

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Е.К. Жаворонкова

EKZhavoronkova@gmail.com

SPIN-код: 55505-1390

К.Ю. Зинкович

kristinavolsk@gmail.com

SPIN-код: 8661-2488

Р.М. Киселев

roma.kis@list.ru

SPIN-код: 3092-9280

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

Аннотация

Рассмотрены показатели контактной выносливости при вакуумной цементации и ионном азотировании высококачественных сталей ВКС-7 и ВКС-10. Приведены сведения о режимах химико-термической обработки и рассмотрен технологический процесс обработки. Приведены статистические данные по разрушению образцов при заданных напряжениях. Выполнен графический анализ полученных значений после испытаний и подобран оптимальный вариант химико-термической обработки для каждой из заданных сталей, дающий наилучшие показатели по механическим характеристикам и эксплуатационным требованиям.

Ключевые слова

Вакуумная цементация, ионное азотирование, закалка, отпуск, контактная выносливость, цементационный слой, напряжения, зубчатые колеса

Поступила в редакцию 09.11.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Процесс химико-термической обработки находит все более широкое применение, особенно в серийном производстве, для повышения эксплуатационных свойств высоконагруженных зубчатых колес. Самыми распространенными способами обработки являются цементация и азотирование. В настоящее время для производства высоконагруженных зубчатых колес применяют высококачественные стали и наиболее эффективные способы химико-термической обработки: вакуумную цементацию и ионно-плазменное азотирование [1–4].

Вакуумная цементация имеет ряд преимуществ по отношению к обычной цементации. Основным ее преимуществом является уменьшение времени процесса при низком давлении и достаточно высокой температуре благодаря более быстрому массообмену между поверхностью детали и углеродом. Для обеспечения высокого предела контактной выносливости зубчатых колес разработан режим подачи ацетилена при цементации, включающий две группы циклов. Первая группа циклов обеспечивает активное насыщение поверхности углеродом, вторая группа — диффузионное перераспределение концентрации углерода и активное насыщение приповерхностной зоны слоя [3, 5].

Преимущества ионно-плазменного азотирования по сравнению с печным заключаются в значительном сокращении времени насыщения и повышении качества и равномерности поверхностного нитридного слоя. Ионное азотирование проводят в две стадии: очистка поверхности катодным распылением и непосредственно азотирование. Первая стадия обеспечивает активацию поверхности и разрушение оксидных пленок, а во второй происходит нагрев поверхности до температуры диффузии и насыщение ее азотом [5–7].

Целью этой работы является анализ контактной выносливости при вакуумной цементации и ионном азотировании сталей ВКС-7 и ВКС-10, применяемых при изготовлении зубчатых колес. Для этого был выполнен ряд испытаний на разрушение и определены оптимальные для исследований напряжения.

Методика и объекты исследования. Объектами исследований служили образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие весь комплекс химико-термической обработки, включая вакуумную цементацию (или азотирование), закалку и отпуск. Ниже приведен химический состав сталей ВКС-10 и ВКС-7:

Сталь	C	Cr	Ni	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
ВКС-7	0,14–0,18	1,8–2,2	2,7–3,0	0,4–0,6	0,2–0,3	0,17–0,37	0,1–0,2	0,1–0,2	0,02–0,07	Не более 0,015	Не более 0,025
ВКС-10	0,10–0,15	3,0–3,4	2,7–3	1,9–2,3	0,3–0,6	0,2–0,5	0,17–0,37	0,05–0,15	Не более 0,04	Не более 0,015	Не более 0,015

Химико-термическую обработку проводили на оборудовании SECO/WARWICK SA. Схемы всего комплекса упрочняющей термической и химико-термической обработки представлены на рис. 1–4. Для сравнения исследовали два способа химико-термической обработки: ионно-плазменное азотирование и вакуумную цементацию. Вакуумную цементацию осуществляли в ацетилене при температуре 940 °С в течение 5 ч по циклическому режиму. Режим подачи ацетилена предусматривал две группы циклов с различным соотношением стадий активного насыщения и диффузионного выравнивания, выбранным в соответствии с рекомендациями [8, 9].

Азотирование в тлеющем разряде осуществляли на окончательно обработанных деталях при температуре 500 °С в атмосфере 95 % N₂ + 5 % H₂. Для сталей ВКС-7 и ВКС-10 перед азотированием выполняли предварительную термическую обработку, включающую в себя две операции — закалку и высокий отпуск (см. рис. 1 и 2). Такая обработка обеспечивает высокую вязкость и прочность сердцевины детали [6, 10].

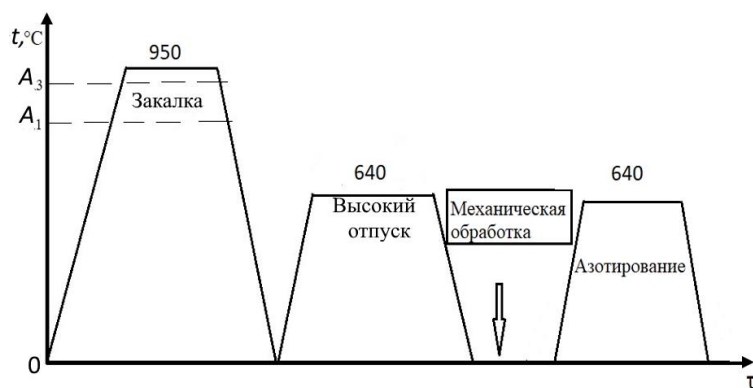


Рис. 1. Схема химико-термической обработки с азотированием стали ВКС-7

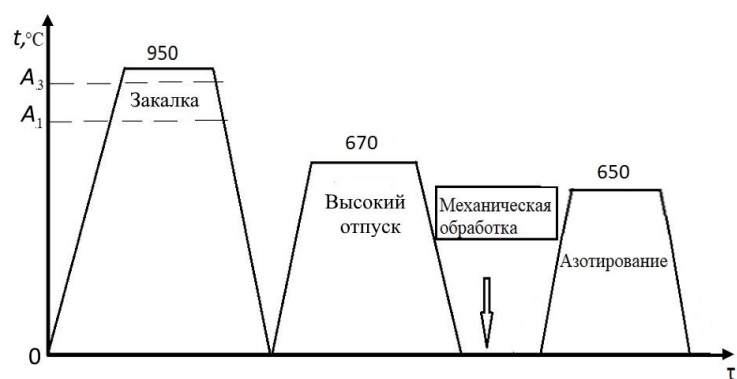


Рис. 2. Схема химико-термической обработки с азотированием стали ВКС-10

Известно [6, 11], что после цементации нельзя получить максимальную твердость, поэтому была проведена окончательная упрочняющая термическая обработка, сочетающая закалку и разные режимы отпуска (см. рис. 3 и 4).



Рис. 3. Схема химико-термической обработки с вакуумной цементацией стали ВКС-7

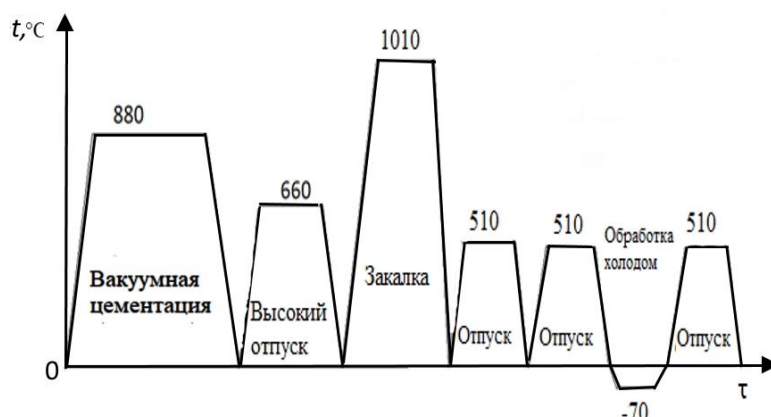


Рис. 4. Схема химико-термической обработки с вакуумной цементацией стали ВКС-10

Цель высокого отпуска — придание материалу максимальной вязкости в условиях сохранения достаточных упругости и предела прочности металла. Остаточный аустенит практически полностью распадается. Цель закалки — получение высокой твердости, износостойкости и физико-механических свойств, а также полное растворение избыточных фаз. Двукратный отпуск проводят для повышения степени перехода остаточного аустенита в мартенсит. При этом происходит рост твердости. Обработку холодом применяют для обеспечения распада остаточного аустенита, повышения свойств (преимущественно твердости) и стабилизации размеров, последний отпуск — для снятия остаточных напряжений.

В результате такой сложной обработки детали получают необходимые значения физико-механических свойств: высокую твердость, износостойкость, долговечность и др. [12, 13].

Испытания на контактную выносливость проводили по схеме качения с проскальзыванием (6 %) по ГОСТ 25.501 на роликовой машине Ш17. В качестве смазочного материала использовали масло дизфирного типа при температуре $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$. За критерий долговечности принимали число циклов до образования выкрашивания на поверхности роликового образца размером не менее ширины рабочей дорожки, равной 8 мм.

Результаты экспериментов и обсуждение. Основные исследования были связаны с испытаниями на контактную выносливость. Был выполнен отсев образцов, число циклов которых имело наибольшее расхождение, тем самым грубые погрешности были исключены из расчетов. При обработке данных использовали полученное математическое ожидание (среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины, выборочное среднее, среднее по выборке). Доказано, что при соблюдении определенных условий выборочное среднее стремится к истинному значению математического ожидания случайной величины при стремлении объема выборки (числа наблюдений, испытаний, измерений) к бесконечности.

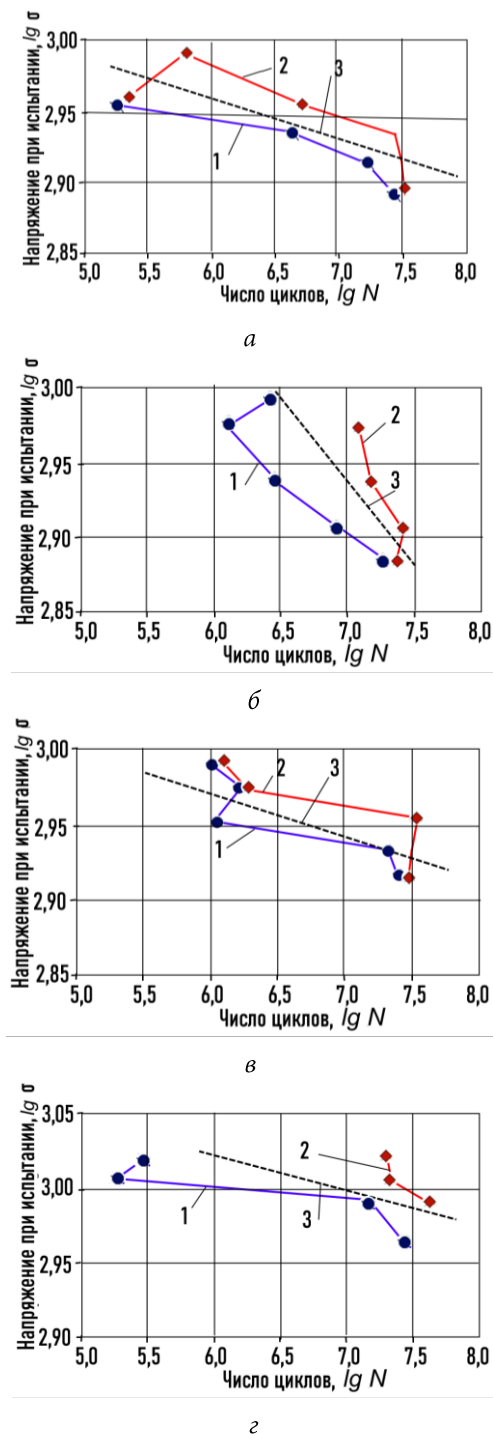


Рис. 5. Кривые усталости (кривые Велера) сталей ВКС-7 (а, б) и ВКС-10 (в, г) после вакуумной цементации (а, в) и ионного азотирования (б, г);

1 и 2 — минимальные и максимальные значения долговечности;
3 — среднее значение долговечности

Результаты вычислений представлены в виде кривых усталости (кривые Велера) — экспериментальные зависимости напряжений от количества циклов нагружения, при которых происходит разрушение образца исследуемой стали (рис. 5). Текущие кривые усталости были построены путем повторно-переменного растяжения-сжатия образцов с помощью МВИ611М по ГОСТ 25.502. Сравнивая кривые усталости между собой, можно убедиться, что чем меньше среднее квадратическое отклонение (СКО), тем меньше рассеяние результатов наблюдений и тем больше вероятность того, что большинство случайных погрешностей в них будет мало. Естественно заключить, что качество измерений тем выше, чем меньше СКО случайных погрешностей.

Представленные графики являются приблизительными кривыми усталости для сталей ВКС-7 и ВКС-10 двух видов термических обработок (вакуумная цементация и ионно-плазменное-азотирование). Графики являются неточными, однако дают представление о том, при каком напряжении следует проводить дальнейшие испытания образцов.

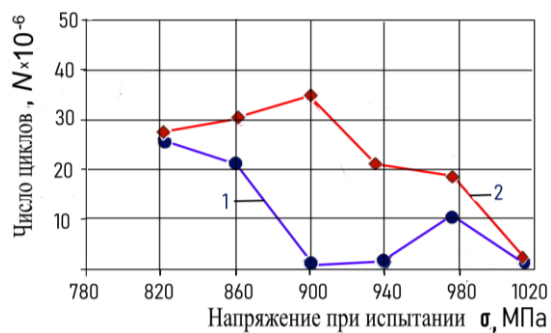
Отклонения графиков от реальной кривой усталости обусловлены:

- 1) наклепом (необратимыми пластическими деформациями);
- 2) неоднородностью структуры материала (крупное либо мелкое зерно в области шейки разрыва / места закрепления образца или наоборот), концентрации примесей и т. п.;
- 3) систематической и статической погрешностью измерений;
- 4) недостаточным числом измерений, вследствие чего возникают большие несистематические погрешности;
- 5) возрастающей с увеличением числа циклов нагружения анизотропией свойств образца;
- 6) скоплением дислокаций (особенно в области шейки разрыва).

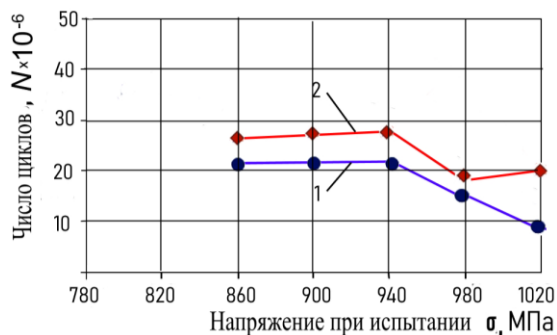
Результаты испытаний на контактную выносливость образцов исследуемых сталей после упрочняющей химико-термической обработки представлены на рис. 6. Испытания были проведены с разными рабочими напряжениями.

Анализ результатов измерений контактной выносливости диффузионных слоев позволяет сделать вывод о том, что оптимальными являются рабочие напряжения 980 МПа для испытания на контактную выносливость сталей ВКС-7 и ВКС-10, так как при напряжениях от $\sigma = 760 \dots 940$ МПа множество образцов не получило разрушений, а при 1020 МПа возникал большой разброс итоговых значений и данное напряжение использовалось не для всех типов сталей и видов химико-термической обработки, а значит, не могло дать достоверных данных.

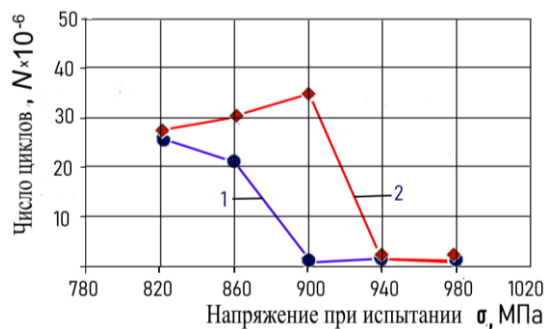
Сравнительная картограмма исследуемых сталей после испытания на контактную выносливость с рабочим напряжением $\sigma = 980$ МПа представлена на рис. 7.



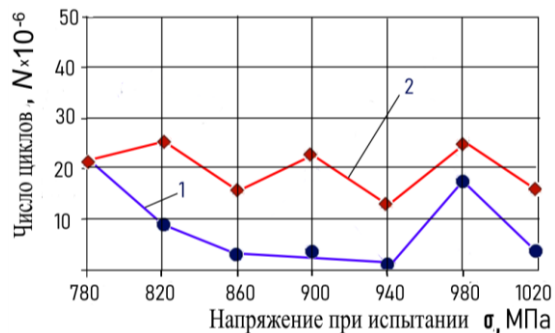
a



б



в



г

Рис. 6. Контактная выносливость сталей ВКС-7 (*a, б*) и ВКС10 (*в, г*) после вакуумной цементации (*a, в*) и ионного азотирования (*б, г*) в зависимости от напряжений σ при испытании

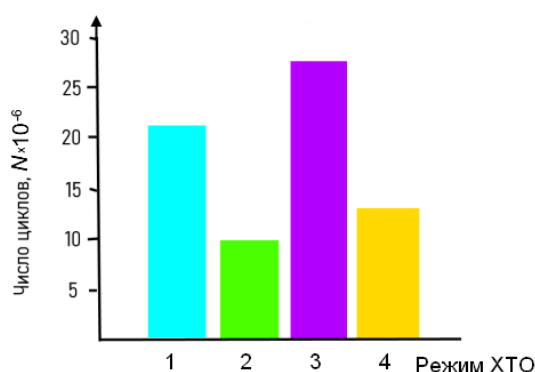


Рис. 7. Контактная выносливость сталей ВКС-7 (1 и 2) и ВКС-10 (3 и 4) после вакуумной цементации (1 и 3) и ионного азотирования (2 и 4) (испытания проведены при $\sigma = 980$ МПа)

Металлографическими исследованиями было установлено, что карбидный слой после цементации и карбонитридный слой после азотирования имели равномерную структуру и высокую микротвёрдость поверхности, что обеспечило высокие показатели контактной выносливости [11, 14]. Испытания показали, что после вакуумной цементации долговечность сталей ВКС-7 и ВКС-10 выше, чем после ионного азотирования, что обусловлено большей протяженностью диффузионного слоя.

Заключение. Подведя итог наших исследований, можно выделить следующее:

1) по результатам предварительных испытаний образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 после вакуумной цементации и ионно-плазменного азотирования рекомендуется испытывать при напряжении $\sigma = 980$ МПа, обеспечивающем более достоверные данные;

2) наибольшее число циклов испытаний продемонстрировано у образцов, подвергшихся вакуумно-цементационной обработке;

3) построены кривые усталости для сталей ВКС-7 и ВКС-10 для вакуумной цементации и ионно-плазменного азотирования.

Литература

- [1] Арзамасов Б.Н., Мухин Г.Г., ред. Материаловедение. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [2] Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М., Высшая школа, 2001.
- [3] Пахомова С.А., Манаев О.И. Разработка технологии вакуумной цементации стали 19ХГН. *Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты. Сб. мат. III Межд. науч.-практ. конф. Т. 2.* Кемерово, Западно-Сибирский научный центр, 2017, с. 422–426.
- [4] Банас И.П., Алексеева Г.П., Уткина А.Н. Современные стали для высоконапряженных зубчатых колес. *Вестник машиностроения*, 1985, № 9, с. 12–15.
- [5] Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2004, № 8, с. 22–27.

- [6] Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М., Машиностроение, 2008.
- [7] Пахомова С.А. Особенности изменения структуры железо-никелевых сплавов в условиях деформирования. *Сб. мат. VIII Межд. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов"*. М., ИМЕТ РАН, 2019, с. 520–522.
- [8] Смирнов А.Е., Мохова А.С., Семёнов М.Ю. и др. Комбинированная химико-термическая обработка зубчатых колес из дисперсионно-твердеющей комплексно-легированной стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш для повышения твердости поверхности, износостойкости и контактной выносливости. *Проблемы машиностроения и надёжности машин*, 2017, № 4, с. 95–100.
- [9] Pakhomova S. Surface modification of low carbon steel to improve corrosion resistance. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 963, art. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012001>
- [10] Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. и др. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацетилене. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2004, № 6, с. 10–15.
- [11] Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С. и др. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации. *Вестник НТР*, 2016, № 9(109), с. 19–28.
- [12] Семенов М.Ю., Смирнов А.Е., Рыжова М.Ю. Расчет концентрационных кривых углерода при вакуумной цементации сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2013, № 1, с. 38–42.
- [13] 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.* Курск, Университетская книга, 2016, с. 86–89.
- [14] Пахомова С.А., Гресс М.А. Исследование контактной выносливости шестерен из стали 25Х13Н2. *Машины, технологии и материалы для современного машиностроения*. М., 2018, с. 134.

Жаворонкова Елизавета Константиновна — студентка кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Зинкович Кристина Юрьевна — студентка кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Киселев Роман Михайлович — студент кафедры «Прикладная механика», 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:

Жаворонкова Е.К., Зинкович К.Ю., Киселев Р.М. Исследование контактной выносливости высококачественных сталей после химико-термической обработки. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-658>

INVESTIGATION OF THE CONTACT ENDURANCE OF HIGH-QUALITY STEELS AFTER CHEMICAL-THERMAL TREATMENT

E.K. Zhavoronkova

EKZhavoronkova@gmail.com

SPIN-code: 55505-1390

K.Yu. Zinkovich

kristinavolsk@gmail.com

SPIN-code: 8661-2488

R.M. Kiselev

roma.kis@list.ru

SPIN-code: 3092-9280

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The indicators of contact endurance during vacuum carburizing and ion nitriding of high-quality VKS-7 and VKS-10 steels are considered. Information about the modes of chemical-thermal treatment is given and the technological process of machining is considered. Statistical data on the destruction of samples at given stresses are presented. The graphical analysis of the obtained values after testing was carried out and the optimal variant of chemical-thermal treatment was selected for each of the given steels, which gives the best performance in terms of mechanical characteristics and operational requirements.

Keywords

Vacuum carburizing, ion nitriding, quenching, tempering, contact endurance, carburizing layer, stresses, gears

Received 09.11.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Arzamasov B.N., Mukhin G.G., eds. *Materialovedenie [Material engineering]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008 (in Russ.).
- [2] Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.P. *Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigateley [Production of gears for gas-turbine engines]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001 (in Russ.).
- [3] Pakhomova S.A., Manaev O.I. [Development of vacuum hardening technology for 19KhGN steel]. *Fundamental'nye nauchnye issledovaniya: teoreticheskie i prakticheskie aspekty. Sb. mat. III Mezhd. nauch.-prakt. konf. T. 2 [Fundamental scientific research: theoretical and practical aspects. Vol. 2]*. Kemerovo, Zapadno-Sibirskiy nauchnyy tsentr Publ., 2017, pp. 422–426 (in Russ.).
- [4] Banas I.P., Alekseeva G.P., Utkina A.N. New steels for highly stressed gears. *Vestnik mashinostroeniya*, 1985, no. 9, pp. 12–15 (in Russ.).
- [5] Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. Control of carbon saturation of a diffusion layer upon vacuum carburizing of heat-resistant steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 8, pp. 22–27 (in Russ.).
- [6] Suslov A.G. *Inzheneriya poverkhnosti detaley [Parts surface engineering]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008 (in Russ.).

- [7] Pakhomova S.A. [Special aspects of structure measuring iron-nickel alloys in deformation conditions]. *Sb. mat. VIII Mezhd. konf. "Deformatsiya i razrushenie materialov i nano-materialov"* [Proc. VIII Int. Conf. "Deformation and destruction of materials and nano-materials"]. Moscow, IMET RAS Publ., 2019, pp. 520–522 (in Russ.).
- [8] Smirnov A.E., Mokhova A.S., Semenov M.Yu., et al. Mixed-surface impregnation of gear wheels made of 13kh3n3m2vfb-sh age-hardenable integrally alloyed steel aimed at improving surface hardness, wear-resistance, and back-to-back endurance. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2017, no. 4, pp. 95–100 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 404–408. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618817040173>)
- [9] Pakhomova S. Surface modification of low carbon steel to improve corrosion resistance. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 963, art. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012001>
- [10] Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S., et al. Special features of vacuum carburization of heat-resistant steel in acetylene. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 6, pp. 10–15 (in Russ.).
- [11] 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 NTR*, 2016, no. 9(109), pp. 19–28 (in Russ.).
- [12] Semenov M.Yu., Smirnov A.E., Ryzhova M.Yu. Computation of carbon concentration curves in vacuum carburizing of steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 1, pp. 38–42 (in Russ.).
- [13] Makushina M.A., Klimkina A.A., Pakhomova S.A. [Study on technological heredity of different carburizing methods]. *Budushchee nauki-2016. Sb. nauch. st. 4-y Mezhd. molodezhn. nauch. konf.* [Future of science 2016. Proc. 4th Int. Youth. Sci. Conf.]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2016, pp. 86–89 (in Russ.).
- [14] Pakhomova S.A., Gress M.A. [Study on contact fatigue of gears made of 25Kh13N steel]. *Mashiny, tekhnologii i materialy dlya sovremennogo mashinostroeniya* [Machines, technologies and materials for modern machine building]. Moscow, 2018, p. 134 (in Russ.).

Zhavoronkova E.K. — Student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Zinkovich K.Yu. — Student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Kiselev R.M. — Student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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

Please cite this article in English as:

Zhavoronkova E.K., Zinkovich K.Yu., Kiselev R.M. Investigation of the contact endurance of high-quality steels after chemical-thermal treatment. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Polytechnical student journal], 2020, no. 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-658.html> (in Russ.).