Научная статья

УДК 669.725
DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-3-14

КИНЕТИКА ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ВНС32-ВИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Г.С. Севальнев[1], Д.Ю. Нефедкин[1], М.Э. Дружинина[1], А.Н. Мосолов[1], И.И. Самойлова[2], А.В. Максимов[2]

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. *Проведено исследование микроструктуры, микротвердости и кинетики диффузионного насыщения бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ после различных видов химико-термической обработки. Установлено, что микроструктура диффузионного слоя состоит из мартенсита, δ-феррита и карбидов различных размеров и морфологии. Исследование кинетики диффузионного насыщения показало, что увеличение времени насыщения при вакуумной цементации приводит к увеличению толщины диффузионного слоя лишь при применении предварительного вакуумного азотирования.*

Ключевые слова: *бериллий, бериллийсодержащая сталь, твердость, δ-феррит, диффузия, химико-термическая обработка*

Для цитирования: 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. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-3-14.

Scientific article

KINETICS OF DIFFUSION SATURATION OF BERYLLIUM-CONTAINING STEEL VNS32-VI AT VARIOUS TYPES OF THERMOCHEMICAL TREATMENT

G.S. Sevalnev[1], D.Yu. Nefedkin[1], M.E. Druzhinina[1], A.N. Mosolov[1], I.I. Samoylova[2], A.V. Maksimov[2]

[1]Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. *Microstructure, microhardness and kinetics of diffusion saturation of beryllium-containing steel VNS32-VI after various types of thermochemical treatment were studied. It was found that the microstructure of the diffusion layer consists of martensite, δ-ferrite and carbides of various sizes and morphology. The study of diffusion saturation kinetics showed that increasing the saturation time during vacuum cementation leads to an increase in the thickness of the diffusion layer only with the use of preliminary vacuum nitriding.*

Keywords: *beryllium, beryllium-containing steel, hardness, δ-ferrite, diffusion, thermochemical treatment*

For citation: Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., 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. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-3-14.

Введение

Приоритетной задачей современного отечественного материаловедения является разработка новых конструкционных и специальных материалов для обеспечения потребностей конструкторов в различных отраслях машиностроения [1–4]. Одной из перспективных задач для авиационной отрасли является создание материалов, работоспособных в условиях экстремальных нагрузок и агрессивных сред.

В достаточно сложных конструкциях таких изделий, как газотурбинные двигатели, используются системы автоматического управления на основе гидроавтоматики, регулировка в которых осуществляется при помощи золотниковых пар и плунжеров. При регулировке механизмов такие узлы в процессе эксплуатации испытывают интенсивное изнашивание, а также воздействие со стороны коррозионно-агрессивных сред. Для обеспечения высокой износостойкости в данных узлах используются комплексно-легированные коррозионностойкие стали [5–12].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1]. В ВИАМ разработаны дисперсионно-твердеющие коррозионностойкие стали, содержащие бериллий в качестве одного из упрочняющих легирующих элементов. Для работы в тяжелонагруженных условиях широкое распространение получила бериллийсодержащая сталь марки ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ), отличительной особенностью которой является возможность работы в условиях агрессивных сред топливорегулирующей аппаратуры, гидросистем авиационной и ракетной техники, а также в условиях высоких температур (при 400 °С) и абразивного износа [8, 9]. Данная сталь обладает достаточно высокими прочностными характеристиками, упрочнение в которой реализуется за счет механизма дисперсионного твердения и выделения мелкодисперсных избыточных и интерметаллидных фаз, в результате чего ее можно использовать для работы в условиях экстремальных нагрузок при интенсивном изнашивании и контактной усталости в диапазоне повышенных температур до 500 °С.

Однако высокое содержание α-стабилизирующих элементов приводит к тому, что в структуре стали ВНС32-ВИ присутствует высокое содержание охрупчивающего δ-феррита, который может негативно сказываться на работе в условиях ударных и контактно-усталостных нагрузок. Поскольку при интенсивном изнашивании и контактно-усталостном воздействии деформационные нагрузки локализуются в поверхностных слоях изделия, то исключить влияние нежелательной охрупчивающей структурной составляющей возможно двумя способами:

– за счет модификации химического состава стали, т. е. частичной замены на более слабые ферритообразующие элементы, а также введением в химический состав γ-стабилизирующих элементов, что позволит снизить стабильность δ-феррита и уменьшить его количество на стадиях технологического передела. Однако данный способ требует разработки новой технологии для модифицированного состава стали – со стадии выплавки до получения конечной детали, что является достаточно дорогостоящим процессом;

– за счет модификации поверхностного слоя, т. е. диффузионного насыщения γ-стабилизирующими элементами, углеродом и азотом. В процессе химико-термической обработки при последующей термической обработке это предположительно позволит

снизить количество δ-феррита, что может способствовать увеличению уровня пластических характеристик, а высокое содержание карбидообразователей в химическом составе стали обеспечит высокую износостойкость и контактную выносливость поверхностного слоя.

Наиболее перспективными методами поверхностного диффузионного насыщения сталей углеродом и азотом являются процессы вакуумной цементации и азотирования, обеспечивающие равномерное насыщение в газовых средах ацетилена и аммиака и формирование качественного диффузионного слоя [12–23].

Дисперсионно-твердеющая бериллийсодержащая сталь ВНС32-ВИ обладает достаточно хорошей коррозионной стойкостью благодаря содержанию в ней хрома >13 % (по массе). Поскольку хром является одним из наиболее активных карбидообразователей, то дополнительное насыщение поверхности углеродом может снизить коррозионную стойкость стали ВНС32-ВИ, что приведет к ограничению возможности работы в условиях различных коррозионно-активных сред. Однако обеспечение достаточно большой толщины диффузионного слоя, а также исключение δ-феррита из структуры поверхности может благоприятно сказаться на уровне прочностных и пластических характеристик.

Азотирование, как вид химико-термической обработки, положительно сказывается на уровне коррозионной стойкости стали, сопротивления интенсивному изнашиванию и контактной усталости. Однако недостатками данного процесса являются тонкие диффузионные слои, а также достаточно долгое время технологического процесса для насыщения поверхности азотом. По опыту работы сотрудников ВИАМ для достижения диффузионного слоя толщиной 100 мкм при ионно-плазменном азотировании необходимо время выдержки при технологическом процессе ~12 ч.

В настоящее время широко используются комбинированные методы химико-термической обработки, в которых совмещены процессы азотирования и цементации либо в одном технологическом процессе, либо на разных этапах упрочняющей обработки. Несмотря на повышение стоимости обработки, применение комбинированных технологий цементации, азотирования и нитроцементации позволяет достичь более высокого уровня механических и триботехнических характеристик.

В большинстве случаев бериллий в комплексно-легированных сталях используется для интенсификации процесса дисперсионного твердения и обеспечения более высокой твердости, прочности, упругости и износостойкости [8, 9, 24–29], а также для насыщения поверхностных слоев металлических изделий, в частности сталей [29–32]. Бериллизация повышает окалиностойкость, твердость, коррозионную стойкость сталей, причем твердость модифицированного слоя растет с увеличением содержания углерода в стали. На диффузионную активность бериллия при химико-термической обработке влияют те же факторы, что и при процессах азотирования, цементации и др.: активность насыщающей среды и концентрация насыщающего элемента, химический состав и, в частности, содержание углерода в стали, температура нагрева и последующее охлаждение. Однако влияние бериллия, входящего в химический состав комплексно-легированных сталей, на формирование диффузионных слоев практически не изучено.

Для разработки и оптимизации технологии поверхностного насыщения комплексно-легированных сталей необходимо исследовать закономерности кинетики диффузионного насыщения в зависимости от системы легирования, параметров технологического процесса и насыщающей среды. В связи с этим целью данной работы является исследование кинетики диффузионного насыщения и параметров диффузионных слоев бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ при различных видах химико-термической обработки.

Материалы и методы

Объектом исследования служили образцы из стали ВНС32-ВИ (32Х13Н6К3М2БДЛТ-ВИ) [8, 9], находящиеся в состоянии поставки (выплавка в вакуумной печи, ковка и последующая радиально-сдвиговая прокатка, отжиг). Химический состав образцов соответствовал требованиям ТУ 14-1-3695–84 «Прутки горячекатаные и кованые из коррозионностойкой стали марки 32Х13Н6К3М2БДЛТ (СЭС1-ВИ, ВНС32-ВИ). Опытно-промышленная партия».

Для химико-термической обработки образцов из стали ВНС32-ВИ использовали универсальную установку, позволяющую проводить процессы вакуумного азотирования, вакуумной цементации и нитроцементации.

Для оценки кинетики диффузионного насыщения технологический процесс вакуумной цементации проводили в температурном диапазоне 800–1000 °С по режимам, включающим соотношение времени активной и пассивной стадии 1:1, с общим временем выдержки в течение 1, 2 и 4 ч. Вакуумное азотирование проводили в температурном диапазоне 500–700 °С. Поскольку сталь коррозионностойкая, поверхность которой в атмосфере низкого давления склонна к пассивации, и процесс вакуумного азотирования используется в качестве предварительного, то для разрушения оксидной пленки на поверхности, блокирующей диффузионное насыщение, проводили процесс термической депассивации. Охлаждение после процессов вакуумной цементации проводили в потоке насыщающего газа. Ввиду того, что сталь ВНС32-ВИ относится к стали мартенситного класса, то время охлаждения являлось достаточным для образования мартенситной структуры в поверхностных слоях.

Металлографический анализ структур стали после упрочняющей термической обработки проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях ×500 и ×1000. Классическим методом для выявления микроструктуры в стали ВНС32-ВИ служит электролитическое травление в 10%-ном растворе щавелевой кислоты. Однако в связи с тем, что поверхность при химико-термической обработке подвергается модификации с последующим активным карбидообразованием, то изготовленные микрошлифы протравливали химически в растворе Марбле (50 мл HCl + 2–4 г $CuSO_4$ + 50 мл этилового спирта).

Дюрометрические исследования образцов из стали ВНС32-ВИ после полного цикла упрочняющей термической обработки проводили на твердомере Durascan 20 при нагрузке 1 Н (100 г). Для оценки толщины диффузионного слоя использовали метод аппроксимации твердостей поверхности и сердцевины, позволяющий достаточно точно определить толщину модифицированного слоя на поверхности.

Кинетику формирования толщины диффузионного слоя h от времени насыщения $\tau_{общ}$ при неизменной температуре технологического процесса ($t_{нас}$ = const) с определением кинетического коэффициента проводили по формуле

$$h = k \cdot \sqrt{\tau_{общ}},$$

где k – кинетический коэффициент, зависящий от температуры, состава насыщаемого материала и насыщающей среды.

Результаты и обсуждение

Для исследования кинетики диффузионного насыщения выбраны процессы вакуумного азотирования в среде аммиака NH_3 и вакуумной цементации в среде ацетилена C_2H_2 в следующих комбинациях:

– вакуумная цементация в интервале температур 800–1000 °С в течение 1, 2 и 4 ч;

– вакуумное азотирование в интервале температур 500–700 °С с термической депассивацией поверхности;

– предварительное вакуумное азотирование в интервале температур 500–700 °С с последующей вакуумной цементацией в интервале температур 800–1000 °С в течение 1, 2 и 4 ч.

Процесс предварительного вакуумного азотирования позволяет обогатить поверхность азотом с формированием мелкодисперсных нитридов, что впоследствии позволяет сдержать рост зерна и в некоторых случаях повысить диффузионную активность углерода, в результате чего растет толщина диффузионного слоя [17].

По результатам металлографических исследований образцов после вакуумной цементации установлено, что структура диффузионного слоя состоит из мартенсита (α-фаза), δ-феррита и карбидов различных размеров и морфологии (рис. 1).

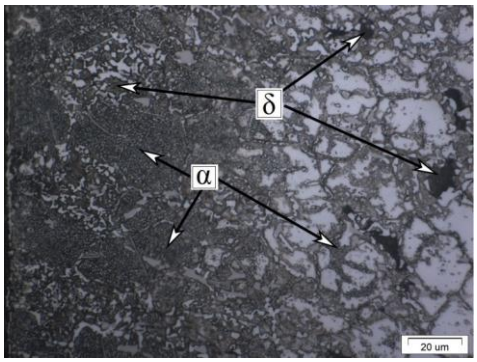

Рис. 1. Микроструктура (×1000) диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ после вакуумной цементации

Детальное исследование структуры позволило установить, что в мартенсите формируются в основном мелкодисперсные карбиды, в то время как в δ-феррите, а также на его границах зерна преобладают крупные избыточные фазы. Согласно работе [9], установлено, что крупными избыточными фазами после термической обработки в структуре стали ВНС32-ВИ являются карбиды $(Nb, Ti)C_2$. Поскольку в δ-феррите растворено больше легирующих элементов (таких как Nb и Ti, обладающих объемноцентрированной кубической (ОЦК) кристаллической решеткой), чем в мартенсите, то после химико-термической обработки в данных участках будут локализоваться более крупные избыточные карбидные фазы. В мартенсите же преобладает большее содержание хрома и никеля, в результате чего образуются мелкодисперсные карбиды $Cr_{23}C_6$.

Анализ микроструктуры (рис. 2), а также исследование распределения микротвердости (рис. 3) после вакуумной цементации с различным временем технологического процесса позволили установить, что увеличение общего времени насыщения с 1 до 4 ч приводит к изменениям в микроструктуре диффузионного слоя, но не приводит к увеличению его толщины. Толщина диффузионного слоя *h* во всех случаях составила ~175 мкм.

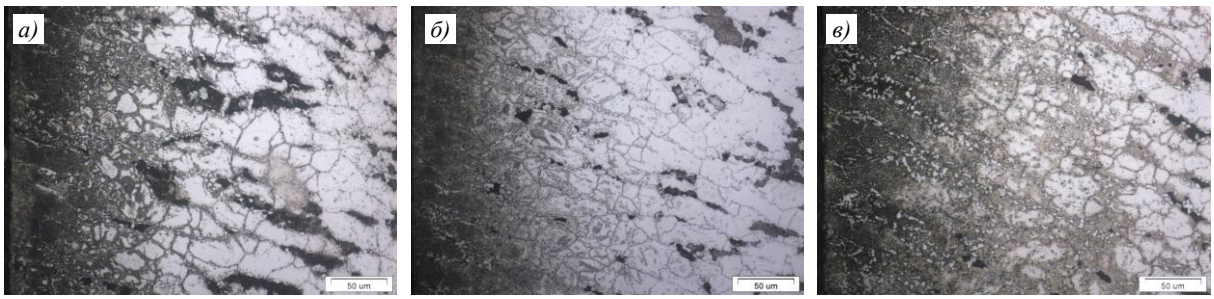

Рис. 2. Микроструктура (×500) диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ после вакуумной цементации при общем времени насыщения 1 (*а*), 2 (*б*) и 4 ч (*в*)

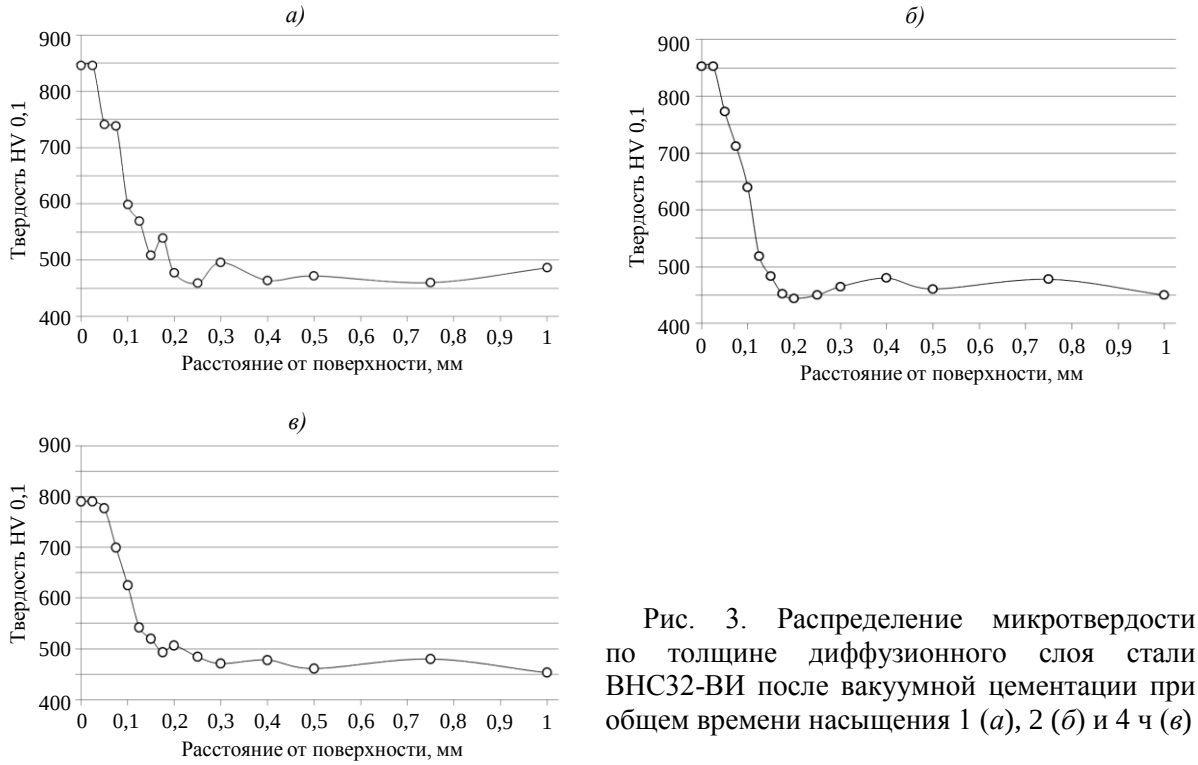

Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ после вакуумной цементации при общем времени насыщения 1 (*а*), 2 (*б*) и 4 ч (*в*)

Данный эффект, предположительно, связан с высокой плотностью мелких и крупных избыточных карбидных фаз, в результате чего формируется экранирующий барьер, препятствующий дальнейшему насыщению и абсорбированию углерода на поверхности. Из-за формирования сегрегаций с крупными стабильными карбидами в зернах δ-феррита и вдоль его границ перераспределение углерода вглубь образца затрудняется, вследствие чего при увеличении общего времени насыщения не происходит увеличения толщины диффузионного слоя. При времени насыщения в течение 4 ч наблюдается более низкое значение твердости поверхности (на 50 HV), что свидетельствует о большей растворимости углерода в поверхности и увеличении содержания аустенита.

Исследование микроструктуры и распределения микротвердости после вакуумного азотирования позволило установить, что сформирован диффузионный слой толщиной ~50 мкм (рис. 4). Поскольку известно, что скорость диффузии при газовом азотировании меньше, чем при ионно-плазменном, то данный результат вполне закономерен.

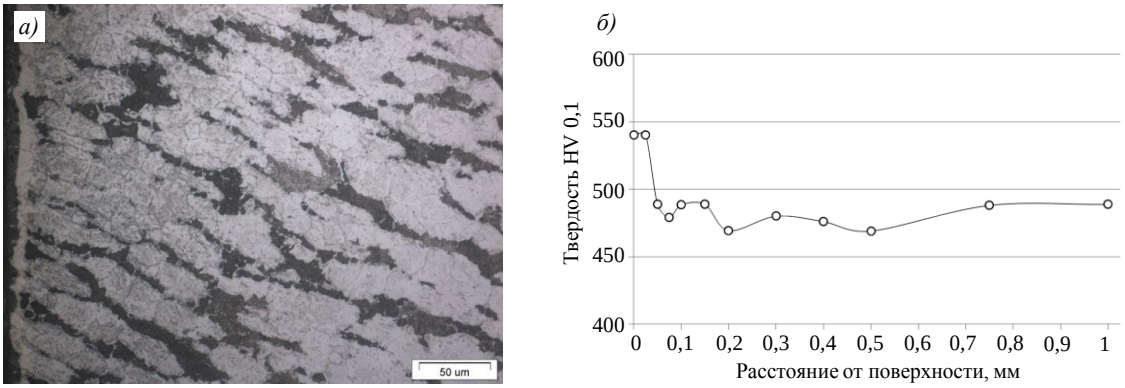

Рис. 4. Микроструктура (*а* – ×500) и распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя (*б*) стали ВНС32-ВИ после вакуумного азотирования

Достаточно интересные результаты наблюдаются после насыщения углеродом образцов, прошедших предварительное вакуумное азотирование. Анализ микроструктуры позволил установить, что с увеличением общего времени насыщения постоянно изменяется морфология избыточной фазы в структуре диффузионного слоя. С увеличением времени с 1 до 2 ч происходит увеличение размера карбидов в зернах δ-феррита, их локализация на расстоянии 100 мкм от поверхности, а также возрастает плотность избыточных фаз во всем объеме диффузионного слоя (рис. 5, *а*, *б*). При увеличении времени до 4 ч происходит перераспределение карбидов и продвижение углерода вглубь слоя с образованием более крупных карбидов на расстоянии 150 мкм от поверхности (рис. 5, *в*). Предположительно это связано с присутствием в структуре диффузионного слоя азота, который может приводить к дестабилизации крупных карбидов и способствовать перераспределению углерода по толщине диффузионного слоя.

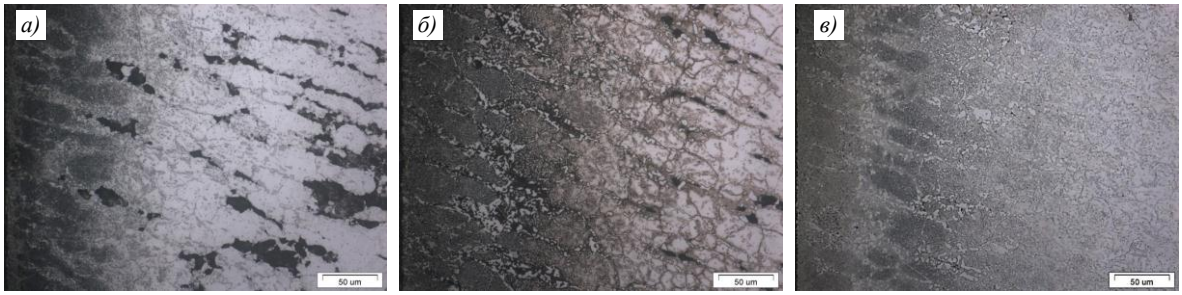

Рис. 5. Микроструктура (×500) диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ после предварительного вакуумного азотирования и последующей вакуумной цементации при общем времени насыщения 1 (*а*), 2 (*б*) и 4 ч (*в*)

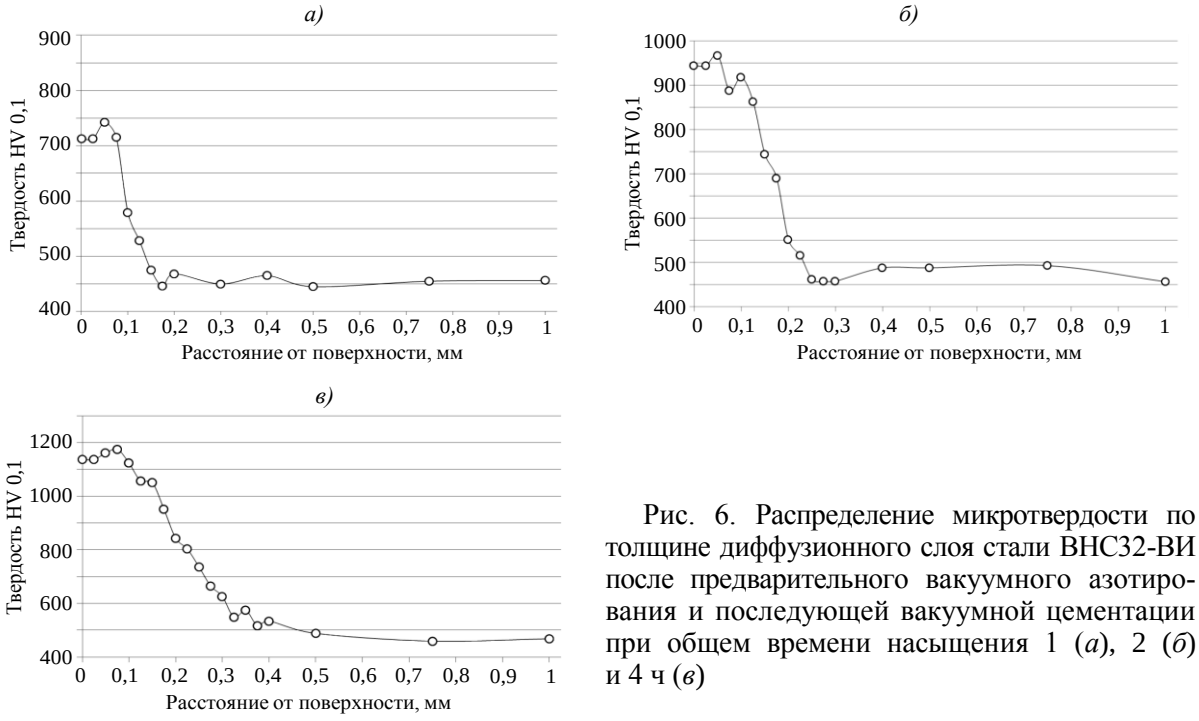

Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ после предварительного вакуумного азотирования и последующей вакуумной цементации при общем времени насыщения 1 (*а*), 2 (*б*) и 4 ч (*в*)

Результаты распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя показали, что предварительное азотирование выступает активатором диффузионных процессов, за счет чего происходит увеличение толщины диффузионного слоя. Анализ

значений микротвердости (рис. 6) показал, что увеличение общего времени насыщения с 1 до 4 ч с применением предварительного вакуумного азотирования позволило увеличить толщину диффузионного слоя в 2 раза – с 0,185 до 0,360 мкм. Положительный эффект от предварительного вакуумного азотирования также наблюдается по возрастанию твердости поверхности: с увеличением общего времени насыщения с 1 до 2 ч микротвердость возросла с 750 до 980 HV, а с 2 до 4 ч – до 1200 HV.

Анализ кинетики диффузионного насыщения и расчет кинетических коэффициентов позволили выявить, что диффузионная активность углерода (k(ВА + ВЦ)/k(ВЦ)) при вакуумной цементации (ВЦ) возросла на 60 % при применении предварительного вакуумного азотирования (ВА) (рис. 7).

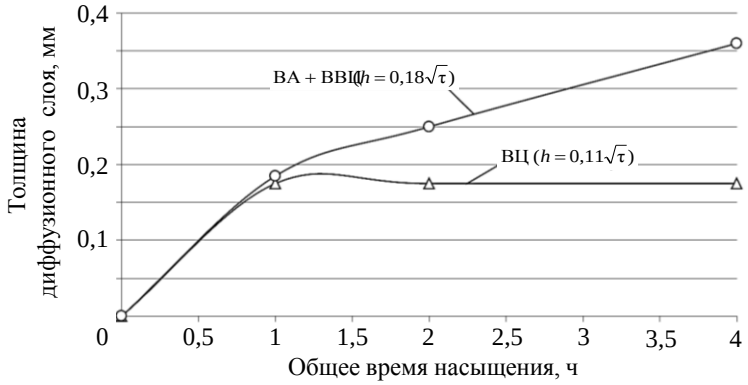

Рис. 7. Зависимость толщины диффузионного слоя стали ВНС32-ВИ от общего времени насыщения при вакуумной цементации (ВЦ), совмещенной с вакуумным азотированием (ВА) и без него

Заключения

Бериллийсодержащие стали являются перспективными материалами в авиационном машиностроении благодаря обеспечению высокого уровня механических характеристик и коррозионной стойкости. Из-за высокого содержания ОЦК-стабилизирующих элементов в химическом составе данных сталей формируется охрупчивающая структурная составляющая – δ-феррит, способная снижать уровень пластических и триботехнических характеристик.

Для повышения уровня триботехнических характеристик и контактной выносливости предложен процесс модификации поверхности путем насыщения элементами внедрения – углеродом и азотом, что может привести к повышению уровня триботехнических характеристик и сопротивления контактной усталости. Однако для разработки технологии необходимо исследовать кинетику диффузионного насыщения стали ВНС32-ВИ при вакуумном азотировании и вакуумной цементации.

По результатам металлографических исследований установлено, что после вакуумной цементации в структуре образуется мартенсит, δ-феррит и карбиды разного размера и морфологии. Увеличение продолжительности процесса не приводит к возрастанию толщины диффузионного слоя, что предположительно связано с повышенной плотностью стабильных карбидных фаз вблизи поверхности, создающих экранирующий эффект.

Применение предварительного азотирования благоприятно влияет на протекание диффузионных процессов при вакуумной цементации. По результатам исследований установлено, что с увеличением общего времени насыщения образцов с 1 до 4 ч

после предварительного азотирования при дальнейшей вакуумной цементации в 2 раза возрастает толщина диффузионного слоя – с 0,185 до 0,360 мкм. По анализу кинетики диффузионного насыщения выявлено, что применение предварительного вакуумного азотирования повышает диффузионную активность углерода при вакуумной цементации на 60 %.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
5. Удод К.А., Трофименко Н.Н., Романенко Д.Н., Севальнев Г.С. Перспективы развития конструкционных сталей, легированных алюминием // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13.
6. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021. Is. 10. P. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.
7. Terent′ev V.F., Prosvirnin D.V., Seval′neva T.G. et al. Structural state and mechanical behavior of Fe–Cr–Ni maraging steels // Russian metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. Is. 4. P. 426–433.
8. Нержавеющая дисперсионно-твердеющая сталь: а. с. 541374 СССР. № 2120727/01; заявл. 03.04.75; опубл. 15.05.91.
9. Мосолов А.Н., Севальнев Г.С., Крылов С.А., Скугорев А.В., Чирков И.А. Исследование структуры и свойств бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 01. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.
10. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временны́х параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 02. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 10.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
11. Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
12. Александров В.Г., Базанов Б.И. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения. М.: Транспорт, 1979. 263 с.
13. 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.
14. Smirnov A.E. Control of phase composition of complexly alloyed high-temperature steels under vacuum carburizing and quenching // Metal Science and Heat Treatment. 2021. Vol. 62. No. 9–10. P. 586–593.
15. 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.
16. Semenov M.Y., Vintaikin B.E., Smirnov A.E., Shevchenko S.Y., Cherenkova S.A., Jian D.K. Modeling of the nitrogen saturation of the alloys based on nickel and chromium in a glow discharge // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021. No. 3. P. 283–289.

17. Smirnov A.E., Semenov M.Y., Mokhova A.S., Seval′nev G.S. Use of Combined Methods of Successive Carburizing and Nitriding of Martensitic Steels in Low-Pressure Atmospheres // Metal Science and Heat Treatment. 2020. Vol. 62. No. 1–2. P. 127–132.
18. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1965. 493 с.
19. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1950. 432 с.
20. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
21. Петрова Л.Г., Александров В.А., Зюзин Д.М. Регулируемые процессы азотирования коррозионностойких сталей // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). 2003. № 1. С. 20–26.
22. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
23. Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Исследование структурного состояния и износостойкости азотированных сплавов железа с разными типами кристаллической решетки // Вестник научно-технического развития. 2019. № 9. С. 21–29.
24. Папиров И.И. Структура и свойства сплавов бериллия: справочник. М.: Энергоиздат, 1981. 368 с.
25. Папиров И.И. Бериллий в сплавах: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
26. Жубаев А.К., Бектурган Н.Б., Куватбаева К.К., Нуртазина А.С. Исследование фазово-структурного состояния нержавеющей стали с бериллием // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14. № 3. С. 70–73.
27. Naik B.G., Sivasubramanian N. Applications of beryllium and its alloys // Mineral Processing and Extractive Metullargy Review. 1994. Vol. 13. No. 1. P. 243–251.
28. Marder J.M. Beryllium – technology and applications // JOM. 1984. Vol. 36. No. 6. P. 45–47.
29. Sawyer C.B., Kjellgren B.R. Newer Developments in Beryllium // Industrial & Engineering Chemistry. 1938. Vol. 30. No. 5. P. 501–505.
30. Hunt R.M. et al. Diffusion bonding beryllium to Reduced Activation Ferritic Martensitic steel: Development of processes and techniques // Fusion Engineering and Design. 2012. Vol. 87. No. 9. P. 1550–1557.
31. Lee J.S., Park J.Y., Choi B.K. et al. Beryllium/ferritic martensitic steel joining for the fabrication of the ITER test blanket module first wall // Fusion engineering and design. 2009. Vol. 84. No. 7–11. P. 1170–1173.
32. Study of beryllium influence on iron surface layers and stainless steel // International symposium dedicated to 100-years from birthday of K.I. Satpaev. Kazakstan: AJKOS, 1999. Vol. 3. P. 68–69.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N. Russia Needs New Generation Materials. *Redkie zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
5. Udod K.A., Trofimenko N.N., Romanenko D.N., Sevalnev G.S. Prospects for the development of constructional aluminium-doped steels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13.
6. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, is. 10, pp. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.

7. Terent′ev V.F., Prosvirnin D.V., Sevalneva T.G. et al. Structural state and mechanical behavior of Fe–Cr–Ni maraging steels. *Russian metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, is. 4, pp. 426–433.
8. *PH stainless steel*: certificate of authorship 541374 USSR; filed 03.04.75; publ. 15.05.91.
9. Mosolov A.N., Sevalnev G.S., Krylov S.A., Skugorev A.V., Chirkov I.A. Study of the structure and properties of beryllium-containing steel VNS32-VI. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 01. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: June 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.
10. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 02. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: July 07, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
11. *Structural materials*: reference book. Ed. B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p.
12. Aleksandrov V.G., Bazanov B.I. *Reference book on aviation materials and technology of their application*. Moscow: Transport, 1979, 263 p.
13. 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.
14. Smirnov A.E. Control of phase composition of complexly alloyed high-temperature steels under vacuum carburizing and quenching. *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 62, no. 9–10, pp. 586–593.
15. 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.
16. Semenov M.Y., Vintaikin B.E., Smirnov A.E., Shevchenko S.Y., Cherenkova S.A., Jian D.K. Modeling of the nitrogen saturation of the alloys based on nickel and chromium in a glow discharge. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, no. 3, pp. 283–289.
17. Smirnov A.E., Semenov M.Y., Mokhova A.S., Sevalnev G.S. Use of Combined Methods of Successive Carburizing and Nitriding of Martensitic Steels in Low-Pressure Atmospheres. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, vol. 62, no. 1–2, pp. 127–132.
18. Minkevich A.N. *Chemical-thermal treatment of metals and alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 493 p.
19. Minkevich A.N. *Chemical-thermal treatment of steel*. Moscow: Mashgiz, 1950, 432 p.
20. Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Yu.S., Panayoti T.A. Ionic chemical-thermal treatment of alloys. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 1999, 400 p.
21. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Zyuzin D.M. Regulated processes of nitriding of corrosion-resistant steels. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2003, no. 1, pp. 20–26.
22. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Nitriding of steel*. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 256 p.
23. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Study of the structural state and wear resistance of nitrided iron alloys with different types of crystal lattice. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2019. no. 9, pp. 21–29.
24. Papirov I.I. *Structure and properties of beryllium alloys*: a reference book. Moscow: Energoizdat, 1981, 368 p.
25. Papirov I.I. *Beryllium in alloys*: a reference book. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 184 p.
26. Zhubaev A.K., Bekturgan N.B., Kuvatbaeva K.K., Nurtazina A.S. Investigation of the phase-structural state of stainless steel with beryllium. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 70–73.
27. Naik B.G., Sivasubramanian N. Applications of beryllium and its alloys. *Mineral Processing and Extractive Metullargy Review*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 243–251.
28. Marder J.M. Beryllium – technology and applications. *JOM*, 1984, vol. 36, no. 6, pp. 45–47.
29. Sawyer C.B., Kjellgren B.R. Newer Developments in Beryllium. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1938, vol. 30, no. 5, pp. 501–505.

30. Hunt R.M. et al. Diffusion bonding beryllium to Reduced Activation Ferritic Martensitic steel: Development of processes and techniques. *Fusion Engineering and Design*, 2012, vol. 87, no. 9, pp. 1550–1557.
31. Lee J.S., Park J.Y., Choi B.K. et al. Beryllium/ferritic martensitic steel joining for the fabrication of the ITER test blanket module first wall. *Fusion engineering and design*, 2009, vol. 84, no. 7–11, pp. 1170–1173.
32. Study of beryllium influence on iron surface layers and stainless steel. *International symposium dedicated to 100-years from birthday of K.I. Satpaev*. Kazakstan: AJKOS, 1999, vol. 3, pp. 68–69.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Дружинина Марина Эдуардовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Мосолов Алексей Николаевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Самойлова Ирина Игоревна, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru
Максимов Александр Владимирович, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina E. Druzhinina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey N. Mosolov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina I. Samoylova, student, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru
Alexander V. Maksimov, student, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.08.2022.

The article was submitted 11.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 16.08.2022.