

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.785.532

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-33-44>

Об эффективности использования соляных ванн на основе карбамида для низкотемпературного цианирования улучшаемых углеродистых и легированных сталей

Н. Н. Костин¹, В. И. Колмыков¹, Н. А. Костин²✉, Д. В. Колмыков²

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. Провести исследование цианирования улучшаемых углеродистых и легированных сталей марок 30, 30ХГТ, 30Х13 при температуре 550–580°C в ваннах на основе карбамида и углекислого натрия.

Сформулировать рекомендации по использованию данных ванн для поверхностного упрочнения углеродистых и легированных улучшаемых сталей, применяемых для изготовления деталей машин.

Методы. Исследована микроструктура диффузионного слоя сталей на поперечных шлифах с использованием оптического микроскопа XIMEA с программным обеспечением Axalut, а также с помощью электронного растрового микроскопа Quanta FEG–650 с системой микроанализа фокусированным ионным пучком EBCD. Испытания цианированных образцов на изнашивание проводили в условиях трения, аналогичных условиям работы штамповых инструментов. Износостойкость нитроцементованных образцов исследовалась на машине трения СМЦ–2. Испытания проводились как в условиях сухого трения, так и в условиях граничного трения.

Результаты. Экспериментально показана высокая эффективность предлагаемого состава ванны при данной температуре. В результате цианирования на поверхности сталей образуются модифицированные слои, насыщенные твердыми включениями (ϵ -фазы), отличающиеся высокой твердостью, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью.

Заключение. По результатам проведенных исследований можно заключить, что низкотемпературное цианирование улучшаемых сталей различных марок возможно проводить в бесцианистых соляных ваннах. Оптимальный состав цианирующей ванны: 40% карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$; 40% кальцинированной соды Na_2CO_3 и 20% поваренной соли NaCl . Предлагаемая ванна не содержит токсичных и дефицитных компонентов, поэтому безопасна с экологической точки зрения и весьма дешева и может быть с большим эффектом использована в машиностроительном, ремонтном и инструментальном производствах.

Ключевые слова: улучшаемые стали; легированные стали; низкотемпературное цианирование; структура диффузионного слоя; фазовый состав.

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

Для цитирования: Об эффективности использования соляных ванн на основе карбамида для низкотемпературного цианирования улучшаемых углеродистых и легированных сталей / Н. Н. Костин, В. И. Колмыков, Н. А. Костин, Д. В. Колмыков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 33–44. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-33-44>

Поступила в редакцию 02.04.2024

Подписана в печать 06.05.2024

Опубликована 17.06.2024

© Костин Н. Н., Колмыков В. И., Костин Н. А., Колмыков Д. В., 2024

On the effectiveness of using carbamide-based salt baths for low-temperature cyanidation of improved carbon and alloy steels

Nikolay N. Kostin¹, Valery I. Kolmykov¹,
Nikolay A. Kostin² ✉, Denis V. Kolmykov²

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

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

✉ e-mail: nikolay-kostin@yandex.ru

Abstract

Purpose. A study of cyanidation of improved carbon and alloy steels of grades 30, 30HGT, 30H13 at a temperature of 550–580°C was carried out in baths based on carbamide and sodium carbonate.

Recommendations on the use of these baths for surface hardening of carbon and alloyed improved steels used for the manufacture of machine parts are formulated.

Methods. The microstructure of the diffusion layer of steels on transverse sections was studied using a Quanta FEG – 650 electron scanning microscope with an EBCD focused ion beam microanalysis system. Cyanide wear tests were performed under friction conditions analogous to those of die tools. The wear resistance of the carbonitrided samples was investigated on a SMTs-2 friction machine. The tests were performed under both dry friction and boundary friction conditions.

Results. The high efficiency of the proposed bath composition at a given temperature has been experimentally shown. As a result of cyanidation, modified layers saturated with solid inclusions (ϵ -phases) are formed on the surface of steels, characterized by high hardness, low coefficient of friction and high wear resistance.

Conclusion. According to the results of the conducted research, it can be concluded that low-temperature cyanidation of improved steels of various grades can be carried out in cyanide-free salt baths. The optimal composition of the cyanide bath is 40% carbamide (NH_2CO); 40% soda ash Na_2CO_3 and 20% NaCl table salt. The proposed bath does not contain toxic and scarce components, therefore it is environmentally safe and very cheap and can be used with great effect in machine-building, repair and tool industries.

Keywords: improved steels; alloy steels; 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., Kolmykov D.V. On the effectiveness of using carbamide-based salt baths for low-temperature cyanidation of improved carbon and alloy steels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(2):33–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-33-44>

Received 02.04.2024

Accepted 06.05.2024

Published 17.06.2024

Введение

Соляные ванны в настоящее время достаточно широко применяются при различных операциях термической и химико-термической обработки деталей машин и инструментов благодаря ряду преимуществ перед другими нагревающими средами: во-первых, это высокая скорость и равномерность нагрева деталей без окис-

ления поверхностей: во-вторых, чрезвычайно высокая активность ванн, используемых для химико-термической обработки стальных изделий, в несколько раз превышающих активность газовых и твёрдых насыщающих сред [1].

Первоначально цианистые ванны использовались для карбонитрации инструментов различного назначения, а с конца 60-х годов прошлого века соляные ванны

начали с успехом использоваться для поверхностного упрочнения (цианирования) деталей машин, в первую очередь на автомобилестроительных предприятиях (BMW, Toyota Motor и др.). При этом стальные детали насыщаются азотом и частично углеродом при температуре $\sim 560^\circ\text{C}$ в расплаве, содержащем цианистые соли (60% NaCN, 40% KCN) с добавлением обезвоженной соды. Этот процесс получил название Tenifer Tufftride (в отечественной литературе – «мягкое азотирование»). Он отличается технологической простотой и высокой производительностью и позволяет формировать на поверхности детали износостойкий и вязкий слой с высоким сопротивлением усталости [2].

С другой стороны, несмотря на высокую эффективность упрочнения стальных изделий в расплавах цианистых солей, этот процесс на отечественных предприятиях практически не используется по экологическим соображениям в связи с высокой токсичностью цианидов. В связи с этим для обеспечения возможности широкого использования низкотемпературной обработки деталей машин в жидких средах необходимо разработать нетоксичные составы нитроцементующих ванн, которые будут иметь столь же высокий упрочняющий эффект, как и цианистые расплавы [3].

В качестве азотсодержащего компонента в цианирующих ваннах возможно использование карбамида, который содержит около 47% азота. Это больше, чем содержание азота в цианистом калии ($\sim 21\%$ N) и в цианистом натрии ($\sim 30\%$ N).

Температура плавления карбамида $\sim 133^\circ\text{C}$, поэтому он может находиться в жидком состоянии при температуре цианирования («мягкого азотирования») в составе цианирующих ванн [4].

Карбамид (мочевина) является одним из самых массовых продуктов, выпускаемых химической промышленностью, ежегодное производство мочевины в мире составляет более 100 млн тонн. Мочевина нетоксична и относительно дешева (50–55 руб./кг), поэтому она является перспективным веществом для использования в цианирующих ваннах, предназначенных для поверхностного насыщения стальных деталей азотом в условиях машиностроительных предприятий и других производств [5].

Цель настоящей работы – исследовать особенности низкотемпературного цианирования конструкционных и легированных сталей в соляных ваннах на основе карбамида и сформулировать рекомендации по использованию таких ванн для поверхностного упрочнения углеродистых и легированных улучшаемых сталей, применяемых для изготовления деталей машин.

Материалы и методы

Для исследования были приготовлены образцы из конструкционных и легированных сталей, широко используемых в машиностроении, отличающихся системой легирования [6]. Химический состав образцов, определённый спектральным методом на оптико-эмиссионном спектрометре OBLF VeOS, представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых образцов

Table 1. Chemical composition of the studied samples

Марка стали	Содержание элементов, мас. %						
	C	Mn	Si	Cr	Ti	S	P
30	0,33	0,67	0,34	–	–	0,038	0,028
30ХГТ	0,29	0,88	0,27	1,27	0,07	0,029	0,022
30Х13	0,31	0,64	0,71	12,8	–	0,021	0,032

Цианирование проводили в лабораторной шахтной электропечи СШОЛ-12-МЗ-Ц4 с размерами рабочего пространства $\varnothing 115 \times 250$ мм [7].

Соли, принятые для приготовления ванны, расплавляли в стальном тигле ($\varnothing 80 \times 150$ мм). Предварительно взвешенные порции солей тщательно перемешивали и засыпали в тигель. Тигель с этой смесью устанавливали в холодную печь и включали нагрев. В процессе нагрева смесь солей переходила из порошкообразного состояния в жидкое, при этом между компонентами смеси происходили реакции с образованием пены. Для уменьшения интенсивности пенообразования разогрев со-

лей производился, по возможности, медленно ($\sim 150^\circ\text{C}/\text{час}$). После расплавления солей и достижения рабочей температуры производили стабилизацию (старение) ванны в течение 2–3 часов, после чего в тигель помещали исследуемые образцы, предварительно подогретые в муфельной печи ТП-2 до температуры $150 \dots 200^\circ\text{C}$. Образцы выдерживали в расплаве (цианирующей ванне) заданное время, температуру контролировали и поддерживали на стабильном уровне с помощью электронного потенциометра с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$.

На рисунке 1 показана схема эксперимента по цианированию стальных образцов в жидкой среде.

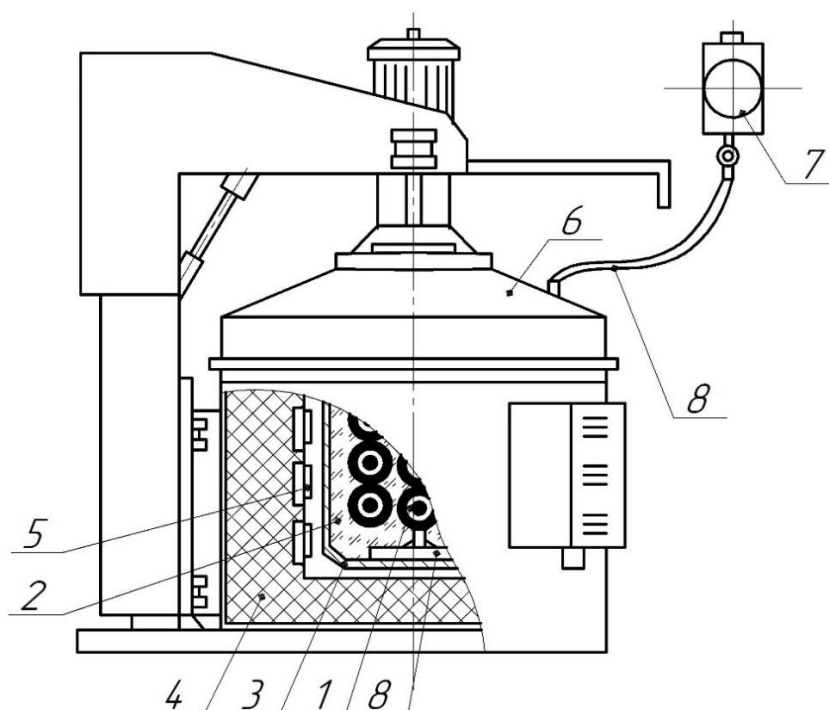


Рис. 1. Схема лабораторной установки для химико-термической обработки образцов в расплаве солей: 1 – образцы; 2 – ванна для цианирования; 3 – тигель; 4 – огнеупорная футеровка печи; 5 – нихромовый нагреватель; 6 – крышка печи; 7 – электронный потенциометр; 8 – термопара

Fig. 1. Diagram of a laboratory installation for chemical and thermal treatment of samples in molten salts: 1 – samples; 2 – cyanidation bath; 3 – crucible; 4 – refractory furnace lining; 5 – nichrome heater; 6 – furnace lid; 7 – electronic potentiometer; 8 – thermocouple

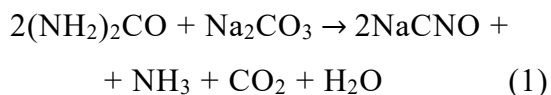
На цианированных образцах готовили поперечные микрошлифы механическим способом, протравливали их в 4%-ном растворе азотной кислоты в этаноле и

исследовали микроструктуру с использованием электронного растрового микроскопа Quanta FEG-650 с системой микроанализа фокусированным ионным пучком

ЕВCD. Глубину диффузионных слоёв на цианированных образцах измеряли на оптическом микроскопе с помощью штатного окуляр-микрометра с точностью $\pm 0,3$ мкм [8].

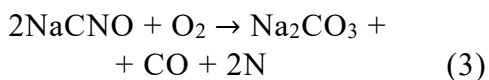
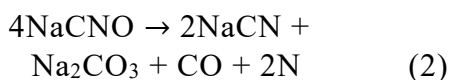
Результаты и их обсуждение

Были исследованы композиции на основе карбамида, который содержит более 40% азота, и кальцинированной соды, которые в исходном состоянии нетоксичны и весьма дешёвы. При расплавлении карбамида и соды в интервале температур $380...400^\circ\text{C}$ между ними происходит реакция с образованием цианата натрия, аммиака и углекислого газа [9]:



Щелочной цианат натрия NaCNO также нетоксичен, и поэтому безопасен с экологической точки зрения, что является решающим преимуществом этого расплава перед цианидными ваннами. Ванна с цианатом натрия позволит решить все проблемы с обезвреживанием отходов соли и промывочной воды, препятствующие внедрению жидкостного цианирования в производство.

Активные атомы азота и углерода образуются при разложении или окислении цианата натрия в расплаве:

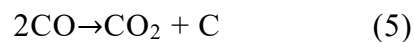


Возможен также распад цианата натрия при температуре цианирования в результате термической диссоциации:



Реакция (3) ускоряется в присутствии железа, которое играет роль катализатора, и наиболее интенсивно протекает на поверхности стальных деталей, обрабатываемых в ванне.

Образующийся в результате реакций (2), (3) и (4) атомарный азот в больших количествах присутствует в расплаве, особенно вблизи поверхностей цианируемых деталей, и интенсивно адсорбируется этими поверхностями. Атомарный углерод образуется при разложении активной окиси на поверхности стали:



Цианистый натрий NaCN – очень токсичное вещество, получающееся при разложении цианата по реакции (2), не накапливается в ванне, т. к. реагирует с двуокисью углерода, образующейся в результате реакции (1), и снова окисляется до нетоксичного цианата:



При разложении цианатов в ванне образуется углекислый натрий по реакции (2), который накапливается в цианирующей ванне в процессе её эксплуатации. Это приводит к снижению насыщающей способности (активности) ванны и требует её постоянного освежения путём добавки дополнительных порций карбамида или цианата натрия, получаемого сплавлением карбамида с содой.

Надо отметить, что по мере эксплуатации ванны снижается её жидкотекучесть и большое количество соли выносится на поверхности цианируемых деталей. Однако этот недостаток в некоторой степени можно компенсировать добавкой в карбамидонатриевый расплав хлористого натрия.

Цианирование конструкционных сталей в ваннах на основе карбамида и углекислого натрия при температурах «мягкого азотирования» ($550...580^\circ\text{C}$) во всех случаях приводит к образованию на поверхности стальных образцов диффузионных слоёв, имеющих специфическую структуру (рис. 2) [10].

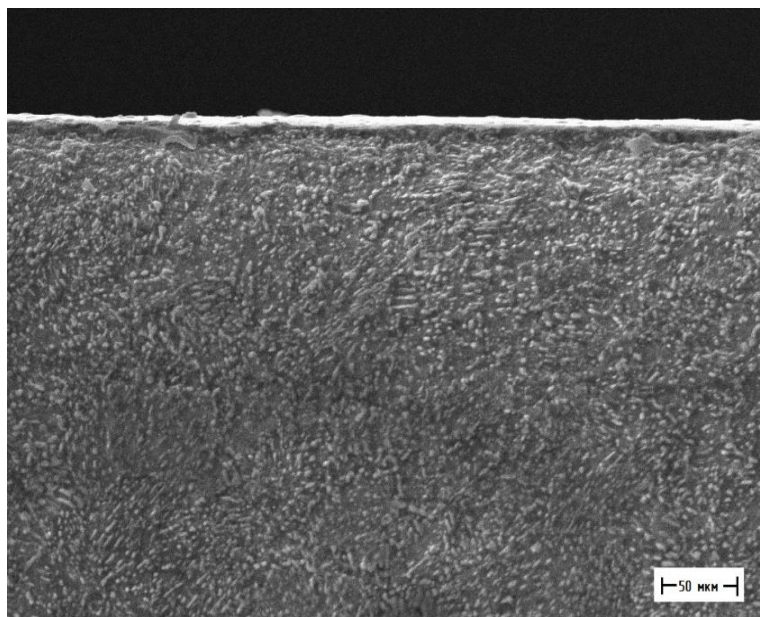


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя стали 30ХГТ, полученного цианированием в карбамидонатриевой ванне при температуре 560°С в течение 2-х часов

Fig. 2. Microstructure of the diffusion layer of 30KHGT steel obtained by cyanidation in a sodium carbamide bath at a temperature of 560°C for 2 hours

Диффузионные слои, получаемые при цианировании сталей в расплавах азотсодержащих солей, имеют, как правило, две зоны: поверхностную – тонкую светлую корку на поверхности (см. рис. 2), представленную высокотвёрдыми карбонитами, и тёмную глубокую зону под этой коркой, представленную азотистым твёрдым раствором с отдельными включениями карбонитридов [11].

Глубина диффузионных слоёв и характерных зон в этих слоях зависит, в первую очередь, от насыщающей способности цианирующей среды, а также от состава цианируемой стали. В таблице 2 представлены результаты цианирования конструкционных сталей различных марок в карбамидонатриевых расплавах, проводимого при температуре «мягкого азотирования» (560°) в течение одного и того же времени (2), для определения активности этих расплавов. Активность при этом оценивалась по глубине диффузионных слоёв [12].

Как можно судить по экспериментальным данным, приведённым в таблице 2,

ванна 1, имеющая наиболее простой состав, отмечается наивысшей активностью. С другой стороны, её использование может представлять определённые технологические трудности из-за высокой густоты расплава при температуре цианирования. При этом даже небольшое снижение температуры обработки, например до температуры азотирования (~520°С), может привести к недопустимому загустеванию расплава и неравномерности насыщения стальных изделий или даже к невозможности погружения их в ванну [13].

Ванна 2 имеет более высокую жидкотекучесть, о чём свидетельствует отсутствие следов соли на образцах, извлекаемых из ванны после цианирования. Однако активность этой ванны несколько ниже, чем активность ванны 1, что можно объяснить снижением общего количества карбамида и углекислого натрия в её составе, частично замещённых неактивным хлористым натрием. С другой стороны, эта активность соответствует уровню активности ванны на основе цианидов натрия и калия (ванна 3).

Таблица 2. Результаты цианирования конструкционных сталей в соляных ваннах различных составов (560 °С, 2 часа)**Table 2.** The results of cyanidation of structural steels in salt baths of various compositions (560 °C, 2 hours)

№ п/п	Состав цианирующей ванны, мас. %	Марка стали	Глубина диффузионного слоя, мм		Примечание
			общая	карбонитридной зоны	
1	(NH ₂) ₂ CO – 50 Na ₂ CO ₃ – 50	30	0,92	0,051	Толстый слой соли на цианированных образцах
		30ХГТ	0,59	0,072	
		30Х13	0,46	0,098	
2	(NH ₂) ₂ CO – 40 Na ₂ CO ₃ – 40 Na Cl – 20	30	0,79	0,048	Поверхность образцов без следов соли
		30ХГТ	0,48	0,067	
		30Х13	0,36	0,098	
3	NaCN – 55 KCN – 35 Na ₂ CO ₃ – 10 (Tenifer-Tufftride)	30	0,78	0,046	Токсичные соли
		30ХГТ	0,52	0,057	
		30Х13	0,32	0,088	

Глубина диффузионных слоёв, полученных цианированием как в ваннах на основе карбамида, так и в ванне на основе цианидов, очень сильно зависит от легирования цианированных сталей, главным образом от содержания в них хрома [14]. Эксперимент показал, что наибольшую глубину имеют диффузионные слои на углеродистой (нелегированной) стали. На легированных сталях глубина диффузионных слоёв, получаемых в сходных условиях цианирования, заметно меньшая (рис. 3) [15].

С другой стороны, на легированных сталях глубина карбонитридной зоны (корки) на поверхности цианированных слоёв больше, чем на нелегированной стали. Эту особенность можно объяснить, по-видимому, тем, что легирующие элементы (главным образом хром) снижают коэффициенты диффузии элементов внедрения и замедляют рост диффузионных слоёв при цианировании [16]. Хром, имеющий повышенную химическую активность

по сравнению с железом, создаёт благоприятные условия для образования химических соединений (карбонитридов) на поверхности хромистых сталей в мощном потоке азота и углерода, поступающем из внешней среды [17].

Для практического использования, по нашему мнению, наиболее подходящей по критериям жидкотекучести и активности является ванна 2, содержащая карбамид, карбонат натрия и хлорид натрия (которую можно назвать «карбамидонатриевая ванна»). По своим характеристикам она практически полностью соответствует традиционной цианистой ванне, которая доказала свою высокую эффективность на практике при поверхностном упрочнении деталей машин и инструмента [18].

Представляет интерес установить закономерности влияния режимов цианирования в этой ванне на формирование диффузионных слоёв на улучшаемой стали [19]. Результаты исследования такого влияния представлены на рисунке 4.

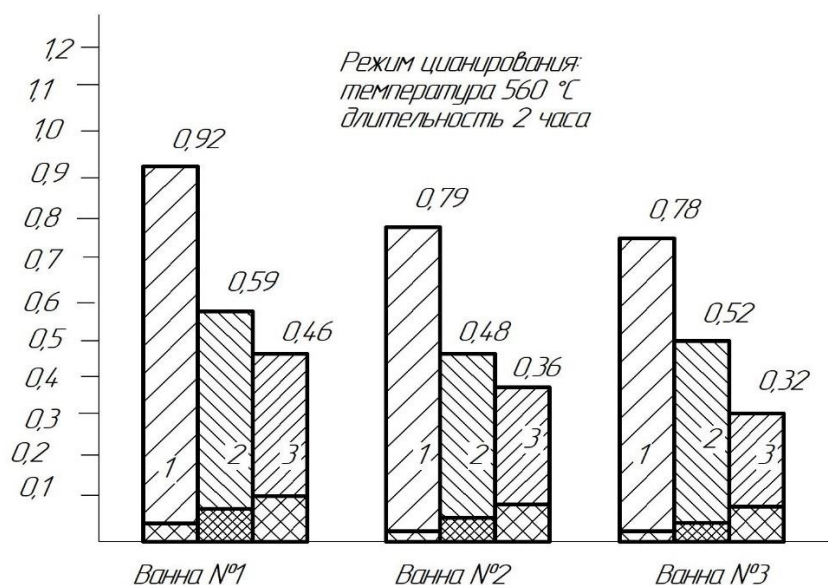


Рис. 3. Глубина диффузионных слоёв на конструкционных сталях, цианированных (560°C, 2 ч) в азотисто-углеродных ваннах различного состава (см. табл. 2): 1 – сталь 30; 2 – сталь 30ХГТ; 3 – сталь 30Х13; – общая глубина диффузионного слоя; – глубина карбонитридной зоны (корки) в диффузионном слое

Fig. 3. Depth of diffusion layers on structural steels cyaninated (560°C, 2 h) in nitrogen-carbon baths of various compositions (see Table 2): 1 – steel 30; 2 – steel 30HGT; 3 – steel 30H13; – the total depth of the diffusion layer; – the depth of the carbonitride zone (crust) in the diffusion layer

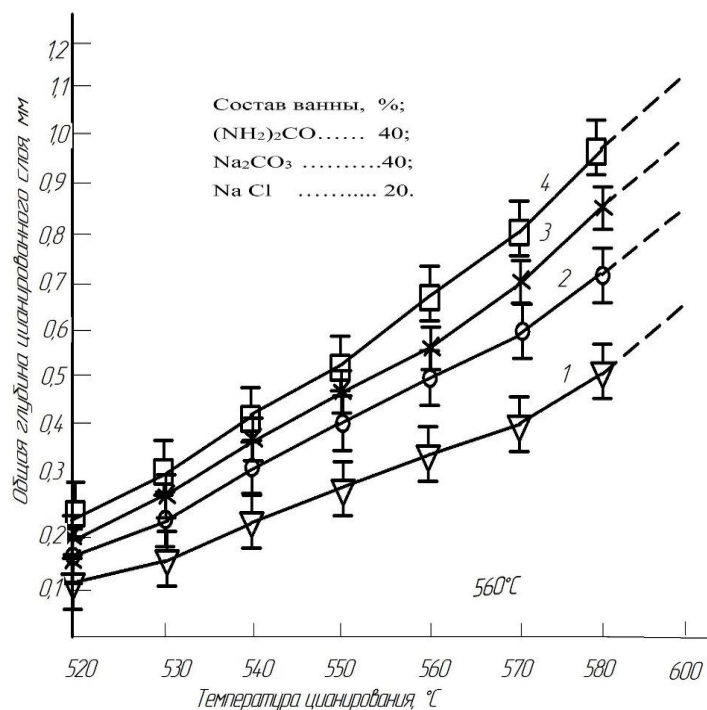


Рис. 4. Влияние температуры цианирования стали 30ХГТ в карбамидонатриевой ванне 2 (см. в табл. 1) при различных длительностях обработки: 1 – 1 час; 2 – 2 часа; 3 – 3 часа; 4 – 4 часа

Fig. 4. Effect of the cyanidation temperature of 30HGT steel in a sodium carbamide bath 2 (Table 1) at various treatment durations: 1 – 1 hour; 2 – 2 hours; 3 – 3 hours; 4 – 4 hours

Как видно из представленных данных, цианирование в карбамидонатриевой ванне, содержащей 40% $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, 40% Na_2CO_3 и 20% NaCl , открывает широкие технологические возможности упрочнения конструкционных сталей, как углеродистых, так и легированных, и управлять характеристиками их диффузионных слоёв, изменяя температуру и время обработки [20]. При этом необходимо иметь в виду, что названная ванна имеет границы рабочих температур. Нижней границей, как показал эксперимент, составляет $\sim 540^\circ\text{C}$, ниже которой ванна загустевает и становится неудобной для пользования. В качестве верхней границы можно считать температуру $\sim 580^\circ\text{C}$, выше этой температуры происходит быстрая испаряемость солей, а в цианированных слоях появляются поры.

Выводы

По результатам проведённых исследований можно констатировать, что низкотемпературное цианирование улучшаемых углеродистых и легированных сталей различных марок возможно проводить в бесцианистых соляных ваннах. Оптимальный состав цианирующей ванны: 40% карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$; 40% кальцинированной соды Na_2CO_3 и 20% поваренной соли NaCl . Предлагаемая ванна не содержит токсичных и дефицитных компонентов, поэтому безопасна с экологической точки зрения и весьма дёшева. Карбамидонатриевая ванна имеет высокую активность по азоту и углероду (на уровне цианид-цианатных ванн “Tenifer-Tufftride”) и может быть с большим эффектом использована в машиностроительном, ремонтном и инструментальном производствах.

Список литературы

1. Повышение эксплуатационных свойств хромомолибденованадиевой стали 30X3МФ для автомобильных деталей нитроцементацией в активной среде / В. И. Колмыков, Р. Ю. Костин, Ю. С. Воробьев, Д. В. Колмыков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 1. С. 41–53. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-41-53>
2. Колмыков В. И., Колмыков Д. В., Чаплыгин В. Ю. Цианирование легированных наплавов в карбамидо-натриевой ванне при восстановлении деталей машин // Современные материалы, техника и технологии: сборник научных статей 9-й Международной научной конференции / отв. ред. А. А. Горохов. Т. 1. Курск: Университетская книга, 2019. С. 86–92.
3. 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.
4. Controlled thermogasocyclic nitriding processes / I. S. Belousova, P. S. Bibikov, A. A. Orekhov, E. I. Starovoitov // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13, special is. P. 13–20. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.S.2>
5. Фазовые превращения в стали 34ХН1М под действием электролитно-плазменной нитроцементации / Н. А. Попова, Л. А. Ерыгина, Е. Л. Никоненко, М. К. Скаков, Н. А. Конева, Э. В. Козлов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 3. С. 383–385.
6. Петрова Л. Г., Сергеева А. С. Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 6(108). С. 3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-6-3-11>
7. Белашова И. С., Бибилов П. С., Прокофьев М. В. Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионностойких сталей авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28, № 2. С. 206–215.

8. 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.
9. Features of cathodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel in an aqueous electrolyte of ammonium nitrate and glycerin / I. Tambovskiy, T. Mukhacheva, I. Gorokhov, I. Suminov, S. Silkin, I. Dyakov, S. Kusmanov, S. Grigoriev // *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 10. P. 1773.
10. Костин Н. А. Особенности закалки штамповых сталей 5ХГС и 5Х3ГС, науглероженных до заэвтектоидных концентраций // *Черные металлы*. 2020. № 5. С. 31–36.
11. Белашова И. С., Маринин Е. А., Лисовский В. А. Количественная оценка эффективности лазерных технологий поверхностного модифицирования // *Черные металлы*. 2023. № 7. С. 47–51.
12. Формирование азотированных слоев в железе в условиях термоциклирования / Л. Г. Петрова, И. С. Белашова, Е. А. Маринин, О. Б. Лисовская // *Черные металлы*. 2023. № 7. С. 42–46.
13. Влияние электролитно-плазменной нитроцементации на фазовый состав сплава 40ХНЮ / Н. А. Попова, Е. Л. Никоненко, Г. У. Ерболатова, А. В. Никоненко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21, № 3. С. 24–32.
14. Грашков С. А., Колмыков В. И. Повышение износостойкости стали ХВГ для деталей топливной аппаратуры дизелей методом нитроцементации // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2020. Т. 10, № 1. С. 43–56. EDN TNHSEO.
15. Об использовании повторной низкотемпературной нитроцементации для эффективного упрочнения коленчатых валов автомобилей КАМАЗ, шлифованных под ремонтные размеры / В. И. Колмыков, Р. Ю. Костин, Ю. С. Воробьев, Д. В. Колмыков // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 2. С. 70–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-70-85>
16. Влияние электролитно-плазменной нитроцементации на структурно-фазовое состояние сталей феррито-перлитного класса / Н. А. Попова, Е. Л. Никоненко, А. В. Никоненко, В. Е. Громов, О. А. Перегудов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 62, № 10. С. 782–789.
17. Влияние многоциклового нитроцементации на микроструктуру и твердость поверхностного слоя низкоуглеродистой стали / Н. Тавиджун, Т. Прадитья, С. Бутчай, Ч. Канчаномай // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021. № 7 (793). С. 38–46.
18. 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.
19. Тилябов Б. К., Нормуродов У. Э. Нитроцементация игольчатых звездочек из углеродистой стали и их последующая закалка и низкий отпуск // *Universum: Технические науки*. 2021. № 2-4(83). С. 21–24.
20. Increasing wear and corrosion resistance of tool steel by anodic plasma electrolytic nitriding / I. G. Dyakov, S. V. Burov, P. N. Belkin, E. V. Rozanov, S. A. Zhukov // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 362. P. 124–131.

Reference

1. Kolmykov V.I., Kostin R.Y., Vorobyov Y.S., Kolmykov D.V. Improving the performance properties of chromium-molybdenum vanadium steel 30X3MF for automotive parts by nitrocementation in an active medium. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika*

i tekhnologii = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022;12(1):41–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-41-53>

2. Kolmykov V.I., Kolmykov D.V., Chaplygin V.Y. Cyanidation of alloyed surfacing in a sodium carbamide bath during the restoration of machine parts. In: Gorokhov A.A. (ed.) *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii: sbornik nauchnykh statej 9-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* = *Modern materials, technique and technologies: collection of scientific articles of the 9th International Scientific Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2019. Vol. 1. P. 86–92. (In Russ.)

3. Teldekov V.A., Gurevich L.M. Research of low-temperature nitrocementation technology for complex hardening of machine parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Izvestiya Volgograd State Technical University*. 2021;(10):64–68. (In Russ.)

4. Belousova I.S., Bibikov P.S., Orekhov A.A., Starovoitov E.I. Controlled thermogasocyclic nitriding processes. *INCAS Bulletin*. 2021;13(Special is.):13–20. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.S.2>

5. Popova N.A., Erygina L.A., Nikonenko E.L., Skakov M.K., Koneva N.A., Kozlov E.V. Phase transformations in 34KHN1M steel under the action of electrolytic plasma nitrocementation. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya* = *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2017;81(3):383–385. (In Russ.)

6. 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;(6):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-6-3-11>

7. Belashova I.S., Bibikov P.S., Prokofiev M.V. Features of nitriding technology of high-alloy corrosion-resistant steels for aviation purposes. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta* = *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2021;28(2):206–215. (In Russ.)

8. 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.

9. Tambovskiy I., Mukhacheva T., Gorokhov I., Suminov I., Silkin S., Dyakov I., Kusmanov S., Grigoriev S. Features of cathodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel in an aqueous electrolyte of ammonium nitrate and glycerin. *Metals*. 2022;12(10):1773.

10. 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.)

11. Belashova I.S., Marinin E.A., Lisovskii V.A. Quantitative assessment of the effectiveness of laser technologies for surface modification. *Chernye metally* = *Ferrous metals*. 2023;(7):47–51. (In Russ.)

12. Petrova L.G., Belashova I.S., Marinin E.A., Lisovskaya O.B. Formation of nitrided layers in iron under thermal cycling conditions. *Chernye metally* = *Ferrous metals*. 2023;(7):42–46. (In Russ.)

13. Popova N.A., Nikonenko E.L., Yerbolatova G.U., Nikonenko A.V. The effect of electrolyte-plasma nitrocementation on the phase composition of alloy 40HNU. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* = *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2019;21(3):24–32. (In Russ.)

14. Grashkov S.A., Kolmykov V.I. Increasing the wear resistance of HVG steel for parts of diesel fuel equipment by nitrocementation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2020;10(1):43–56. (In Russ.) EDN TNHSOE

15. Kolmykov V.I., Kostin R.Y., Vorobyov Y.S., Kolmykov D.V. On the use of repeated low-temperature nitrocementation for effective hardening of crankshafts of KAMAZ vehicles ground to repair dimensions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i*

tekhnologii = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(2):70–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-70-85>

16. Popova N.A., Nikonenko E.L., Nikonenko A.V., Gromov V.E., Peregudov O.A. The influence of electrolytic plasma nitrocementation on the structural and phase state of ferrite-perlite class steels. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2019;62(10):782–789.

17. Tavijun N., Praditya T., Butchai S., Kanchanomai Ch. The effect of multicycle nitrocementation on the microstructure and hardness of the surface layer of low-carbon steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallurgy and heat treatment of metals*. 2021;(7):38–46. (In Russ.)

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

19. Tilabov B.K., Normurodov U.E. Nitrocementation of needle sprockets made of carbon steel and their subsequent hardening and low tempering. *Universum: technical sciences*. 2021; (2-4):21–24.

20. Dyakov I.G., Burov S.V., Belkin P.N., Rozanov E.V., Zhukov S.A. Increasing wear and corrosion resistance of tool steel by anodic plasma electrolytic nitriding. *Surface and Coatings Technology*. 2019;362:124–131.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Колмыков Валерий Иванович, доктор
технических 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

Колмыков Денис Валерьевич, кандидат
технических наук, Курский государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kodan@mail.ru

Denis V. Kolmykov, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Kursk
State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kodan@mail.ru