

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ХРОМИСТЫХ И ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

А.Н. Василевич

vasilevichnasty@mail.ru

М.М. Евстафьева

marina.ewstafieva@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследована вакуумная цементация низкоуглеродистых (легированных и нелегированных) сталей 20, 20Х и 20Х2Н4А. Описан процесс науглероживания поверхности в атмосфере ацетилена по одностадийному режиму и без последующей термической обработки. Показано влияние температуры и времени вакуумной цементации на характер распределения углерода в поверхностном слое и на эффективную толщину диффузионного слоя стали. Выполнен анализ кинетики насыщения при вакуумной цементации. Экспериментально установленные зависимости показывают рост толщины диффузионного слоя по параболической кривой роста слоя и достижение постоянного значения концентрации углерода, что может быть положено в основу решения задач моделирования массопереноса в будущем.

Ключевые слова

Химико-термическая обработка, низкоуглеродистая сталь, вакуумная цементация, диффузия, эффективная толщина слоя, кинетический коэффициент, время, температура, концентрация углерода

Поступила в редакцию 08.07.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Химико-термическая обработка в контролируемых атмосферах деталей машин и механизмов из углеродистых и легированных сталей с целью поверхностного упрочнения получила широкое применение в промышленности [1–3]. Она является важнейшей частью технологического процесса изготовления деталей, в результате которого сталь приобретает необходимую твердость, прочность и пластичность [4–6].

Вакуумная цементация в нашей стране и за рубежом признана самым приоритетным из способов цементации. Данный процесс относится к экологически чистым и энергосберегающим [7–9]. Важной особенностью процесса является высокая стабильность результатов науглероживания, формирование качественных диффузионных слоев. Разработка технологии этого процесса открывает возможности для повышения эксплуатационных свойств ответственных деталей машин.

Процесс вакуумной цементации имеет ряд преимуществ перед другими традиционными методами. Основными из них являются отсутствие газоприготовительных установок и приборов контроля углеродного потенциала; возможность эффективного регулирования профиля распределения углерода в цемен-

тованном слое; уменьшение удельного расхода электроэнергии и технологического газа; отсутствие кислородсодержащих компонентов в атмосфере, что исключает внутреннее окисление деталей; большая мобильность оборудования; сокращение длительности процесса в результате проведения его при высокой температуре [10–12]. Возможно эффективное сочетание цементации с последующим деформационным упрочнением [13–15]. Учитывая важность применения вакуумной цементации в промышленности, необходимо исследовать процесс насыщения в кинетическом режиме, изменяя параметры атмосферы во времени. К основным характеристикам цементованного слоя относятся концентрация углерода на поверхности, эффективная толщина слоя, изучая которые, можно рассчитать кинетический коэффициент диффузии [10, 16, 17]. Одновременно необходимо исследовать кинетические параметры атмосферы вакуумной цементации: количественный и качественный состав карбюризатора.

Цель работы — исследование влияния кинетических параметров вакуумной цементации на распределение углерода в поверхностном слое и на толщину эффективного диффузионного слоя стали.

Материал и методика исследования. Для проведения исследований были подобраны следующие низкоуглеродистые нелегированные и легированные стали с одинаковым количеством углерода: 20, 20X и 20X2H4A.

Сталь 20 применяют для изготовления элементов сварных конструкций, трубопроводов, коллекторов, вкладышей подшипников, строп и другой продукции. Валы, шестерни, червяки, фрикционные диски, оси, шпиндели, шпильки и другие изделия из стали 20 после химико-термической обработки приобретают высокую поверхностную твердость и износостойкость при невысокой прочности сердцевины.

Сталь 20X используют в промышленности: втулки, шестерни, обоймы, гильзы, диски, плунжеры, рычаги и другие цементуемые детали, к которым предъявляют требования высокой поверхностной твердости при невысокой прочности сердцевины, детали, работающие в условиях износа при трении.

Сталь 20X2H4A в промышленности применяют для изготовления шестерен, валов-шестерен, пальцев и других цементуемых особо ответственных высоконагруженных деталей, к которым предъявляют требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины и высокой поверхностной твердости и которые работают под действием ударных нагрузок или при отрицательной температуре.

Химический состав исследуемых сталей 20, 20X и 20X2H4A представлен в таблице.

Низкоуглеродистые стали подвергали вакуумной цементации. Вакуумная цементация — это высокотемпературный вариант газовой цементации, которая проводится при давлении меньше атмосферного. Цементацию проводили в ва-

куумной печи по одностадийному режиму в атмосфере ацетилена при пониженном давлении 6 мм рт. ст. Температура вакуумной цементации лежит в пределах 880...940 °С. Образцы выдерживали в течение 2, 5 и 10 мин.

Химический состав сталей (% по массе)

Марка стали	C	Cr	Cu	As	Si	Mn	Ni	P	S	Fe
20	0,17–0,24	0,25	0,25	0,08	—	0,35–0,65	0,25	До 0,04	До 0,04	Остальное
20X	0,12–0,18	0,7–1,0	До 0,30	—	0,17–0,30	0,50–0,80	До 0,30	до 0,035	До 0,035	Остальное
20X2H4A	0,17–0,24	До 0,25	До 0,25	До 0,08	0,17–0,37	0,35–0,65	До 0,25	До 0,04	До 0,04	Остальное

В работе проведен эмиссионный спектральный анализ для определения концентрации углерода на поверхности исследуемых образцов с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с лазерным возбуждением спектров модели SPECS LAES MATRIX.

Результаты экспериментов и обсуждение. Вакуумная цементация заключается в проведении процедуры при низком давлении. Процесс науглероживания поверхности изделий осуществлялся с применением ацетилена, поскольку результаты расчетов в работах [7, 12] свидетельствуют о том, что насыщение этим углеводородом привело к формированию наиболее высокой концентрации углерода на поверхности, наибольшей эффективной и общей толщины слоя.

При проведении вакуумной цементации детали помещаются в холодную печь, после герметизации камеры нагрева в ней создается вакуум. Затем выполняют нагрев до необходимой температуры, осуществляется выдержка. За это время выравнивается температура деталей по сечению и с поверхности нагретых деталей осыпаются загрязнения, мешающие науглероживанию. Затем в камеру под давлением подается углеводородный газ, благодаря чему наступает активная фаза обогащения поверхностного слоя. На следующем этапе происходит диффузионное внедрение углерода, для чего в камере опять создают вакуумическое давление. Охлаждение до температуры окружающей среды происходит в печи под действием инертных газов под разным давлением [10, 11]. После вакуумной цементации проводят термическую обработку, а именно закалку и отпуск, чтобы повысить прочность материала. В данной работе для исследования параметров вакуумной цементации процесс проводили по одностадийному режиму и без последующей термической обработки, поскольку нагрев способен исказить результаты цементации.

Основная схема вакуумной цементации стали 20Х2Н4А представлена на рис. 1.

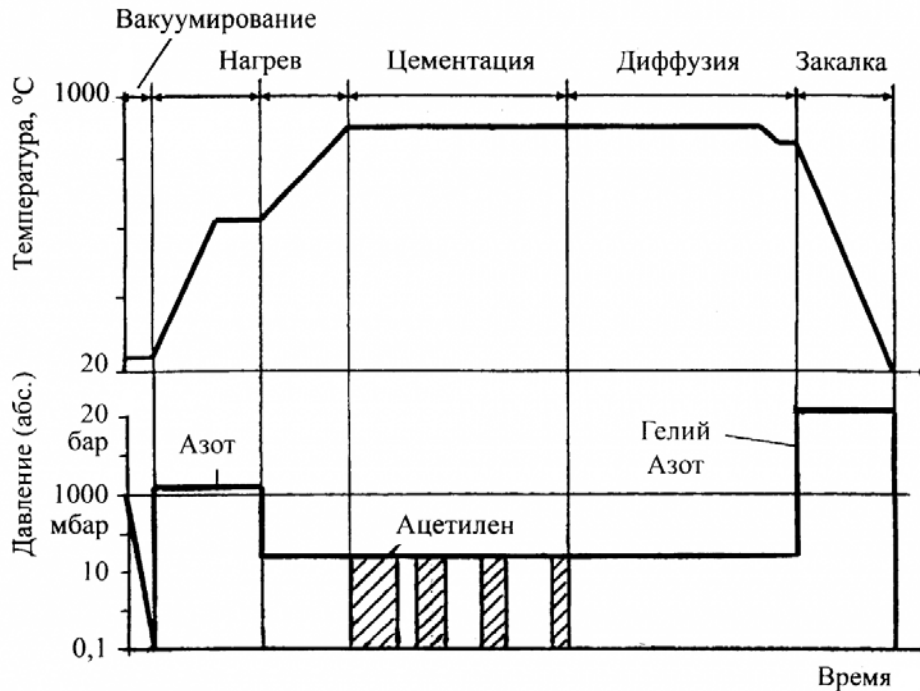


Рис. 1. Схема вакуумной цементации стали 20Х2Н4А

Химический состав сталей был определен методом эмиссионного спектрального анализа. Принцип действия атомно-эмиссионного спектрометра с лазерным возбуждением спектров модели SPECS LAES MATRIX основан на регистрации эмиссионного спектра определенного диапазона длин волн. Атомно-эмиссионный спектральный анализ состава вещества, в свою очередь, основан на двух фундаментальных принципах: спектр, испускаемый предварительно возбужденными атомами и ионами данного химического элемента, характерен только для данного химического элемента; интенсивность линий этого спектра зависит от концентрации этого элемента, определение которой и является целью анализа. Спектр представляет собой распределение мощности излучения по длинам волн и характеризуется зависимостью интенсивности от длины волны. Измеряя интенсивность линий спектра атомов (или ионов) того или иного химического элемента, определяют концентрацию этого химического элемента в анализируемой пробе.

По полученным данным для исследуемых марок стали были построены зависимости концентрации углерода от времени цементации для различных значений температуры (рис. 2).

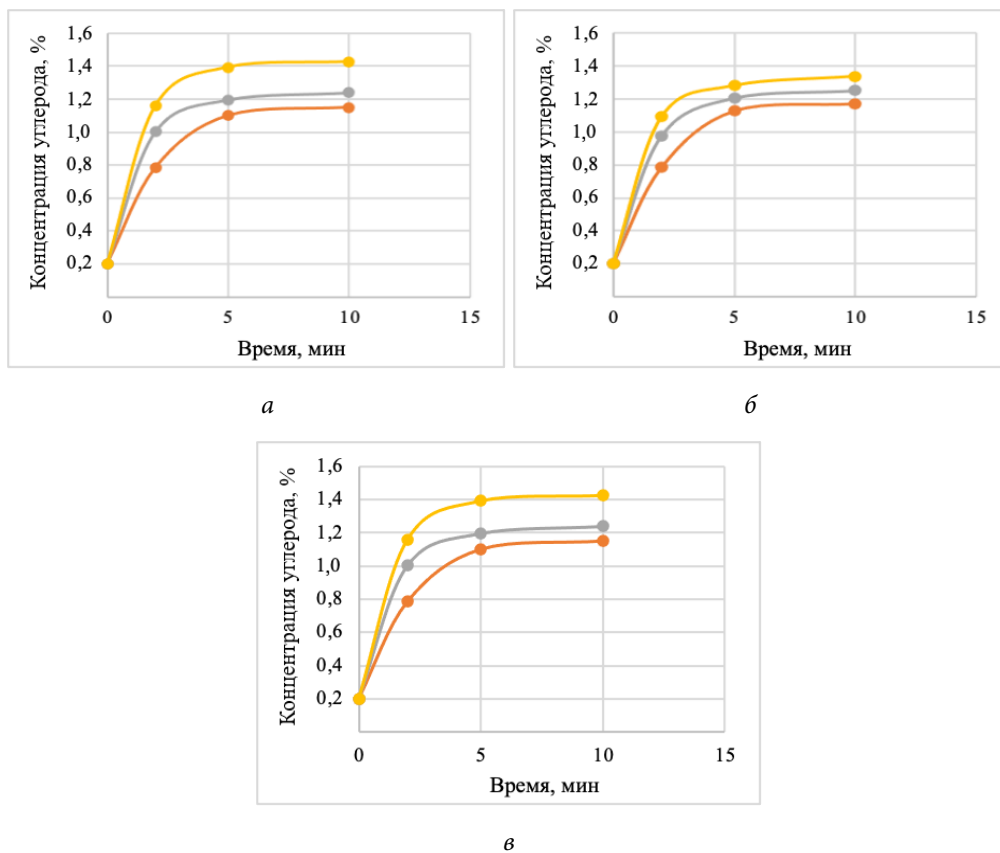


Рис. 2. Зависимости концентрации углерода сталей 20 (а), 20Х (б) и 20Х2Н4А (в) от времени цементации для различных значений температуры:

—●— $t = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$; —●— $t = 910\text{ }^{\circ}\text{C}$; —●— $t = 940\text{ }^{\circ}\text{C}$

По графикам (см. рис. 2) установлено, что кинетика концентрации углерода на поверхности асимптотически приближается к постоянному значению.

С помощью программы Microsoft Excel по полученным данным проведены расчеты кинетического коэффициента k для исследуемых сталей 20, 20Х и 20Х2Н4А согласно формуле [7, 10]

$$h_{\text{эф}} = k(t)^{0,5} + h_{\text{исх}},$$

где k — кинетический коэффициент; τ — время насыщения, ч; $h_{\text{эф}}$ и $h_{\text{исх}}$ — эффективная толщина слоя в конце и начале эксперимента; $h_{\text{исх}} = 0$ мм.

Зависимости кинетического коэффициента от различных температур построены при времени цементации 10 мин (рис. 3).

На рис. 3 видно, что с повышением температуры вакуумной цементации кинетический коэффициент исследуемых сталей увеличивается.

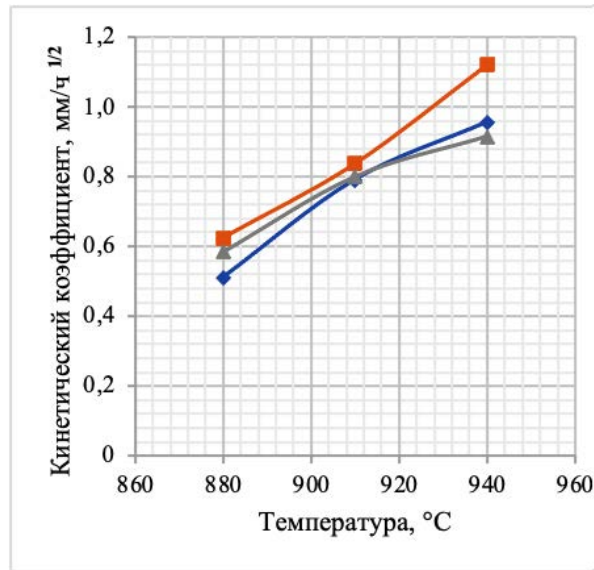


Рис. 3. Зависимость кинетического коэффициента сталей от температуры:

—◆— 20X2H4A; —■— 20X; —▲— сталь 20

Заключение. На основе экспериментального исследования и математической обработки полученных результатов насыщения углеродом при вакуумной цементации можно сделать вывод о том, что при достаточно продолжительной выдержке в атмосфере ацетилена (более 10 мин) концентрация углерода на поверхности образцов достигает определенного предела, выше которого уже не растет. Кинетический коэффициент возрастает с увеличением температуры от 880 до 940 °C.

Литература

- [1] Арзамасов Б.Н., Мухина Г.Г., ред. Материаловедение. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [2] Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М., Машиностроение, 2008.
- [3] Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., и др. Механические свойства теплоустойчивых сталей после активизации процесса цементации. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 4, с. 113–119.
- [4] Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М., Бином. Лаборатория знаний, 2009.
- [5] Pakhmovova S.A., Fakhurtdinov R.S., Zhavoronkova E. et al. Investigation of the contact fatigue strength of high quality carburised steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1129, art 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1129/1/012027>
- [6] Макушина М.А., Климкина А.А., Пахомова С.А. Исследование технологической наследственности разных способов цементации. *Будущее науки-2016. Сб. науч. ст. 4-й Межд. молодеж. науч. конф. Т. 4*. Курск, Университетская книга, 2016, с. 86–89.

- [7] Lashnev M.M., Smirnov A.E., Semenov M.Y. Use of vacuum carbonitriding for raising the seizure resistance of gears from steel VKS-10. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2013, vol. 55, no 1-2, pp. 29–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9574-z>
- [8] Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А. Преимущества вакуумной цементации и проблемы ее промышленного применения. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2016, № 8, с. 37–43.
- [9] Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С. и др. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации. *Вестник научно-технического развития*, 2016, № 9, с. 19–28.
- [10] Semenov M.Y., Smirnov A.E., Ryzhova M.Y. Computation of carbon concentration curves in vacuum carburizing of steels. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2013, vol. 55, no 1-2, pp. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9576-x>
- [11] Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. Control of carbon saturation of the diffusion layer in vacuum carburizing of heat-resistant steels. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2004, vol. 46, no 7-8, pp. 340–344. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000048845.35526.09>
- [12] Рыжов Н.М., Фахуртдинов Р.С., Горбалетов Н.В. Управление химическим составом, структурой и свойствами зубчатых колес при ХТО. *Вестник машиностроения*, 1985, № 9, с. 16–20.
- [13] Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 870, pp. 383–391. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383>
- [14] Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology. *Heat Treatment Progress*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 57–65.
- [15] Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1999, № 2, с. 61–68.
- [16] Atena H., Schrank F. Niederdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabschreckung: Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten und Anlagentechnik. *HTM – J. Heat Treat. Mater.*, 2002, vol. 57, no. 4, pp. 247–256.
- [17] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. Changes in the structure of martensite of iron-nickel alloys under the action of thermal shotblast treatment. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2001, vol. 43, no. 11-12, pp. 438–439. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014855712535>

Василевич Анастасия Николаевна — студентка кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Евстафьева Марина Максимовна — студентка кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Пахомова Светлана Альбертовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Василевич А.Н., Евстафьева М.М. Исследование параметров вакуумной цементации хромистых и хромоникелевых сталей. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 11(76). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-11-840>

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF VACUUM CEMENTATION OF CHROMIUM AND CHROMIUM-NICKEL STEELS

A.N. Vasilevich
M.M. Evstafieva

vasilevichnasty@mail.ru
 marina.ewstafieva@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the study of vacuum cementation of steels 20, 20X and 20X2H4A. The influence of parameters such as temperature and time of vacuum cementation on the nature of carbon distribution in the diffusion layer and on the effective thickness of the steel layer is analyzed. Experimentally established dependences show an increase in the thickness of the diffusion layer according to the parabolic kinetics of layer growth and the achievement of a constant value of the carbon concentration, which can be used as the basis for solving problems of modeling mass transfer in the future.

Keywords

Chemical heat treatment, mild steel, vacuum carburizing, diffusion, effective layer thickness, kinetic coefficient, time, temperature, carbon concentration

Received 08.07.2022
 © Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Arzamasov B.N., Mukhina G.G., ed. Materialovedenie [Material science]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008 (in Russ.).
- [2] Suslov A.G. Inzheneriya poverkhnosti detaley [Engineering of a part surface]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008 (in Russ.).
- [3] Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., et al. Mechanical properties of hot-working steels after activation of cementation process. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 4, pp. 113–119 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 4, pp. 322–326. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618814040062>)
- [4] Gottstein G. Physical foundations of materials science. Springer, 2004. (Russ. ed.: Fiziko-khimicheskie osnovy materialovedeniya. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2009.)
- [5] Pakhomova S.A., Fakhurtdinov R.S., Zhavoronkova E. et al. Investigation of the contact fatigue strength of high quality carburised steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1129, art 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1129/1/012027>
- [6] Makushina M.A., Klimkina A.A., Pakhomova S.A. Issledovanie tekhnologicheskoy nasledstvennosti raznykh sposobov tsementatsii [Study on technological heritage of different carburization methods]. *Budushchee nauki-2016. Sb. nauch. st. 4-y Mezhd. molodezh. nauch. konf. T. 4* [Future of Science-2016. Proc. 4th Int. Youth Sci. Conf. Vol. 4]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2016, pp. 86–89 (in Russ.).
- [7] Lashnev M.M., Smirnov A.E., Semenov M.Y. Use of vacuum carbonitriding for raising the seizure resistance of gears from steel VKS-10. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2013, vol. 55, no 1-2, pp. 29–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9574-z>

- [8] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Yu., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 8, pp. 37–43 (in Russ.). (Eng. version: *Polym. Sci. Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421217010063>)
- [9] Pakhomova S.A., Ryzhova M.Yu., Fakhurtdinov R.S. et al. Contact fatigue and wear resistance of heat-resistant steel after different kinds of carburizing. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2016, no. 9, pp. 19–28 (in Russ.).
- [10] Semenov M.Y., Smirnov A.E., Ryzhova M.Y. Computation of carbon concentration curves in vacuum carburizing of steels. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2013, vol. 55, no 1-2, pp. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9576-x>
- [11] Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. Control of carbon saturation of the diffusion layer in vacuum carburizing of heat-resistant steels. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2004, vol. 46, no 7-8, pp. 340–344. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000048845.35526.09>
- [12] Ryzhov N.M., Fakhurtdinov R.S., Gorbaleto N.V. Management of chemical composition, structure and properties of gear wheels during heat treatment. *Vestnik mashinostroeniya*, 1985, no. 9, pp. 16–20 (in Russ.).
- [13] Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 870, pp. 383–391. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383>
- [14] Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology. *Heat Treatment Progress*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 57–65.
- [15] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M. Efficiency of the strain hardening of the rose steels. Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering, 1999, no. 2, pp. 61–68 (in Russ.).
- [16] Atena H., Schrank F. Niederdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabschreckung: Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten und Anlagentechnik. *HTM – J. Heat Treat. Mater.*, 2002, vol. 57, no. 4, pp. 247–256.
- [17] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. Changes in the structure of martensite of iron-nickel alloys under the action of thermal shotblast treatment. *Met. Sci. Heat. Treat.*, 2001, vol. 43, no. 11-12, pp. 438–439. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014855712535>

Vasilevich A.N. — student, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Evstafieva M.M. — student, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Pakhomova S.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Vasilevich A.N., Evstafieva M.M. Investigation of the parameters of vacuum cementation of chromium and chromium-nickel steels. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 11(76). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-11-840.html> (in Russ.).