

УДК 621.785.532

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-21-33>



Энергосберегающая и экологически безопасная технология карбонитрации быстрорежущих сталей в соляных ваннах на основе карбамида

Н.Н. Костин^{1✉}, В.И. Колмыков¹, Н.А. Костин²

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

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Резюме

Цель. Исследование процесса цианирования быстрорежущей стали марки Р6М5 в ваннах на основе карбамида и углекислого натрия в температурном диапазоне 550–580°C.

Методы. Микроструктура диффузионного слоя сталей была изучена на поперечных шлифах с применением растрового электронного микроскопа Quanta FEG-650, оснащённого системой микроанализа EBCD с фокусированным ионным пучком. Данная методика позволила провести детальную визуализацию и анализ фазового состава и морфологии поверхностных слоёв. Для оценки эксплуатационных характеристик цианированных образцов были проведены испытания на изнашивание в условиях, имитирующих трение при работе режущего инструмента. Тестирование выполнялось с целью установления корреляции между микроструктурными особенностями диффузионного слоя и его устойчивостью к абразивному воздействию.

Результаты. Проведённые эксперименты подтвердили значительную эффективность нового состава соляной ванны для цианирования быстрорежущей стали Р6М5 при заданных температурных условиях. В процессе обработки на поверхности материала формируются модифицированные слои, обогащённые ε-фазами (твёрдыми включениями), которые обеспечивают уникальные эксплуатационные характеристики: повышенную микротвёрдость, сниженный коэффициент трения и устойчивость к износу.

Заключение. Установлена возможность применения бесцианистых соляных ванн для низкотемпературного цианирования стали Р6М5, что расширяет технологические возможности инструментального производства. Сочетание высокой износостойкости и твёрдости обработанной стали делает метод перспективным для изготовления режущего инструмента и деталей, работающих в условиях интенсивных нагрузок. Результаты исследования демонстрируют, что использование разработанного состава позволяет не только улучшить качество цианированных слоёв, но и внедрить ресурсосберегающие технологии в промышленность, сохраняя при этом высокие стандарты экологической безопасности.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь; низкотемпературное цианирование; структура диффузионного слоя; фазовый состав.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Костин Н.Н., Колмыков В.И., Костин Н.А. Энергосберегающая и экологически безопасная технология карбонитрации быстрорежущих сталей в соляных ваннах на основе карбамида // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 21–33. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-21-33>.

Поступила в редакцию 24.02.2025

Подписана в печать 28.04.2025

Опубликована 30.06.2025

Energy-saving and environmentally safe technology of urea-based carbonitration of high-speed steels in salt baths

Nikolay N. Kostin^{1✉}, Valery I. Kolmykov¹, Nikolay A. Kostin²

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

² Kursk State University
33 Radishchev Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Abstract

Purpose. A study was conducted on the cyanidation of R6M5 high-speed steel using baths composed of urea and sodium carbonate within the temperature range of 550–580°C.

Methods. The microstructure of the diffusion layer of steels was studied on cross sections using a Quanta FEG-650 scanning electron microscope equipped with an EBSD microanalysis system with a focused ion beam. This technique allowed for detailed visualization and analysis of the phase composition and morphology of the surface layers. To evaluate the performance characteristics of the cyanidized samples, wear tests were performed under conditions simulating friction during cutting tool operation. Testing was performed to establish a correlation between microstructural features of the diffusion layer and its resistance to abrasive action.

Results. The conducted experiments confirmed the significant efficiency of the new salt bath composition for cyanidation of high-speed steel P6M5 under the given temperature conditions. In the process of treatment, modified layers enriched with ϵ -phases (solid inclusions) are formed on the surface of the material, which provide unique performance characteristics: increased microhardness, reduced friction coefficient and resistance to wear.

Conclusion. The possibility of using cyanide-free salt baths for low-temperature cyanidation of P6M5 steel has been established, which expands the technological possibilities of tool production. The combination of high wear resistance and hardness of the treated steel makes the method promising for manufacturing of cutting tools and parts operating under intensive loads. The results of the study demonstrate that the use of the developed composition allows not only to improve the quality of cyanided layers, but also to introduce resource-saving technologies in industry, while maintaining high standards of environmental safety.

Keywords: high-speed steel; low-temperature cyanidation; diffusion layer structure; phase composition.

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

For citation: Kostin N.N., Kolmykov V.I., Kostin N.A. Energy-saving and environmentally safe technology of urea-based carbonitration of high-speed steels in salt baths. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(2):21–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-21-33>.

Received 24.02.2025

Accepted 28.04.2025

Published 30.06.2025

Введение

В современном машиностроении инструменты из быстрорежущих сталей, такие как резцы, фрезы и свёрла, остаются незаменимыми благодаря их износостойкости и прочности. Наиболее распространёнными материалами для их производства служат вольфрамомолибденовые марки Р6М5 и Р6М3. Однако для повышения эксплуатационных характеристик

этих инструментов требуются дополнительные методы обработки, среди которых выделяются азотирование и низкотемпературное цианирование, направленные на насыщение поверхности углеродом и азотом [1].

Традиционно для химико-термической обработки инструментов применялись соляные ванны, обладающие рядом преимуществ. Во-первых, это высокая

скорость и равномерность нагрева, исключая окисление поверхностей. Во-вторых, повышенная активность насыщающей среды, превосходящая эффективность газовых и твёрдых аналогов [2].

Несмотря на эти достоинства классическая технология карбонитрации в цианистых расплавах, разработанная в середине XX в., сегодня практически не используется из-за экологических рисков. Высокая токсичность цианидов делает процесс опасным для персонала и окружающей среды, что требует поиска альтернативных решений [3].

Актуальной задачей является разработка безопасных составов для низкотемпературной обработки, сохраняющих упрочняющий эффект цианирования [4]. Перспективным направлением стало использование карбамида (мочевины) в качестве азотсодержащего компонента соля-

ных ванн. Его главные преимущества – низкая токсичность и доступность, что делает его пригодным для внедрения в производственные процессы [5]. Исследования подтверждают потенциал карбамидных ванн для насыщения поверхности быстрорежущих сталей азотом, однако требуют оптимизации параметров обработки [6].

Целью данного исследования является анализ особенностей процесса низкотемпературного цианирования инструментов из стали Р6М5, проводимого в солевых ваннах с применением карбамида.

Материалы и методы

В качестве исследуемого материала использовалась быстрорежущая сталь Р6М5 [7]. Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73)

Table 1. Chemical composition of high-speed steel P6M5 (GOST 19265-73)

Элемент	Массовая доля, %	Элемент	Массовая доля, %
С	0,9	Ni	до 0,4
W	6,2	Co	до 0,5
Mo	5,1	S	до 0,025
Cr	4,2	P	до 0,03
V	2,0		

Цианирование проводили в лабораторной шахтной электропечи СШОЛ-12-МЗ-Ц4 с размерами рабочего пространства $\phi 115 \times 250$ мм.

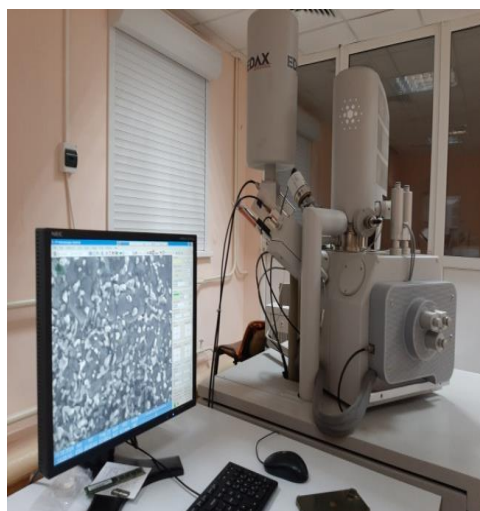
Для приготовления ванны применяли солевую смесь, расплавляемую в стальном тигле диаметром 80 мм и высотой 150 мм. Предварительно взвешенные солевые порции тщательно перемешивали и загружали в тигель. Ёмкость с подготовленной смесью помещали в холодную печь, после чего запускали постепенный нагрев со скоростью около $150^{\circ}\text{C}/\text{час}$. Медленный температурный режим позволил минимизировать пенообразование,

возникавшее в ходе химических реакций между компонентами при переходе смеси из порошкообразного состояния в жидкое.

После полного расплавления солей и достижения требуемой температуры проводили стабилизацию (старение) ванны в течение 2–3 часов. Затем в расплав погружали исследуемые образцы, предварительно нагретые в муфельной печи ТП-2 до $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ [8]. Выдержка образцов в цианирующей ванне осуществлялась строго по заданному времени, а температура контролировалась электронным потенциометром с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$ [9].

Для анализа микроструктуры на цианированных образцах механическим способом изготавливали поперечные микрошлифы. Структуру выявляли методом травления в 4%-ном растворе азотной

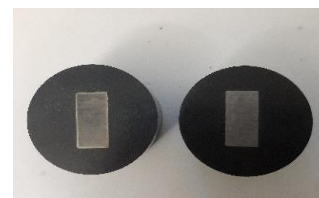
кислоты в этаноле. Исследование проводили на растровом электронном микроскопе Quanta FEG-650 с системой рентгеновского микроанализа EDAXM2 (рис. 1).



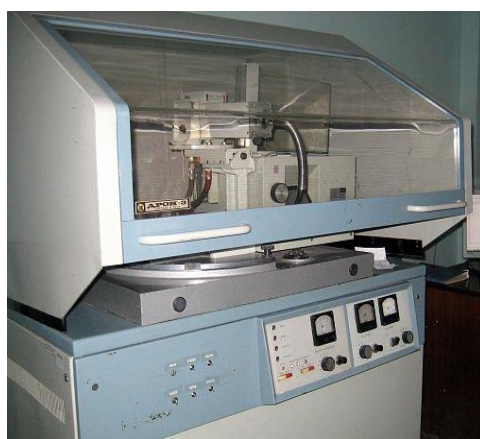
а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Оборудование для исследования цианированных образцов быстрорежущей стали P6M5: а – сканирующий электронный микроскоп – Qanta FEG-650; б – установка для подготовки микрошлифов; в – образцы, подготовленные для металлографического анализа и рентгеноструктурного исследования; г – рентгеновский дифрактометр – ДРОН-3; д – микротвердомер – ПМТ-3; е – твердомер по Виккерсу – KBW-10V

Fig. 1. Equipment for the study of cyanidized samples of high-speed steel P6M5: а – scanning electron microscope - Qanta FEG-650; б – unit for preparation of microsurfaces; в – samples prepared for metallographic analysis and X-ray diffraction study; г – X-ray diffractometer DRON-3; д – microhardness tester PMT-3; е – Vickers hardness tester KBW-10V

Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в медном $K\alpha$ -излучении. Микротвёрдость измеряли в соответствии с ГОСТ 9450 на микротвердомере ПМТ-3М, а твёрдость – на твердомере Виккерса KBW-10V с автоматическим измерением отпечатка по ГОСТ 2999.

Красностойкость определяли путём измерения твёрдости образцов из стали Р6М5 путём измерения твёрдости после нагрева и выдержки при повышенных температурах.

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что цианированные слои на быстрорежущей стали, полученные обработкой в расплавах азотсодержащих солей, имеют две чётко различимые зоны. Непосредственно на поверхности имеется тонкая светлая зона в виде нетравящейся

полоски, а под ней – глубокий тёмный слой с мелкими светлыми включениями (рис. 2). Рентгеновская съёмка, проведённая с цианированной поверхности образцов стали Р6М5, показала, что в поверхностном слое глубиной ~ 10 мкм (глубина рентгеноотражающего слоя) обнаруживаются такие карбонитридные фазы, как гексагональная ϵ -фаза $Fe_{2-3}(CN)$, изоморфная с одноимённым нитридом, ортогональная ζ -фаза $Fe_3(CN)$, изоморфная с цементитом, и ОЦК фаза α -Fe, изоморфная с ферритом (рис. 3).

Поскольку быстрорежущая сталь Р6М5 содержит большое количество легирующих элементов, в металлической части карбонитридов присутствует не только железо, но и легирующие элементы [10]. Об этом свидетельствует некоторое изменение углов скольжения на дифрактограмме по сравнению с чистым железом [11].

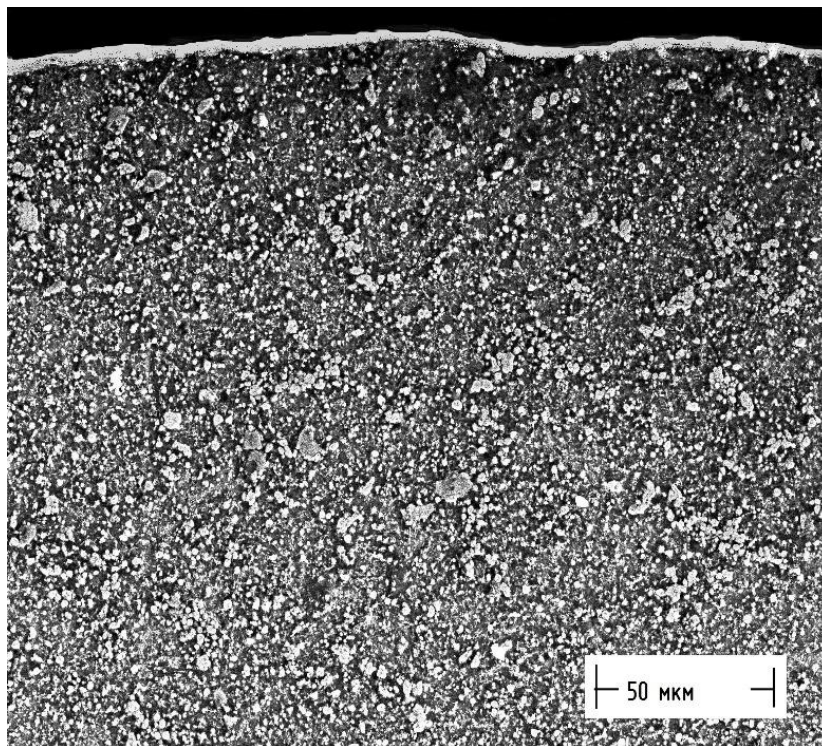


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя стали Р6М5, сформированного методом цианирования в карбамидно-натриевой ванне при температуре 560°C в течение двух часов

Fig. 2. Microstructure of diffusion layer of P6M5 steel formed by cyanidation in urea-sodium bath at 560°C for two hours

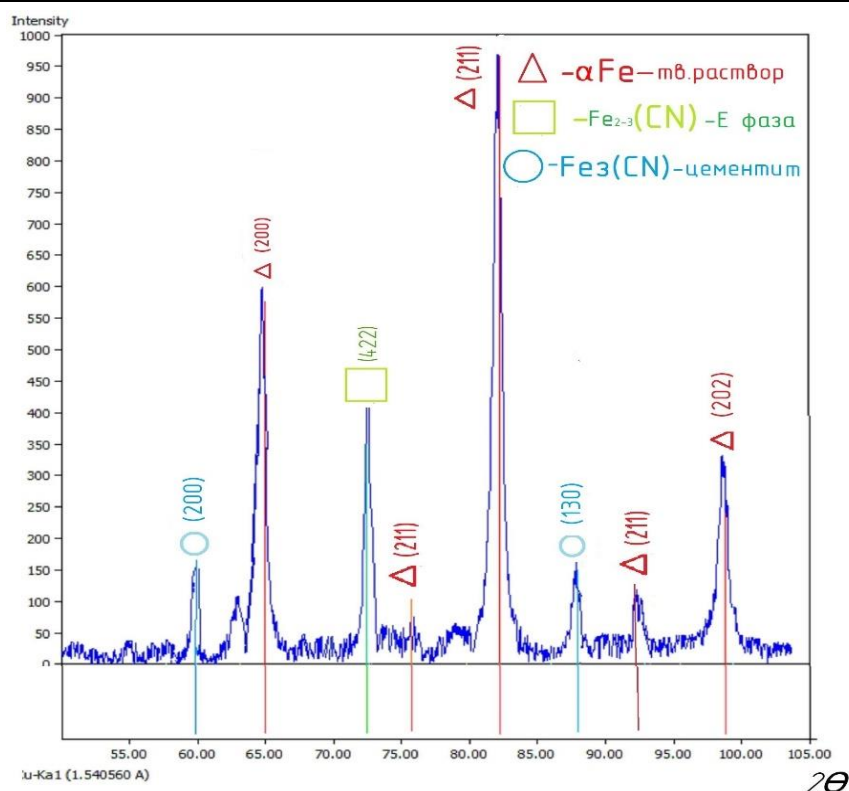


Рис. 3. Дифрактограмма, полученная с поверхности инструментальной стали Р6М5 после цианирования в карбамидо-натриевой ванне при 560°C в течение 2 часов

Fig. 3. Diffractogram obtained from the surface of P6M5 tool steel after cyanidation in urea-sodium bath at 560°C for 2 hours

Результаты исследования распределения легирующих элементов в поперечном сечении диффузионного слоя цианированной стали марки Р6М5, выполненные методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) с использованием сканирующего электронного микроскопа, приведены на рисунке 4. На карте распределения легирующих элементов в структуре стали можно видеть, что светлые сферические включения (карбонитриды) обогащены молибденом и вольфрамом, которые растворяются в гексагональной решётке по механизму замещения. Мелкие (серые) образования, обогащённые ванадием, по-видимому, являются карбамидами ванадия, входящими в исходный (до цианирования) состав стали и обеспечивающие её наследственную мелкозернистость (рис. 4, а). Ванадий практически не растворяется в железе, поэтому

маловероятно, чтобы они входили в состав карбонитридов, образующихся при цианировании.

Рентгеноспектральный анализ общего элементного состава цианированного слоя на легированной стали Р6М5 (рис. 5, б) показывает, что наиболее распространённым элементом в нём, не считая основы стали – железа, является молибден, который в больших количествах входит в состав карбонитридов, а также в состав α -твёрдого раствора, в меньших количествах в цианированных слоях обнаруживается вольфрам, хотя в составе стали вольфрама содержится больше, чем молибдена. По-видимому, это обусловлено меньшей растворимостью вольфрама в железе и в карбонитридах. Большая часть вольфрама образует наноразмерные карбиды по границам зёрен ещё при кристаллизации стали из расплава. Из-за этого их

слабое рентгеновское излучение не улавливается детектором энергодисперсионной системы.

Меньше всего в составе цианированного слоя хрома и ванадия, что обусловливается общим малым их содержанием в составе стали. Поскольку все легирующие элементы, входящие в состав быстрорежущей стали, являются карбидообразующими элементами, они обладают большей

энергией связи и, соответственно, большей устойчивостью. Поэтому большая часть легирующих элементов находится в карбонитридах и карбидах, замещая в них атомы железа или образуя собственные соединения. Твёрдый раствор при цианировании обедняется легирующими элементами, что необходимо учитывать при упрочняющей обработке быстрорежущих инструментов.

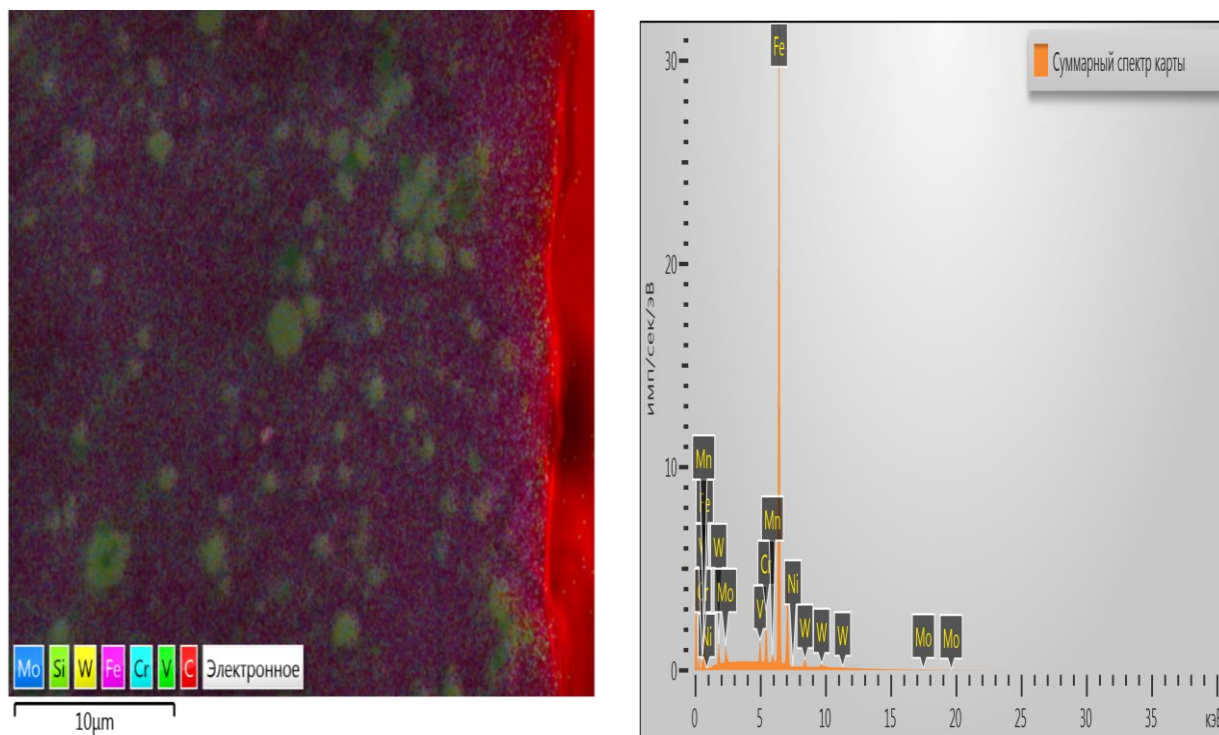


Рис. 4. Многослойное СЭМ-изображение (а) с элементным анализом (б)

Fig. 4. Multilayer SEM image (a) with element analysis (б)

Результаты исследования распределения микротвёрдости по глубине цианированных слоев при разных температурах на стали Р6М5 представлены на рисунке 5. Видно, что микротвёрдость цианированных слоёв (насыщенных совместно азотом и углеродом) выше микротвёрдости азотированных слоёв (насыщенных одним азотом путём традиционной обработки в аммиаке). Очевидно, карбонитридные фазы обладают большим упрочняющим эффектом, чем нитридные частицы в структуре азотированной стали. При возрастании температуры цианирования в

диапазоне 560–600°C наблюдается значительное увеличение глубины упрочнённых поверхностных слоёв на быстрорежущей стали. Это связано с активизацией диффузионных процессов, приводящей к ускоренному проникновению азота и углерода даже при относительно небольшом температурном росте. Стоит подчеркнуть, что микротвёрдость внутренних зон образцов, расположенных под цианированными слоями, сохраняет стабильность вне зависимости от режима обработки, оставаясь в пределах 8400–8500 МПа.

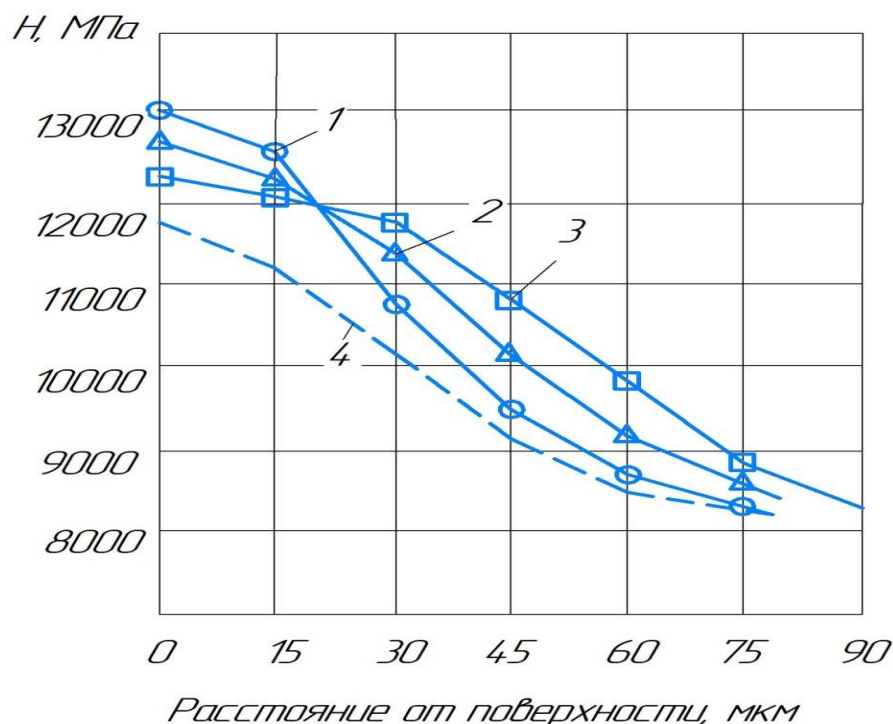


Рис. 5. Влияние температурного режима и состава среды на распределение микротвердости в диффузионных слоях стали Р6М5 при цианировании: 1 – обработка методом цианирования при 560°C в течение 60 мин; 2 – проведение процесса при повышении температуры до 580°C с выдержкой 60 мин; 3 – цианирование при 600°C с аналогичной продолжительностью (60 мин); 4 – газовое цианирование в атмосфере аммиака при 560°C (60 мин)

Fig. 5. Influence of temperature regime and medium composition on microhardness distribution in diffusion layers of P6M5 steel during cyanidation: 1 – cyanidation treatment at 560°C for 60 min; 2 – cyanidation at 580°C with 60 min dwell time; 3 – cyanidation at 600°C with similar duration (60 min); 4 – gas cyanidation in ammonia atmosphere at 560°C (60 min)

Значительное увеличение микротвёрдости стали Р6М5 после цианирования (до 12500–13000 МПа) обуславливает также значительное повышение износостойкости. Проверка износостойкости цианированной стали показала, что она в три раза выше износостойкости термообработанной стали Р6М5 (без поверхностного упрочнения) и в полтора раза выше азотированной стали. Надо отметить, что газовое азотирование также значительно (более чем в два раза) повышает износостойкость быстрорежущей стали Р6М5.

Красностойкость инструментальной стали – одна из главных характеристик, которая обуславливает максимальную скорость резания, доступную для данного инструмента. Красностойкость инстру-

ментальной стали характеризует способность инструмента сохранять высокую твёрдость в процессе работы. Эту характеристику обычно определяют по температуре отпуска, при которой твёрдость стали уменьшается до HRC 58.

Для измерения красностойкости стали Р6М5 после упрочняющей обработки различными методами соответствующие образцы нагревали до температур 560, 575, 600, 625, 650 и 675°C в течение 4-х часов с охлаждением на спокойном воздухе. Затем проводили измерения твёрдости образцов по Виккерсу (HV₅) и по Роквеллу (HRC). Сравнительные результаты этих измерений представлены на рисунке 6.

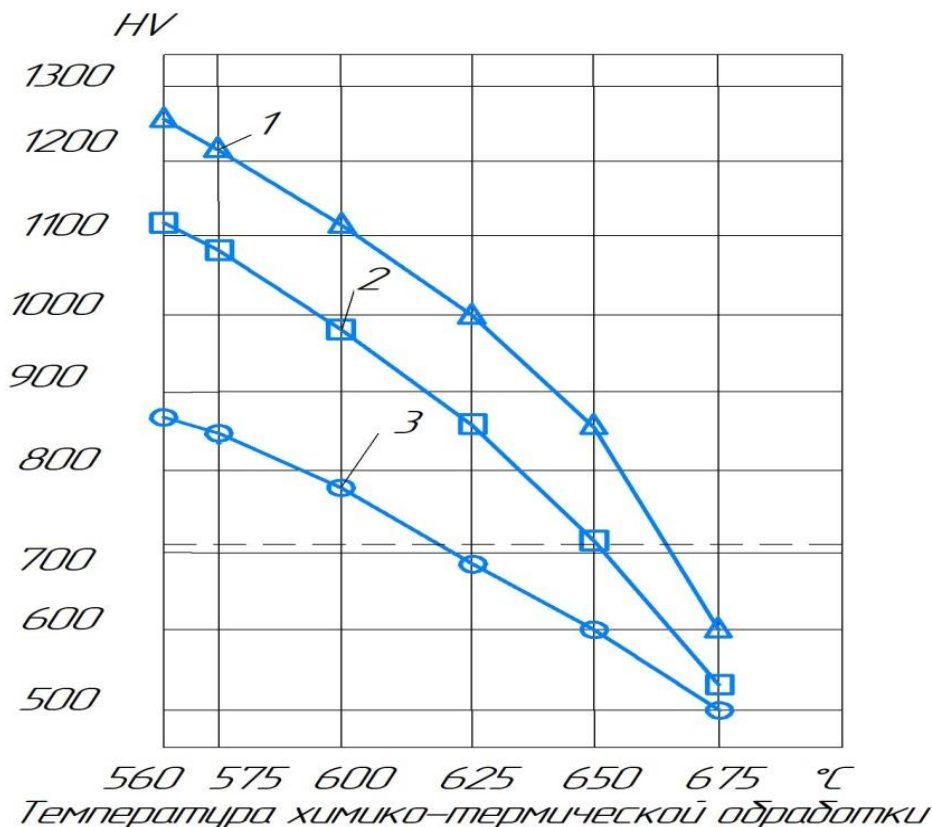


Рис. 6. Исследование красностойкости стали Р6М5, упрочненной различными методами, в диапазоне температур 560–675°C: 1 – цианирование в карбомидо-натриевой ванне; 2 – азотирование в аммиаке; 3 – закаленная сталь Р6М5 без дополнительного поверхностного упрочнения

Fig. 6. Investigation of red-hardening resistance of P6M5 steel hardened by different methods in the temperature range of 560-675°C: 1 – cyanidation in a carbomide-sodium bath; 2 – nitriding in ammonia; 3 – hardened steel P6M5 without additional surface hardening

Как следует из анализа полученных результатов, максимальной красностойкостью (способностью сохранять повышенную твёрдость при нагревании) обладают образцы, цианированные в соляной ванне. Их красностойкость, т. е. твёрдость HRC 58, на ~45°C превышает красностойкость закалённой стали Р6М5 и на ~15°C красностойкость этих сталей после азотирования. Таким образом, можно констатировать, что частицы карбонитридов в структуре цианированной стали обладают более высокой устойчивостью к растворению и коагуляции, чем частицы нитридов [12], а твёрдый раствор в зоне нитроцементованного слоя имеет повышенную устойчивость к отпуску [13].

Проверку эффективности цианирования режущих инструментов для повышения их долговечности проводили в производственных условиях на Курском АО «Электроаппарат». Цианированию в карбомидонатриевой ванне подвергали режущий инструмент: цилиндрические свёрла $d = 4$ мм, метчики М4, развёртки $d = 6$ и прорезные фрезы $d = 60$ мм и толщиной 1 мм. Такие же инструменты упрочнили газовым азотированием (для сравнения). Обработка в обоих процессах выполнялась при одинаковой температуре 560°C. Цианирование проводилось в течение 30 минут, тогда как азотирование потребовало 6 часов для достижения диффу-

зионных слоёв сопоставимой с цианированием глубины. Испытания проводились на автоматических линиях при обработке элементов арматуры электротехнических

изделий из малоуглеродистых сталей 08 и 10. В таблице 2 представлены результаты производственных испытаний.

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний

Table 2. Results of comparative tests

Технология упрочнения	Число операций, выполняемых инструментом до выхода из строя			
	свёрла	метчики	фрезы	развёртки
Цианирование в карбамидо-натриевой ванне	1630	1880	1700	1790
Газовое азотирование в среде аммиака	786	984	787	1060
Закалка с двойным отпуском без ХТО	525	626	384	488

Результаты производственных испытаний показывают, что цианирование инструментов из стали Р6М5 в карбамидо-натриевой ванне обеспечивает повышение долговечности инструмента в 3,2–4,6 раза по сравнению с инструментом, имеющим стандартную термообработку (без ХТО). Кроме того, цианирование повышает в 1,6–2,2 раза долговечность режущих инструментов, упрочнённых газовым азотированием.

Таким образом, использование цианирования инструментов из быстрорежущих сталей в дешёвой и нетоксичной карбамидо-натриевой ванне весьма эффективно для повышения долговечности режущих инструментов [15]. Использование его в производственных условиях позволит повысить производительность труда и обеспечит экономию дорогостоящих быстрорежущих сталей [15].

Выводы

Установлена возможность применения бесцианистых соляных ванн для низкотемпературного цианирования стали Р6М5, что расширяет технологические возможности инструментального производства. Сочетание высокой износостойкости и твёрдости обработанной стали делает метод перспективным для изготовления режущего инструмента и деталей, работающих в условиях интенсивных нагрузок. Результаты исследования демонстрируют, что использование разработанного состава позволяет не только улучшить качество цианированных слоёв, но и внедрить ресурсосберегающие технологии в промышленность, сохраняя при этом высокие стандарты экологической безопасности.

Список литературы

1. Адаскин А.М. Инструментальные материалы в машиностроении. М.: Инфра-М, 2024. 391 с.
2. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки: монография. Минск: БИТУ, 2006. 198 с.

3. Губин Д.И. Карбонитрация быстрорежущих сталей в нетоксичной карбамидо-натриевой ванне // Молодежь и наука: реальность и будущее: материалы I Международной научно-практической конференции. Т. 2. Невинномысск: Невинномысский ин-т экономики, упр. и права, 2008. С. 319-320.

4. Гадалов, В.Н., Захаров И.С. К вопросу о применении методов поверхностного упрочнения конструкционных и инструментальных материалов в современных условиях // Материалы и упрочняющие технологии – 2004: сборник материалов XI Юбилейной Российской научно-технической конференции / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2004. С. 8–12.

5. Костин Н.А., Трусова Е.В. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 и Р6М3 низкотемпературным цианированием // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 4. С. 2.

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. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб.: Профессионал, 2003. 1066 с.

8. Состав ванны для цианирования металлов и сплавов в жидких средах: патент 2533577 Российская Федерация / Костин Н.А., Колмыков В.И., Трусова Е.В.; № 20131563397/02; заявл. 18.12.2013. опубл. 20.11.2014; Бюл. № 32. 5 с.

9. Состав ванны для азотирования деталей из конструкционных и инструментальных сталей: патент 2714271 Российская Федерация / Костин Н.А., Костин Н.Н., Трусова Е.В. № 2019138040; заявл. 25.11.2019; опубл. 13.02.2020; Бюл. № 5. 5 с.

10. Белашова И.С., Петрова Л.Г. Регулирование фазового состава азотированного слоя в железе при химико-термической обработке в условиях термоциклирования // Вестник Московского авиационного института. 2022. № 2. С. 237–245.

11. Бегатов Ж., Джалилова М. Влияние режимов низкотемпературной нитроцементации на структуру и свойства стали 4ХМФС // Белорусско-узбекский научно-методический журнал. 2022. Т. 1, № 2. С. 45-48.

12. Temperature effect on deformation mechanisms and mechanical properties of a high manganese C+N alloyed austenitic stainless steel / L. Mosecker, D.T. Pierce, A. Schwedt, M. Beighmohamadi, J. Mayer, W. Bleck [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 642. P. 71–83.

13. Phase transformations in high strength austenitic FeMnCr Steels / L. Bracke, B. de Cooman, M. Liebeherr, N. Akdur // Solid-solid phase transformations in inorganic materials. 2005. Vol. 1. P. 905.

14. Microstructures and mechanical properties of the carburized CrNiMo steels with added case nitrogen / Chen Qing Gu, Bing Zhe Lou, Xiao Tian Jing, Fu San Zhen // Heat Treat, and Surface Eng. : New Technol. and Pract. Appl.: Proc. 6th Int. Congr. Heat Treat. Mater, with World Mater. Congr. Chicago, 1988. P. 331–336.

15. 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.

References

1. Adaskin A. M. Instrumental materials in mechanical engineering. Moscow: Infra-M; 2024. 391 p. (In Russ.)

2. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. Theory and technology of chemical and thermal treatment. Minsk: BITU, 2006. 198 p. (In Russ.)
3. Gubin D.I. Carbonitration of high-speed cutting steels in non-toxic urea-sodium bath. In: *Molodezh' i nauka: real'nost' i budushchee: materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = *Youth and science: reality and future: materials of the I International scientific and practical conference*. Vol. 2. Nevinnomyssk: Nevinnomysskii in-t ekonomiki, upr. i prava; 2008. P. 319-320. (In Russ.)
4. Gadalog V.N., Zaknarov I.S. On the application of methods of surface hardening of structural and instrumental materials in modern conditions. In: *Materialy i uprochnyayushchie tekhnologii – 2004: sbornik materialov XI Yubileinoi Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = *Materials and strengthening technologies 2004: collection of materials of the XI Jubilee Russian of sciences and practical Conference*. Kursk: Kursk State Technical University; 2004. P. 8-12. (In Russ.)
5. Kostin N.A., Trusova E.V. Increase of tool durability of high-speed steel P6M5 and P6M3 by low-temperature cyanidation. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* = *Machine Building and Engineering Education*. 2014;(4):2-6. (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 Bauman; 2014. 520 p. (In Russ.)
7. Solntseva Yu.P. (ed.) Metals and alloys. St. Petersburg: Professional; 2003. 1066 p. (In Russ.)
8. Kostin N.A., Kolmykov V.I. Bath composition for cyanidation of metals and alloys in liquid media. Russian Federation patent 2533577. 20 November 2014.
9. Kostin N.A., Kostin N.N., Trusova E.V. Bath composition for nitriding of parts made of structural and tool steels. Russian Federation patent 2714271. 13 February 2020.
10. Belashova I.S., Petrova L.G. Regulation of the phase composition of the nitrided layer in Iron during chemical heat treatment under thermal cycling conditions. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* = *Bulletin of Moscow Aviation Institute*. 2022;(2):237-245. (In Russ.)
11. Begatov J., Jalilova M. The influence of low-temperature nitrocementation modes on the structure and properties of 4HMFS steel. *Belorussko-uzbekskii nauchno-metodicheskii zhurnal* = *Belarusian-Uzbek Scientific and Methodological Journal*. 2022;1(2):45-48. (In Russ.)
12. Mosecker L., Pierce D. T., Schwedt A., Beighmohamadi M., Mayer J., Bleck W., et al. Temperature effect on deformation mechanisms and mechanical properties of a high manganese C+N alloyed austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;(642):71-83.
13. Bracke L., de Cooman B., Liebherr M., Akdur N. Phase transformations in High Strength Austenitic FeMnCr Steels. Solid-solid phase transformations in inorganic materials. 2005. Vol. 1. P. 905.
14. Microstructures and mechanical properties of the carburized CrNiMo steels with added case nitrogen / Chen Qing Gu, Bing Zhe Lou, Xiao Tian Jing, Fu San Zhen // Heat Treat, and Surface Eng. : New Technol. and Pract. Appl.: Proc. 6th Int. Congr. Heat Treat. Mater, with World Mater. Congr. Chicago, 1988. P. 331–336.
15. Teldekov V.A., Gurevich L.M. Research technology of low-temperature nitrocementation for complex hardening of parts machines. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2021;(10):64-68. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Костин Николай Николаевич, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kostinnikolayn@yandex.ru

Nikolay N. Kostin, Postgraduate Student,
Southwest State University, Kursk, Russian
Federation,
e-mail: kostinnikolayn@yandex.ru

Колмыков Валерий Иванович, доктор техни-
ческих наук, профессор, Юго-Западный
государственный университет, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: kolmikov@yandex.ru

Valery I. Kolmykov, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kolmikov@yandex.ru

Костин Николай Анатольевич, кандидат
технических наук, 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