

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-70-85>

Об использовании повторной низкотемпературной нитроцементации для эффективного упрочнения коленчатых валов автомобилей КАМАЗ, шлифованных под ремонтные размеры

В. И. Колмыков¹, Р. Ю. Костин¹ ✉, Ю. С. Воробьев¹, Д. В. Колмыков²

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

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

✉ e-mail: kostin004@gmail.com

Резюме

Целью работы является разработка эффективной технологии поверхностного упрочнения коленчатых валов двигателей КАМАЗ 740, восстановленных перешлифовкой под ремонтные размеры, путем их ускоренной низкотемпературной нитроцементации в условиях автосервисных (авторемонтных) предприятий.

Методы. Нитроцементацию образцов проводили в азотисто-углеродной пасте. Нагрев образцов с нитроцементующим покрытием проводили в лабораторной печи с вертикальной нагрузкой СШОЛ-12-МЗ-У4. Нитроцементованные образцы подвергали металлографическому анализу с использованием оптического микроскопа Axio Observer.A1m и электронного сканирующего микроскопа Quanta TM 3D200i. Фазовый анализ диффузионных слоев на образцах, нитроцементованных по различным режимам, проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S. Микротвердость нитроцементованных образцов измеряли с помощью микротвердомера Duramin-5 с компьютером и программным обеспечением. Твердость нитроцементованных образцов измеряли на твердомере ТК-2М (Роквелл) по шкале «А» по стандартной методике.

Результаты. Представлена технология низкотемпературной нитроцементации азотированных коленчатых валов автомобилей КАМАЗ после их ремонта шлифованием с удалением упрочненного слоя с поверхностей коренных и шатунных шеек. Показано, что нитроцементация стали 42ХМФА, из которой изготавливают коленчатые валы, при температуре 520...580°C в течение 3-х часов в высокоактивной пасте обеспечивает получение упрочненных слоев по глубине, структуре, фазовому составу и твердости, практически идентичных азотированным слоям. Такая нитроцементация может быть полноценной и эффективной заменой повторного азотирования восстанавливаемых валов, предусмотренного технической документацией на ремонт двигателей КАМАЗ категорий Е-2, Е-3 и Е-4.

Заключение. Невысокая трудоемкость и технологическая простота нитроцементации позволит использовать ее для упрочнения коленчатых валов всех семи ремонтных размеров, предусмотренных для этих деталей, что может дать очень большой экономический эффект.

Ключевые слова: коленчатый вал; упрочненный слой; ремонтные размеры; нитроцементация; структура; фазовый состав; микротвердость.

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

© Колмыков В. И., Костин Р. Ю., Воробьев Ю. С., Колмыков Д. В., 2023

Для цитирования: Об использовании повторной низкотемпературной нитроцементации для эффективного упрочнения коленчатых валов автомобилей КАМАЗ, прошлифованных 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>

Поступила в редакцию 11.03.2023

Подписана в печать 18.04.2023

Опубликована 30.05.2023

On the Use of Repeated Low-Temperature Nitrocementation for Effective Hardening of the Crankshafts of KAMAZ Vehicles, Ground to Repair Dimensions

Valery I. Kolmykov¹, Roman Y. Kostin¹ ✉, Yunis S. Vorobyev¹,
Denis V. Kolmykov²

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

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

✉ e-mail: kostin004@gmail.com

Abstract

Purpose of research the aim of the work is to develop an effective technology for surface hardening of the crankshafts of KAMAZ 740 engines, restored by re-grinding to repair dimensions, by means of their accelerated low-temperature nitrocementation in the conditions of car service (car repair) enterprises.

Methods. Nitrocementation of the samples was carried out in a nitrogen-carbon paste. The samples with a nitro-cementing coating were heated in a laboratory furnace with a vertical load of SSHOL-12-M3-U4. The nitrocemented samples were subjected to metallographic analysis using an Axio Observer.A1m optical microscope and a Quanta TM 3D200i electron scanning microscope. Phase analysis of diffusion layers on samples nitrocemented according to various modes was carried out on an XRD-7000S X-ray diffractometer. The microhardness of the nitrocemented samples was measured using a Duramin-5 microhardness meter with a computer and software. The hardness of the nitrocemented samples was measured on a TK-2M (Rockwell) hardness tester on the "A" scale according to the standard method.

Results. The technology of low-temperature nitrocementation of nitrided crankshafts of KAMAZ vehicles after their repair by grinding with the removal of the hardened layer from the surfaces of the root and connecting rod necks is presented. It is shown that nitrocementation of 42HMFA steel, from which crankshafts are made, at a temperature of 520...580 °C for 3 hours in a highly active paste ensures the production of hardened layers in depth, structure, phase composition and hardness are almost identical to nitrided layers. Such nitrocementation can be a full-fledged and effective replacement for the re-nitriding of the restored shafts provided for in the technical documentation for the repair of KAMAZ engines, categories E-2, E-3 and E-4.

Conclusion. The low labor intensity and technological simplicity of nitrocementation will allow it to be used to strengthen the crankshafts of all seven repair sizes provided for these parts, which can give a very large economic effect.

Keywords: crankshaft; hardened layer; repair dimensions; nitrocementation; structure; phase composition; microhardness.

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

For citation: Kolmykov V. I., Kostin R. Y., Vorobyev Y. S., Kolmykov D. V. On the Use of Repeated Low-Temperature Nitrocementation for Effective Hardening of the 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>

Received 11.03.2022

Accepted 18.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

Коленчатый вал является одной из самых дорогих и наиболее тяжелонагруженных деталей автомобильного двигателя. В процессе работы на коленчатый вал действуют знакопеременные нагрузки, вибрации и повышенные температуры, а также интенсивное трение, зачастую в неблагоприятных условиях (при масляном голоде, в присутствии абразивных частиц и агрессивных веществ). Также воздействия вызывают деструктивные процессы в материалах коленчатых валов, по большей части в поверхностных слоях, которым эти материалы должны противостоять длительное время [1–3].

Коленчатые валы двигателей КАМАЗ изготавливаются из высококачественной стали 42ХМФА (ТУ 14-1-1296-75) и упрочняются либо поверхностной закалкой ТВЧ (коленвалы двигателей экологических классов Е-О и Е-1), либо азотированием (коленвалы двигателей Е-2, Е-3 и Е-4). Последние поколения двигателей оборудованы турбонаддувом, системами Common Rail и электронным управлением и отличаются повышенной мощностью (360...440 л.с.), поэтому и к их деталям предъявляются повышенные требования по прочности и износостойкости и предопределяется использование азотирования для эффективного поверхностного упрочнения. Азотирование коленчатых валов нового поколения, проводимое в среде аммиака в течение 30 часов при температуре 560°C, обеспечивает повышение твердости коренных и шатунных шеек до HV 800...1000 и обуславливает повышение до ремонтного ресурса двигателей до 800 тыс. км. Это более чем в два раза выше ресурсов двигателей первого поколения (300...400 тыс. км.), коленчатые валы которых упрочняются поверхностной закалкой токами высокой частоты (ТВЧ) [4–6].

С другой стороны, коленчатые валы, упрочненные азотированием, имеют пониженную ремонтпригодность или вовсе

являются неремонтопригодными из-за весьма тонкого упрочненного слоя на поверхности (~0,4 мм). Это можно считать недостатком метода азотирования применительно к упрочнению коленчатых валов, т. к. повторное многократное использование таких сложных и дорогостоящих (до 200 тыс. руб.) деталей после эффективного восстановления может обеспечить значительную экономию материальных производственных и трудовых ресурсов и повысить эффективность автомобильных перевозок [7–9].

Технология ремонта коленчатых валов, принятая в настоящее время на отечественных автосервисных предприятиях, предусматривает шлифование коренных и шатунных шеек до выведения дефектов с их поверхностей, при котором с них удаляется часть металла. Такой ремонт производится с использованием ступенчатых категорий ремонтных размеров и предусматривает уменьшение диаметров шеек на одну ступень на 0,25 мм, что соответствует мировой практике двигателестроения [10–15].

Упрочненный слой на азотированном коленчатом вале весьма тонок (~0,4 мм), поэтому вал допускает только одну перешлифовку (на 0,25 мм), при которой уже заметно (в 2–3 раза) снижаются его триботехнические характеристики. После второй перешлифовки азотированный коленчатый вал практически полностью теряет упрочненный слой и становится непригодным для эксплуатации.

В руководстве по эксплуатации двигателей классов Е-2, Е-3 и Е-4 (740 37-400, 740 64-420, 740 74-420, 740 75-440 и др.) предусмотрено после второй перешлифовки дополнительное азотирование для восстановления упрочненного слоя на поверхности [5; 6]. Однако на практике дополнительное азотирование коленчатых валов не проводится ввиду его технологической сложности и высокой себестоимости

сти, а также ввиду отсутствия на автосервисных предприятиях, где производится ремонт коленчатых валов, необходимого термического оборудования.

Материалы и методы

Исследования низкотемпературной нитроцементации проводились на образцах, представляющих собой темплеты, вырезанные механическим способом с обильным охлаждением из изношенного коленчатого вала КАМАЗ 740-64 (Евро 3), ранее упрочненного (при изготовлении) газовым азотированием. Химический состав образцов, определенный на оптико-эмиссионном спектрометре OBLF VeOS, следующий: 0,43% С; 1,18% Cr; 0,43% Мо; 0,11% V; 0,77% Mn; 0,33% Si (содержание S, P, Ni и Cu – менее 0,025%). По химическому составу материал образцов соответствует стали 42ХМФА, производимой согласно ТУ 14-1-5520-2005 ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат».

Нитроцементацию образцов проводили в азотисто-углеродной пасте, которая отличается высокой активностью при температурах «мягкого азотирования» (540...580°C) и очень удобна для мелкосерийного ремонтного производства, т. к. может наноситься на детали самых различных форм и размеров, а также на отдельные (рабочие) части этих деталей [16–18].

Состав нитроцементующей пасты следующий, мас. %: карбанид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 30; железосинеродистый калий $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 20; аморфный углерод (сажа ДГ-100) 50; раствор карбометилцеллюлозы (клей КМЦ) – до состояния густой пасты. Названная паста состоит из дешёвых и весьма доступных веществ и практически безопасна с точки зрения токсичности. Паста наносилась на образцы слоем 1,5...2 мм и высушивалась, в результате чего на их поверхностях получалось твер-

дое азотисто-углеродное покрытие, хорошо удерживающееся на нитроцементуемых поверхностях. При использовании такого покрытия процесс насыщения стали азотом значительно ускоряется, т. к. генерирование активных атомов диффузанта максимально приближено к насыщаемой поверхности, где они тут же поглощаются сталью. Скорость нитроцементации в таком покрытии приближается к скорости цианирования стали в цианистых солях (например, к скорости Tenifer-процесса).

Нагрев образцов с нитроцементующим покрытием проводили в лабораторной печи с вертикальной нагрузкой СШОЛ-12-МЗ-У4 с размерами рабочего пространства $\varnothing 115 \times 220$ мм с автоматическим регулированием и поддержанием (с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$) температуры. В печь помещалась герметизированная репорта ($\varnothing 100 \times 200$ мм), в которую укладывались подготовленные образцы, и в процессе нитроцементации подливался триэтаноламин (5 кап/мин). Последний, диссоциируя при повышенной температуре, создавал в репорте азотсодержащую атмосферу и обеспечивал вытеснение кислорода и азотный подпор активного покрытия на поверхности образцов.

Температура нитроцементации принималась равной температуре азотирования, используемой при изготовлении коленчатых валов, т. е. 520...580°C, длительность нитроцементации составляла 1–3 часа (в 10–30 раз меньше длительности традиционного газового азотирования). По окончании нитроцементации образцы осаждали в воде.

Нитроцементованные образцы подвергали металлографическому анализу с использованием оптического микроскопа Axio Observer.A1m и электронного сканирующего микроскопа Quanta TM 3D200i. Последний использовался также для рентгеноспектрального анализа поверхностей

нитроцементованных образцов для определения их элементного состава. Фазовый анализ диффузионных слоев на образцах, нитроцементованных по различным режимам, проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S. Рентгеновская съемка проводилась в хромовом $K\alpha$ -излучении, регистрация и расшифровка дифрактограмм с выводом на экран монитора и фиксированием результатов в памяти.

Микротвердость нитроцементованных образцов измеряли с помощью микротвердомера Duramin-5 с компьютером и программным обеспечением, позволяющим измерять отпечатки индентора автоматически. Распределение микротвердости по сечению диффузионных слоев на

нитроцементованных образцах из стали 42ХМФА исследовали на поперечных не травленных микрошлифах. Твердость нитроцементованных образцов измеряли на твердомере ТК-2М (Роквелл) по шкале «А» по стандартной методике.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследования низкотемпературной нитроцементации («мягкого азотирования») стали 42ХМФА показывает, что при всех исследованных температурах (520...580°C) на поверхности стали образовались упрочненные слои, имеющие две чётко выраженные зоны (рис. 1).

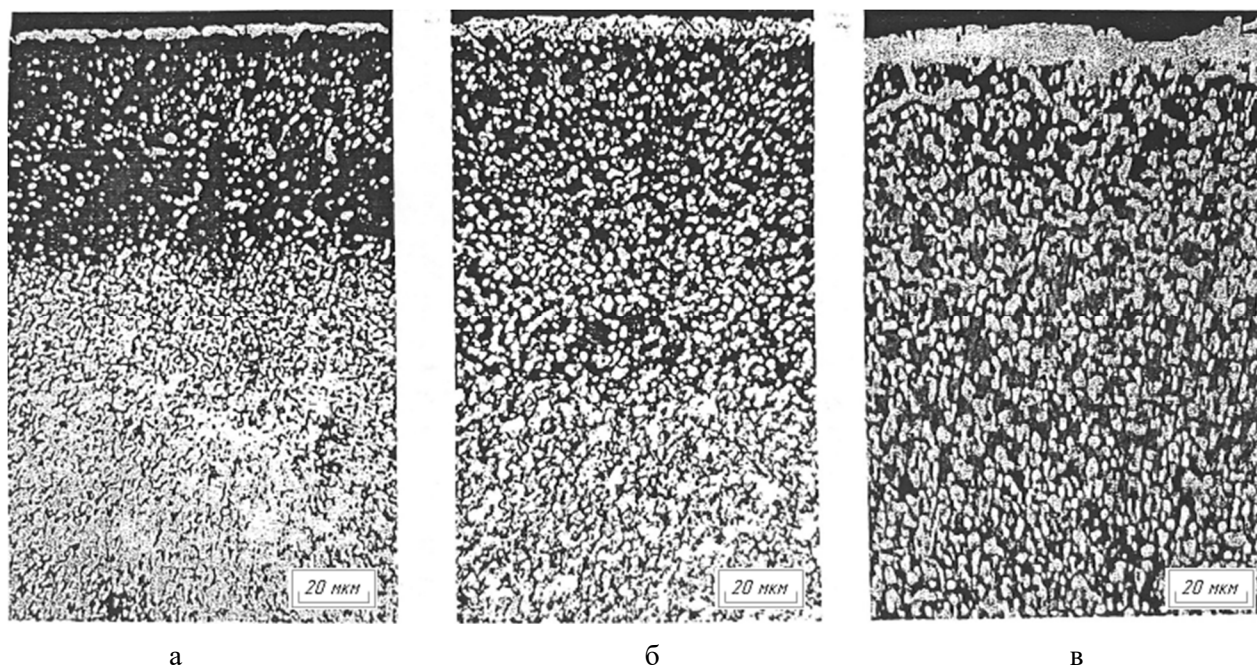


Рис. 1. Микроструктуры диффузионных слоев на поверхности стали 42ХМФА, нитроцементованной в высокоактивной среде в течение 3-х часов при различных температурах: а – 520°C; б – 560°C; в – 580°C.

Fig. 1. Microstructures of diffusion layers on the surface of 42HMFA steel, nitrocemented in a highly active medium for 3 hours at various temperatures: a – 520°C; б – 560°C; c – 580°C

Поверхностные слои, полученные низкотемпературной нитроцементацией стали 42ХМФА в высокоактивной среде за относительно небольшое время, по структуре практически идентичны азоти-

рованным слоям, полученным азотированием этой стали в газовой атмосфере при изготовлении коленчатых валов на заводе (рис. 2).

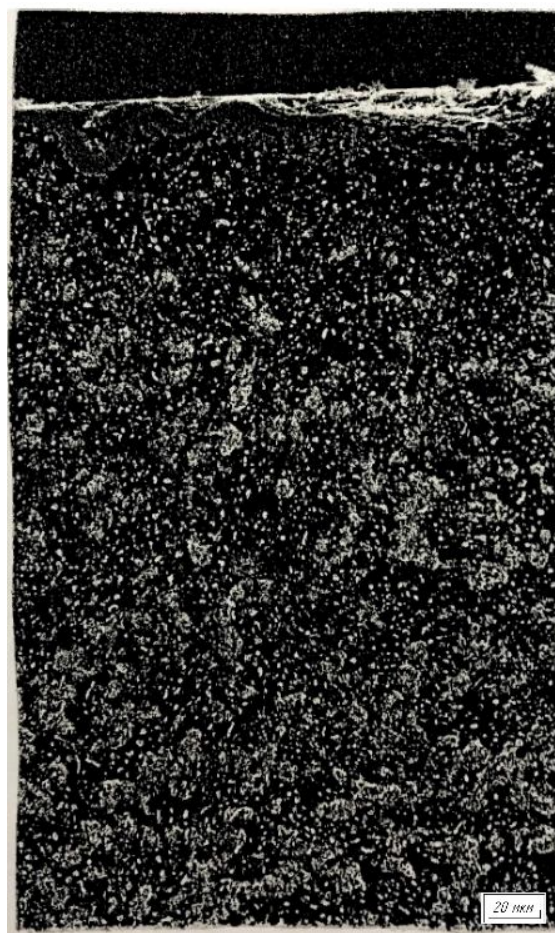


Рис. 2. Микроструктура азотированного слоя на стали 42ХМФА, полученного в атмосфере аммиака при температуре 520°С в течение 30 часов

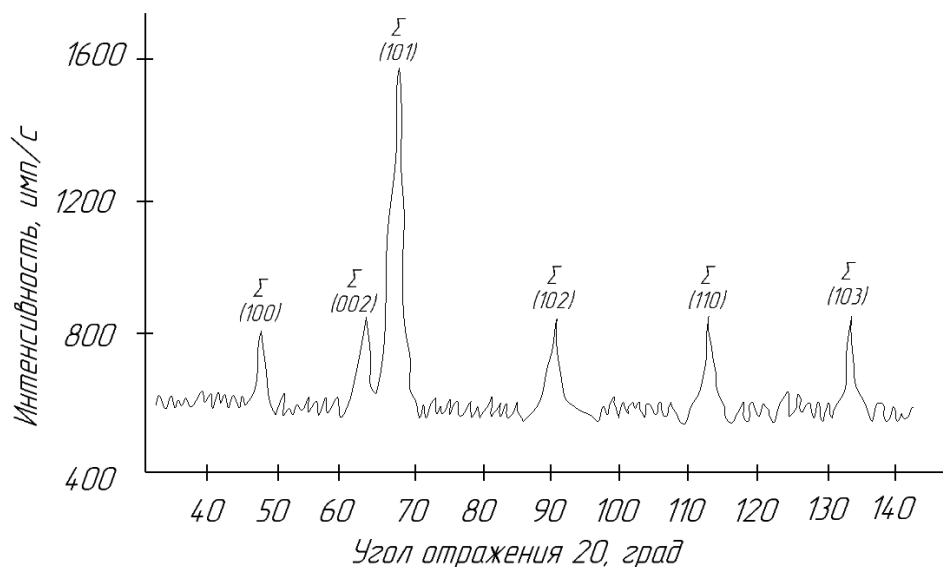
Fig. 2. Microstructure of the nitrided layer on 42HMPH steel obtained in an ammonia atmosphere at a temperature of 520° C for 30 hours

На поверхности всех нитроцементованных слоёв имеются тонкие нетравящиеся зоны (корка), как и на азотированном слое, где эта корка представлена нитридами железа и легирующих элементов [19]. Поверхностные зоны на нитроцементованных слоях представлены карбонитридами, изоморфными с гексагональным ϵ -нитридом (рис. 3, а). Под зоной карбонитридов в нитроцементованных слоях находятся более глубокие двухфазные зоны, как и в азотированных слоях, состоящих из λ -твёрдого раствора и многочисленных включений ϵ -фазы (рис. 3, б).

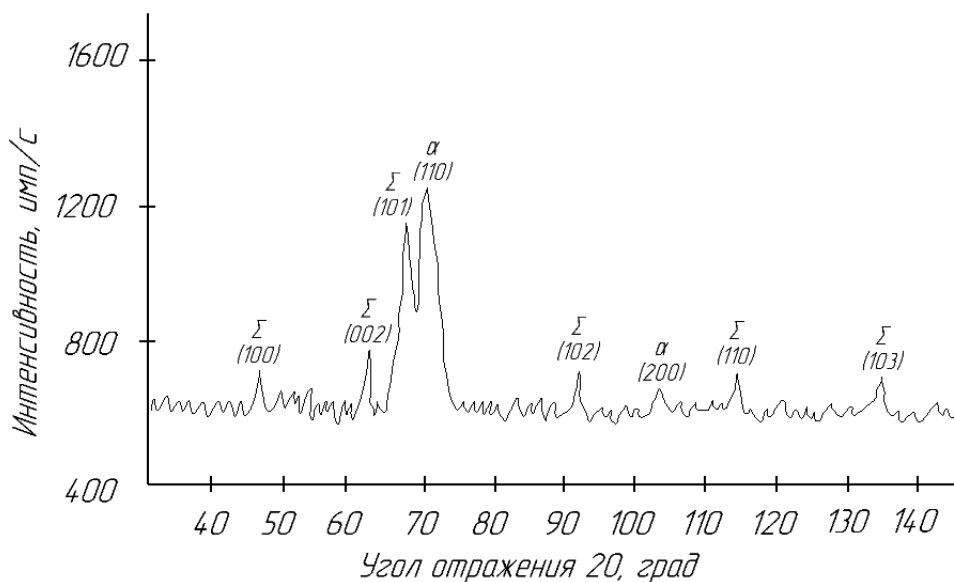
Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами фунда-

ментальных работ Б. Прженосила [20], где показано, что строение нитроцементованных слоев определяется активностью азота и углерода в стали, которая зависит, главным образом, от температуры процесса и от состава насыщающей среды.

При температурах «мягкого азотирования» (520...580°С) исходная структура стали представлена ферритом, в котором точно хорошо растворяется азот и не растворяется углерод. Концентрация углерода в нитроцементованных слоях, полученных при температурах 520...580°С, практически не отличается от исходной концентрации стали.



а



б

Рис. 3. Дифрактограммы нитроцементованного (560°C, 3 часа) слоя стали 42ХМФА:
а – поверхность; б – 0,1 мм от поверхности.

Fig. 3. Diffractograms of nitro-cemented (560°C, 3 hours) 42HMFA steel layers: а – surface;
б – 0.1 mm from the surface

На нитроцементованной поверхности исследуемой стали 42ХМФА (в карбонитридной зоне) наблюдается повышенное содержание азота, а также некоторое количество углерода, входящего, по-видимому, в состав ϵ -фазы. Кроме того, на поверхности имеются следы хрома, воль-

фрама и молибдена, присутствующие в стали в виде легирующих элементов (рис. 4).

Исследования показали, что глубина и твердость диффузионных слоев на стали 42ХМФА заметно зависит от температуры нитроцементации (табл.).

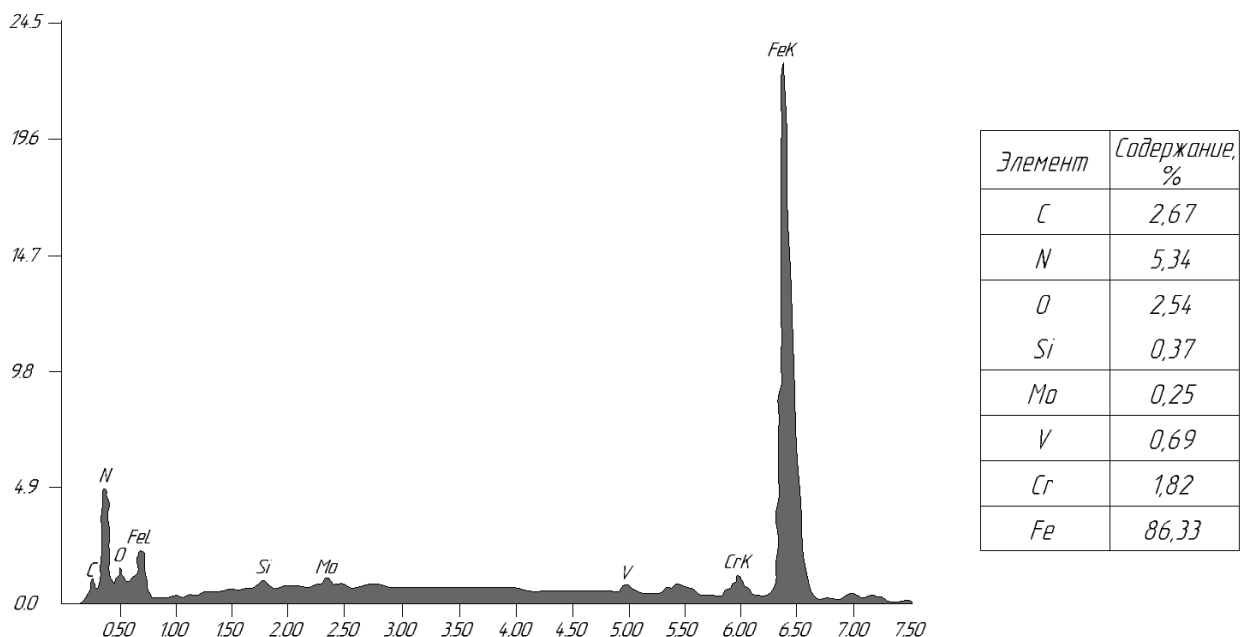


Рис. 4. Рентгеновский спектр, снятый с поверхности, стали 42ХМФА, нитроцементованной при температуре 560°C в течение 3-х часов

Fig. 4. X-ray spectrum taken from the surface of 42HMFA steel, nitrocemented at a temperature of 560°C for 3 hours

Таблица 1. Глубина и твердость упрочненных слоев на поверхности стали 42ХМФА

Table 1. The depth and hardness of the hardened layers on the surface of steel 42KHMFA

Характер упрочняющей обработки	Общая глубина упрочненного слоя, мм	Толщина карбонитридной (нитридной) зоны, мкм	Поверхностная твердость, HRA
Нитроцементация, 520°C, 3 ч	0,16...0,18	8...12	78...80
Нитроцементация, 560°C, 3 ч	0,23...0,28	25...30	80...84
Нитроцементация, 580°C, 3 ч	0,27...0,31	37...41	82...85
Азотирование, 560°C, 30 ч	0,28...0,30	9...12	80...82

При повышении температуры нитроцементации увеличивается как общая глубина упрочненного слоя на поверхности стали 42ХМФА, так и, особенно, толщина карбонитридной зоны (корки) на поверхности. Повышение температуры обработки образцов в высокоактивной среде от 520°C до 580°C при одинаковом времени обработки вызывает увеличение глубины нитроцементованного слоя в 1,6 раза, а увеличение толщины карбонитридной зоны – почти в 4 раза. Очевидно, что в ис-

пользуемой для нитроцементации азотисто-углеродной среде создаются благоприятные условия (повышенная активность азота и углерода) для образования избыточных карбонитридов в нитроцементованных слоях при повышении температуры.

При этом надо отметить, что температура нитроцементации влияет на общую твердость упрочненных слоев, которая является интегральной характеристикой их механических свойств, незначительно. Во

всех случаях нитроцементованные слои имеют весьма высокую твердость HRA 80 и более (8200...8800 МПа).

Сравнивая структуру и свойства нитроцементованных и азотированных слоев на стали 42ХМФА (см. рис. 1 и 2, табл.), можно сделать вывод о том, что низкотемпературный процесс соответствует практически «чистому азотированию», при этом скорость насыщения стали с использованием предлагаемой высокоактивной

азотисто-углеродной пасты значительно (на порядок) выше, чем в газовой среде на основе аммиака. В этом состоит главное преимущество низкотемпературной нитроцементации перед азотированием.

Нитроцементованные, а по существу, азотированные слои на поверхности стали 42ХМФА ввиду весьма сложной структуры имеют неравномерное распределение микротвердости по глубине (рис. 5).

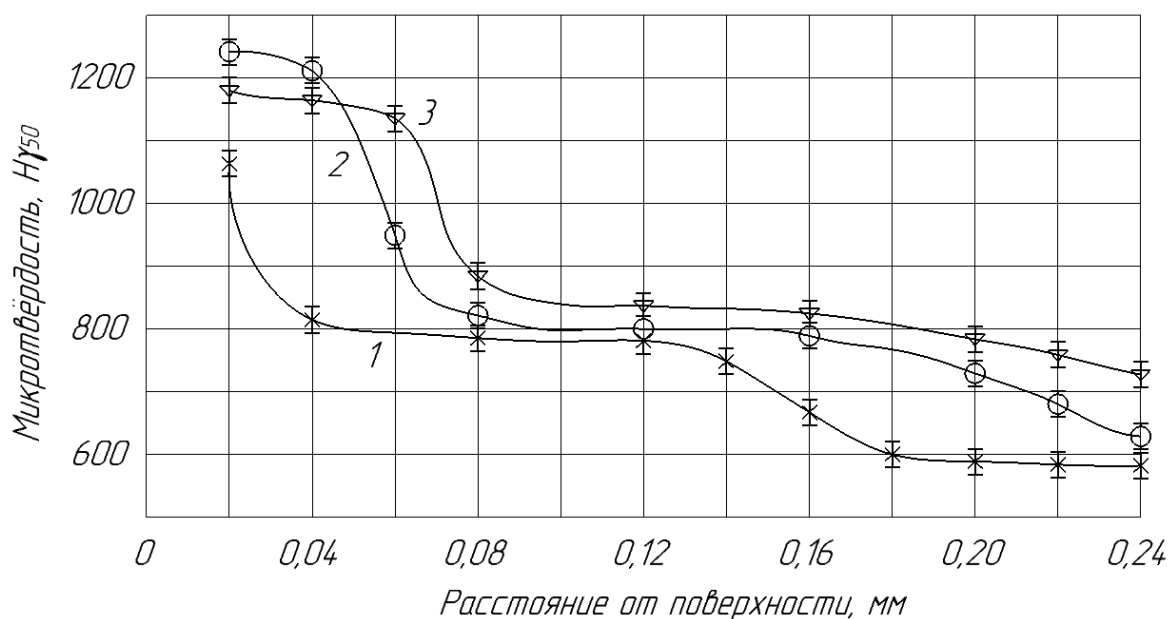


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине диффузионных слоев на поверхности стали 42ХМФА, нитроцементованной в высокоактивной среде в течение 3-х часов при различных температурах: 1 – 520°C; 2 – 560°C; 3 – 580°C.

Fig. 5. Microhardness distribution over the depth of diffusion layers on the surface of 42HMF steel, nitrocemented in a highly active medium for 3 hours at various temperatures: 1 – 520°C; 2 – 560°C; 3 – 580°C.

Максимальная микротвердость поверхности стали 42ХМФА, равная H_m 1240, получается при температуре нитроцементации 560°C, что соответствует температурному режиму традиционного азотирования в аммиаке. При температуре нитроцементации ниже или выше названной оптимальной температуры наблюдается заметное снижение микротвердости поверхностных зон в диффузионных

слоях. Это обусловлено особенностями их структуры и фазового состава.

Карбонитридная корка, образующаяся при пониженной температуре нитроцементации, еще не полностью сформировалась, имеет рыхлое строение и несплошности. При повышенной температуре азотонауглероживания в структуре карбонитридной зоны, наряду с высокотвердой азотистой ε -фазой, появляется обогащенная

γ -фаза и орторомбической фаза, изоморфная с цементитом.

Под коркой карбонитридов в нитроцементованных слоях во всех случаях наблюдается резкое снижение твердости, до H_m 800...900, что соответствует закаленному мартенситу с зернографичным упрочнением карбонитридами. Глубина зоны с такой твердостью в нитроцементованном слое совпадает с глубиной этого слоя, а при переходе к сердцевине твердость плавно уменьшается до постоянных значений H_m 550...600.

Наличие на поверхности стали нитроцементованных слоев, твердость которых сопоставима с твердостью абразивных частиц, могущих попасть в зону трения

между шейками коленчатого вала и соответствующими вкладышами (например, частиц кварца с твердостью H_m 1000), обеспечит высокую износостойкость нитроцементованных деталей [21].

Для эффективного упрочнения коленчатых валов имеет значение не только твердость поверхности, но и глубина упрочненных слоев, от которой зависит длительность работы вала в условиях минимального изнашивания. На рисунке 6 представлены кинетические кривые роста общей глубины диффузионных слоев и карбонитридных зон на поверхности этих слоев при нитроцементации стали 42ХМФА при оптимальной температуре 560°C.

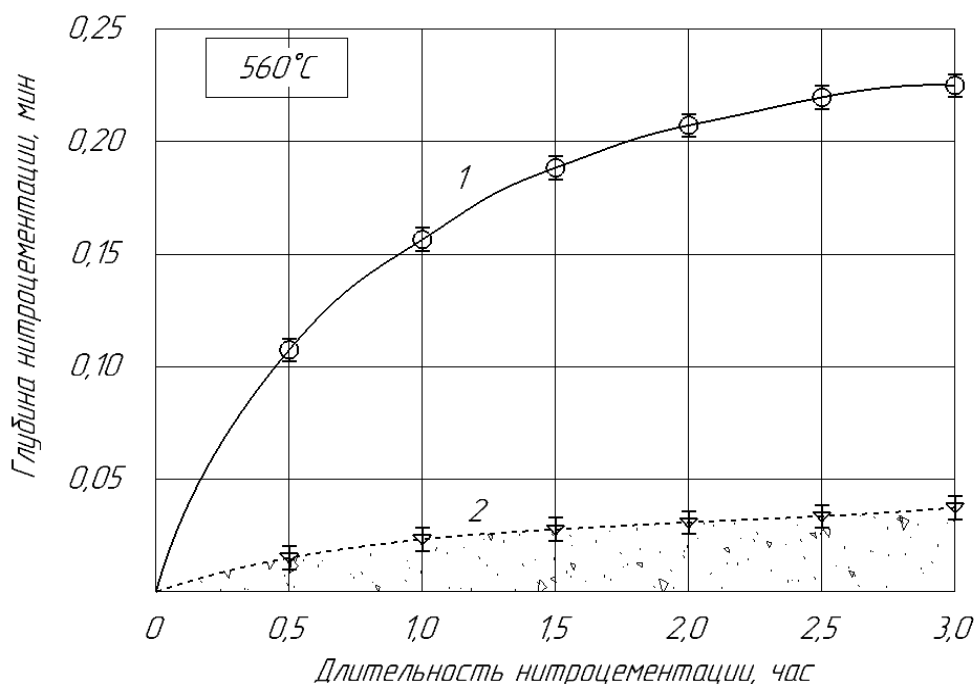


Рис. 6. Зависимость глубины нитроцементации (560°C) стали 42ХМФА от длительности обработки: 1 – общая глубина; 2 – глубина карбонитридной зоны на поверхности

Fig. 6. Dependence of the depth of nitrocementation (560°C) of 42ХМФА steel on the duration of treatment: 1 - the total depth; 2 - the depth of the carbonitride zone on the surface

При увеличении длительности нитроцементации стали 42ХМФА в высокоактивной насыщающей среде скорость роста диффузионных слоев постепенно уменьшается, что, по-видимому, связано со спецификой диффузионных процессов в гете-

рофазных структурах, содержащих карбонитриды, через которые идет диффузия азота.

Наиболее распространенным карбонитридом в тройной системе Fe-C-N (при температуре нитроцементации 560°C) яв-

ляется гексагональная фаза ϵ , которая может быть обозначена стехиометрической формулой $\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$. Она изоморфна с одноименным нитридом, в решетке которого некоторые атомы азота замещены углеродом. Карбонитрид ϵ при одной и той же кристаллической решетке может иметь переменный состав – общее содержание азота и углерода в нем может колебаться от 26,9 до 33,3 ат. % N и C. Такая широкая область гомогенности карбонитрида ϵ по азоту делает возможным диффузию этого элемента через корку карбонитрида на поверхности нитроцементуемой стали. Тем не менее увеличение толщины этой корки снижает интенсивность диффузии через неё азота, что и проявляется в уменьшении скорости нитроцементации при повышении длительности процесса [22].

Высокая твердость нитроцементованных слоев на стали 42ХМФА распространяется на глубину, больше глубины допускаемых износов коленчатых валов, предопределяет возможность использования этого процесса для поверхностного упрочнения таких деталей. Очевидно, что, обеспечивая характеристики структуры и свойств поверхностных слоев, сходные с азотированием, низкотемпературная нитроцементация может служить полноценной заменой азотирования. При этом затраты времени, электроэнергии и денежных средств, необходимых для проведения нитроцементации, будут в разы меньше, чем затраты на процессе азотирования.

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать технологические рекомендации по восстановлению азотированных коленчатых валов автомобилей КАМАЗ. Такие валы, получившие в процессе эксплуатации износы и погибы, превышающие допустимые значения, подвергаются шлифованию на специализированных станках по стандартной технологии. Этими работами занимаются

многочисленные автосервисные и ремонтные предприятия, как российские, так и зарубежные.

При шлифовании коленчатых валов с рабочих поверхностей шеек удаляется наряду с дефектным металлом и упрочненный слой, что является существенным недостатком названной технологии. Нами для восстановления упрочненного слоя на шлифованных коленвалах предлагается усовершенствовать существующую технологию следующим образом.

На шлифованные поверхности коленчатых валов (коренные и шатунные шейки и галтели) наносится кистью, шприцем или другим способом нитроцементующая паста слоем 1,5...2 мм и высушивается. Коленчатые валы с сухим азотисто-углеродным покрытием могут сразу загружаться в печь или храниться до укомплектования партии валов для их одновременной обработки.

Подготовленные таким образом восстанавливаемые валы загружаются в нитроцементационную печь в вертикальном положении для предотвращения деформации при повышенной температуре в процессе обработки. Для такой загрузки необходимо использовать специальное приспособление.

При длине коленчатого вала автомобиля КАМАЗ 790 мм и диаметре 225 мм размеры рабочего пространства печи должны допускать вертикальное расположение нитроцементуемых валов. Например, нитроцементацию коленчатых валов можно проводить в шахтной печи СШЦМ 6.12/9,5, внутренние размеры репорты которой составляют $\varnothing 600 \times 1200$ мм. В такую печь можно одновременно загрузить 5–6 валов, что будет повышать производительность нитроцементации.

Температура в печи должна составлять 540...560°C, длительность нитроцементации – до 3-х часов. В процессе выдержки в репорте печи необходимо через капельницу подавать триэтаноламин

(60 кап/мин) для создания в репорте небольшого избыточного давления азотсодержащей атмосферы (продуктов диссоциации триэтанолamina).

После нитроцементации коленчатые валы извлекаются из печи и охлаждаются на спокойном воздухе или в потоке воздуха от вентилятора. Затем нитроцементованные валы очищаются от остатков обработанного покрытия и подвергаются легкой полировке (0,05...0,010 мм) по поверхностям шеек и галтелей. В таком виде коленчатые валы с повторно упрочненными рабочими поверхностями готовы к установке в блоки двигателей в комплекте с соответствующими ремонтными вкладышами.

Повторная низкотемпературная нитроцементация может быть относительно легко внедрена на автосервисных предприятиях, ремонтирующих коленчатые валы, для чего потребуется только одна нитроцементационная печь (например, СШЦМ 6.12/9,5 стоимостью ~6,5 млн руб.). Повторная нитроцементация (аналогичная азотированию) позволит эффективно восстанавливать коленчатые валы автомобилей КАМАЗ нового поколения с исходным азотированием (Е-2, Е-3 и Е-4). Это позволит многократно использовать каждый дорогостоящий коленчатый вал в соответствии с разработанной ВНИИ ТУВИД «Ремдеталь» гаммой ремонтных размеров, предусматривающей семь ремонтных размеров (от Р0 до Р6), что может дать очень большой экономический эффект и значительно повысить эффективность автомобильных перевозок.

Выводы

На основе проведенных исследований разработаны технологические рекомендации по повторному упрочнению коленчатых валов автомобилей КАМАЗ, подвергнутых шлифованию под ремонтные размеры, путем низкотемпературной

обработки в высокоактивной азотисто-углеродной пасте на основе карбамида и железосинеродистого калия. Такая обработка может проводиться на автосервисных предприятиях, т. к. не требует использования специализированного оборудования, необходимого для повторного азотирования, и характеризуется небольшой длительностью (до 3-х часов), технологической простотой и экономичностью.

Диффузионные слои, образующиеся на стали 42ХМФА в результате нитроцементации при температурах 520...580°C, соответствующих температурам традиционного газового азотирования, принятого на заводе КАМАЗ, имеют глубину, структуру и фазовый состав, аналогичные азотированным слоям. При этом длительность нитроцементации более чем в 10 раз меньше длительности азотирования и, соответственно, во столько же раз меньше затраты на обработку.

Высокая твердость нитроцементованных слоев на шейках коленчатого вала, практически равная твердости азотированных слоев, и их достаточно большая глубина позволит увеличить послеремонтные ресурсы восстановленных валов до уровня новых азотированных деталей. Повторная нитроцементация дает возможность многократно ремонтировать дорогостоящие коленчатые валы автомобилей КАМАЗ нового поколения, используя всю гамму ремонтных размеров, предусмотренную технической документацией (семь ремонтных размеров). При этом может быть получен значительный экономический эффект при эксплуатации автомобилей КАМАЗ.

Кроме того, предлагаемая технология низкотемпературной нитроцементации благодаря простоте и экономичности может быть использована для упрочнения коленчатых валов и многих других автотракторных двигателей при их ремонте и изготовлении.

Список литературы

1. Лиханов В. А. Двигатели КАМАЗ. Киров: Вятская ГСХА, 2018. 190 с.
2. Денисов А. С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобиля. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 1999. 352 с.
3. Буравцев С. К. О состоянии характеристик коленчатых валов и их влиянии на показатели двигателей // Двигателестроение. 2006. № 1(223). С. 38–42.
4. Автомобили КАМАЗ 6х4: техническое обслуживание и ремонт / под ред. В. Н. Баруна. М.: Изд-во МО СССР, 1983. 127 с.
5. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию двигателей экологического класса Евро-3,4 740.60–3902010РЭ. Набережные Челны: ОАО КАМАЗ, 2011.
6. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. Двигатели КАМАЗ 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.51-320, 740.50-390.1001 КД. экологического класса Евро-3,4 740.60–3902010РЭ. Набережные Челны: ОАО КАМАЗ, 2002.
7. Исследование ремонтпригодности коленчатых валов двигателей КАМАЗ. Технический отчет. Набережные Челны: ОАО КАМАЗ НТЦ, 2004.
8. Петросов В. В. Ремонт автомобилей и двигателей. М.: Изд. «Академия», 2007. 222 с.
9. Восстановление деталей автомобилей КАМАЗ / Р. А. Азаматов, В. Г. Дажин, А. Т. Кулаков, А. И. Модин / под ред. В. Г. Дажина. Набережные Челны: ОАО КАМАЗ, 1994. 215 с.
10. Агеева Е. В., Агеев Е. В. Повышение качества ремонта и восстановление деталей современных транспортных систем // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки. 2011. Вып. № 3. С. 503–509.
11. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / Ю. А. Кузнецов, И. Н. Кравченко, А. А. Севрюков, М. А. Глинский // Технологии металлов. 2019. № 5. С. 34–40.
12. Каталог деталей и сборочных единиц КАМАЗ-65111 с двигателями уровня Евро-1, Евро-2, Евро-3 65111-3902001 КД. Набережные Челны: ОАО КАМАЗ, 2010.
13. Черноиванов В. И., Лялякин В. П., Литовченко Н. Н. Ресурсосберегающие восстановительно-упрочняющие технологии – основа вторичного производства деталей // Вестник Орловского государственного аграрного университета. Ремонт и организация технического сервиса. 2009. № 1. С. 2–5.
14. Бондарев С. А. Совершенствование технологии восстановления коленчатых валов // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2(5). С. 47–51.
15. Тугушев Б. Ф. Мировая практика восстановления коленчатых валов // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвузовский научный сборник. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. С. 69–85.
16. Карбонитрирование улучшаемых сталей в пастах / В. И. Колмыков, В. М. Переверзев, А. А. Барабаш, С. Н. Савельев. Курск: Изд-во Курской гос. с/х акад., 2000. С. 67–72.
17. Низкотемпературное цианирование конструкционных улучшаемых сталей в твердой среде / А. А. Барабаш, В. Н. Долженков, В. И. Колмыков, В. М. Переверзев, В. П. Пивовар. Курск: Изд-во Курской гос. с/х акад., 2000. С. 67–72.
18. Разработка и исследование высокоактивной насыщенной среды для нитроцементации сталей при низких и высоких температурах / В. И. Колмыков, Н. Д. Тутов, А. А. Нику-

лин [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2008: сборник материалов XV Российской научно-технической конференции с международным участием / Курск. гос. техн. ун-т; редкол.: В. Н. Гадалов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2008. С. 139–144.

19. Прокошкин Д.А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация. М.: Металлургия, 1984. 240 с.

20. Прженосил Б. Нитроцементация. М.: Металлургия, 1969. 212 с.

21. Колмыков В. И., Емельянов С. Г., Гарайбе Н. С. Об эксплуатационных свойствах материалов с гетерофазными структурами // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сборник материалов XVII Российской научно-технической конференции с международным участием / Курск. гос. техн. ун-т; редкол.: В. Н. Гадалов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2010. С. 155–158.

22. Диффузия углерода и азота через корку карбонитридов / В. И. Колмыков, Е. А. Рязанцев, Н. С. Гарайбе [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2009: сборник материалов XVI Российской научно-технической конференции с международным участием / Курск. гос. техн. ун-т; редкол.: В. Н. Гадалов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2009. Ч. 2. С. 4–8.

References

1. Likhanov V. A. Dvigateli KAMAZ [KAMAZ engines]. Kirov, Vyatka St. Agricultural Acad. Publ., 2018. 190 p.

2. Denisov A. S. Osnovy formirovaniya ekspluatatsionno-remontnogo tsikla avtomobilya [Fundamentals of the formation of the operational and repair cycle of the car]. Saratov, Saratov St. Univ. Publ., 1999. 352 p.

3. Buravtsev S. K. O sostoyanii kharakteristik kolenchatykh valov i ikh vliyaniy na pokazateli dvigatelei [On the state of characteristics of crankshafts and their influence on engine performance]. *Dvigatestroenie = Engine building*, 2006, no. 1(223), pp. 38–42.

4. Avtomobili KAMAZ 6kh4: tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont [KAMAZ 6x4 cars: maintenance and repair]; ed. by V. N. Barun. Moscow, Izd-vo MO SSSR, 1983. 127 p.

5. Rukovodstvo po ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu dvigatelei ekologicheskogo klassa Evro-3,4 740.60–3902010RE [Operation and maintenance manual for Euro-3,4 environmental class engines 740.60–3902010RE]. Naberezhnye Chelny, JSC KAMAZ, 2011.

6. Rukovodstvo po ekspluatatsii, tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu. Dvigateli KAMAZ 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.51-320, 740.50-390.1001 KD. ekologicheskogo klassa Evro-3,4 740.60–3902010RE [Operation, maintenance and repair manual. KAMAZ engines 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.51-320, 740.50-390.1001 CD. ecological class Euro-3,4 740.60–3902010RE]. Naberezhnye Chelny, JSC KAMAZ, 2002.

7. Issledovanie remontoprigradnosti kolenchatykh valov dvigatelei KAMAZ. Tekhnicheskii otchet [Investigation of maintainability of crankshafts of KAMAZ engines. Technical report]. Naberezhnye Chelny, JSC KAMAZ STC, 2004.

8. Petrosov V. V. Remont avtomobilei i dvigatelei [Repair of cars and engines]. Moscow, Academy Publ., 2007. 222 p.

9. Azamatov R. A., Dazhin V. G., Kulakov A. T., Modin A. I. Vosstanovlenie detalei avtomobilei KAMAZ [Restoration of parts of KAMAZ cars]; ed. by V. G. Dazhin. Naberezhnye Chelny, JSC KAMAZ, 1994. 215 p.

10. Ageeva E. V., Ageev E. V. Povyshenie kachestva remonta i vosstanovlenie detalei sovremennykh transportnykh sistem [Improving the quality of repair and restoration of parts of mo-

dern transport systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Series: Technical Sciences*, 2011, is. 3, no. 3, pp. 503–509.

11. Kuznetsov Yu. A., Kravchenko I. N., Sevryukov A. A., Glinsky M. A. Tekhnologicheskie metody povysheniya dolgovechnosti detalei mashin [Technological methods of increasing the durability of machine parts]. *Tekhnologii metallov = Technologies of metals*, 2019, no. 5, pp. 34–40.

12. Katalog detalei i sborochnykh edinit KAMAZ-65111 s dvigatelyami urovnya Evro-1, Evro-2, Evro-3 65111-3902001 KD [Catalog of parts and assembly units of KAMAZ-65111 with Euro-1, Euro-2 engines, Euro-3 65111-3902001 CD]. Naberezhnye Chelny, JSC KAMAZ, 2010.

13. Chernoi Ivanov V. I., Lyalyakin V. P., Litovchenko N. N. Resursoberegayushchie vosstanovitel'no-uprochnyayushchie tekhnologii – osnova vtorichnogo proizvodstva detalei [Resource-saving restorative and strengthening technologies – the basis of secondary production of machine parts]. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Remont i organizatsiya tekhnicheskogo servisa = Bulletin of the Orel State Agrarian University. Repair and Organization of Technical Service*, 2009, no. 1, pp. 2–5.

14. Bondarev S. A. Sovershenstvovanie tekhnologii vosstanovleniya kolenchatykh valov [Improving the technology of restoring crankshafts]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2016, no. 2(5), pp. 47–51.

15. Tugushev B. F. [The world practice of restoring crankshafts]. Vosstanovlenie i uprochnenie detalei mashin. Mezhvuzovskii nauchnyi sbornik [Restoration and strengthening of machine parts. Interuniversity scientific collection]. Saratov, Saratov St. Techn. Univ. Publ., 2001, pp. 69–85.

16. Kolmykov V. I., Pereverzev V. M., Barabash A. A., Savelyev S. N. Karbonitrirovaniye uluchshaemykh stalei v pastakh [Carbonitriding of improved steels in pastes]. Kursk, Kursk St. Agrarian Acad. Publ., 2000, pp. 67–72.

17. Barabash A. A., Dolzhenkov V. N., Kolmykov V. I., Pereverzev V. M., Pivovarov V. P. Nizkotemperaturnoe tsianirovaniye konstruksionnykh uluchshaemykh stalei v tverdoi srede [Low-temperature cyanidation of structural improved steels in a solid medium]. Kursk, Kursk St. Agrarian Acad. Publ., 2000, pp. 67–72.

18. Kolmykov V. I., Tutov N. D., Nikulin A. A., eds. [Development and research of a highly active saturated medium for nitrocementation of steels at low and high temperatures]. *Materialy i uprochnyayushchie tekhnologii – 2008. Sbornik materialov XV Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials and hardening technologies – 2008. Collection of materials of the XV Russian Scientific and technical conference with international participation]; ed. by V. N. Gadalov. Kursk, Kursk St. Technical Univ. Publ., 2008, pp. 139–144. (In Russ.)

19. Prokoshkin D. A. Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov – karbonitratsiya [Chemical and thermal treatment of metals – carbonitration]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984. 240 p.

20. Przhenosil B. Nitrotsementatsiya [Nitrocementation]. Moscow, Metallurgy Publ., 1969. 212 p.

21. Kolmykov V. I., Emelyanov S. G., Garaibe N. S. [On the operational properties of materials with heterophase structures]. *Materialy i uprochnyayushchie tekhnologii 2009. Sbornik materialov XVII Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem – 2010* [Materials and hardening technologies – 2010. Collection of materials of the XVI Russian scientific and technical conference with international participation]; ed. by V. N. Gadalov. Kursk, Kursk St. Technical Univ. Publ., 2010, pp. 155–158. (In Russ.)

22. Kolmykov V. I., Ryazantsev E. A., Garaibe N. S., eds. [Diffusion of carbon and nitrogen through the crust of carbonitrides]. *Materialy i uprochnyayushchie tekhnologii – 2009. Sbornik materialov XVI Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials and hardening technologies – 2009. Collection of materials of the XVII russian scientific and technical conference with international participation]; ed. by V. N. Gadlov. Kursk, Kursk St. Technical Univ. Publ., 2009, pp. 4–8. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Колмыков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kodan1@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4002-6785

Valery I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kodan1@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4002-6785

Костин Роман Юрьевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kostin004@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0271-9073

Roman Y. Kostin, Post-Graduate Student of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kostin004@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0271-9073

Воробьев Юнис Сергеевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: korolev37-31-72@mail.ru

Yunis S. Vorobyev, Post-Graduate Student of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: korolev37-31-72@mail.ru

Колмыков Денис Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и безопасности жизнедеятельности, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kodan@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5494-534X

Denis V. Kolmykov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Life Safety, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kodan@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5494-534X