

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-16-25

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ В АУСТЕНИТНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ ВНС53-Ш

Г.С. Севальнев¹, А.В. Шереметьев¹, Т.Г. Севальнева¹, К.В. Дульнев¹

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

Аннотация. Исследовано изменение удельного электросопротивления аустенитной азотсодержащей стали ВНС53-Ш в зависимости от термической обработки в диапазоне 200–1000 °С. Методом измерения электросопротивления по стандарту IACS установлена взаимосвязь электросопротивления со структурно-фазовыми превращениями: выделением нитридов хрома, формированием зон прерывистого распада и рекристаллизацией. Определены пороговые значения удельного электросопротивления для неразрушающего контроля фазового состава стали в условиях производства.

Ключевые слова: азотсодержащая сталь, комплексно-легированная аустенитная сталь, микроструктура, фазовый состав, твердость, удельное электросопротивление

Для цитирования: Севальнев Г.С., Шереметьев А.В., Севальнева Т.Г., Дульнев К.В. Исследование изменения электросопротивления в зависимости от эволюции структуры в аустенитной азотсодержащей коррозионностойкой стали ВНС53-Ш // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 16–25. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-16-25.

Scientific article

STUDY OF THE CHANGE IN ELECTRICAL RESISTANCE DEPENDING ON THE STRUCTURE EVOLUTION IN AUSTENITIC NITROGEN-CONTAINING CORROSION-RESISTANT STEEL VNS53-Sh

G.S. Sevalnev¹, A.V. Sheremetiev¹, T.G. Sevalneva¹, K.V. Dulnev¹

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

Abstract. The change in electrical resistivity of austenitic nitrogen-containing steel VNS53-Sh has been studied depending on heat treatment in the temperature range of 200–1000 °C. Using the IACS standard resistivity measurement method, the relationship between electrical resistivity and structural-phase transformations has been established, including chromium nitride precipitation, formation of discontinuous decomposition zones, and recrystallization. Threshold values of electrical resistivity for non-destructive testing of the phase composition of the steel under production conditions have been determined.

Keywords: nitrogen-containing steel, complex-alloyed austenitic steel, microstructure, phase composition, hardness, specific electrical resistivity

For citation: Sevalnev G.S., Sheremetiev A.V., Sevalneva T.G., Dulnev K.V. Study of the change in electrical resistance depending on the structure evolution in austenitic nitrogen-containing corrosion-resistant steel VNS53-Sh. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 16–25. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-16-25.

Введение

В современной металлургии и материаловедении особый интерес представляют аустенитные азотсодержащие стали, сочетающие высокую прочность, пластичность и исключительную стойкость к коррозии. При механическом воздействии данные материалы за счет оптимальной системы легирования обладают фазовой и структурной стабильностью, что в свою очередь обеспечивает более высокую надежность по сравнению с углеродсодержащими коррозионностойкими сталями типа 08X18H10, 12X18H10T, AISI 304 и AISI 321 [1–8].

При изготовлении защитных элементов лопастей вертолетной техники типа окровок в большинстве случаев используется коррозионностойкая аустенитная сталь 12X18H10T, которая при механическом воздействии склонна к образованию мартенсита деформации [6, 7], что приводит к снижению коррозионной стойкости и надежности элемента. Для улучшения характеристик элементов, таких как износ- и эрозионная стойкость, при сохранении коррозионной стойкости рекомендуется применение аустенитных коррозионностойких азотсодержащих сталей, в которых за счет высокой концентрации азота обеспечивается фазовая стабильность.

Для различных изделий авиационной техники в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана аустенитная коррозионностойкая азотсодержащая сталь ВНС53-Ш, которая за счет фазовой стабильности структуры обладает более высокими характеристиками коррозионной стойкости, а при интенсивной пластической деформации поверхностных слоев – более высокой износостойкостью по сравнению со сталью 12X18H10T [5–13].

Сталь ВНС53-Ш (08X21Г11АН6-Ш) относится к системе легирования Fe–Cr–Mn–Ni–N, поэтому при дополнительной термической обработке из твердого раствора можно выделять нитриды, которые в большинстве случаев способствуют повышению износостойкости. Вследствие образования мелкодисперсных нитридов общая твердость образцов при измерении по шкале Виккерса может незначительно изменяться, в связи с чем необходимы исследования в области взаимосвязи изменения физических характеристик материалов, таких как удельное электросопротивление, с происходящими структурно-фазовыми превращениями.

В авиационном машиностроении, где требования к надежности, безопасности и ресурсу конструкций предельно высоки, особое значение имеют неразрушающие методы контроля [14, 15]. Среди них в настоящее время активно развиваются методы акустической эмиссии и измерения удельного электросопротивления по стандарту IACS (International Annealed Copper Standard), обеспечивающие оперативную оценку структурного состояния и качества металлических материалов без нарушения их целостности [16, 17]. Измерения по стандарту IACS опираются на сравнительный принцип: электропроводность исследуемого образца сопоставляется с эталонным значением для отожженной меди при 20 °С. На регистрируемые показания в процессе генерации переменного электромагнитного поля катушкой датчика и возбуждения вихревых токов в приповерхностном слое материала влияют:

- фазовые превращения;
- изменения степени упорядоченности кристаллической решетки;
- образование и распад вторичных фаз;
- плотность дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий);
- перераспределение легирующих элементов в твердом растворе.

Таким образом, исследование взаимосвязи электросопротивления с протекающими структурно-фазовыми превращениями позволит улучшить характеристики и контроль качества термической обработки аустенитных азотсодержащих сталей.

В рамках данной работы для коррозионностойкой азотсодержащей стали ВНС53-III исследовано изменение микроструктуры и электросопротивления, измеряемого по стандарту IACS, в зависимости от режимов термической обработки в температурном диапазоне от 200 до 1000 °С.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали цилиндрические заготовки Ø20×20 мм из коррозионностойкой азотсодержащей стали ВНС53-III, вырезанные из горячедеформированного прутка. Заготовки после горячей деформации подвергали нагреву до температуры более 1000 °С с последующим охлаждением в воде для обеспечения гомогенной аустенитной структуры и повторному нагреву в диапазоне от 200 до 1000 °С с шагом 100 °С с последующим охлаждением в воде для фиксации фазовых превращений. Выдержка при температуре повторного нагрева составила ≥ 1 ч.

Термодинамический анализ фазового состава проводили в специализированном программном обеспечении, использующем метод CalPhaD. Входными параметрами служили химический состав стали и температурный интервал термической обработки.

Металлографические исследования микроструктуры проводили с применением оптического микроскопа при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$. Травление образцов для выявления микроструктуры осуществляли электролитически в 10%-ном растворе щавелевой кислоты при напряжении ≤ 5 В.

Твердость образцов измеряли по методу Виккерса при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Электросопротивление исследовали методом возбуждения вихревых токов в приповерхностном слое в соответствии со стандартом IACS при частотах 60, 120, 240, 480 и 960 кГц. Удельное электросопротивление материала рассчитывали в соответствии с формулой

$$\rho_{\text{мат}} = \frac{1,7241 \cdot 10^8}{\% \text{IACS}} \cdot 100 \%,$$

где %IACS – значение, регистрируемое прибором.

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

Результаты и обсуждение

Проведен термодинамический расчет фазового состава стали в равновесном состоянии (рис. 1). Показано, что при длительном отжиге фазовый состав стали может включать фазу с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой и большое количество σ -фазы в связи с высоким содержанием хрома (> 20 %). Кроме того, присутствует прерывистый распад в виде π -фазы, при которой происходит локальное обезлегирование твердого раствора никелем, хромом и азотом с образованием перлитоподобных структур в виде последовательных областей твердого раствора с нитридами хрома [18–22].

По диаграмме Потока–Сагалевиц [23] для хромового эквивалента мартенситообразования получено значение коэффициента $\text{Cr}_{\text{экв}}^{\text{M}} = -35,26$, что свидетельствует о высокой стабильности аустенитной структуры при кристаллизации. Для хромового эквивалента ферритообразования достигнуто значение коэффициента $\text{Cr}_{\text{экв}}^{\text{F}} = 9,04$, что подтверждает возможное присутствие δ -феррита в структуре. Согласно расчетам,

сталь марки ВНС53-Ш может содержать ~20 % δ -феррита, однако при этом не учитывается способность высоких концентраций азота подавлять ферритообразование.

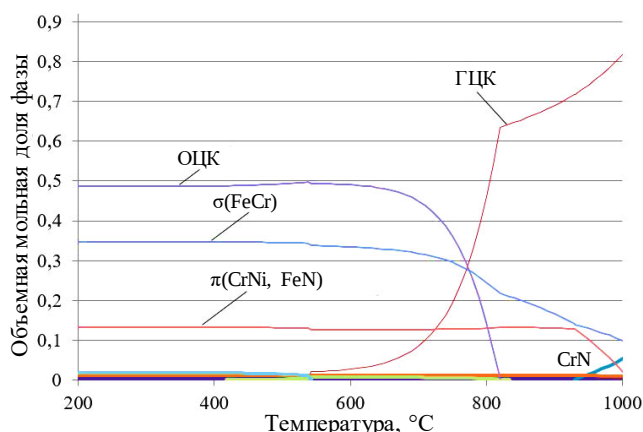


Рис. 1. Термодинамический расчет фазового состава стали ВНС53-Ш в равновесном состоянии (ОЦК, ГЦК – фазы с объемно-центрированной кубической и гранецентрированной кубической решеткой соответственно)

Металлографические исследования (рис. 2) показали, что в интервале температур отпуска 200–500 °С структура стали не изменяется – сохраняется твердый раствор аустенита с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) без выделений каких-либо фаз. Увеличение температуры до 600 °С привело к выделению нитридов хрома Cr_2N из твердого раствора по границам зерен (рис. 2, д). При температуре 700 °С объемное содержание нитридов хрома увеличилось и начался процесс формирования прерывистого распада с образованием перлитоподобной структуры (рис. 2, е). Согласно расчетам, начиная с 750 °С происходит активный переход ОЦК–ГЦК, растворение σ -фазы в твердом растворе, а также перераспределение легирующих элементов и увеличение доли π -фазы. При 800 °С доля π -фазы увеличивается, что дополнительно выявлено при анализе микроструктуры (рис. 2, ж). Расчетные данные также подтверждаются для образцов, подвергнутых обработке при температурах 900 и 1000 °С, – уменьшаются доля прерывистого распада ввиду растворения π -фазы в твердорастворной матрице и содержание нитридов.

Анализ изменения твердости образцов (рис. 3) позволил установить следующее. При повышении температуры обработки до 500 °С твердость стали практически не изменяется, что связано со стабильностью фазового состава и отсутствием образования избыточных фаз (карбидов, нитридов, карбонитридов). При температуре 600 °С твердость увеличивается до ~298 HV_1 , что объясняется активным выделением нитридов хрома из твердого раствора, которое, согласно результатам металлографических исследований, происходит преимущественно по границам зерен.

Дальнейшее увеличение температуры до 800 °С вызывает незначительное снижение твердости (до 285 HV_1). При этом происходят перераспределение легирующих элементов в твердом растворе, подготовка к прерывистому распаду и локальному образованию перлитоподобных структур. Несмотря на то что прерывистый распад приводит к образованию нитридов хрома, снижение содержания никеля в твердом растворе вызывает уменьшение твердости локальных областей до 150 HV_1 (рис. 4). Это в свою очередь снижает объемную твердость образца. Увеличение твердости образцов до 310 HV_1 связано с одновременным протеканием процессов перекристаллизации и переходом π -фазы и части нитридов хрома в твердый раствор.

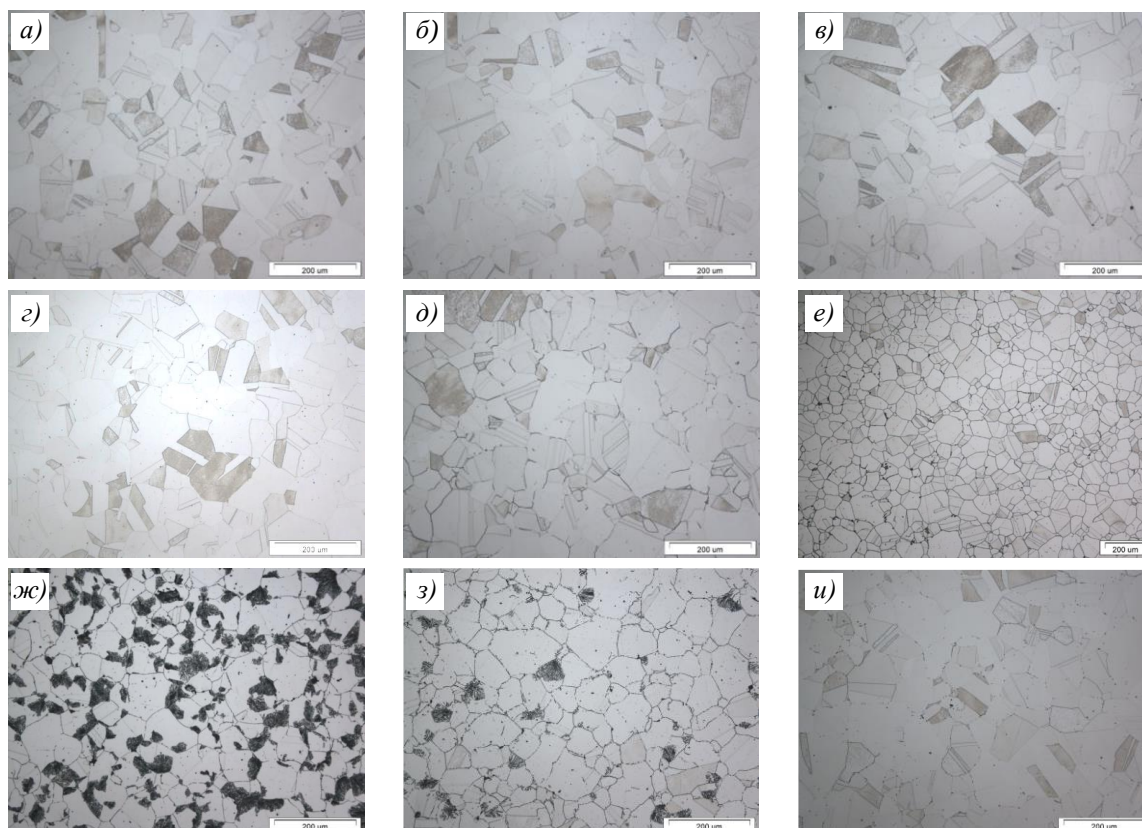


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 200$) стали ВНС53-III после термической обработки при температуре 200 (а), 300 (б), 400 (в), 500 (г), 600 (д), 700 (е), 800 (ж), 900 (з) и 1000 °C (и)

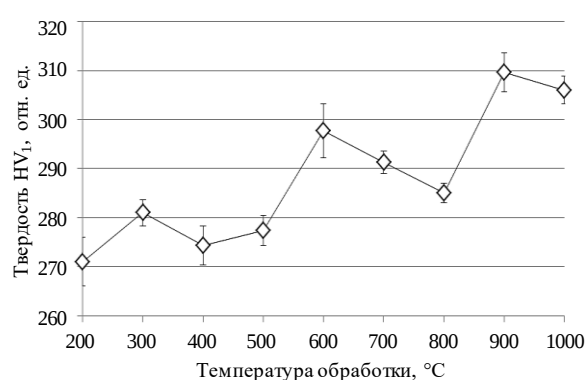


Рис. 3. Изменение твердости HV₁ образцов из стали ВНС53-III в зависимости от температуры обработки

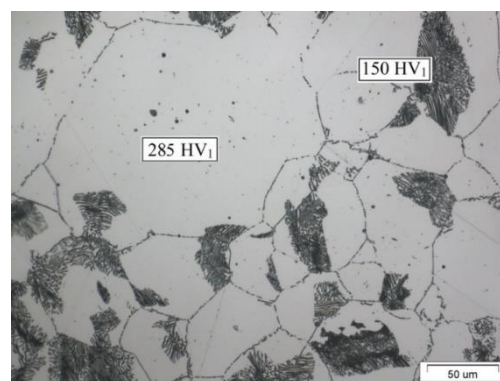


Рис. 4. Микроструктура прерывистого распада в стали марки ВНС53-III

Удельное электросопротивление чувствительно к структурным изменениям, особенно к обеднению твердорастворной матрицы легирующими элементами, а также к выпадению избыточных фаз. Сталь ВНС53-III является маломагнитной, поэтому измерение удельного электросопротивления с применением вихретокового метода обеспечивает высокую точность исследований.

Для сравнительной оценки проведены измерения при различных частотах. Результаты позволили установить, что измерения при 60 кГц дают высокие значения удельного электросопротивления (рис. 5, а), в то время как использование диапазона частот 120–960 кГц обеспечивает идентичный характер распределения значений

с небольшим отклонением (рис. 5, б). Для более точного определения зависимости удельного электросопротивления от изменений микроструктуры использованы средние значения при диапазоне частот 120–960 кГц.

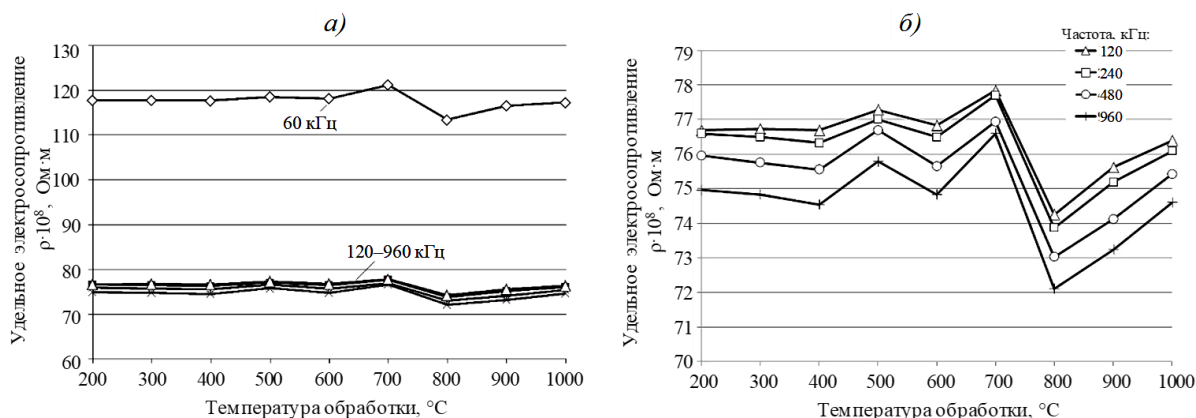


Рис. 5. Изменение удельного электросопротивления образцов из стали ВНС53-III в зависимости от температуры обработки при диапазоне частот измерения 60–960 (а) и 120–960 кГц (б)

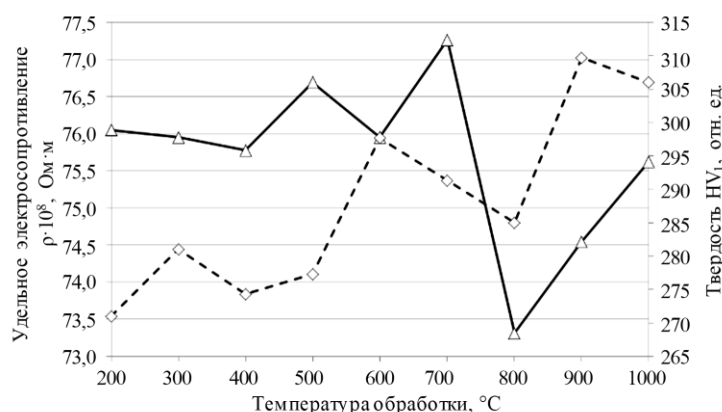


Рис. 6. Сравнение результатов изменения удельного электросопротивления (Δ) и твердости (◇) образцов из стали ВНС53-III в зависимости от температуры обработки

Сравнение результатов измерения твердости и удельного электросопротивления после обработки при различных температурах (рис. 6) позволили выявить следующие закономерности:

- в температурном диапазоне обработки от 200 до 400 °С удельное электросопротивление практически не изменяется, несмотря на колебания твердости;
- при температурах обработки от 500 до 700 °С происходят начальное увеличение удельного электросопротивления вследствие возможного образования σ -фазы и дальнейшее снижение вследствие выделения нитридов при 600 °С. Наибольшее электросопротивление ($77,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) достигается при выделении нитридов по границам зерен из твердого раствора и в начале процесса формирования зон прерывистого распада с образованием перлитоподобных структур, подобно формированию зон Гинье–Престона, что в свою очередь способствует увеличению электросопротивления;
- активное выделение нитридов хрома и зон прерывистого распада с обеднением никелем твердого раствора при температуре обработки 800 °С приводит к снижению электросопротивления на 5 % (до $73,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), что согласуется с исследованиями, проведенными на других материалах [24];

– активная перерекристаллизация структуры, растворение нитридов и легирующих элементов в твердом растворе в диапазоне температур 900–1000 °С приводят к увеличению электросопротивления до $75,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м из-за искажения кристаллической решетки.

Полученные значения удельного электросопротивления можно использовать для контроля фазового состава стали ВНС53-Ш:

– $\rho = (75,5–77,0) \cdot 10^{-8}$ Ом·м – формирование ГЦК-структуры без значительного выделения нитридов;

– $\rho > 77,0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – значительное выделение нитридов по границам зерен;

– $\rho < 73,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – образование зон прерывистого распада.

Для точного подтверждения данных значений необходимо провести дополнительные исследования изменений полуфабриката, а также совместного влияния степени деформации и структурно-фазовых превращений в процессе термической обработки.

Заключения

В рамках данной работы проведено комплексное исследование взаимосвязи удельного электросопротивления со структурно-фазовыми превращениями в аустенитной коррозионностойкой азотсодержащей стали ВНС53-Ш при термической обработке в диапазоне температур 200–1000 °С.

Установлено, что в интервале температур 200–500 °С фазовый состав и микроструктура стали остаются стабильными: выделения избыточных фаз не наблюдается, твердость и удельное электросопротивление практически не изменяются.

При температурах 600–700 °С происходит активное выделение нитридов хрома Cr_2N по границам зерен и начинают формироваться зоны прерывистого распада с образованием перлитоподобных структур. Данные процессы сопровождаются увеличением твердости до 298 HV₁ и достижением максимального значения удельного электросопротивления ($77,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), что обусловлено искажением кристаллической решетки за счет выделения нитридов и перераспределением легирующих элементов для формирования зон прерывистого распада.

При температуре 800 °С развитие прерывистого распада и обеднение твердого раствора никелем приводят к снижению удельного электросопротивления (на ~5 % – до $73,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) и твердости (до 285 HV₁), что согласуется с данными, полученными для других материалов с аналогичными структурными изменениями.

В диапазоне 900–1000 °С активная рекристаллизация структуры и растворение нитридов в твердом растворе способствуют повышению твердости до 310 HV₁ и восстановлению удельного электросопротивления до $75,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м вследствие искажения кристаллической решетки растворенными легирующими элементами.

На основании полученных результатов предложены пороговые значения удельного электросопротивления для неразрушающего контроля фазового состояния стали ВНС53-Ш по стандарту IACS, открывающие возможность практического применения данного метода для оперативной оценки качества термической обработки в условиях производства.

Для окончательного подтверждения установленных закономерностей и расширения области применения метода необходимо проведение дополнительных исследований с учетом степени предварительной деформации полуфабриката и совместного влияния термомеханических факторов на структурно-фазовые изменения в стали ВНС53-Ш.

Список источников

1. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
2. Мушникова С.Ю., Костин С.К., Сагарадзе В.В., Катаева Н.В. Структура, свойства и сопротивление коррозионному растрескиванию азотсодержащей аустенитной стали, упрочненной термомеханической обработкой // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 11. С. 1223–1235. DOI: 10.7868/S0015323017110092.

3. Свяжин А.Г., Капуткина Л.М. Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2019. № 62 (3). С. 173–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-173-187.
4. Кушнерева Д.С., Сапожников Г.В. Исследование свойств новых высокопрочных нержавеющих сталей // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. № 1. С. 39–44.
5. Севальнев Г.С., Дружинина М.Э., Вознесенская Н.М. и др. Структурные изменения поверхностных слоев при испытании на изнашивание высокопрочной аустенитной стали ВНС-53 // Металлы. 2023. № 4. С. 76–81.
6. Парменова О.Н. Влияние холодной деформации на коррозионную стойкость аустенитных сталей в морской воде // Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов и докл. XIX Междунар. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 332–333.
7. Бубнов В.А. Механизм перехода аустенита в мартенсит при холодной пластической деформации аустенитных сталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 11 (704). С. 14–19.
8. Костина М.В., Кудряшов А.Э., Спицина И.В. и др. Исследование влияния горячей прокатки и температуры нагрева под закалку на структуру и твердость сталей Fe–13%Cr, легированных азотом, ванадием, ниобием // Металлы. 2024. № 3. С. 21–31. DOI: 10.31857/S0869573324032131.
9. Лукин Е.И., Блинов В.М., Банных И.О. и др. Влияние холодной прокатки на структуру и механические свойства коррозионностойкой азотосодержащей мартенситно-аустенитно-ферритной стали 03X17AH2Ф // Электрометаллургия. 2025. № 2. С. 11–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-2-11-19.
10. Betsofen S.Ya., Lukin E.I., Ashmarin A.A. et al. Effect of Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in Steels with 15,9 and 17,7 % Mn // Russian Metallurgy (Metally). 2025. Vol. 2025. No. 3. P. 603–610. DOI: 10.1134/S0036029525700168.
11. Севальнев Г.С., Дульнев К.В., Рыжков П.В., Леонов А.В., Вознесенская Н.М. Оптимизация термической обработки высокопрочной коррозионностойкой азотсодержащей стали для получения бесшовных тонкостенных труб // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). С. 41–52. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.
12. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
13. 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.
14. Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). С. 101–112. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
15. Леднев И.С. Магнитные методы неразрушающего контроля деталей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 111–120. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
16. Lin G., Zhang Z., Wang H. et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al–Mg–Si alloy by thermo-mechanical treatment // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 650. P. 210–217.
17. Cui X., Wu Y., Zhang G. et al. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys // Composites. Part B: Engineering. 2017. Vol. 110. P. 381–387.
18. Банных И.О. Структурные особенности и перспективы применения высокоазотистых аустенитных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 5. С. 22–29.
19. Bannykh O.A., Blinov V.M. On the effect of discontinuous decomposition on the structure and properties of high-nitrogen steels and on methods for suppression thereof // Steel research. 1991. Vol. 62. No. 1. P. 38–45.

20. Сагарадзе В.В., Фомина О.В., Вихарева Т.В. и др. Особенности распада дельта-феррита в азотсодержащих аустенитных сталях // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 3. С. 296–302.
21. Беломытцев М.Ю. Закономерности формирования аустенитного зерна в 12%-ных хромистых жаропрочных ферритно-мартенситных сталях // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2023. Т. 66. № 2. С. 168–176.
22. Банных И.О. Корреляция зеренной структуры и механических свойств высокоазотистой аустенитной стали 02X20AG10H4MФБ после отжига // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 25–29.
23. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
24. Елисеев Э.А., Леонов А.В., Вознесенская Н.М., Нефедкин Д.Ю. Исследование изменения структуры под действием влияния различных технологических факторов на свойства холоднокатаной ленты из никель-бериллиевого сплава марки 97НЛ-ВИ // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2022. № 1. С. 29–34.

References

1. Filippov M.A., Litvinov V.S., Nemirovsky Yu.R. *Steels with metastable austenite*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 256 p.
2. Mushnikova S.Yu., Kostin S.K., Sagaradze V.V., Kataeva N.V. Structure, properties and resistance to stress corrosion cracking of nitrogen-containing austenitic steel strengthened by thermomechanical treatment. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2017, vol. 118, no. 11, pp. 1223–1235. DOI: 10.7868/S0015323017110092.
3. Svyazhin A.G., Kaputkina L.M. Nitrogen and high-nitrogen steels. Industrial technologies and properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2019, no. 62 (3), pp. 173–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-173-187.
4. Kushnereva D.S., Sapozhnikov G.V. Study of the properties of new high-strength stainless steels. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 39–44.
5. Sevalnev G.S., Druzhinina M.E., Voznesenskaya N.M. et al. Structural changes in surface layers during wear testing of high-strength austenitic steel VNS-53. *Metally*, 2023, no. 4, pp. 76–81.
6. Parmenova O.N. Effect of Cold Deformation on the Corrosion Resistance of Austenitic Steels in Seawater. *Ural School of Young Metallurgists: Coll. of Materials and Reports of the XIX Int. Scientific and Technical. Ural School-Seminar of Metallurgists – Young Scientists*. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2018, pp. 332–333.
7. Bubnov V.A. Mechanism of the Transition of Austenite to Martensite during Cold Plastic Deformation of Austenitic Steels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2018, no. 11 (704), pp. 14–19.
8. Kostina M.V., Kudryashov A.E., Spitsina I.V. et al. Study of the Effect of Hot Rolling and Heating Temperature for Quenching on the Structure and Hardness of Fe–13%Cr Steels Alloyed with Nitrogen, Vanadium, and Niobium. *Metally*, 2024, no. 3, pp. 21–31. DOI: 10.31857/S0869573324032131.
9. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Effect of cold rolling on the structure and mechanical properties of corrosion-resistant nitrogen-containing martensitic-austenitic-ferritic steel 03Kh17AN2F. *Electrometallurgiya*, 2025, no. 2, pp. 11–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-2-11-19.
10. Betsofen S.Ya., Lukin E.I., Ashmarin A.A. et al. Effect of Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in Steels with 15,9 and 17,7 % Mn. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2025, vol. 2025, no. 3, pp. 603–610. DOI: 10.1134/S0036029525700168.
11. Sevalnev G.S., Dulnev K.V., Ryzhkov P.V., Leonov A.V., Voznesenskaya N.M. Optimization of heat treatment for high-strength corrosion-resistant nitrogen-containing steel to produce seamless thin-walled tubes. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 41–52. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-41-52.
12. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 25, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

13. 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.
14. Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods for residual stress assessment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), pp. 101–112. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 11, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
15. Lednev I.S. Magnetic methods of non-destructive testing of aircraft parts. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 111–120. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 11, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
16. Lin G., Zhang Z., Wang H. et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al–Mg–Si alloy by thermo-mechanical treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 650, pp. 210–217.
17. Cui X., Wu Y., Zhang G. et al. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys. *Composites. Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 381–387.
18. Bannykh I.O. Structural features and prospects for the application of high-nitrogen austenitic steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2019, no. 5, pp. 22–29.
19. Bannykh O.A., Blinov V.M. On the effect of discontinuous decomposition on the structure and properties of high-nitrogen steels and on methods for suppression thereof. *Steel research*, 1991, vol. 62, no. 1, pp. 38–45.
20. Sagaradze V.V., Fomina O.V., Vikhareva T.V. et al. Features of delta-ferrite decomposition in nitrogen-containing austenitic steels. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2018, vol. 119, no. 3, pp. 296–302.
21. Belomyttsev M.Yu. Regularities of austenite grain formation in 12% chromium heat-resistant ferritic-martensitic steels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 168–176.
22. Bannykh I.O. Correlation of grain structure and mechanical properties of high-nitrogen austenitic steel 02Kh20AG10N4MFB after annealing. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2015, no. 12, pp. 25–29.
23. Potak Ya.M. *High-strength steels*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 208 p.
24. Eliseev E.A., Leonov A.V., Voznesenskaya N.M., Nefedkin D.Yu. Study of structure changes under the influence of various technological factors on the properties of cold-rolled strip made of nickel-beryllium alloy grade 97NL-VI. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2022, no. 1, pp. 29–34.

Информация об авторах

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

Шереметьев Александр Владимирович, начальник филиала, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севальнева Татьяна Геннадьевна, инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Aleksandr V. Sheremetiev, Head of Branch, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatyana G. Sevalneva, Engineer, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 18.03.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2026.

The article was submitted 18.03.2026; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2026.