

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-3-15

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ В ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

Г.С. Севальнев¹, Е.И. Ульянов¹, К.В. Дульнев¹, Т.Г. Севальнева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследована кинетика диффузионного насыщения углеродом, формирования микроструктуры и твердости диффузионных слоев в экономнолегированной высокоазотистой конструкционной стали с различной концентрацией азота при вакуумной цементации. Установлено, что увеличение продолжительности технологического процесса с 1 до 4 ч приводит к повышению протяженности диффузионного слоя на 60–90 %, а увеличение концентрации азота в твердом растворе с 0,13 до 0,22 % (по массе) – к интенсификации процесса образования избыточных фаз и росту зоны со стабильной аустенитной структурой.

Ключевые слова: высокоазотистые стали, химико-термическая обработка, твердость, микроструктура, карбиды, нитриды, фазовый состав

Для цитирования: Севальнев Г.С., Ульянов Е.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Особенности формирования диффузионных слоев в экономнолегированной высокоазотистой конструкционной стали при вакуумной цементации // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-3-15.

Scientific article

FORMATION FEATURES OF DIFFUSION LAYERS IN ECONOMICALLY ALLOYED HIGH-NITROGEN STRUCTURAL STEEL DURING VACUUM CARBURIZATION

G.S. Sevalnev¹, E.I. Ulyanov¹, K.V. Dulnev¹, T.G. Sevalneva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The kinetics of diffusion saturation with carbon, the formation of the microstructure and hardness of diffusion layers in economically alloyed high-nitrogen structural steel with different nitrogen concentrations during vacuum carburizing were studied. It was established that an increase in the time of the technological process from 1 to 4 hours leads to an increase in the length of the diffusion layer by 60–90 %, and an increase in the nitrogen concentration in the solid solution from 0,13 to 0,22 wt. % leads to an intensification of the process of formation of excess phases and an increase in the zone with a stable austenitic structure.

Keywords: high nitrogen steels, chemical heat treatment, hardness, microstructure, carbides, nitrides, phase composition

For citation: Sevalnev G.S., Ulyanov E.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Formation features of diffusion layers in economically alloyed high-nitrogen structural steel during vacuum carburization. *Trudy VIAM*, 2025, no. 1 (143), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-3-15.

Введение

Стремительные темпы научно-технического прогресса приводят к необходимости разработки и конструирования нового технологического, исследовательского и испытательного оборудования с тяжело нагруженными узлами подвижных механизмов. В связи с этим возникает потребность в применении более высокопрочных и стойких к внешнему воздействию конструкционных материалов.

Одними из наиболее востребованных материалов в современном машиностроении являются конструкционные экономнолегированные стали мартенситного класса, которые обеспечивают комплекс высоких механических, триботехнических и контактно-усталостных характеристик при достаточно низкой стоимости и высокой технологичности производства полуфабрикатов [1–7].

Для современной промышленности перспективными материалами на основе железа являются конструкционные и коррозионностойкие стали, содержащие высокие концентрации азота в качестве легирующего элемента [8–14]. Легирование азотом мартенситной структуры наряду с высокими прочностными характеристиками позволяет обеспечить высокие значения ударной вязкости, относительного удлинения и других параметров пластичности. Существенным преимуществом перед конструкционными углеродистыми сталями является формирование мелкодисперсных избыточных фаз без их значительного укрупнения в процессе нагрева, что обеспечивает более высокий уровень триботехнических и контактно-усталостных характеристик при фрикционном взаимодействии.

Конструкционные стали типа 12Х2Н4А, 20Х3МВФ, ВКС-5, ВКС-7, ВКС-10 и др. [15–23], предназначенные для изготовления тяжело нагруженных элементов, таких как шестерни, зубчатые колеса и подшипники качения, подвергаются химико-термической обработке для обеспечения более высокого уровня износостойкости, контактной и изгибной выносливости при реализации контактно-усталостного воздействия. В качестве химико-термической обработки для данных сталей применяется цементация, в некоторых случаях – комбинация процессов цементации и азотирования. В ряде работ [16, 17, 19, 21] представлены результаты подробного изучения процессов формирования структуры и диффузионных слоев при газовой и вакуумной цементации этих сталей.

Для обеспечения высокой концентрации азота (превышающей равновесную) в конструкционные стали вводят легирующие элементы Cr, Mo, V, W, Mn, повышающие растворимость азота [9]. Кроме того, они являются достаточно сильными карбидообразующими элементами, увеличивающими твердость, износостойкость и контактную выносливость диффузионного слоя.

Углерод и азот в качестве легирующих элементов оказывают идентичное воздействие на упрочнение структуры. Однако азот обладает меньшим атомным радиусом и обеспечивает меньшую энергию дефектов упаковки при формировании конечной структуры в результате упрочняющей обработки. В связи с этим кинетика образования диффузионного слоя в таких сталях может существенно различаться. Предварительное азотирование высокоуглеродистых сталей положительно влияет на кинетику роста диффузионного слоя, увеличение доли избыточных фаз, а также позволяет обеспечить более высокий уровень износостойкости и контактной выносливости. В совокупности данные факторы обуславливают актуальность исследования кинетики диффузионного насыщения и морфологии образования избыточных фаз высокоазотистых конструкционных сталей.

В рамках данной работы исследована кинетика диффузионного насыщения и формирования структуры конструкционной высокоазотистой стали с различной концентрацией азота в процессе вакуумной цементации.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали образцы из экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой конструкционной стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота и хрома 0,13 и 2,9 % (по массе), а также 0,22 и 3,6 % (по массе) соответственно.

Расчетное содержание азота для данной стали с учетом открытой выплавки при нормальном атмосферном давлении составляет ~0,07 % (по массе). Общее содержание легирующих элементов в стали варьирует от 7 до 8 % (по массе). Для обеспечения высокой концентрации азота изначальную выплавку электродов без азота проводили в вакуумной индукционной печи с последующим электрошлаковым переплавом под избыточным давлением 30 ат (3 МПа). При этом основную концентрацию азота получали путем введения в расплав шихтовых материалов-азотоносителей – азотированного феррохрома ФХН-10.

Для исследования кинетики диффузионного насыщения и особенностей формирования диффузионного слоя из прутков вырезали образцы Ø30×15 мм. Химико-термическую обработку образцов из стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V проводили при температуре >900 °С в среде ацетилена в соответствии со следующей технологической схемой: нагрев до температуры цементации вместе с печью, введение насыщающей среды и выдержка при температуре с соотношением продолжительности стадий активного насыщения (τ_a) и диффузионного перераспределения (τ_n) 1:1. При соотношении 1:1 общая продолжительность технологического процесса вакуумной цементации составила 1; 2 и 4 ч.

Металлографическое исследование структуры диффузионного слоя проводили методом световой микроскопии с использованием оптического конфокального инвертированного микроскопа при увеличении $\times 100$. Исследования проводили на металлографических шлифах, подвергнутых химическому травлению в реактиве «Ниталь» (4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте).

Химический состав анализировали по толщине диффузионного слоя методом оптико-эмиссионной спектроскопии. Идентификацию структуры и фазового состава структурных составляющих проводили с применением электронной микроскопии в режиме вторичных и обратноотраженных электронов при рабочем увеличении $\times 2500$ и ускоряющем напряжении 15 кВ с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа с использованием программного обеспечения.

Соединения и стехиометрический состав идентифицировали в соответствии с открытой базой существования химических соединений при нормальных условиях [24].

Объемное содержание избыточных фаз в диффузионном слое рассчитывали с помощью программы с открытым исходным кодом *imageJ* путем обработки пяти изображений с применением монохроматической бинаризации.

Дополнительное исследование фазового состава проводили путем рентгенофазового анализа на дифрактометре с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Дифрактограммы расшифровывали с применением встроенного программного обеспечения.

Для определения толщины формируемого диффузионного слоя исследовали распределение микротвердости в соответствии с ГОСТ 9450–76 на твердомере по методу Виккерса с нагрузкой 100 г (1 Н). По полученным значениям проводили аппроксимацию твердости поверхности и сердцевины, результатом которой являлась толщина диффузионного слоя после вакуумной цементации.

Для анализа кинетики диффузионного насыщения углеродом в процессе цементации и формирования толщины диффузионного слоя h в зависимости от продолжительности насыщения $\tau_{\text{общ}}$ при неизменной температуре технологического процесса

($T_{\text{нас}} = \text{const}$) определены кинетические коэффициенты диффузионного массопереноса k , зависящие от температуры, состава насыщаемого материала и насыщающей среды:

$$h = k\sqrt{\tau_{\text{общ}}}.$$

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В работах [10, 25, 26] показано, что кинетика диффузионного насыщения конструкционных высокоазотистых сталей с точки зрения формирования диффузионного слоя зависит от типа насыщающей среды: при азотировании диффузия ускоряется, при цементации – замедляется, при борировании – формируются нитробориды.

Металлографический анализ структур образцов после вакуумной цементации в течение 1; 2 и 4 ч при соотношении $\tau_a:\tau_n = 1:1$ представлен на рис. 1. Структура образцов с разной концентрацией хрома и азота имеет идентичный характер образования и включает зоны:

- с избыточными фазами, сформировавшимися в охрупчивающую сетку;
- со стабилизированной аустенитной структурой;
- с высокоуглеродистой мартенситной структурой.

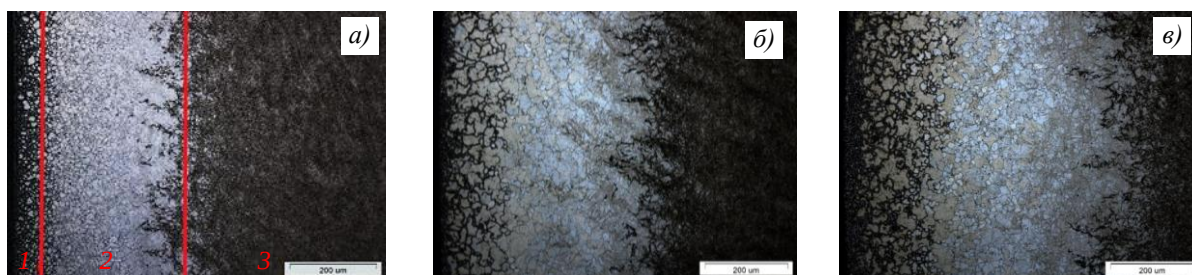


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 100$) экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой конструкционной стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V после вакуумной цементации в течение 1 (а), 2 (б) и 4 ч (в). Выделены зоны с избыточными фазами, сформировавшимися в охрупчивающую сетку (1), со стабилизированной аустенитной (2) и высокоуглеродистой мартенситной структурой (3)

При увеличении продолжительности цементации протяженность зоны стабилизированной аустенитной структуры повышается. Для определения данной зависимости исследовано распределение микротвердости образцов по толщине диффузионного слоя (рис. 2).

Анализ результатов распределения микротвердости (рис. 2, а–в) показывает, что образцы, включающие 0,22 % (по массе) азота, обладают большей твердостью у поверхности (в среднем на 60–100 HV₁), чем образцы с содержанием азота 0,13 % (по массе). Это свидетельствует о более высокой плотности избыточных фаз у поверхности. Для оценки ширины зоны со стабильным аустенитом определили участки с твердостью меньше твердости сердцевины. Затем визуально сравнили ширину зоны с изображением микроструктуры диффузионного слоя. По результатам оценки (рис. 2, г) установлено, что при увеличении продолжительности цементации ширина зоны повышается практически линейно. При изменении концентрации азота с 0,13 до 0,22 % (по массе) прирост составляет ~30 %. Такое увеличение ширины свидетельствует

о повышении стабилизации аустенита за счет одновременного легирования твердого раствора углеродом и азотом.

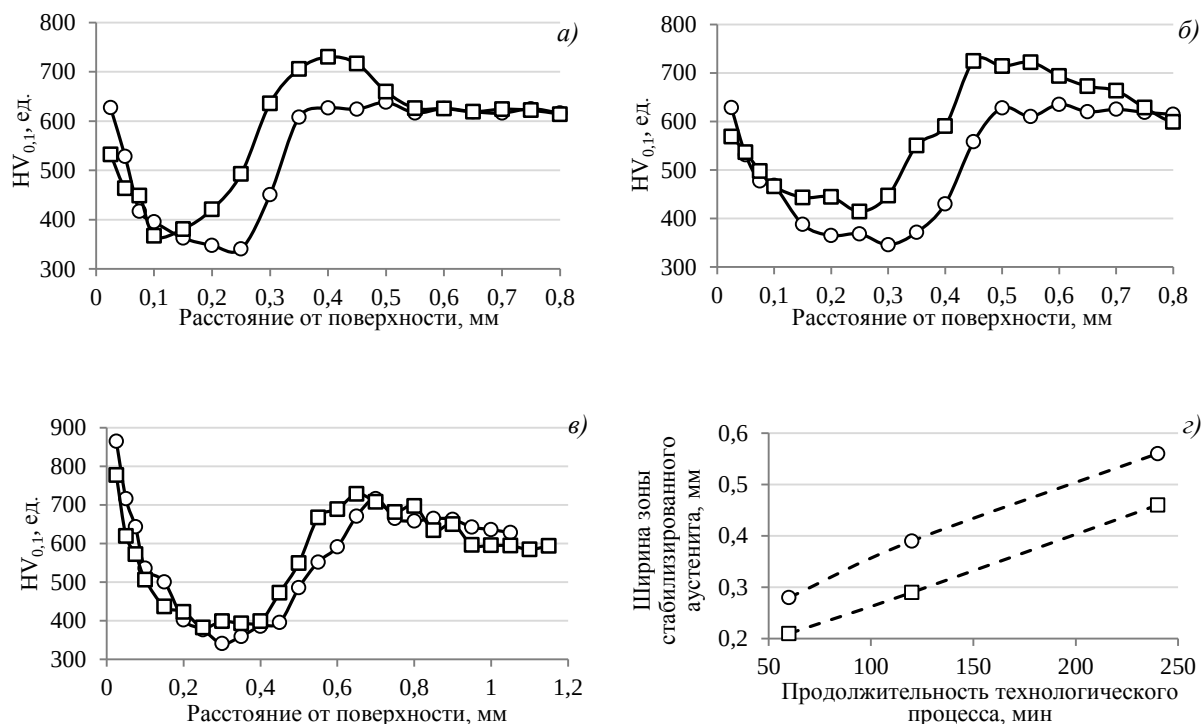


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 ($\square$) и 0,22 % (по массе) ($\circ$) после вакуумной цементации в течение 1 (а), 2 (б), 4 ч (в) и зависимость ширины аустенитной зоны от продолжительности технологического процесса (г)

Увеличение продолжительности вакуумной цементации с 1 до 4 ч приводит к повышению протяженности диффузионного слоя на 60–90 %. При этом образцы с меньшей концентрацией азота обладают более протяженным диффузионным слоем (на 18–23 %) при продолжительности насыщения 1 и 2 ч.

По результатам исследований микроструктуры методами электронной микроскопии и энергодисперсионного картирования (рис. 3) установлено, что крупными избыточными фазами в структуре диффузионного слоя являются карбиды хрома, легированные молибденом, а также мелкодисперсные нитриды ванадия. В соответствии с базой существования элементов [24], карбидами хрома, одновременно содержащими хром, углерод и молибден, могут являться соединения $Cr_{22}MoC_6$, $Cr_{21}(MoC_3)_2$ и $Cr_3(MoC_2)_2$. Однако для подтверждения стехиометрического состава необходимо провести дополнительные исследования. По результатам микрорентгеноспектрального анализа не удается установить стехиометрический состав исследуемых фаз, так как помимо искомых элементов обнаруживается большое количество элементов матрицы.

По результатам расшифровки дифрактограмм (рис. 4), полученных методом рентгенофазового анализа, установлено, что на поверхности диффузионного слоя формируется структура аустенита и мартенсита, образуется большое количество избыточных фаз, таких как карбиды $Cr_{23}C_6$, нитриды ванадия VN, хрома Cr_2N и железа Fe_2N . При этом содержание нитридов хрома и ванадия при увеличении количества азота повышается.

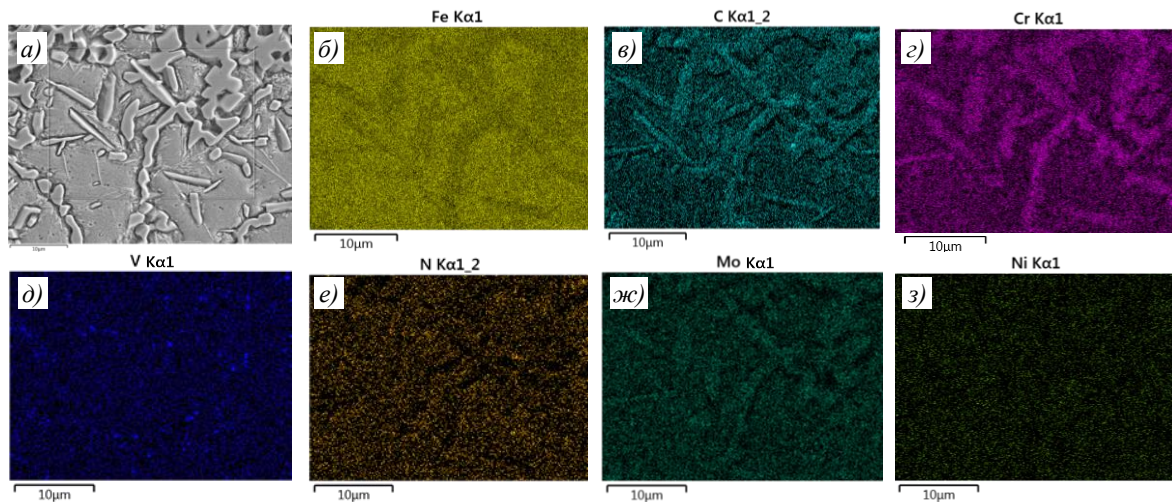


Рис. 3. Микроструктура (а) и энергодисперсионные спектры железа (б), углерода (в), хрома (г), ванадия (д), азота (е), молибдена (ж), никеля (з) в диффузионном слое высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V

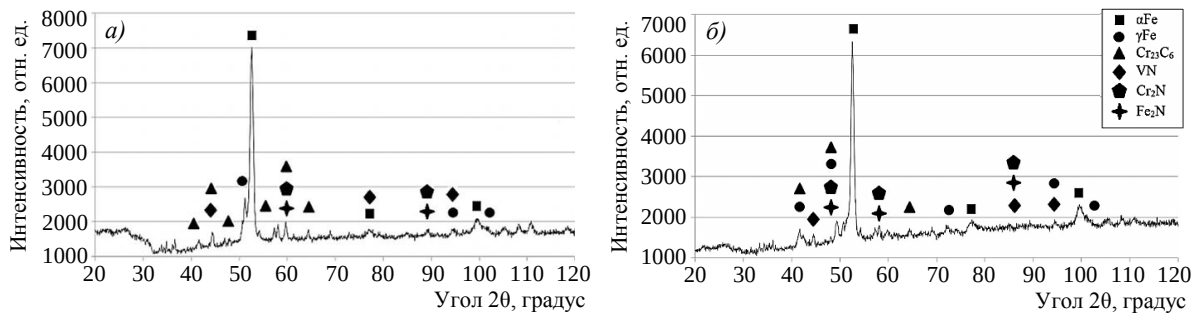


Рис. 4. Фазовый состав диффузионного слоя стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 (а) и 0,22 % (по массе) (б)

Для определения объемного содержания избыточных фаз в структуре диффузионного слоя на глубине 200 мкм изображения обрабатывали методом монохроматической бинаризации с дальнейшим расчетом черной и белой составляющей. Микроструктуры диффузионных слоев после обработки представлены на рис. 5. Выявлено, что:

- увеличение продолжительности вакуумной цементации с 1 до 4 ч приводит к повышению протяженности диффузионного слоя и доли избыточных фаз;
- увеличение концентрации азота с 0,13 до 0,22 % (по массе) в твердом растворе интенсифицирует процесс образования избыточных фаз.

Результаты проведенных исследований позволили установить, что зависимость содержания избыточной фазы от продолжительности технологического процесса имеет параболический характер (рис. 6). В установленной зависимости реализуется достаточно высокий коэффициент детерминации: при концентрации азота 0,13 % (по массе) $R^2 = 0,9763$, при 0,22 % (по массе) – $R^2 = 0,9546$. При этом увеличение концентрации азота приводит к повышению содержания избыточных фаз.

Степень увеличения содержания избыточных фаз рассчитана через отношение объемных долей $V_{N0,22}/V_{N0,13}$ (рис. 7). По результатам расчета установлено, что при повышении продолжительности технологического процесса с 1 до 4 ч степень увеличения содержания избыточных фаз в зависимости от концентрации азота уменьшается с 1,7

до 1,3. Это свидетельствует о том, что эффект от высокой концентрации азота в твердом растворе наиболее сильно проявляется при непродолжительном насыщении и снижается при более длительном процессе.

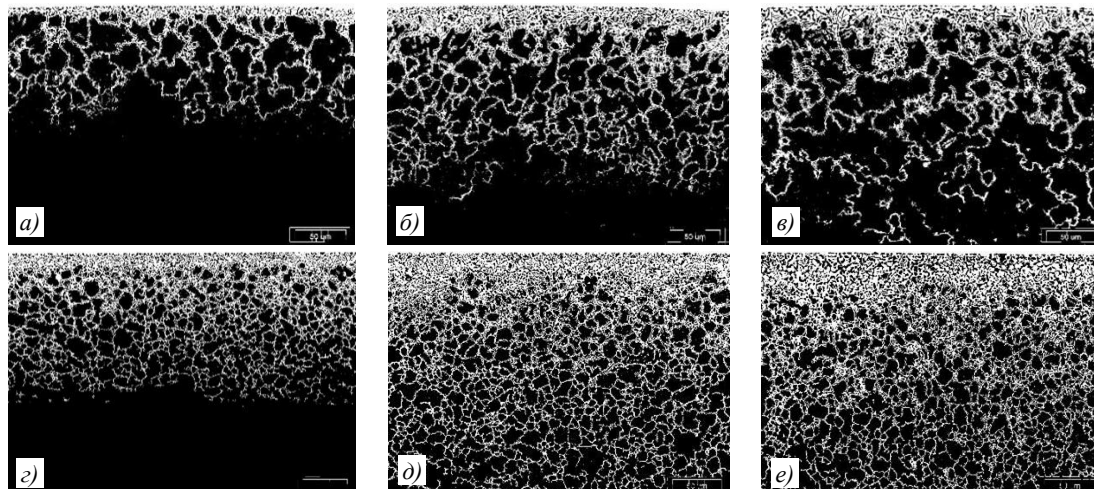


Рис. 5. Бинаризованное изображение микроструктуры диффузионного слоя стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 (а–в) и 0,22 % (по массе) (г–е) после вакуумной цементации в течение в течение 1 (а, г), 2 (б, д) и 4 ч (в, е)

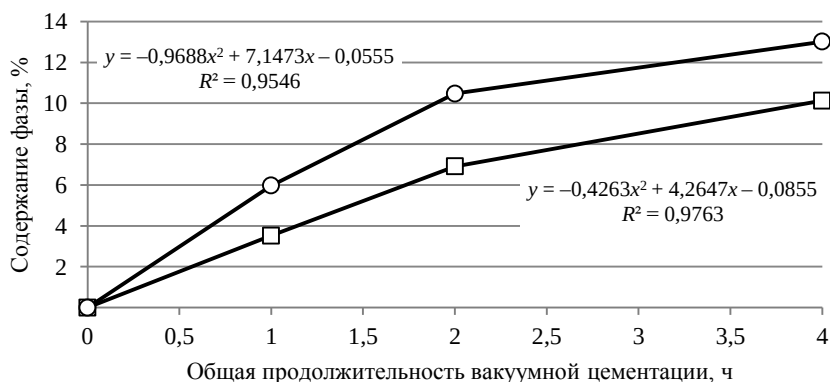


Рис. 6. Зависимость содержания избыточной фазы в диффузионном слое от продолжительности вакуумной цементации стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 (□) и 0,22 % (по массе) (○)

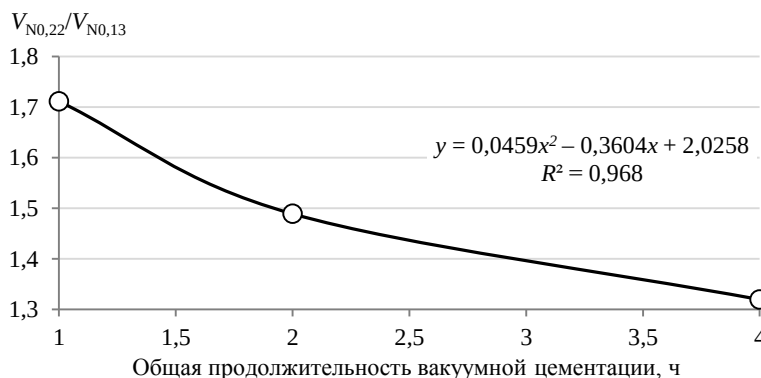


Рис. 7. Влияние продолжительности вакуумной цементации на соотношение объемных долей избыточных фаз стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V при концентрации азота 0,13 и 0,22 % (по массе)

Выявлено, что увеличение концентрации азота приводит к торможению диффузионных процессов (рис. 8) и снижению кинетического коэффициента с 0,576 до 0,501 мм/ч². Данный эффект является закономерным, так как увеличение содержания легирующих элементов в целом тормозит общую диффузию элементов внедрения при химико-термической обработке и рост диффузионного слоя. Анализ результатов предыдущих исследований [25, 26] позволил выявить тенденцию: при увеличении концентрации азота с 0,01 до 0,22 % (по массе) при неизменных концентрациях остальных легирующих элементов кинетический коэффициент диффузионного массопереноса снижается с 0,640 до 0,501 мм/ч². При этом зависимость имеет практически линейный характер (рис. 9).

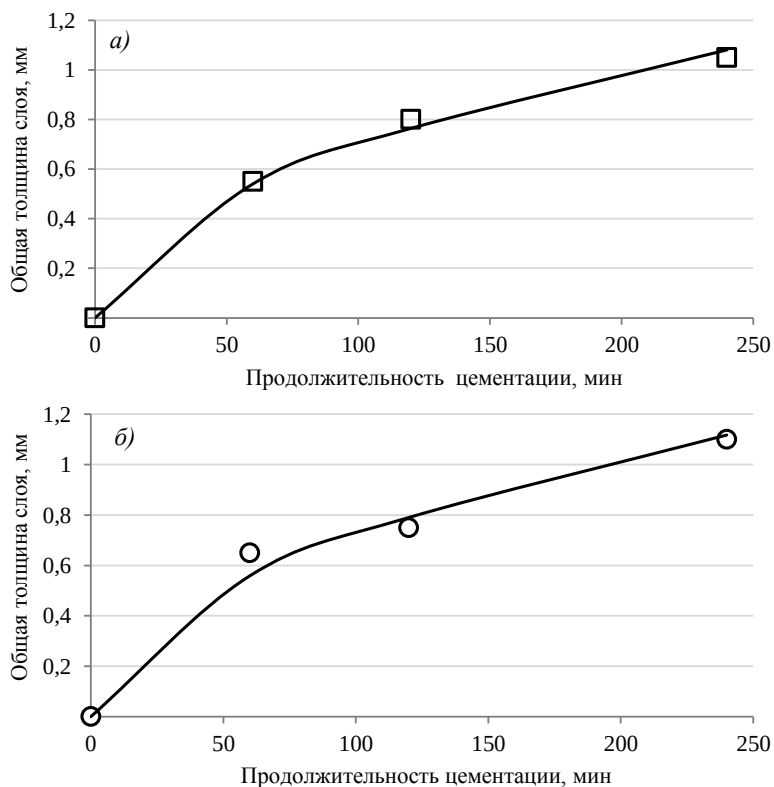


Рис. 8. Зависимость толщины диффузионного слоя в стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V от продолжительности вакуумной цементации при концентрации азота 0,13 (а) и 0,22 % (по массе) (б)

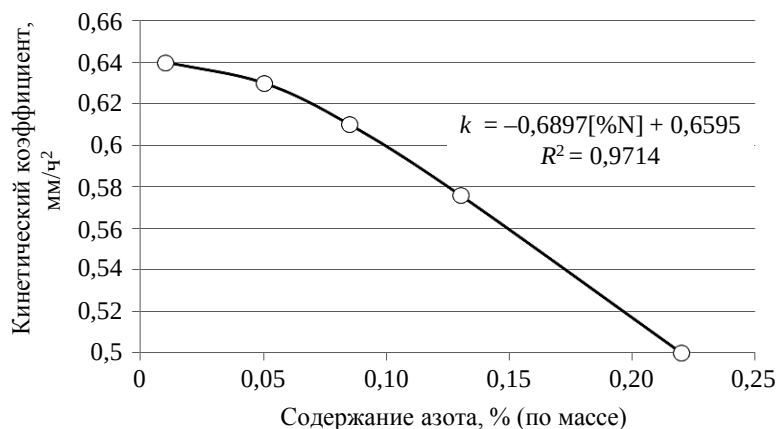


Рис. 9. Зависимость кинетического коэффициента от концентрации азота

Несмотря на то что при вакуумной цементации высокоазотистых конструкционных сталей системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 и 0,22 % (по массе) образуется карбидная сетка с крупными карбидными фазами, изменение режимов вакуумной цементации (соотношения продолжительности активной и пассивной стадий), а также последующая термическая обработка предположительно позволят обеспечить формирование более качественных диффузионных слоев с комплексом высоких характеристик.

Заключения

Высокопрочные конструкционные экономнолегированные высокоазотистые стали являются перспективными конструкционными материалами в современном машиностроении за счет комплекса высоких прочностных и пластических характеристик. По аналогии с высокопрочными углеродистыми конструкционными сталями мартенситного класса для тяжело нагруженных механизмов, работающих в условиях интенсивного изнашивания и контактной усталости, целесообразно применять упрочнение поверхности таких сталей методами химико-термической обработки. Однако кинетика диффузионного насыщения и формирования диффузионных слоев для высокоазотистых сталей малоизучена.

В рамках проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- применение вакуумной цементации приводит к образованию карбидной сетки с крупными карбидными фазами на основе хрома. Кроме того, в структуре диффузионного слоя присутствуют мелкодисперсные карбидные и нитридные фазы легирующих элементов;
- увеличение продолжительности вакуумной цементации с 1 до 4 ч обеспечивает повышение протяженности диффузионного слоя на 60–90 %. Образцы с меньшей концентрацией азота обладают более протяженным (на 18–23 %) диффузионным слоем при продолжительности насыщения 1 и 2 ч;
- увеличение концентрации азота в твердом растворе с 0,13 до 0,22 % (по массе) вызывает интенсификацию процесса образования избыточных фаз, повышение протяженности зоны со стабильным аустенитом в структуре диффузионного слоя. Степень увеличения доли избыточных фаз $V_{\text{N}0,22}/V_{\text{N}0,13}$ уменьшается с 1,7 до 1,3 при повышении продолжительности вакуумной цементации с 1 до 4 ч. Это свидетельствует о том, что высокие концентрации азота в твердом растворе оказывают наибольшее влияние при небольшой продолжительности насыщения;
- следствием изменения концентрации азота в твердом растворе с 0,01 до 0,22 % (по массе) является снижение кинетического коэффициента с 0,64 до 0,501 мм/ч², что подтверждает замедление процесса диффузионного массопереноса углерода при вакуумной цементации.

Исследования процесса вакуумной цементации высокоазотистых конструкционных сталей системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V с содержанием азота 0,13 и 0,22 % (по массе) показали, что во всех случаях образуется карбидная сетка, протяженность которой повышается с увеличением общей продолжительности технологического процесса. Данная сетка является браковочным признаком, однако повторный нагрев позволит ее растворить и обеспечить получение качественных диффузионных слоев.

Работа (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Костина М.В., Воробьев И.А., Галиахметов Т.Ш., Кудряшов А.Э. Крепежные изделия из новой азотсодержащей коррозионно-стойкой стали 05X16H5AB для высоконагруженных деталей как стратегия импортозамещения // Вестник машиностроения. 2023. № 3. С. 225–231. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-3-225-231.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Севальнев Г.С., Востриков А.В., Нефедкин Д.Ю., Моисеенков В.В., Волков Р.Б., Ульянов Е.И. Исследование структуры, распределения карбидной фазы, твердости и триботехнических характеристик высокохромистых подшипниковых сталей мартенситного класса // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 02. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-13-23.
4. Митраков О.В., Яковлев Н.О., Якушева Н.А., Гриневич А.В. Особенности разрушения стали 20ХГСН2МФА-ВД при испытании на вязкость разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 49–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.
5. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
6. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
7. Арзамасов Б.Н. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
8. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В., Крылов С.А., Тонышева О.А. Разработка и исследование высокопрочной коррозионностойкой стали для деталей подшипников // Metallurg. 2019. № 11. С. 39–44.
9. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Изд-во «Проф. Марин Дринов», 1995. 272 с.
10. Востриков А.В., Севальнев Г.С., Банных И.О., Власов И.И., Романенко Ю.Н., Дульнев К.В. Эволюция микроструктуры, твердости и триботехнических свойств экономнолегированной стали мартенситного класса со сверхравновесным содержанием азота // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-3-14.
11. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content // Russian Metallurgy (Metally). 2023. No. 6. P. 649–656.
12. Севальнев Г.С., Дульнев К.В., Банных И.О., Красуля А.А., Цих С.Г., Лукин Е.И. Исследование структуры и свойств диффузионных слоев после борирования сталей со сверхравновесным содержанием азота // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-17-29.
13. Лукин Е.И., Блинов В.М., Банных И.О. и др. Исследование влияния температуры закалки на структуру и механические свойства мартенситно-ферритной коррозионно-стойкой азотосодержащей стали 08X17H2AФ // Электрометаллургия. 2022. № 12. С. 2–14. DOI: 10.31044/1584-6781-2022-0-12-2-14.
14. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Алексеева М.С., Громов В.И. Влияние вакуумной химико-термической обработки на износостойкость сталей ВКС-7 и ВКС-10 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
15. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. и др. Влияние ионно-плазменного азотирования и вакуумной цементации на износостойкость сталей ВКС-7 и ВКС-10 // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 6. С. 391–402.

16. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. и др. Исследование износостойкости сталей ВКС-7 и ВКС-10 после вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 5. С. 345–356.
17. Семенов М.Ю., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. и др. Оптимизация технологических режимов вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойкой стали ВКС-7 на основе расчетного метода проектирования // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 1. С. 27–30.
18. Semenov M.Y., Smirnov A.E., Ryzhova M.Y. Problems of Simulation of Carbon Mass Transfer from Low-Pressure Saturating Atmosphere into Steel // Metal Science and Heat Treatment. 2021. Vol. 63. No. 1-2. P. 101–105. DOI: 10.1007/s11041-021-00654-0.
19. Смирнов А.Е. Управление фазовым составом комплексно-легированных теплостойких сталей при вакуумной цементации и закалке // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 9 (783). С. 45–52.
20. Смирнов А.Е. Оптимизация технологических факторов вакуумной нитроцементации комплексно-легированных сталей мартенситного класса // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. № 2. С. 13–19.
21. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И. Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей. М.: ВИАМ, 2019. 600 с.
22. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Особенности формирования структуры и трибологических свойств азотированных сталей и сплавов // Вестник научно-технического развития. 2017. № 7 (119). С. 3–17.
23. Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дружинина М.Э., Мосолов А.Н., Самойлова И.И., Максимов А.В. Кинетика диффузионного насыщения бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ при различных видах химико-термической обработки // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-3-14.
24. The Materials Project. URL: <http://www.next-gen.materialsproject.org> (дата обращения: 25.07.2024).
25. Гончаревская Д.А. Массоперенос азота и углерода в стали со сверхравновесной концентрацией азота при диффузионном насыщении // Будущее машиностроения России: XIII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием): сб. докл. в 2 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т. 1. С. 117–120.
26. Гончаревская Д.А. Химико-термическая обработка сталей со сверхравновесной концентрацией азота // Политехнический молодежный журнал. 2020. № 8 (49). С. 5. DOI: 10.18698/2541-8009-2020-8-636.

References

1. Kostina M.V., Vorobyov I.A., Galiakhmetov T.Sh., Kudryashov A.E. Fasteners from new nitrogen-containing corrosion-resistant steel 05X16N5AB for highly loaded parts as an import substitution strategy. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2023, no. 3, pp. 225–231. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-3-225-231.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Sevalnev G.S., Vostrikov A.V., Nefedkin D.Yu., Moiseenkov V.V., Volkov R.B., Ulyanov E.I. Study of the structure, distribution of carbide phase, hardness and tribotechnical characteristics of high-chromium bearing steels of the martensitic class. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-13-23.
4. Mitrov O.V., Yakovlev N.O., Yakusheva N.A., Grinevich A.V. Destruction features of steel 20XГCH2MФА-ВД during the fracture toughness test. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 49–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.

5. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
6. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
7. Arzamasov B.N. *Materials Science*. Moscow: Publ. House of Bauman Moscow State Tech. Univ., 2008, 648 p.
8. Bakradze M.M., Voznesenskaya N.M., Leonov A.V., Krylov S.A., Tonysheva O.A. Development and Research of High-Strength Corrosion-Resistant Steel for Bearing Parts. *Metallurg*, 2019, no. 11, pp. 39–44.
9. Rashev Ts.V. *High-Nitrogen Steels. Pressure Metallurgy*. Sofia: Publ. House «Prof. Marin Drinov», 1995, 272 p.
10. Vostrikov A.V., Sevalnev G.S., Bannykh I.O., Vlasov I.I., Romanenko D.N., Dulnev K.V. Microstructure, hardness and tribotechnical properties evolution of economically alloyed high nitrogen martensitic steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-3-14.
11. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 6, pp. 649–656.
12. Sevalnev G.S., Dulnev K.V., Bannykh I.O., Krasulya A.A., Tsikh S.G., Lukin E.I. Investigation of the structure and properties of diffusion layers after boriding high nitrogen steels. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-17-29.
13. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Study of the influence of hardening temperature on the structure and mechanical properties of martensitic-ferritic corrosion-resistant nitrogen-containing steel 08Kh17N2AF. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 12, pp. 2–14. DOI: 10.31044/1584-6781-2022-0-12-2-14.
14. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Alekseeva M.S., Gromov V.I. Influence of vacuum chemical and thermal processing on wear resistance of VKS-7 and VKS-10 steels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
15. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. et al. Effect of ion-plasma nitriding and vacuum carburizing on the wear resistance of VKS-7 and VKS-10 steels. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*, 2013, no. 6, pp. 391–402.
16. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. et al. Study of wear resistance of VKS-7 and VKS-10 steels after vacuum carburizing and vacuum nitrocarburizing. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*, 2013, no. 5, pp. 345–356.
17. Semenov M.Yu., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. et al. Optimization of technological modes of vacuum carburizing of gears made of heat-resistant steel VKS-7 based on the calculation method of design. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2015, no. 1, pp. 27–30.
18. Semenov M.Y., Smirnov A.E., Ryzhova M.Y. Problems of Simulation of Carbon Mass Transfer from Low-Pressure Saturating Atmosphere into Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 63, no. 1–2, pp. 101–105. DOI: 10.1007/s11041-021-00654-0.
19. Smirnov A.E. Control of the phase composition of complex-alloyed heat-resistant steels during vacuum carburizing and quenching. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2020, no. 9 (783), pp. 45–52.
20. Smirnov A.E. Optimization of technological factors of vacuum nitrocarburizing of complex-alloyed martensitic steels. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2019, no. 2, pp. 13–19.
21. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Ospennikova O.G., Alekseeva M.S., Gromov V.I. *Surface engineering and performance properties of nitrided structural steels*. Moscow: VIAM, 2019, 600 p.

22. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Features of the formation of the structure and tribological properties of nitrided steels and alloys. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2017, no. 7 (119), pp. 3–17.
23. Sevalnev G.S., Nefedkin D.Y., Druzhinina M.E., Mosolov A.N., Samoylova I.I., Maksimov A.V. Kinetics of diffusion saturation of beryllium-containing steel VNS32-VI at various types of thermochemical treatment. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-3-14.
24. The Materials Project. Available at: <http://www.next-gen.materialsproject.org> (accessed: July 25, 2024).
25. Goncharevskaya D.A. Mass transfer of nitrogen and carbon in steel with super-equilibrium nitrogen concentration under diffusion saturation. *The future of mechanical engineering in Russia: XIII All-Rus. Conf. of Young Scientists and Specialists (with international participation)*: Coll. reports in 2 vols. Moscow: Publ. house of Bauman Moscow State Tech. Univ., 2020, vol. 1, pp. 117–120.
26. Goncharevskaya D.A. Chemical-thermal treatment of steels with super-equilibrium nitrogen concentration. *Politekhnicheskiiy molodezhny zhurnal*, 2020, no. 8 (49), p. 5. DOI: 10.18698/2541-8009-2020-8-636.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ульянов Егор Ильич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севальнева Татьяна Геннадьевна, инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Egor I. Ulyanov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana G. Sevalneva, Engineer, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.09.2024.
The article was submitted 10.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.09.2024.