость, тем меньшей реальной площадью металлическая поверхность взаимодействует с коррозионной средой.

В отношении влияния дисперсности структуры на стойкость нержавеющей стали к коррозии в литературе содержатся крайне противоречивые данные. Так, согласно классической теории коррозии, уменьшение размера зерна должно ускорять коррозию [15], поскольку приводит к формированию множества электрохимических ячеек между границами зерна и матрицей. Однако в работе [16] показано, что фрагментация структуры способствует пассивации поверхности (ускоренному формированию пассивных пленок) стали AISI 409.

Цель работы – исследование влияния наноструктурирующей фрикционной обработки на микромеханические и коррозионные свойства стабильной аустенитной стали 03X16H14M3T.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала исследования была выбрана коррозионностойкая аустенитная сталь 03X16H14M3T (хим. состав в масс. %: 0,03C; 15,69Cr; 14,17Ni; 1,17Ti; 0,25Mn; 0,64Si; 2,67Mo; 0,03Co; 0,004Nb; 0,11Cu; 0,030P; 0,008S; 0,043V; Fe – остальное). Образцы из стали 03X16H14M3T размерами 36×36×6 мм были вырезаны из круглого проката и подвергнуты термической обработке – закалке от 1100 °С в воду, механическому шлифованию и последующему электролитическому полированию. Фрикционную обработку проводили скользящим индентором из синтетического алмаза полусферической формы с радиусом полусферы $R=3$ мм. Возвратно-поступательное движение индентором осуществляли в безокислительной среде аргона со скоростью 0,05 м/с, при 1-кратном ($n=1$) сканировании индентором по поверхности образца. Нагрузка на индентор P составила 294 Н, длина хода индентора – 29 мм, смещение индентора на каждый двойной ход – 0,1 мм.

Все образцы вырезали на электроэрозийном проволочном вырезном станке FANUC ROBOCUT α -0iE. Микротвердость определяли по методу восстановленного отпечатка при нагрузке на индентор Виккерса 0,245 Н на микротвердомере SHIMADZU HMV-G21DT. Инструментальное микроиндентирование проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm по стандарту ISO 14577 при максимальной нагрузке на индентор Виккерса 0,245 Н. Фазовый состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в $\text{CrK}\alpha$ -излучении. Поверхность

образцов изучали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU. Для определения параметров шероховатости использовали оптический профилометр Wyko NT-1100. Измерения проводили на участках размерами $0,9 \times 1,2$ мм и определяли среднеарифметическое отклонение профиля Ra и максимальную высоту профиля Rt .

Для коррозионных испытаний готовили образцы в следующих состояниях: после электролитического полирования, шлифования на абразивной шкурке и после фрикционной обработки. Испытания на общую коррозию проводили гравиметрическим методом в растворе 20 % NaCl + 30 % HCl (1:1), обеспечивающем активное коррозионное разрушение исследуемого материала, согласно ГОСТ Р 9.905-2007. Общая продолжительность испытаний составила 2 ч. Скорость коррозии k_m определяли по формуле $k_m = \Delta m / S \cdot \tau$, где Δm – потери массы образца, г; S – площадь поверхности образца, см^2 ; τ – время выдержки в коррозионной среде, ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ранее авторами было показано, что использование при фрикционной обработке индентора из синтетического алмаза и среды аргона обеспечивает интенсивное деформационное упрочнение метастабильной аустенитной Cr-Ni стали при отсутствии адгезионного схватывания, характерного для фрикционной обработки инденторами из W-Co твердого сплава и мелкодисперсного нитрида бора даже в случае применения охлаждающей жидкости [17]. Для фрикционной обработки стабильной аустенитной хромоникелевой стали был выбран схожий технологический режим.

При определении микротвердости методом восстановленного отпечатка установлено, что фрикционная обработка приводит к двукратному росту микротвердо-

сти поверхности стабильной аустенитной стали 03X16H14M3T: от 270 до 570 HV 0,025. Согласно результатам рентгенофазового анализа в структуре исследуемой стали в исходном закаленном состоянии обнаружено 100 об. % γ -фазы (аустенита). После фрикционной обработки стали 03X16H14M3T сохраняется практически полностью аустенитная структура: доля α' -мартенсита деформации не превышает 2 об. %.

Представленные на рис. 1 диаграммы непрерывного вдавливания индентора Виккерса с максимальной нагрузкой 0,245 Н были получены при инструментальном микроиндентировании поверхности аустенитной стали 03X16H14M3T в закаленном состоянии (кривая 1) и после фрикционной обработки (кривая 2).

Используя кривые нагружения (a–b) и разгрузки (b–c), по методу Оливера и Фарра [18] определяли характеристики, которые отражают особенности механического поведения исследуемой стали при упруго-пластическом деформировании (таблица 1, таблица 2). Фрикционная обработка способствует заметному смещению кривой 2 в сторону меньших значений перемещений индентора h относительно кривой 1, которая характеризует механическое поведение закаленной стали 03X16H14M3T. Из таблицы 1 следует, что фрикционная обработка обуславливает снижение значений максимальной h_{max} и остаточной h_p глубин вдавливания индентора в поверхностный слой стабильной аустенитной стали (на рис. 1 приведены для закаленной стали).

После фрикционной обработки в 1,5–1,7 раза возрастает твердость вдавливания при максимальной нагрузке H_{IT} и твердость по Мартенсу HM , учитывающая не только пластическую, но и упругую деформацию (таблица 1). Наблюдается также некоторое снижение (с 207 до 187 ГПа) значений контактного модуля упругости (таблица 1).

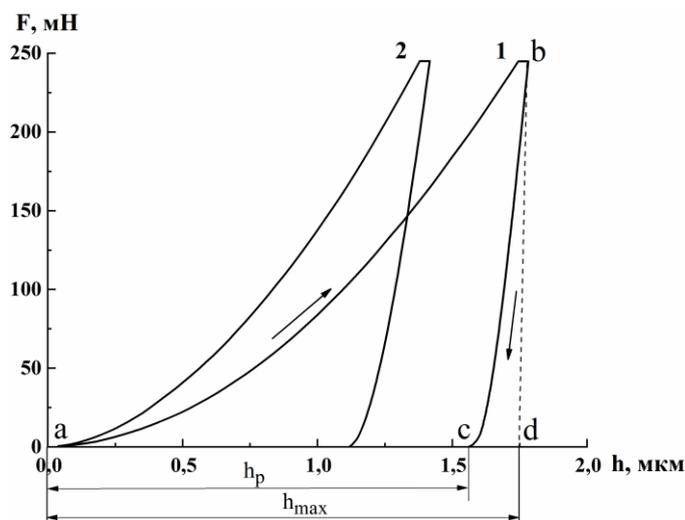


Рис. 1. Диаграммы нагружения «нагрузка F – перемещение индентора h » при микроиндентировании поверхности стали 03X16H14M3T в исходном закаленном (электрополированном) состоянии (кривая 1)

и после фрикционной обработки (кривая 2) с максимальной нагрузкой на индентор Виккерса 0,245 Н

Fig. 1. Loading diagrams “load F – indenter movement h ” at microindentation of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel surfaces in initial quenched condition (curve 1) and after frictional treatment (curve 2) with maximum load on Vickers indenter of 0.245 Н

Таблица 1. Результаты инструментального микроинdentирования поверхности образцов из стали 03X16Ni14M3T в закаленном состоянии и после фрикционной обработки**Table 1.** The results of instrumental microindentation of surfaces of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel specimens in a quenched condition and after frictional treatment

Состояние образца	h_{max} , мкм	h_p , мкм	HM , ГПа	H_{IT} , ГПа	E^* , ГПа	$W_i \cdot 10^{-3}$, мкДж	$W_e \cdot 10^{-3}$, мкДж
Закалка (электрополирование)	1,74±0,09	1,57±0,13	2,9±0,3	3,4±0,4	206±25	145,8±9,8	19,9±1,4
Фрикционная обработка	1,41±0,07	1,19±0,07	4,4±0,4	5,8±0,6	187±12	121,2±6,2	28,0±1,1

Таблица 2. Рассчитанные по результатам инструментального микроинdentирования характеристики поверхности образцов из стали 03X16Ni14M3T в закаленном состоянии и после фрикционной обработки**Table 2.** Characteristics of surfaces of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel specimens in a quenched condition and after frictional treatment calculated according to the results of instrumental microindentation

Состояние образца	R , %	$\frac{H_{IT}}{E^*}$	$\frac{H_{IT}^3}{E^{*2}}$, ГПа	$\left(1 - \frac{W_e}{W_i}\right) \cdot 100$, %
Закалка (электрополирование)	9,7	0,016	0,001	86
Фрикционная обработка	15,3	0,031	0,005	77

В результате проведения фрикционной обработки снижается также полная механическая работа вдавливания W_i , которая определяется всей площадью под кривой нагружения (на рис. 1 треугольник abd) и состоит из работы пластической деформации и работы упругого восстановления. Работа упругой деформации при инdentировании W_e , которая определяется площадью под кривой разгрузки (на рис. 1 треугольник cbd), напротив, возрастает в результате фрикционной обработки. Следовательно, большая энергия упругой деформации высвобождается при снятии измерительной нагрузки [18].

Согласно данным, представленным в таблице 2, в результате фрикционной обработки наблюдается увеличение расчетных параметров упругого восстановления $\%R = \frac{h_{max} - h_p}{h_{max}} \cdot 100$ % [19], $\frac{H_{IT}}{E^*}$ [20]

и $\frac{H_{IT}^3}{E^{*2}}$. Поверхность аустенитной стали после фрикционной обработки характеризуется также наименьшей величиной рассчитанного по формуле $\left(1 - \frac{W_e}{W_i}\right) \cdot 100$ %

согласно ГОСТ Р 8.748-2011 отношения (таблица 2). Приведенные на рис. 2 гистограммы свидетельствуют о том, что у аустенитной стали 03X16Ni14M3T с электрополированной поверхностью и с поверхностью, подвергнутой фрикционной обработке, наблюдаются близкие значения скорости коррозии: $k_m = 3,26 \cdot 10^5$ г/(см²·ч) и $k_m = 3,27 \cdot 10^5$ г/(см²·ч) соответственно. Сталь в шлифованном состоянии характеризуется в 2 раза большей скоростью коррозии $k_m = 6,50 \cdot 10^5$ г/(см²·ч).

Согласно данным, приведенным в таблице 3, поверхности стали после шлифования и после фрикционной обработки характеризуются близкими уровнями среднего арифметического отклонения профиля Ra (0,25 и 0,23 мкм). У электрополированной поверхности отмечается меньшее значение указанного параметра $Ra = 0,14$ мкм. Максимальная высота профиля Rt шлифованной стали в 6,0 раз больше, чем у стали в электрополированном состоянии, и в 10,6 раза больше, чем у стали, подвергнутой фрикционной обработке (таблица 3).

Отмеченные наиболее высокие значения параметра $Rt = 35,15$ мкм у стали 03X16Ni14M3T после шлифования могут быть связаны с тем, что на шлифованной поверхности присутствуют мелкие трещины и вырывы металла, а также борозды, ориентированные в направлении шлифовки (рис. 3 а). Поверхность исследуемой стали после фрикционной обработки характеризуется наличием полос пластического оттеснения (рис. 3 б) при отсутствии дефектов сплошности, что определяет наблюдаемое наименьшее значение параметра шероховатости $Rt = 3,30$ мкм (таблица 3). На поверхности стали после электрополирования виден четкий рельеф по границам зерен, связанный с их вытравливанием (рис. 3 с). Это обуславливает несколько больший уровень максимальной высоты профиля ($Rt = 5,85$ мкм) у электрополированной поверхности (таблица 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достигнутый при фрикционной обработке уровень микротвердости (570 HV 0,025) и прочностных характеристик ($HM = 4,4$ ГПа, $H_{IT} = 5,8$ ГПа) стали

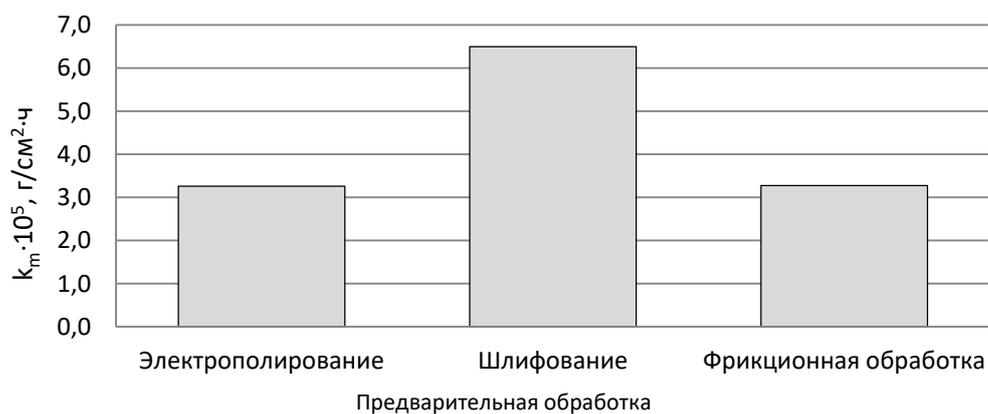


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии k_m от вида предварительной обработки поверхности стали 03X16Ni14Mo3Ti (время испытаний 2 ч)

Fig. 2. The dependence of corrosion rate k_m on the type of preliminary processing of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel surface (testing time is 2 h)

Таблица 3. Параметры шероховатости Ra и Rt поверхности образцов из стали 03X16Ni14Mo3Ti после различных видов обработки

Table 3. Ra and Rt roughness parameters of surfaces of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel specimens after different types of processing

Вид обработки	Ra , мкм	Rt , мкм
Шлифование	0,25	35,15
Фрикционная обработка	0,23	3,30
Электрополирование	0,14	5,85

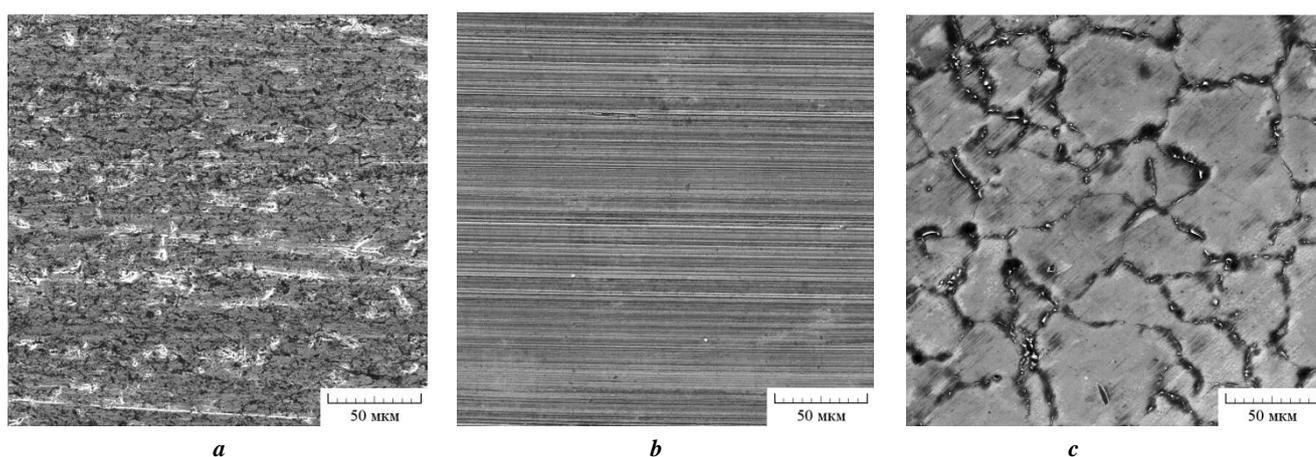


Рис. 3. Изображения поверхности образцов из стали 03X16Ni14Mo3Ti после шлифования (а), фрикционной обработки (б) и электрополирования (с)

Fig. 3. Images of surfaces of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel specimens after grinding (a), frictional treatment (b), and electropolishing (c)

03X16H14M3T объясняется тем, что в процессе деформации при активизации дислокационного, субструктурного и зернограницного механизмов упрочнения γ -фаза претерпевает трансформацию от исходного крупнокристаллического до субмикро/нанокристаллического (после фрикционной обработки) строения [8]. Близкий уровень микротвердости был достигнут при фрикционной обработке стали Гадфильда [21]. Фрикционное нагружение даже в среде жидкого азота не привело к изменению фазового состава закаленной стали, однако способствовало наноструктурированию поверхностного слоя толщиной 5–10 мкм и, как следствие, обеспечило рост микротвердости стали до 6 ГПа.

В настоящей работе отмечено снижение контактного модуля упругости стали 03X16H14M3T после фрикционной обработки (таблица 1). Известно, что при деформации модуль упругости металлических материалов может как возрастать [22], так и снижаться [23]. При холодной деформации алюминиевого сплава АА 1050 модуль Юнга на начальном этапе снижается, а при последующем деформационном воздействии повышается [24].

Наблюдаемое снижение полной механической работы вдавливания W_t связано с упрочнением аустенитной стали при фрикционной обработке, поскольку более прочные и менее пластичные поверхностные слои меньше деформируются под индентором.

Отмеченное увеличение работы W_e , а также расчетных параметров R и $\frac{H_{IT}}{E^*}$ (таблица 1, таблица 2), характеризующих долю упругой составляющей в общей деформации, указывает на повышенную способность упрочненного при наноструктурирующей фрикционной обработке поверхностного слоя стали деформироваться в упругой области.

Рост отношения $\frac{H_{IT}^3}{E^{*2}}$ (таблица 2) в результате фрикционной обработки свидетельствует об увеличении сопротивления поверхности стали 03X16H14M3T пластическому деформированию после начала течения металла, поскольку оно пропорционально напряжению течения R_y материала [25]. Поверхность аустенитной стали после фрикционной обработки характеризуется также наименьшей величиной отношения $\left(1 - \frac{W_e}{W_t}\right) \cdot 100\%$ (таблица 2), характеризующего пластическую составляющую работы при индентировании стальной поверхности.

Установленная максимальная скорость коррозии стали в шлифованном состоянии (рис. 2), очевидно, связана с выявленными особенностями топографии шлифованной поверхности – с наличием на ней дефектов сплошности (вырывов, трещин) (рис. 3 а), вызывающих максимальный уровень параметра шероховатости $Rt=35,15$ мкм (таблица 3). Известно, что рост шероховатости поверхности приводит к росту скорости коррозии [26], а дефекты сплошности материала могут являться дополнительными очагами коррозионного разрушения и препятствовать образованию пассивных пленок [15].

Обладающие минимальной скоростью коррозии поверхности, сформированные фрикционной обработкой и электрополированием (рис. 2), характеризуются су-

щественно меньшими уровнями параметра шероховатости $Rt=3,30-5,85$ мкм (таблица 3) и отсутствием трещин и вырывов (рис. 3 б, 3 с). Следовательно, основное влияние на коррозионную стойкость рассматриваемой аустенитной стали оказывает качество поверхности (шероховатость, наличие или отсутствие дефектов). Важно также отметить, что сильное диспергирование аустенитной структуры закаленной стали 03X16H14M3T при фрикционной обработке [8], вопреки классической теории коррозии [15], не приводит к снижению ее коррозионной стойкости (рис. 2).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Показано, что наноструктурирующая фрикционная обработка приводит к повышению в 1,5–2,1 раза микротвердости и других прочностных характеристик (твердости вдавливания при максимальной нагрузке H_{IT} и твердости по Мартенсу HM) стабильной аустенитной стали 03X16H14M3T.

По данным инструментального микроиндентирования установлена повышенная способность упрочненного фрикционной обработкой слоя аустенитной стали деформироваться в упругой области, а также сопротивляться деформированию и после начала пластического течения материала.

В испытаниях на общую коррозию установлено, что максимальной скоростью коррозии ($k_m=6,50 \cdot 10^5$ г/(см²·ч)) сталь 03X16H14M3T обладает в шлифованном состоянии. Это обусловлено наличием на шлифованной поверхности микротрещин и вырывов металла, что вызывает резкий рост максимальной высоты профиля Rt . Отсутствие дефектов сплошности и уменьшение в 6–10 раз параметра шероховатости Rt на поверхности после электролитического полирования и фрикционной обработки скользящим индентором обеспечивают существенно меньшие близкие величины скорости коррозии стали $k_m=(3,26-3,27) \cdot 10^5$ г/(см²·ч). Это свидетельствует об определяющей роли качества поверхности, сформированной различными обработками, в сопротивлении коррозионному разрушению стабильной аустенитной стали. Реализуемое при фрикционной обработке диспергирование исходного крупнокристаллического аустенита до субмикро/нанокристаллического состояния не оказывает заметного влияния на сопротивление стали общей коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borgioli F. From austenitic stainless steel to expanded austenite-S phase: formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase // Metals. 2020. Vol. 10. № 2. Article number 187. DOI: [10.3390/met10020187](https://doi.org/10.3390/met10020187).
2. Остапенко Г.И., Усманов И.Р. Исследование коррозии нержавеющей стали 10X17H13M2T в хлорной кислоте // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 2. С. 51–60. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-2-51-60](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-2-51-60).
3. Basak S., Sharma S.K., Mondal M., Sahu K.K., Gollapudi S., Majumdar J.D., Hong S.-T. Electron beam surface treatment of 316L austenitic stainless steel: improvements in hardness, wear, and corrosion

- resistance // *Metals and Materials International*. 2020. Vol. 27. № 5. P. 953–961. DOI: [10.1007/s12540-020-00773-y](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00773-y).
4. Khaksaran A., Taghiabadi R., Jafarzadegan M. Tribological properties of surface friction hardened AISI 316L steel // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74. № 8. P. 1979–1989. DOI: [10.1007/s12666-021-02306-6](https://doi.org/10.1007/s12666-021-02306-6).
 5. Наркевич Н.А., Шулепов И.А., Миронов И.П. Структура, механические и триботехнические свойства аустенитной азотистой стали после фрикционной обработки // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 4. С. 421–428. DOI: [10.7868/S0015323017020097](https://doi.org/10.7868/S0015323017020097).
 6. Макаров А.В., Скорынина П.А., Юровских А.С., Осинцева А.Л. Влияние технологических условий наноструктурирующей фрикционной обработки на структурно-фазовое состояние и упрочнение метастабильной аустенитной стали // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 12. С. 1300–1311. DOI: [10.7868/S0015323017120087](https://doi.org/10.7868/S0015323017120087).
 7. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Металлофизические основы наноструктурирующей фрикционной обработки сталей // *Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. № 3. С. 327–336. DOI: [10.1134/S0015323018120124](https://doi.org/10.1134/S0015323018120124).
 8. Makarov A.V., Skorynina P.A., Volkova E.G., Osintseva A.L. Effect of friction treatment on the structure, micromechanical and tribological properties of austenitic steel 03Kh16N14M3T // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 61. № 11-12. P. 764–768. DOI: [10.1007/s11041-020-00497-1](https://doi.org/10.1007/s11041-020-00497-1).
 9. Wang P.F., Han Z. Friction and wear behaviors of a gradient nano-grained AISI 316L stainless steel under dry and oil-lubricated conditions // *Journal of Materials Science and Technology*. 2018. Vol. 34. № 10. P. 1835–1842. DOI: [10.1016/j.jmst.2018.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.01.013).
 10. Litovchenko I.Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Tyumentsev A.N., Naiden E.P. The features of microstructure and mechanical properties of metastable austenitic steel subjected to low-temperature and subsequent warm deformation // *Russian physics journal*. 2016. Vol. 59. № 6. P. 782–787. DOI: [10.1007/s11182-016-0837-1](https://doi.org/10.1007/s11182-016-0837-1).
 11. Яровчук А.В., Доронина Т.А., Тиванова О.В. Влияние мартенсита деформации на стойкость к питтинговой коррозии нержавеющей стали 12Х18Н10Т // *Ползуновский альманах*. 2007. № 1-2. С. 190–196.
 12. Chen X., Gussev M., Balonis M., Bauchy M., Sant G. Emergence of micro-galvanic corrosion in plastically deformed austenitic stainless steels // *Materials and Design*. 2021. Vol. 203. Article number 109614. DOI: [10.1016/j.matdes.2021.109614](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109614).
 13. Lee H.S., Kim D.S., Jung J.S., Pyoun Y.S., Shin K. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel // *Corrosion science*. 2009. Vol. 51. № 12. P. 2826–2830. DOI: [10.1016/j.corsci.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.008).
 14. Ahmed A.A., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI 316L // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 259. P. 448–455. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2014.10.052](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.052).
 15. Hao Y.W., Deng B., Zhong C., Jiang Y.M., Li J. Effect of surface mechanical attrition treatment on corrosion behavior of 316 stainless steel // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009. Vol. 16. № 2. P. 68–72. DOI: [10.1016/S1006-706X\(09\)60030-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60030-3).
 16. Balusamy T., Kumar S., Narayanan T.S.N. Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behaviour of AISI 409 stainless steel // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. № 11. P. 3826–3834. DOI: [10.1016/j.corsci.2010.07.004](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.07.004).
 17. Makarov A.V., Skorynina P.A., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Effect of the technological conditions of frictional treatment on the structure, phase composition and hardening of metastable austenitic steel // *AIP Conference Proceedings: Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2016)*. 2016. Vol. 1785. Article number 040035. DOI: [10.1063/1.4967092](https://doi.org/10.1063/1.4967092).
 18. Oliver W.C., Pharr J.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*. 1992. Vol. 7. № 6. P. 1564–1583. DOI: [10.1557/JMR.1992.1564](https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564).
 19. Петржик М.И., Левашов Е.А. Современные методы изучения функциональных поверхностей перспективных материалов в условиях механического контакта // *Кристаллография*. 2007. Т. 52. № 6. С. 1002–1010.
 20. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation // *Applied Physics Letters*. 1998. Vol. 73. № 5. P. 614–616. DOI: [10.1063/1.121873](https://doi.org/10.1063/1.121873).
 21. Коршунов Л.Г., Сагарадзе В.В., Черненко Н.Л. Структурно-фазовые превращения в стали Гадфильда при фрикционном нагружении в среде жидкого азота // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 8. С. 856–861. DOI: [10.7868/S0015323016080064](https://doi.org/10.7868/S0015323016080064).
 22. Savrai R.A., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Rogovaya S.A., Osintseva A.L. Improving the strength of the AISI 321 austenitic stainless steel by frictional treatment // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2017. № 5. P. 43–62. DOI: [10.17804/2410-9908.2017.5.043-062](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.5.043-062).
 23. Юркова А.И., Мильман Ю.В., Бякова А.В. Структура и механические свойства железа после поверхностной интенсивной пластической деформации трением. II. Механические свойства нано- и субмикрорекристаллического железа // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 2. С. 2–9.
 24. Villuendas A., Roca A., Jorba J. Change of Young's modulus of cold-deformed aluminum AA 1050 and of AA 2024 (T65): a comparative study // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 539-543. № 1. P. 293–298. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.293](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.293).
 25. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 174. P. 725–731. DOI: [10.1016/S0257-8972\(03\)00576-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00576-0).
 26. Yin S., Li D.Y., Bouchard R. Effects of the strain rate of prior deformation on the wear-corrosion synergy of carbon steel // *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 801–807. DOI: [10.1016/j.wear.2007.01.058](https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.058).

REFERENCES

- Borgioli F. From austenitic stainless steel to expanded austenite-S phase: formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 2, article number 187. DOI: [10.3390/met10020187](https://doi.org/10.3390/met10020187).
- Ostapenko G.I., Usmanov I.R. Investigation of AISI 316 stainless steel corrosion in perchloric acid. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 2, pp. 51–60. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-2-51-60](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-2-51-60).
- Basak S., Sharma S.K., Mondal M., Sahu K.K., Gollapudi S., Majumdar J.D., Hong S.-T. Electron beam surface treatment of 316L austenitic stainless steel: improvements in hardness, wear, and corrosion resistance. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 27, no. 5, pp. 953–961. DOI: [10.1007/s12540-020-00773-y](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00773-y).
- Khaksaran A., Taghiabadi R., Jafarzadegan M. Tribological properties of surface friction hardened AISI 316L steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, vol. 74, no. 8, pp. 1979–1989. DOI: [10.1007/s12666-021-02306-6](https://doi.org/10.1007/s12666-021-02306-6).
- Narkevich N.A., Mironov Y.P., Shulepov I.A. Structure, mechanical, and tribotechnical properties of an austenitic nitrogen steel after frictional treatment. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 4, pp. 399–406. DOI: [10.7868/S0015323017020097](https://doi.org/10.7868/S0015323017020097).
- Makarov A.V., Skorynina P.A., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Effect of the conditions of the nanostructuring frictional treatment process on the structural and phase states and the strengthening of metastable austenitic steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 12, pp. 1225–1235. DOI: [10.7868/S0015323017120087](https://doi.org/10.7868/S0015323017120087).
- Makarov A.V., Korshunov L.G. Metallophysical foundations of nanostructuring frictional treatment of steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 3, pp. 303–311. DOI: [10.1134/S0015323018120124](https://doi.org/10.1134/S0015323018120124).
- Makarov A.V., Skorynina P.A., Volkova E.G., Osintseva A.L. Effect of friction treatment on the structure, micromechanical and tribological properties of austenitic steel 03Kh16N14M3T. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, vol. 61, no. 11-12, pp. 764–768. DOI: [10.1007/s11041-020-00497-1](https://doi.org/10.1007/s11041-020-00497-1).
- Wang P.F., Han Z. Friction and wear behaviors of a gradient nano-grained AISI 316L stainless steel under dry and oil-lubricated conditions. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, no. 10, pp. 1835–1842. DOI: [10.1016/j.jmst.2018.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.01.013).
- Litovchenko I.Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Tyumentsev A.N., Naiden E.P. The features of microstructure and mechanical properties of metastable austenitic steel subjected to low-temperature and subsequent warm deformation. *Russian physics journal*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 782–787. DOI: [10.1007/s11182-016-0837-1](https://doi.org/10.1007/s11182-016-0837-1).
- Yarovchuk A.V., Doronina T.A., Tivanova O.V. The influence of deformation martensite on pitting resistance of 12H18N10T stainless steel. *Polzunovskiy almanakh*, 2007, no. 1-2, pp. 190–196.
- Chen X., Gussev M., Balonis M., Bauchy M., Sant G. Emergence of micro-galvanic corrosion in plastically deformed austenitic stainless steels. *Materials and Design*, 2021, vol. 203, article number 109614. DOI: [10.1016/j.matdes.2021.109614](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109614).
- Lee H.S., Kim D.S., Jung J.S., Pyoun Y.S., Shin K. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel. *Corrosion science*, 2009, vol. 51, no. 12, pp. 2826–2830. DOI: [10.1016/j.corsci.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.008).
- Ahmed A.A., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI 316L. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 259, pp. 448–455. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2014.10.052](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.052).
- Hao Y.W., Deng B., Zhong C., Jiang Y.M., Li J. Effect of surface mechanical attrition treatment on corrosion behavior of 316 stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 68–72. DOI: [10.1016/S1006-706X\(09\)60030-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60030-3).
- Balusamy T., Kumar S., Narayanan T.S.N. Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behaviour of AISI 409 stainless steel. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 3826–3834. DOI: [10.1016/j.corsci.2010.07.004](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.07.004).
- Makarov A.V., Skorynina P.A., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Effect of the technological conditions of frictional treatment on the structure, phase composition and hardening of metastable austenitic steel. *AIP Conference Proceedings: Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2016)*, 2016, vol. 1785, article number 040035. DOI: [10.1063/1.4967092](https://doi.org/10.1063/1.4967092).
- Oliver W.C., Pharr J.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583. DOI: [10.1557/JMR.1992.1564](https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564).
- Petrzhik M.I., Levashov E.A. Modern methods for investigating functional surfaces of advanced materials by mechanical contact testing. *Crystallography Reports*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 966–974.
- Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, no. 5, pp. 614–616. DOI: [10.1063/1.121873](https://doi.org/10.1063/1.121873).
- Korshunov L.G., Sagaradze V.V., Chernenko N.L. Structural and phase transformations in hadfield steel upon frictional loading in liquid nitrogen. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 8, pp. 828–833. DOI: [10.7868/S0015323016080064](https://doi.org/10.7868/S0015323016080064).
- Savrai R.A., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Rogovaya S.A., Osintseva A.L. Improving the strength of the AISI 321 austenitic stainless steel by frictional treatment. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, no. 5, pp. 43–62. DOI: [10.17804/2410-9908.2017.5.043-062](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.5.043-062).
- Yurkova A.I., Milman Yu.V., Byakova A.V. Structure and the Mechanical Properties of Iron after Surface Severe Plastic Deformation under Friction. II. The Mechanical Properties of Nano and Submicrocrystalline Iron. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 2, pp. 2–9.
- Villuendas A., Roca A., Jorba J. Change of Young's modulus of cold-deformed aluminum AA 1050 and of AA 2024 (T65): a comparative study. *Materials Science*

- Forum*, 2007, vol. 539-543, no. 1, pp. 293–298. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.293](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.293).
25. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 174, pp. 725–731. DOI: [10.1016/S0257-8972\(03\)00576-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00576-0).
26. Yin S., Li D.Y., Bouchard R. Effects of the strain rate of prior deformation on the wear-corrosion synergy of carbon steel. *Wear*, 2007, vol. 263, pp. 801–807. DOI: [10.1016/j.wear.2007.01.058](https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.058).

Effect of nanostructuring frictional treatment on micromechanical and corrosion properties of stable austenitic chromium-nickel steel

© 2021

Polina A. Skorynina^{*1,5}, junior researcher

Aleksey V. Makarov^{1,2,6}, doctor of technical sciences, corresponding member of RAS, Chief researcher, head of the department, head of the laboratory

Vera V. Berezovskaya^{3,7}, doctor of technical sciences, professor

Evgeny A. Merkushev^{3,8}, candidate of technical sciences, assistant professor

Nikolay M. Chekan^{4,9}, PhD (Physics and Mathematics),

Head of the Laboratory of Nanomaterials and Ion-Plasma Processes

¹*Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

²*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

³*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (Russia)*

⁴*Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk (Belarus)*

*E-mail: polina.skorynina@mail.ru

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8904-7600>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-3375>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-8818>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3339-9922>

Abstract: Frictional treatment is an effective method to increase the strength and wear resistance of austenitic chromium-nickel steels. Previously, the authors identified that the high level of mechanical properties of metastable austenitic steels is achieved at the intensive development of deformation $\gamma \rightarrow \alpha'$ -transformation. However, the presence of strain-induced martensite in the austenitic steel structure can negatively affect its anti-corrosion properties. The search for ways to improve the strength characteristics of stable austenitic chromium-nickel steel while maintaining high resistance to corrosion destruction is the up-to-date line of research. In this paper, to evaluate the mechanical properties of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel in the quenched condition and after frictional treatment, the authors applied the technique of measuring the hardness using the residual imprint method and the method of instrumental microindentation, which allows recording the indenter loading and unloading diagrams. The corrosion failure resistance of steel was studied in general corrosion tests. The authors compared the corrosion rate of austenitic steel after grinding, electropolishing, and frictional treatment; using scanning electron microscopy and optical profilometry, studied steel surfaces subjected to these treatments and determined their roughness. Nanostructuring frictional treatment provides surface hardening of stable austenitic steel up to 570 HV 0.025. The study showed the high efficiency of frictional treatment application to increase the strength characteristics and resistance of steel surface layer to elastic and plastic deformation. The authors identified that austenitic steel is characterized by similar corrosion rates $k_m = (3.26-3.27) \cdot 10^5$ (g/cm²·h) after electrolytic polishing (the structure of coarse-crystalline austenite) and after frictional treatment (submicro/nanocrystalline austenite structure), while mechanical grinding leads to a twofold increase in the corrosion rate of 03Cr16Ni14Mo3Ti steel due to the occurrence of microcracks and metal breakouts on the polished surface. The research justified the determining role of the quality of the surface formed by various processings (roughness, the presence of continuity defects) in ensuring the corrosion resistance of stainless steel.

Keywords: 03Cr16Ni14Mo3Ti austenitic stainless steel; frictional treatment; microindentation; roughness; corrosion resistance.

Acknowledgements: The work was carried out within the state assignments of the Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch) on the topic No. AAAA-A18-118020790148-1 and the Institute of Metal Physics, RAS (Ural Branch) on the topic No. AAAA-A18-118020190116-6 supported by the Grant of the Russian Foundation for Basic Research and the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No. 20-58-00057).

The research of phase analysis and micromechanical characteristics was performed on the equipment of the “Plastometry” Core Facility Center of the IES UB RAS.

The authors express deep gratitude to A.L. Osintseva, PhD (Engineering) for her participation in the work.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Skorynina P.A., Makarov A.V., Berezovskaya V.V., Merkushev E.A., Chekan N.M. Effect of nanostructuring frictional treatment on micromechanical and corrosion properties of stable austenitic chromium-nickel steel. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 4, pp. 80–88. DOI: [10.18323/2782-4039-2021-4-80-88](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2021-4-80-88).