

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.27

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-34-44>

К вопросу о применении нитроцементации для поверхностного упрочнения деталей из стали 30ХГС

К.Ю. Кузнецов^{1✉}

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: Nightvol@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Изучение элементного и фазового составов, а также микротвердости поверхности корпуса резца дорожной фрезы марки КЗТС А6/20, изготовленного из стали 30ХГС, с целью применения нитроцементации для его поверхностного упрочнения.

Методы. Для реализации поставленной цели использовались современные методы и оборудование. Применяя анализатор рентгеновского излучения, встроенный в растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG, были определены спектры рентгеновского излучения в определенных точках на поверхности образца.

Фазовый состав образца определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV в определенном излучении с использованием щелей Соллера с помощью БД ICDD PDF-2 (2014). Описание дифракционных пиков осуществляли, используя суперпозицию функции Гаусса и функции Лоренца. Используя автоматическую систему анализа микротвердости DM-8 методом микроВиккерса, вдавливанием алмазных наконечников, провели исследование микротвердости образцов по поперечному шлифу.

Результаты. В результате исследования были получены: рентгенограмма элементного состава корпуса резца дорожной фрезы марки КЗТС А6/20, показывающая, что соотношение элементов соответствует составу легированной конструкционной стали 30ХГС; дифрактограмма, показывающая кристаллические фазы α -Fe и Fe₂O₃ с разными размерами кристаллитов, а также данные о положении и межплоскостные расстояния всех отражений.

Определена микротвердость поверхности образца: $HV_{0.01} = 437,6$.

Заключение. Выполненное исследование позволит разработать рекомендации к практическому применению методов химико-термической обработки, посредством которых можно проводить поверхностное упрочнение деталей, изготовленных из стали 30ХГС, в частности корпуса резца дорожной фрезы.

Ключевые слова: нитроцементация; упрочнение; сталь; сплав; фаза.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Кузнецов К.Ю. К вопросу о применении нитроцементации для поверхностного упрочнения деталей из стали 30ХГС // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 34–44. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-34-44>.

Поступила в редакцию 07.04.2025

Подписана в печать 15.05.2025

Опубликована 30.06.2025

On the issue of using nitrocarburizing for surface hardening of parts made of 30KhGS steel

Konstantin Yu. Kuznetsov¹✉

¹ Southwest State University
50 let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: Nightvol@yandex.ru

Abstract

Purpose. Study of the elemental and phase compositions, as well as the microhardness of the surface of the cutter body of the KZTS A6/20 road milling machine made of 30KhGS steel, in order to use nitrocarburizing for its surface hardening.

Methods. Modern methods and equipment were used to achieve the set goal.

Using the X-ray analyzer built into the Quanta 600 FEG scanning electron microscope, X-ray spectra were determined at specific points on the sample surface.

The phase composition of the sample was studied by X-ray diffraction on a Rigaku Ultima IV diffractometer in Cu-K α radiation using Soller slits using the ICCD PDF-2 DB (2014). The diffraction maxima were described using a superposition of the Gaussian function and the Lorentz function.

Using the DM-8 automatic microhardness analysis system using the micro-Vickers method, the microhardness of the samples was studied by transverse section.

Results. The following were obtained as a result of the study: an X-ray diffraction pattern of the elemental composition of the cutter body of the KZTS A6/20 road milling machine, showing that the ratio of the elements corresponds to the composition of alloyed structural steel 30KhGS; a diffraction pattern showing the crystalline phases of α -Fe and Fe₂O₃ with different sizes of crystallites, as well as data on the position and interplanar distances of all reflections.

The microhardness of the sample surface was determined: HV0.01 = 437.6.

Conclusion. The completed study will allow the development of recommendations for the practical application of chemical-thermal treatment methods, by means of which it is possible to carry out surface hardening of parts made of 30KhGS steel, in particular the body of a road milling cutter.

Keywords: nitrocarburizing; hardening; steel; alloy; phase.

Conflict of interest: The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuznetsov K.Yu. On the issue of using nitrocarburizing for surface hardening of parts made of 30KhGS steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(2):34–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-34-44>.

Received 07.04.2025

Accepted 15.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Большая группа конструкционных легированных сталей, производимых сегодня металлургической отраслью, находит самое широкое применение. Хромокремнемарганцовая конструкционная легированная сталь 30ХГС (хромансиль), согласно ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали», содержит 0,3% углерода, поэтому является

среднеуглеродистой, особенно незаменима в производстве сложных конструкций и ответственных элементов, несущих большие нагрузки и применяемых в особых условиях, это улучшаемые детали: валы, оси, зубчатые колеса, лопадки компрессорных машин, рычаги, корпуса обшивки, тормозные ленты моторов [1].

По стоимости конструкционная легированная сталь 30ХГС ниже своих анало-

гов, например, легированной хромомолибденовой стали, т. к. молибден в большей степени закупается за рубежом, а все компоненты для хромансиля добываются в России [2].

В автомобильной промышленности стальной прокат 30ХГС используется для производства деталей трансмиссии, подвески и рулевого управления: шестерни коробок передач, подверженные высоким контактными напряжениям и износу, валы коробок передач и дифференциалов, передающие крутящий момент и подверженные изгибу и кручению, рычаги, тяги и наконечники подвески и рулевого управления, работающие в условиях переменных нагрузок и подверженные износу. Заменители стали марки 30ХГС: 40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 35ХГСА [3].

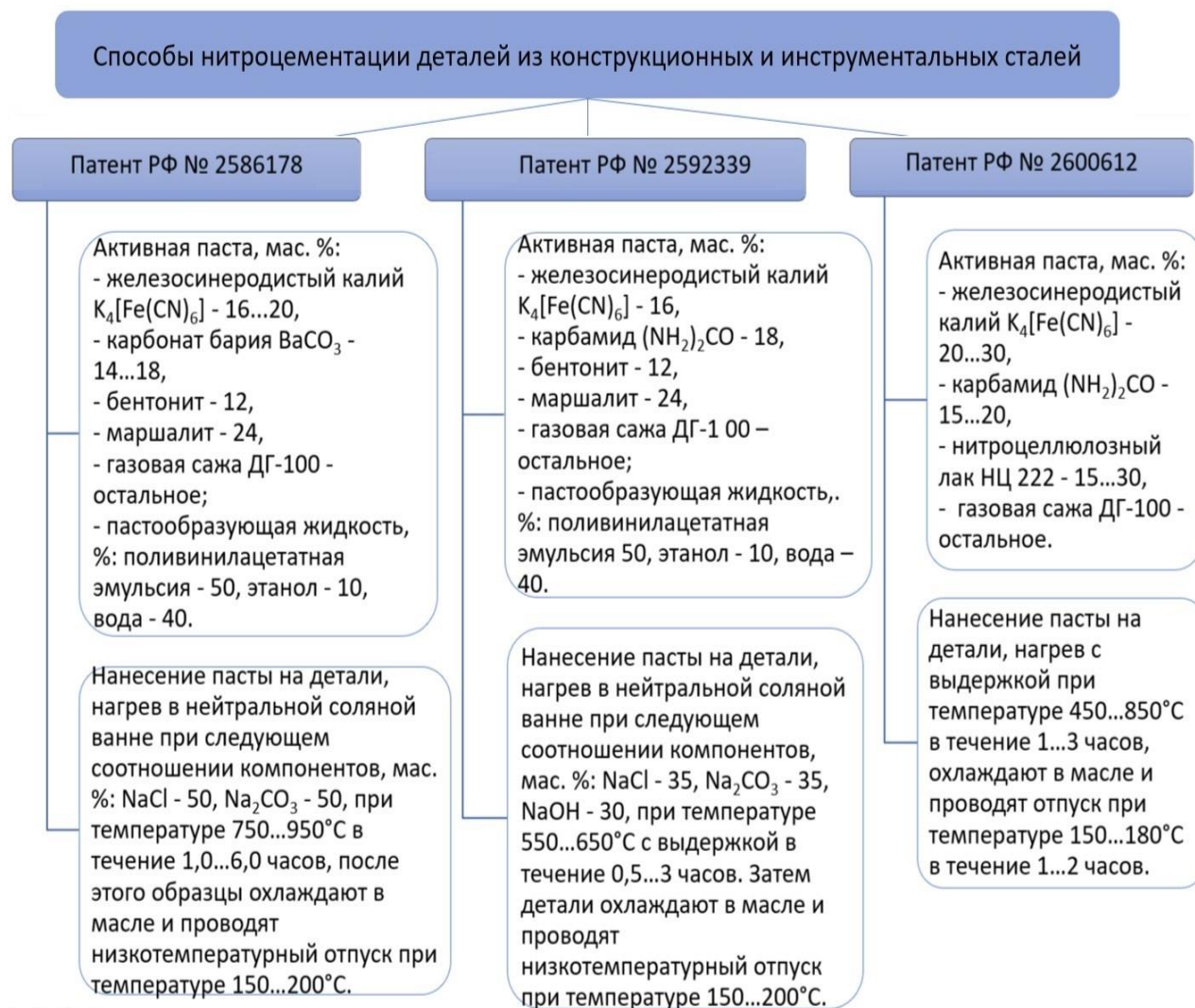
Корпуса резцов дорожных фрез [4], работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания (абразивные частицы (кварц), твердость которых составляет 10–12 ГПа, а прочность на сжатие – порядка 18–30 ГПа) [5], изготавливают из легированных конструкционных сталей (30ХГС, 30Г2 и др.) [6] штамповкой [7]. Эксплуатационные испытания дорожных резцов [8] показали, что их наработка до потери работоспособности составляет 5700–6000 м² срезаемого полотна, а их замена осуществляется через 2–3 недели (в зависимости от вида снимаемой поверхности) [9]. Вынужденный простой фрезы, вызываемый необходимостью замены изношенных резцов, составляет 7–20% от общего времени эксплуатации [9], а затраты на их замену составляют около 10% от стоимости ремонтных работ [10].

Одним из наиболее эффективных методов упрочнения поверхности конструкционных легированных сталей с целью повышения их износостойкости и, соответственно, наработки до отказа является нитроцементация с последующей термической обработкой [11].

Нитроцементация преследует цель насыщения поверхностного слоя легированной стали азотом и углеродом, что существенно улучшает устойчивость аустенита на поверхности. Известны составы смесей и паст для нитроцементации [12], особенностью которых является одновременное введение в основу добавок $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_{10})\text{Na}_2\text{N}_2$ и $(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_3\text{N}$. Продукты диссоциации смеси обеспечивают высокие углеродный и азотный потенциалы насыщающей среды в поверхностных слоях.

Известны способы нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей (рис. 1), когда готовятся активные пасты, основными ингредиентами которых являются железосинеродистый калий $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, карбонат бария BaCO_3 [13], карбамид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ [14], вспомогательные вещества и пастообразующая жидкость [15], затем эти пасты наносятся на детали, выполняется нитроцементация и последующий низкотемпературный отпуск.

При цементации или нитроцементации легированных конструкционных сталей элементами внедрения в поверхностных слоях образуется определенное количество карбидов или карбонитридов (твердые включения), здесь происходит связывание избыточных атомов углерода и азота после предельного насыщения твердого раствора. В результате такого формирования структура диффузионных (модифицированных) слоев представлена частицами твердой фазы в окружении относительно вязкой металлической матрицы, по типу спеченных металлокерамических твердых сплавов (типа ВК) [16]. Карбиды или карбонитриды в сталях после соответствующей химико-термической обработки имеют очень высокую твердость – порядка $H_{\mu} = 10$ ГПа и хорошо сопротивляются действию минеральных частиц при абразивном изнашивании [17].



Таким образом, возникает необходимость в изучении свойств самого изнашиваемого компонента дорожного резца, а именно корпуса, для дальнейшей разработки технологии химико-термической обработки с целью его упрочнения.

Целью исследования является изучение элементного и фазового составов, а также микротвердости поверхности корпуса резца дорожной фрезы марки КЗТС А6/20, изготовленного из стали 30ХГС, с целью применения нитроцементации для его поверхностного упрочнения.

Материалы и методы

С целью применения нитроцементации для поверхностного упрочнения корпуса резца дорожной фрезы возникает

необходимость в изучении его элементного, фазового составов и микротвердости.

Образцы для исследования в виде цилиндра диаметром 30–35 мм и высотой 5–8 мм (рис. 2) изготавливали из изношенных резцов А6/20 производства Кировградского завода твердых сплавов (КЗТС).

С целью определения элементного и фазового составов сплава корпуса резца поверхность образца подвергали шлифовке и полировке. Шлифовальной наждачной бумагой с крупным (60–70) и мелким зерном (220–240) проводили шлифование, периодически поворачивая образец на 90°.



Рис. 2. Резцы КЗТС А6/20 в разрезе

Fig. 2. Cutters KZTS A6/20 in section

Спектры характеристического рентгеновского излучения в точках на поверхности исследуемого образца были получены методом растровой электронной микроскопии с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в раст-

ровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG (рис. 3, а).

На дифрактометре Rigaku Ultima IV (рис. 3, б) осуществляли исследование фазового состава исследуемого образца методом рентгеновской дифракции с использованием щелей Соллера.



а



б

Рис. 3. Техническое оснащение для исследования: а – электронно-ионный сканирующий микроскоп Quanta 600 FEG; б – рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV

Fig. 3. Technical equipment for research: а – electron-ion scanning microscope Quanta 600 FEG; б – X-ray diffractometer Rigaku Ultima IV

Определение дифракционного спектра проводили по схеме θ - 2θ сканирования с фокусировкой по Брегу – Брентано в интервале углов 5–100 град. 2 θ . Программный пакет PDXL RIGAKU приме-

няли для уточнения экспериментальных рентгенограмм.

Испытание микротвердости по Виккерсу образца корпуса резца дорожной

фрезы проводили с помощью автоматизированного микротвердомера AFFRI DM-8 (рис. 4) при нагрузке на индентор 10 г, время нагружения индентора 15 с, по

десяти отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии с ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».



Рис. 4. Автоматизированный микротвердомер AFFRI DM-8

Fig. 4. Automated microhardness tester AFFRI DM-8

Результаты и их обсуждение

Результаты рентгеноспектрального микроанализа исследуемого образца кор-

пуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20 приведены на рисунке 5.

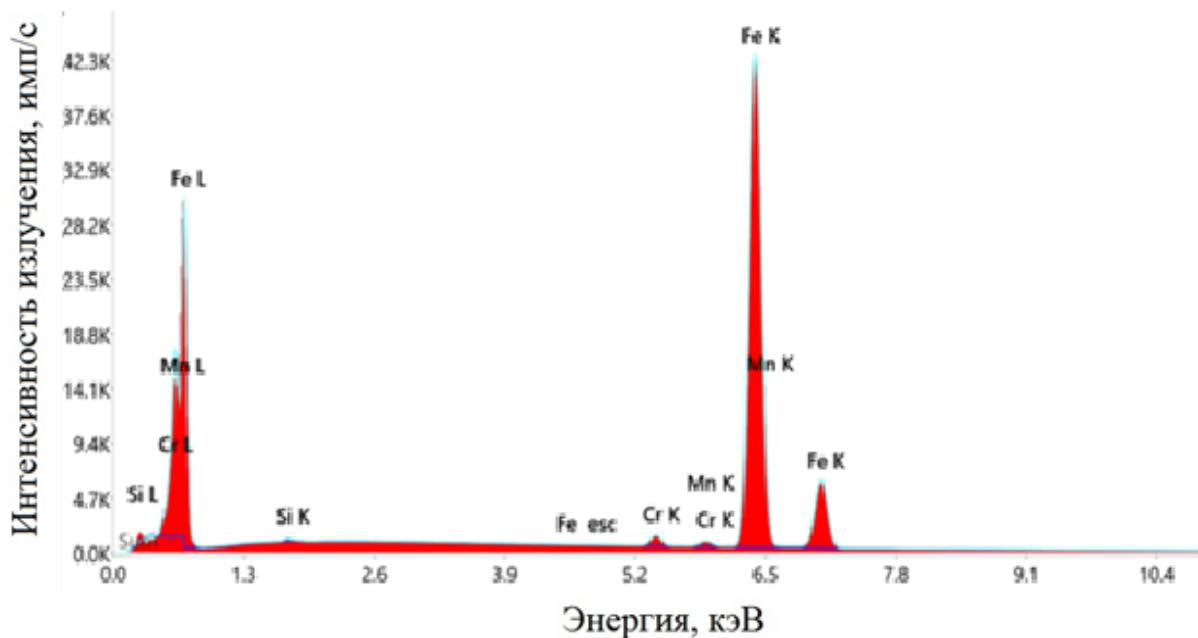


Рис. 5. Рентгенограмма (Quanta 600 FEG)

Fig. 5. X-ray diffraction pattern (Quanta 600 FEG)

Метод анализа рентгенограммы основан на регистрации и определении индивидуального рентгеновского излучения, которое формируется при взаимодействии лучей с объектом. Полученные исследования дают возможность идентифицировать элементы, входящие в состав объекта, и измерить их количество [18]. Каждая точка на графике соответствует определенному спектру рентгеновского излучения [19]. Таким образом, основными элементами исследуемого образца являются

железо, хром, марганец, кремний, а их соотношения соответствуют составу легированной конструкционной стали 30ХГС по ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали».

Результаты исследования фазового состава образца резца КЗТС А6/20 представлены в виде дифрактограммы (рис. 6), а положение и межплоскостные расстояния всех отражений представлены в таблице 1.

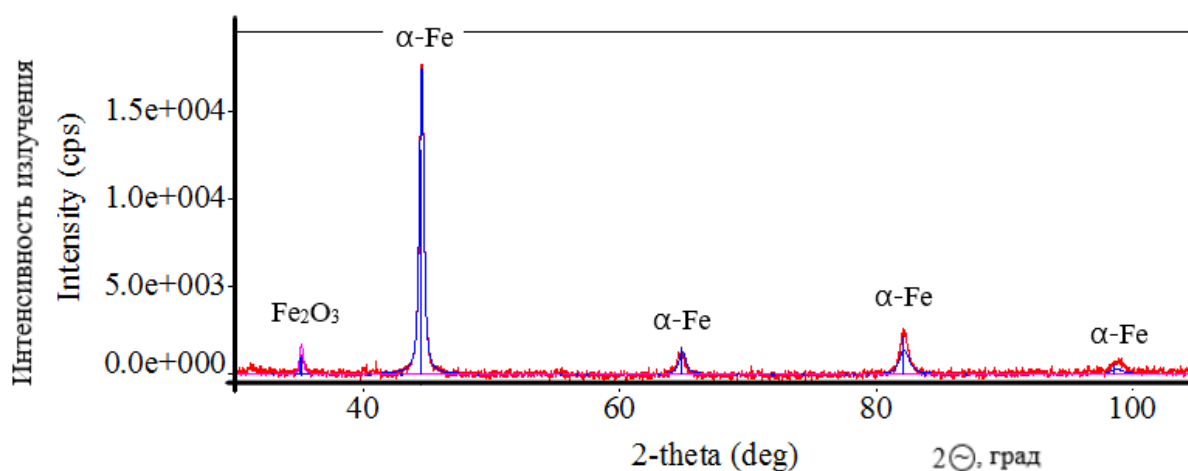


Рис. 6. Дифрактограмма образца

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of sample

Таблица 1. Положения и межплоскостные расстояния всех отражений в образце КЗТС А6/20

Table 1. Positions and interplanar distances of all reflections in the sample of KZTS A6/20

Периоды решеток, Å Lattice periods, Å	
Iron (Fe)	Hematite (Fe ₂ O ₃)
229:Im-3m кубическая кристаллическая решетка $a = b = c = 2,874711 \text{ Å}$	167:R-3c, hexagonal гексагональная кристаллическая решетка $a = b = 5,106011 \text{ Å}, c = 14,496609 \text{ Å}$

Анализ дифрактограммы выявил наличие в образце двух кристаллических фаз: α -Fe и оксид Fe_2O_3 , характеризующихся различными размерами кристаллов. Различные фазы в образце проявляются в виде уникальных пиков на рентгеновской дифрактограмме. Пики дифрак-

ции получены от кристаллических фаз образца, а расположение дифракционных максимумов (рефлексов) на дифрактограмме, их количество и интенсивность индивидуальны для атомной структуры каждого кристалла.

В объёмно-центрированной кубической кристаллической решётке α -Fe период решётки (расстояние между атомами) составляет 0,28665 нм, или 2,8665 Å.

Испытания микротвердости образца проводили с помощью АСАК микротвердости DM-8 [20] по методу микроВиккерса с нагрузкой 10 г на индентор, по 10 отпечаткам, полученным в определенных точках в соответствии с ГОСТ 9450-76. Результаты измерений показывают среднее значение (единицы измерения) $HV_{0.01} = 437,6$, или 4288,48 МПа, или 4,288 ГПа.

Согласно источникам сталь 30ХГС имеет твердость НВ ~ 2290 МПа [1]. Корпус резца дорожной фрезы из конструкционной легированной стали после закалки и среднего отпуска имеет твердость 350–400 НВ на поверхности [2]. Твердость образцов из стали 30ХГС после отжига составляет 228–232 НВ.

Сталь 30ХГС имеет относительно высокую прочность, обладая достаточно высокой ударной вязкостью: после закалки 880°C (масло) и отпуска 540°C (вода) предел прочности составляет $\sigma_B = 1080$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 835$ МПа и ударная вязкость КСИ = 440 кДж/м² [1].

Метод химико-термической обработки (нитроцементация), посредством которого можно осуществить поверхностное упрочнение дорожных резцов, а также деталей из стали 30ХГС в массовом масштабе, делает его целесообразным для обработки больших партий этих деталей.

Выводы

В результате проведенного эксперимента по изучению свойств корпуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20 с целью дальнейшей разработки технологии практического применения химико-термической обработки для упрочнения изнашиваемой поверхности установлено, что основными элементами сплава исследуемого образца являются железо, хром, марганец, кремний, а их соотношения соответствуют составу легированной конструкционной стали 30ХГС ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали».

Экспериментально установлено, что дифрактограмма указывает на присутствие в образце двух кристаллических фаз (α -Fe и Fe₂O₃), отличающихся по размеру кристаллов. В объёмно-центрированной кубической кристаллической решётке α -Fe период решётки (расстояние между атомами) составляет 0,28665 нм, или 2,8665 Å.

Определена микротвердость образца по методу микроВиккерса, результаты измерений показывают среднее значение (единицы измерения) $HV_{0.01} = 437,6$, или 4288,48 МПа, или 4,288 ГПа.

Изучение элементного, фазового составов и микротвердости исследуемого образца позволит подобрать наилучший вариант проведения нитроцементации для поверхностного упрочнения детали из стали 30ХГС.

Список литературы

1. Сергеев Н.Н., Ушаков М.В., Сергеев А.Н. Исследование коррозионной стойкости конструкционных легированных сталей в агрессивных средах // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3. С. 591–601.
2. Жигинас В.В. Износостойкость упрочненной стали 30ХГСА в условиях коррозионно-активных сред // Проблемы термической обработки. 2012. № 57. С. 117–138.
3. Муравьев В.И., Саблин П.А., Лончаков С.З. Влияние режимов термообработки и механической обработки на свойства и качество поверхности среднелегированных сталей // Металлообработка. 2015. № 4 (88). С. 7–12.

4. Резец дорожной фрезы: патент 180771 Российская Федерация / Кисель Ю.Е., Гурьянов Г.В., Кубаткина О.В., Лаптева Н.А. № 2018106391; заявл. 20.02.2018; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18. 9 с.
5. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. № 1. 2008. С. 25–29.
6. Исследование элементного состава компонентов резцов дорожной фрезы методом рентгенофлуоресцентного анализа / Л.П. Кузнецова, К.Ю. Кузнецов, В.И. Колмыков, Б.А. Семенихин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. Т. 13, № 3. 2023. С. 44–60.
7. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films / A. Wählich, C. Streeck, P. Hönicke, B. Beckhoffa // J. Anal. At. Spectrom. 2020. Vol. 35. P. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>.
8. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Методика производственных испытаний материалов резца дорожной фрезы в условиях изнашивания закрепленным абразивом // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. № 2. 155–162.
9. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Оптимизация срока службы резцов дорожной фрезы на основе технологий предварительной и восстановительной износостойкой наплавки // Конструкционные функциональные материалы. № 1. 2007. С. 69–77.
10. Оценка экономической эффективности своевременной замены резцов дорожных фрез / С.П. Осипов, А.Н. Школьный, К.Б. Бида, А.В. Мальков // Механизация строительства. № 9 (843). 2014. С. 22–25.
11. Лошкарёв Д.А., Колмыков В.И. Изучение влияния процесса нитроцементации на размеры зерна конструкционной стали // Современные проблемы и направления развития материаловедения и термической обработки металлов и сплавов: сборник научных статей 4-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова. Курск: Университетская книга, 2023. С. 89–92.
12. Состав для нитроцементации изделий из легированных сталей: патент 2314363 Российская Федерация / Тарасов А.Н., Шалагинов С.Л., Макарский В.А. № 2006126472/02; заявл. 20.07.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. 8 с.
13. Способ нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей: патент 2586178 Российская Федерация / Костин Н.А., Колмыков В.И., Костин Н.Н., Колмыков Д.В. № 2015109207/02; заявл. 16.03.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. 5 с.
14. Способ нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей: патент 2592339 Российская Федерация / Костин Н.А., Колмыков В.И., Костин Н.Н. [и др.]. № 2015111054/02; заявл. 26.03.2015; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. 6 с.
15. Способ нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей: патент 2600612 Российская Федерация / Костин Н.А., Колмыков В.И., Костин Н.Н. [и др.]. № 2015116958/02; заявл. 05.05.201; опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30. 5 с.
16. Исследование особенностей формирования диффузионных слоёв при нитроцементации высокохромистых сталей в сажево-карбонатной среде / Д.В. Колмыков, Ю.С. Воробьёв, В.И. Колмыков, Е.В. Трусова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 1. С. 30–45. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-30-45>.
17. Об использовании нитроцементованной стали 30ХГТ для резцов дорожных фрез / В.И. Колмыков, Д.Н. Романенко, К.И. Абышев, С.П. Нефедьев, Р.Р. Дема // Современные проблемы сварочного производства: сборник научных трудов / под ред. М.А. Иванова, И.А. Ильина. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. С. 290–299.

18. Рентгеноспектральный микроанализ электроискровых покрытий на основе вольфрама-содержащих электроэрозионных порошков / А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева, А.А. Горохов, А.С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3. С. 29–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-29-39>.

19. Особенности применения методов рентгеноструктурного анализа в исследовании материалов / А.А. Ковалев, Л.А. Тищенко, В.Д. Шашурин, А.Л. Галиновский // Технология металлов. 2017. № 7. С. 2–11.

20. Перевай Т.А. Измерение микротвердости по сечению наплавленного слоя методом газопорошковой наплавки // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11(95). С. 748–754.

Reference

1. Sergeev N.N., Ushakov M.V., Sergeev A.N. Study of corrosion resistance of structural alloy steels in aggressive environments. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Series: Technical sciences*. 2019;(3):591-601. (In Russ.)

2. Zhiginas V.V. Wear resistance of hardened steel 30KhGSA in corrosive environments. *Problemi tertya ta znoshuvannya = Friction and wear problems*. 2012;(57):117-138. (In Russ.)

3. Muraviev V.I., Sablin P.A., Lonchakov S.Z. The influence of heat treatment and mechanical processing modes on the properties and surface quality of medium-alloy steels. *Metalloobrabotka = Metalworking*. 2015;(4):7-12. (In Russ.)

4. Kisel Yu.E., Guryanov G.V., Kubatkina O.V., Lapteva N.A. Road milling cutter. Russian Federation patent 180771. 22 June 2018. (In Russ.)

5. Popov S.N., Antonyuk D.A. Study of the influence of external wear conditions on the wear resistance of road milling cutters. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii = New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. 2008;(1):25-29. (In Russ.)

6. Kuznetsova L.P., Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Semenikhin B.A. Study of the elemental composition of the components of road milling cutters using X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitet. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(3):44-60. (In Russ.)

7. Wählisch A., Streeck C., Hönicke P., Beckhoff B. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films. *J. Anal. At. Spectrom.* 2020;35:1664-1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>.

8. Popov S.N., Antonyuk D.A. Methodology for production testing of road milling cutter materials under conditions of wear by fixed abrasive. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. 2007;(2):155-162. (In Russ.)

9. Popov S.N., Antonyuk D.A. Optimization of service life of road milling cutters based on technologies of preliminary and restorative wear-resistant surfacing. *Konstruktsionnye funktsional'nye materialy = Structural and functional materials*. 2007;(1):69-77. (In Russ.)

10. Osipov S.P., Shkolny A.N., Bida K.B., Malkov A.V. Evaluation of the durability of rotating cutters with wear-resistant inserts of arbitrary shape. *Mekhanizatsiya stroitel'stva = Mechanization of construction*. 2014;(9):22-25. (In Russ.)

11. Loshkarev D.A., Kalmykov V.I. Study of the influence of the nitrocarburizing process on the grain size of structural steel. In: *Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoi obrabotki metallov i splavov: sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A.A. Baikova = Modern problems and directions of development of metal science and heat treatment of metals and alloys: collection of scientific articles of the 4th International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician A. N.A. Baykov*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 89-92. (In Russ.)

12. Tarasov A.N., Shalaginov S.L., Makarsky V.A. Composition for nitrocarburizing products made of alloy steels. Russian Federation patent 2314363. 10 January 2008.
13. Kostin N.A., Kolmykov V.I., Kostin N.N., Kolmykov D.V. Method of nitrocarburizing parts made of structural and tool steels. Russian Federation patent 2586178. 10 June 2016.
14. Kostin N.A., Kolmykov V.I., Kostin N.N., et al. Method of nitrocarburizing parts made of structural and tool steels. Russian Federation patent 2592339. 20 June 2016.
15. Kostin N.A., Kolmykov V.I., Kostin N.N., et al. Method of nitrocarburizing parts made of structural and tool steels. Russian Federation patent 2600612. 27 October 2016.
16. Kolmykov D.V., Vorobyev Yu.S., Kolmykov V.I., Trusova E.V. Investigation of the features of the formation of diffusion layers during nitrocementation of high-chromium steels in a carbon black medium. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2024;14(1):30-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-30-45>.
17. Kolmykov V.I., Romanenko D.N., Aбышев K.I., Nefediev S.P., Dema R.R. On the use of nitrocarburized steel 30KhGT for road milling cutters. In: Ivanova M.A., Il'ina I.A. (eds.). *Sovremennye problemy svarochnogo proizvodstva: sbornik nauchnykh trudov = Modern problems of welding production: collection of scientific papers*. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2016. P. 290-299. (In Russ.)
18. Altukhov A.Yu., Ageeva E.V., Gorokhov A.A., Osminina A.S. X-ray microanalysis of electric-spark coatings based on tungsten-containing electroerosion powders. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2018;22(3):29-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-29-39>.
19. Kovalev A.A., Tishchenko L.A., Shashurin V.D., Galinovsky A.L. Features of the application of X-ray structural analysis methods in the study of materials. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*. 2017;(7):2-11. (In Russ.)
20. Perevaj T.A. Measuring microhardness across the cross-section of the deposited layer using gas-powder surfacing. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2022; 11(95):748-754. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Кузнецов Константин Юрьевич, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Nightvol@yandex.ru,
ORCID: 0009-0007-1186-1470,
SPIN-код: 3203-2282

Konstantin Yu. Kuznetsov, Postgraduate
Student, Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: Nightvol@yandex.ru,
ORCID: 0009-0007-1186-1470,
SPIN-код: 3203-2282