

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.785.532:628.51

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-51-60>

Низкотемпературная нитроцементация штамповой стали 5ХНМ в пасте на основе карбамида и железосинеродистого калия

Н.А. Костин¹✉

¹ Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать карбюризатор для нитроцементации на основе аморфного углерода ДГ-100 и азотосодержащих компонентов – карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, железосинеродистого калия $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Исследовать особенности нитроцементации стали Х12МФ в азотоуглеродистой среде при различных температурах.

Методы. Проведены металлографический и рентгеноструктурный анализы нитроцементованных образцов с использованием электронного растрового микроскопа Quanta FEG-650 и дифрактометра ЕММА. Испытания карбонитрированных образцов на изнашивание проводились в условиях, имитирующих работу штамповых инструментов.

Результаты. Эксперименты показали, что модифицированные слои на стали 5ХНМ начинают формироваться уже при температуре 500°C. Глубина этих слоев зависит от температуры обработки: при 550°C глубина составляет около 5 мкм, а при 650°C – 15–20 мкм. Рентгеноструктурный анализ выявил наличие гексагонального карбонитрида ϵ на поверхности стали, обработанной при 550°C, и карбонитридов двух типов (ϵ -фаза и фаза, изоморфная цементиту) при 650°C. Микротвердость поверхностных слоев достигает 10 ГПа при 550°C и 8–9 ГПа при 650°C. Глубина диффузионных слоев зависит от содержания карбамида в пасте, тогда как влияние железосинеродистого калия проявляется только при температурах выше 600°C.

Заключение. Нитроцементация в высокоактивной азотисто-углеродной среде является эффективным методом упрочнения штамповых инструментов из стали 5ХНМ. При низких температурах (550°C) происходит преимущественное насыщение азотом, а при 650°C – совместное насыщение азотом и углеродом. Образующиеся карбонитридные слои обладают высокой твердостью и износостойкостью, что делает этот метод перспективным для упрочнения инструментов, работающих в условиях повышенных нагрузок.

Ключевые слова: низкотемпературная нитроцементация; штамповые стали; структура диффузионного слоя; фазовый состав; износостойкость.

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

Для цитирования: Костин Н.А. Низкотемпературная нитроцементация штамповой стали 5ХНМ в пасте на основе карбамида и железосинеродистого калия // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 51–60. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-51-60>.

Поступила в редакцию 20.01.2025

Подписана в печать 18.02.2025

Опубликована 20.03.2025

© Костин Н.А., 2025

Nitro-carburizing of die steel 5XHM in the general-purpose highly active medium

Nikolay A. Kostin¹✉

¹ Kursk State University
33 Radisheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study. To develop a carburizer for nitro-cementation based on amorphous carbon DG-100 and nitrogen-containing components - urea $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, potassium iron-sulphide $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Study the features of nitro-cementation of X12MF steel in nitrogen-carbon medium at different temperatures.

Methods. Metallographic and X-ray diffraction analyses of nitrocemented samples were carried out using Quanta FEG-650 electron scanning microscope and EMMA diffractometer. Wear tests of carbonitrided samples were carried out under conditions simulating the operation of die tools.

Results. Experiments have shown that modified layers on 5XHM steel begin to form already at 500°C. The depth of these layers depends on the processing temperature: at 550°C the depth is about 5 microns, and at 650°C - 15...20 microns. X-ray diffraction analysis revealed the presence of hexagonal carbonitride ϵ on the surface of steel treated at 550°C, and carbonitrides of two types (ϵ -phase and phase isomorphic to cementite) at 650°C. The microhardness of surface layers reaches 10 GPa at 550°C and 8...9 GPa at 650°C. The depth of diffusion layers depends on the urea content in the paste, while the influence of potassium iron-sulphide is evident only at temperatures above 600°C.

Conclusion. Nitro-cementation in a highly active nitrogen-carbon medium is an effective method of hardening of stamping tools made of 5XHM steel. At low temperatures (550°C), preferential saturation with nitrogen occurs, and at 650°C - joint saturation with nitrogen and carbon. The resulting carbonitride layers have high hardness and wear resistance, which makes this method promising for hardening tools operating under increased loads.

Keywords: low-temperature nitro-cementation; stamped steels; diffusion layer structure; phase composition; wear resistance.

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

For citation: Kostin N.A. Nitro-carburizing of die steel 5XHM in the general-purpose highly active medium. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(1):51–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-51-60>.

Received 20.01.2025

Accepted 18.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

На современном этапе развития машиностроения для создания новых машин во всё больших объёмах используются конструкционные материалы с повышенным уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств [1]. При этом инструментальные материалы, которыми располагает производство, зачастую не позволяют осуществлять высокопроизводительную обработку заготовок. В связи

с этим в настоящее время разрабатываются инструментальные материалы, в том числе штамповые стали, с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также технологические приёмы, позволяющие эффективно упрочнять штамповые инструменты из традиционных сталей [2].

Одной из самых распространённых сталей в практике инструментального производства является среднеуглеродистая хромоникелемолибденовая сталь

5ХНМ (ГОСТ 5950-2000), которая отличается достаточно высокими физико-механическими свойствами и относительно небольшой ценой, ~ 220 тыс. руб./т, которая сопоставима с ценой многих конструкционных сталей (например, стали 30ХГСА ~ 203 тыс. руб./т) [3].

Сталь 5ХНМ широко применяется для изготовления большой номенклатуры инструментов горячего деформирования, таких как молотовые и прессовые штампы, штампы скоростной машинной штамповки, матрицы и вставки горизонтально-ковочных машин и многих других [4]. Инструменты из этой стали подвергаются достаточно простой термической обработке (закалке с 850°C в масле и отпуску при 500...550°C), что обеспечивает высокую прочность ($\sigma_{0,2} \geq 600$ МПа) и достаточно высокую ударную вязкость ($KCU \geq 30$ Дж/см²), однако твёрдость таких инструментов не превышает HRC 40...42. Эта твёрдость во многих случаях недостаточна для обеспечения высокой износостойкости инструментов, поэтому целесообразно подвергать их дополнительному поверхностному упрочнению [5].

Для такого упрочнения к настоящему времени разработано много методов, связанных с нанесением на рабочие поверхности инструментов различных износостойких покрытий, а также с созданием на поверхностях модифицированных слоёв повышенной твёрдости и износостойкости методами химико-термической обработки [6].

Нитроцементация проводится в качестве окончательной обработки после закалки и механической обработки в режиме так называемого «мягкого азотирования», когда поверхность стали насыщается главным образом азотом и в весьма небольшой степени углеродом [7].

Инструменты или их элементы упрочняются путём погружения их в ванну, содержащую 40% цианата калия KCN и 60% цианата натрия $NaCN$ и

разогретую до температуры 560...580°C. Длительность карбонитрации составляет 30...180 мин при продувании ванны сухим воздухом для ускорения окисления и диссоциации солей [8].

Однако этот метод поверхностного упрочнения, несмотря на высокую эффективность, имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих его применение. Главным недостатком является высокая токсичность компонентов цианистой ванны, что требует устройства эффективной системы вентиляции и системы утилизации отработанных солей и промывочной воды. Кроме того, цианистые соли весьма дороги и дефицитны. Цианистые ванны непригодны для упрочнения крупногабаритных изделий, т. к. имеют ограниченные размеры, а также непригодны для локального упрочнения инструментов [9].

Для поверхностного упрочнения штамповых инструментов целесообразно использовать насыщающую среду, которая была бы такой же эффективной, как цианат, – цианидные расплавы, но была бы технологичной и экологически безопасной для работы в условиях мелкосерийного производства.

Вышеназванным требованиям в полной мере отвечает нитроцементующая среда в виде пасты (обмазки) на основе азотосодержащих компонентов. Нитроцементующую пасту можно наносить на любые поверхности самых различных инструментов, как, впрочем, и других стальных деталей, имеющих различные размеры и формы, а также наносить на отдельные места стальных изделий, требующих упрочнения [10].

Цель работы – исследование влияния состава нитроцементующей пасты на насыщение стали 5ХНМ азотом и углеродом при низких температурах (550...650°C) и формирование структуры и фазового состава поверхностных слоёв.

Материалы и методы

Для проведения научных исследований выбрали образцы из стали 5ХНМ. Химический состав образцов исследовали на оптико-эмиссионном спектрометре OBLF VeOS. Результаты исследования представлены ниже при следующем соотношении, мас. %: С 0,58; Мн 0,78; Si 0,21; Мо 0,25; Ni 1,77; Fe 96,41.

Для проведения нитроцементации готовили специальную пасту путем смешивания карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, железосинеродистого калия $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, газовой сажи ДГ-100. Далее компоненты разводили лаком НЦ-222 и наносили полученную пасту на образцы-детали [11].

Подготовленные образцы с сухим покрытием на поверхности деталей упаковывали в герметичный контейнер и проводили нитроцементацию при различных температурах.

Нитроцементирующая среда будет проявлять активность в широком диапазоне температур: так нитроцеллюлозный лак начинает разлагаться при температуре $\sim 200^\circ\text{C}$, карбамид начнет выделять активный азот уже при 450°C , железосинеродистый калий начнет выделять азот и углерод при $600\dots 650^\circ\text{C}$ и,

наконец, сажа при каталитическом действии продуктов реакций распада двух первых компонентов будет генерировать активный углерод при повышенных температурах, вплоть до 950°C [12].

Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента по нитроцементации стали 5ХНМ в высокоактивной пасте на основе аморфного углерода (сажи) с добавками азотсодержащих компонентов (карбамида и железосинеродистого калия) показали, что модифицированные слои на этой стали начинают формироваться уже при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$, слои проявляются в виде светлых нетравящихся фаз на поверхности стали, а их глубина зависит от температуры нитроцементации [13]. На рисунке 1 показаны микроструктуры поперечных шлифов образцов стали 5ХНМ, нитроцементованных в пасте, содержащей 20% карбамида и 10% железосинеродистого калия (остальное – сажа) при двух температурах: 550°C (в режиме мягкого азотирования) и 650°C (в режиме азотонауглероживания). Длительность нитроцементации в обоих случаях 4 часа.

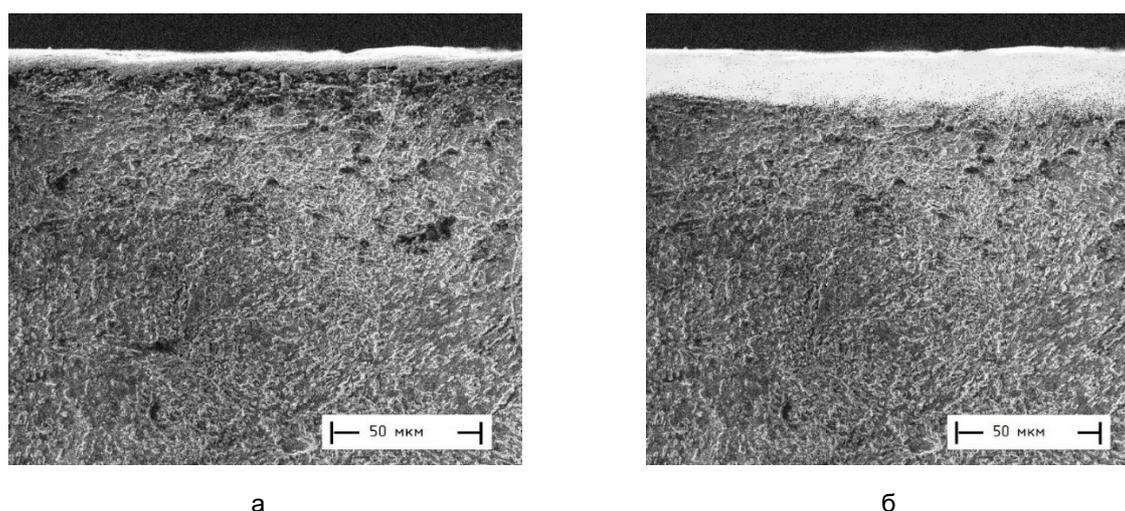


Рис. 1. Микроструктуры поверхности стали 5ХНМ, нитроцементованной при разных температурах: а – температура 550°C ; б – температура 650°C

Fig. 1. Microstructures of the surface of 5KhNM steel, nitrocarburized at different temperatures: а – temperature 550°C ; б – temperature 650°C

На рисунке видно, что на поверхности стали, нитроцементованной при обеих исследованных температурах, образовались диффузионные слои, имеющие идентичное строение: на поверхности имеется светлая (нетравящаяся) зона, под которой имеется тёмный (травящийся) гетерофазный слой. При этом глубина поверхностных зон сильно зависит от температуры нитроцементации. На образце, нитроцементованном при 550°C, глубина светлой зоны составляет ~5 мкм (см. рис. 1, а), на образце, нитроцементованном при 650°C, глубина светлой зоны составляет 15–20 мкм, т. е. в 3–4 раза больше (см. рис. 1, б).

Рентгеноструктурный анализ тех же образцов (рис. 2) показал, что поверхност-

ный слой стали, нитроцементованной при пониженной температуре (550 °С) содержит гексагональный карбонитрид ϵ (рис. 2, а), изоморфный с одноимённым нитридом (ϵ -фазой), который встречается в диффузионных слоях сталей, азотированных в аммиаке. Более глубокий диффузионный слой, полученный при температуре 650°C, содержит карбонитридные фазы двух видов: гексагональную ϵ -фазу и фазу с орторомбической кристаллической решёткой, изоморфную с цементитом (рис. 2, б). Кроме того, в нитроцементованных слоях стали 5ХНМ присутствует то или иное количество α -железа, по-видимому, азотистого феррита.

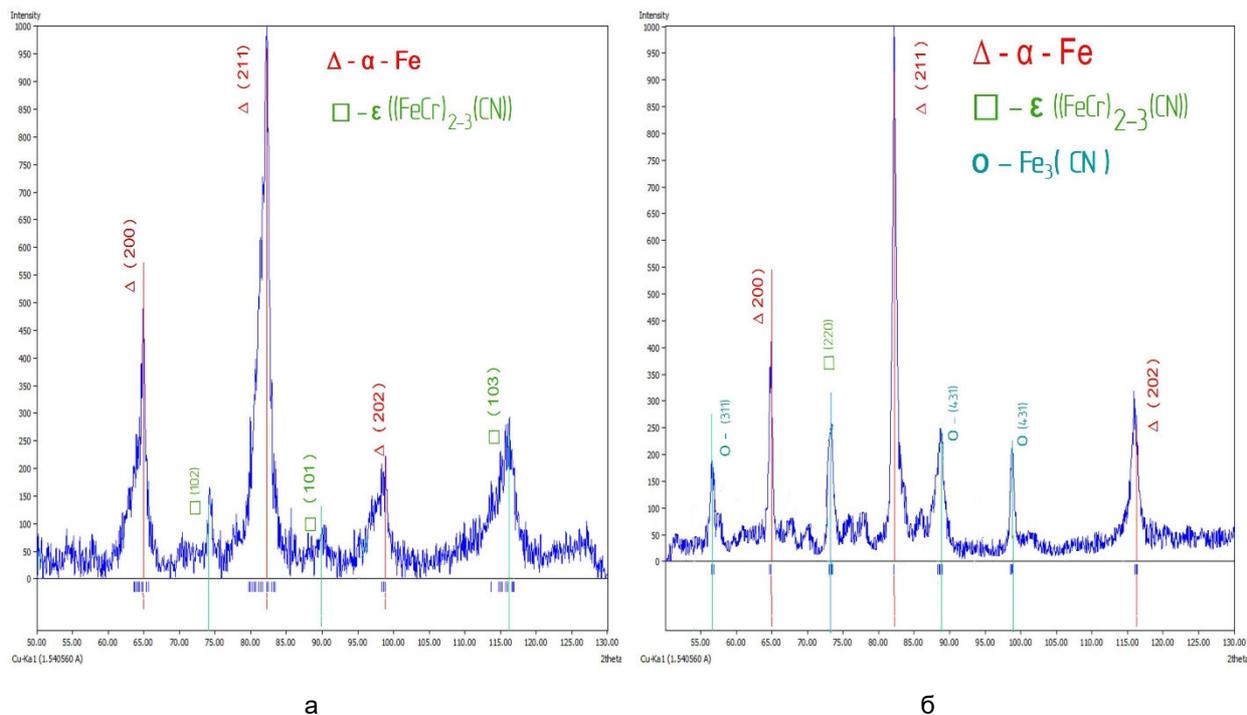


Рис. 2. Элементы дифрактограмм, снятых с поверхности образцов стали 5ХНМ, нитроцементованных при разных температурах: а – температура 550°C; б – температура 650°C

Fig. 2. Elements of diffraction patterns taken from the surface of 5KhNM steel samples nitrocarburized at different temperatures: а – temperature 550°C; б – temperature 650°C

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что при пониженной температуре нитроцементации (550°C) происходит преимущественное насыщение штамповой стали азотом. При этом такой процесс идёт с

большой скоростью, гораздо большей (примерно на порядок), чем при традиционном газовом азотировании в аммиаке. При повышенной температуре обработки (650°C) в азотисто-углеродной пасте поверхность стали насыщается как азотом,

так и углеродом, т. е. идёт процесс собственно нитроцементации (азотонауглероживания) [14].

Карбонитридная зона, образующаяся при низкой температуре (ϵ -карбонитрид) имеет микротвёрдость $H_{\mu} \geq 10$ ГПа, а карбонитридная зона, образующаяся при повышенной температуре (карбонитрид ϵ + карбонитрид, изоморфный с цементитом), имеет микротвёрдость $H_{\mu} = 8 \dots 9$ ГПа. Высокая твёрдость карбонитридных слоёв на поверхности нитроцементованной зоны

обеспечивает высокий упрочняющий эффект (повышение износостойкости), причём во втором случае этот эффект должен быть выше за счёт большей глубины карбонитридных слоёв.

Глубина диффузионных слоёв, получаемых при низкотемпературной нитроцементации стали 5ХНМ, как показывают наши эксперименты, сильно зависит от концентрации азотсодержащих компонентов в пасте, особенно от содержания в ней карбамида (рис. 3).

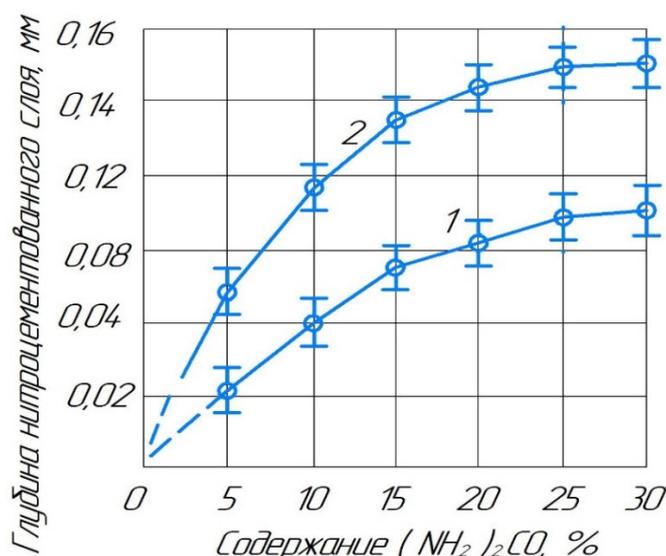


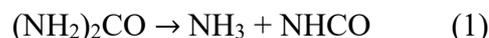
Рис. 3. Зависимости глубины нитроцементованных слоёв стали 5ХНМ от содержания карбамида в пастообразной среде: 1 – температура нитроцементации 550°C; 2 – температура нитроцементации 650°C

Fig. 3. Dependences of the depth of nitrocarburized layers of 5KhNM steel on the content of urea in a paste-like medium: 1 – nitrocarburizing temperature 550°C; 2 – nitrocarburizing temperature 650°C

Что касается такого азотсодержащего компонента нитроцементующей среды, как железосинеродистый калий, то его влияние на интенсивность нитроцементации штамповой стали гораздо меньше, чем карбамида. Это влияние проявляется только при повышенных температурах (выше 600°C) и то незначительно.

Механизм действия исследуемой нитроцементующей среды на насыщение поверхности стали азотом и углеродом, как можно судить по полученным экспериментальным данным, следующий. При нагреве нитроцементующей пасты карба-

мид, присутствующий в её составе, начинает разлагаться уже при температуре 200°C по следующей реакции [9]:



В результате этой реакции выделяется газообразный аммиак и остаётся твёрдая изоциановая кислота (NHCO), которая не участвует в дальнейших реакциях. Аммиак диссоциирует на поверхности стали, которая является катализатором, и атомарный азот тут же поглощается металлом. При температурах 550...560°C скорость реакции (1) достигает максимума,

что обуславливает максимальную эффективность насыщающей среды по азоту.

Железосинеродистый калий, присутствующий в составе предлагаемой среды, начинает разлагаться при температуре ~ 550°C:



Активные атомы азота и углерода поглощаются поверхностью стали, а твёрдые остатки (Fe_3C и KCN) не участвуют в низкотемпературных реакциях, оставаясь в виде наночастиц в толще аморфного углерода (сажи).

Таким образом, нитроцементующая среда будет интенсивно выделять азот при температурах 500...600°C за счёт распада карбамида и обеспечивать быстрое насыщение стали азотом в режиме мягкого азотирования [15]. При повышении температуры генерирования азота карбамидом будет сокращаться по мере его израсходования, однако активизируется диссоциация железосинеродистого калия, выделяющего большие количества азота, а также активного углерода. В результате будет поддерживаться высокая скорость нитроцементации при температурах выше 600°C, в режиме азотонауглероживания.

На основе проведённых исследований предлагается нитроцементующая среда следующего состава, мас. %:

– карбамид $(NH_2)_2CO$ – 60%;

– железосинеродистый калий $K_4Fe(CN)_6$ – 20%;

– аморфный углерод (сажа газовая) ДТ 100 – 20%;

– поливинилацетатная эмульсия (раствор клея ПВА) ~ 20% от массы твёрдых компонентов, до консистенции густой пасты.

В пасте предлагаемого состава скорость нитроцементации штамповой стали 5ХНМ составляет при температуре 650°C 0,11...0,15 мм/ч. Эта скорость сравнима со скоростью карбонитрации штамповых сталей в цианат-цианидной ванне.

На рисунке 4 представлено распределение микротвёрдости по сечению нитроцементованных слоёв на стали 5ХНМ, полученных обработкой при различных температурах. Максимальная микротвёрдость $H_{\mu} 1160$ наблюдается на поверхности стали, нитроцементованной при $T = 550^\circ C$, когда на поверхности формируется сплошной слой (корка) твёрдого ϵ -карбонитрида.

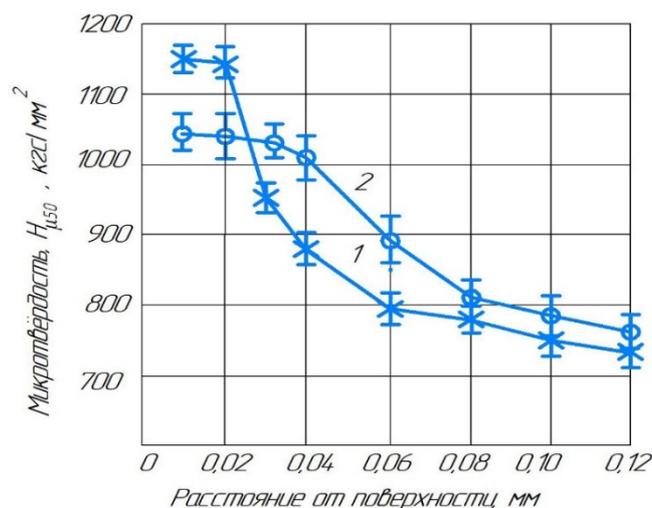


Рис. 4. Распределение микротвёрдости по сечению диффузионных слоёв стали 5ХНМ, нитроцементованной при температурах: 1 – при 550°C; 2 – при 650°C

Fig. 4. Distribution of microhardness across the cross-section of diffusion layers of 5KhNM steel, nitrocarburized at temperatures: 1 – at 550°C; 2 – at 650°C

Глубина этой зоны совпадает с толщиной корки ε -карбонитрида. Нитроцементация при $T = 650^\circ\text{C}$ приводит к снижению микротвёрдости на поверхности $H_{\mu} 1050$, что связано, по-видимому, с наличием в структуре карбонитридной зоны, наряду с ε -фазой карбонитрида, изоморфного с цементитом, который имеет меньшую твёрдость, чем ε -карбонитрид [16; 17].

Зоны с повышенной твёрдостью в сечении диффузионных слоёв имеют глубину, соизмеримую с глубиной карбонитридных слоёв в их структуре. В обоих случаях под коркой карбонитридов наблюдается постепенное снижение микротвёрдости до $H_{\mu} 700\dots 800$, что соответствует азотистому мартенситу, а к сердцевине

микротвёрдость уменьшается до постоянных значений $\sim H_{\mu} 600$.

Выводы

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы: нитроцементация в высокоактивной азотисто-углеродной среде является эффективным методом упрочнения штамповых инструментов из стали 5ХНМ. При низких температурах (550°C) происходит преимущественное насыщение азотом, а при 650°C – совместное насыщение азотом и углеродом. Образующиеся карбонитридные слои обладают высокой твердостью и износостойкостью, что делает этот метод перспективным для упрочнения инструментов, работающих в условиях повышенных нагрузок.

Список литературы

1. Адашкин А.М. Инструментальные материалы в машиностроении. Москва: НИЦ Инфра–М, 2024. 391 с.
2. *Материаловедение* / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]. 8-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 646 с.
3. Околович Г.А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. 202 с.
4. *Металлы и сплавы: справочник* / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб.: АНО НПО Профессионал, 2003. 1066 с.
5. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки: монография. Минск: БИТУ, 2006. 198 с.
6. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 520 с.
7. Иванов А.С., Богданова М.В. Оптимизация технологии цементации и термической обработки низкоуглеродистых мартенситных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 2. С. 59–62.
8. Тельдеков В.А., Гуревич Л.М. Исследование технологии низкотемпературной нитроцементации для комплексного упрочнения деталей машин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 10 (257). С. 64–68.
9. Костин Н.А. Нитроцементация штамповой стали 5ХНМ в универсальной высокоактивной среде // *Машиностроение и инженерное образование*. 2015. № 4. С. 21–26.
10. Костин Н.А., Трусова Е.В. Исследование насыщающей способности азотирующей пасты при низких и высоких температурах нитроцементации штамповой стали // *Учёные записки: электронный журнал Курского государственного университета*. 2013. № 1. С. 80–86.
11. Kostin N.A. Pack cyaniding of steel 6KH4M2FS in order to increase heavily-loaded die durability // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62, no. 5–6. P. 331-335.

12. 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.
13. 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. 05.05.2015; опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30. 5 с.
14. Костин Н.А. Особенности закалки штамповых сталей 5ХГС и 5ХЗГС, науглероженных до заэвтектоидных концентраций // Черные металлы. 2020. № 5. С. 31–36.
15. Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // Научно-технические проблемы машиностроения. 2020. № 6(108). С. 3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-6-3-11>.
16. Бегатов Ж., Джалилова М. Влияние режимов низкотемпературной нитроцементации на структуру и свойства стали 4ХМФС // Belarusian-Uzbek Scientific and Methodological Journal. 2022. Vol. 1, no. 2. P. 45-48.
17. Костин Н.А. Повышение эксплуатационных свойств штамповой стали 5Х2ГФ путём создания карбонитридных слоёв химико-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 8. С. 19–22.

Reference

1. Adaskin A.M. Instrumental materials in mechanical engineering. Moscow: SIC Infra-M; 2024. 391 p. (In Russ.)
2. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G., et al. Materials science: a textbook for universities. 8th ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2008. 646 p. (In Russ.)
3. Okolovich G.A. Stamped steels for cold deformation of metals. 2nd ed. Barnaul: Izd-vo AltGTU; 2010. 202 p. (In Russ.)
4. Solntsev Yu.P. (ed.) Metals and alloys. St.-Petersburg: ANO NPO Professional; 2003; 1066 p. (In Russ.)
5. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. Theory and technology of chemical and thermal treatment. Minsk: BITU; 2006. 198 p. (In Russ.)
6. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys. 2nd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2014. 520 p. (In Russ.)
7. Ivanov A.S., Bogdanova M.V. Optimization of the technology of cementation and heat treatment of low-carbon martensitic steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallology and heat treatment of metals*. 2016;(2)59-62. (In Russ.)
8. Teldekov V.A., Gurevich L.M. Investigation of low-temperature nitro cementation technology for complex hardening of machine parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2021;(10):64-68. (In Russ.)
9. Kostin N.A. Nitro cementation of stamp steel 5XHM in a universal highly active. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Machine Building and Engineering Education*. 2015;(4):21-26. (In Russ.)
10. Kostin N.A., Trusova E.V. Investigation of the saturating ability of nitriding paste at low and high temperatures of nitro cementation of stamped steel. *Uchenye zapiski: elektronnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific notes: electronic journal of Kursk State University*. 2013;(1):80-86. (In Russ.)
11. Kostin N.A. Pack cyaniding of steel 6KH4M2FS in order to increase heavily-loaded die durability. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020;62(5–6):331-335.

12. Kostin N.A., Kolmykov V.I., Kostin N.N., et al. Method of nitrocementation of structural and tool steel parts. Russian Federation patent 2592339. 20 July 2016.

13. Kostin N. A., Kolmykov V.I., Kostin N.N., et al. Method of nitrocementation of structural and tool steel parts. Russian Federation patent 2600612. 27 October 2016.

14. Kostin N.A. Features of quenching die steels 5XGS and 5X3GS, carbonized to hypereutectoid concentrations. *Chernye metally = Ferrous metals*. 2020;(5):31-36. (In Russ.)

15. Petrova L.G., Sergeeva A.S. Control of the phase composition of austenitic steels during surface hardening by high-temperature nitriding. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High-tech technologies in mechanical engineering*. 2020;(68):3-11. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-6-3-11>.

16. Begatov J., Jalilova M. The influence of low-temperature nitrocementation modes on the structure and properties of 4HMFS steel. *Belarusian-Uzbek Scientific and Methodological Journal*. 2022;1(2):45-48. (In Russ.)

17. Kostin N.A. Improving the performance properties of 5X2GF die steel by creating carbonitride layers by chemical-thermal treatment. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallology and heat treatment of metals*. 2016;(8):19-22. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Костин Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Nikolay A. Kostin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru