

УДК 674.023

М. Н. Пищов¹, С. Е. Бельский¹, Адель Абдель Вассет Рашид², А. В. Вергейчик¹¹ Белорусский государственный технологический университет² Бейрутский Арабский Университет (Ливан)**ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЯДА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Эксплуатационные свойства и долговечность деталей подвижных сопряжений в значительной степени определяются состоянием их рабочих поверхностей, многие из которых подвержены контактными нагрузкам. Кроме того, на поверхности располагаются основные источники концентрации напряжений, зависящие от формы детали, шероховатости, характера соединений и сил трения в сопряженных деталях.

Во многих случаях в поверхностном слое при нагружении деталей возникают растягивающие напряжения, приводящие к снижению усталостных характеристик материалов. Поэтому для повышения сопротивления усталостному разрушению деталей, работающих в условиях циклического нагружения, очень перспективно использование поверхностного упрочнения.

В данной статье исследовано влияние комплексного борирования на усталостные характеристики конструкционной стали. Показана возможность существенного повышения пределов выносливости образцов из стали 20ХН3А за счет поверхностного упрочнения, определен рациональный состав насыщающей смеси, а также температурно-временные параметры процесса. Также установлена возможность существенного повышения усталостных характеристик инструментальной стали 5ХЗВЗМФС, обеспеченных проведенной цементацией, что необходимо для изготовления штамповой оснастки.

Ключевые слова: сталь, поверхностное упрочнение, усталостные характеристики, температура, время.

Для цитирования: Пищов М. Н., Бельский С. Е., Адель Абдель Вассет Рашид, Вергейчик А. В. Повышение усталостных характеристик ряда конструкционных и инструментальных сталей поверхностным упрочнением // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 313–319.

M. N. Pishchov, S. Ye. Belsky, Adel Abdel Wasset Rashid, A. V. Vergeichik¹ Belarusian State Technological University² Beirut Arab University (Lebanon)**IMPROVING FATIGUE CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS BY SURFACE HARDENING**

The operational properties and durability of parts of movable conjunctions are largely determined by the condition of their working surfaces that are subject to contact loads. In addition, the main sources of stress concentration are occur on the surface. The stress depends on the shape of the part, roughness, the nature of the joints and friction forces in the mating parts.

In many cases, tensile stresses occurs in the surface layer when the parts are loaded. It leads to a leads to a decrease in the fatigue characteristics of materials. Therefore, to increase the resistance to fatigue failure of parts working under cyclic loading conditions it is promising to use surface hardening.

This article deals with the influence of complex borating on the fatigue characteristics of structural steel. The possibility of a significant increase in the endurance limits of samples made of 20KH3A steel is shown, the rational composition of the saturating mixture, as well as the temperature and time parameters of the process are determined. The possibility of a significant increase in the fatigue characteristics of tool steel 5KH3VZMFS by cementation which is necessary for the manufacture of die steel is also specified.

Key words: steel, surface hardening, fatigue characteristics, temperature, time.

For citstion: Pishchov M. N., Belsky S. Ye., Adel Abdel Wasset Rashid, Vergeichik A. V. Improving fatigue characteristics of structural and tool steels by surface hardening. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 313–319 (In Russian).

Введение. Циклические нагрузки широкого амплитудно-частотного диапазона являются

одной из основных причин разрушения деталей современных машин.

Разрушение деталей, как правило, начинается с поверхности, так как многие из них подвержены контактному нагружению, изгибу, кручению, а также их совместному действию. Кроме того, на поверхности располагаются основные источники концентрации напряжений, зависящие от формы детали, шероховатости, характера соединений и сил трения в сопряженных деталях. Поэтому при решении проблемы повышения износостойкости и долговечности деталей значительное внимание уделяется различным методам упрочнения поверхностных слоев, во многих случаях более эффективным по сравнению с объемными способами обработки деталей. Однако при разработке многих процессов упрочнения, обеспечивающих существенное повышение твердости и сопротивления изнашиванию (например, химико-термической или скоростной термической обработки), часто не учитываются характеристики усталости, что затрудняет применение таких процессов для изделий, работающих в условиях циклического нагружения. Исследований влияния частоты нагружения на развитие процесса усталостного разрушения упрочненных материалов проведено недостаточно, и часто они выполнялись в несопоставимых условиях. Практически отсутствует анализ развития процесса усталостного разрушения материалов, имеющих упрочненные слои и покрытия, что затрудняет определение рациональных параметров поверхностного упрочнения. В работе ставилась цель повышения характеристик усталости конструкционной и инструментальной сталей, используемых в условиях циклических нагрузок. При этом решались задачи экспериментального определения пределов выносливости сталей, имеющих упрочненные слои, а также установления рациональных температурно-временных параметров процесса упрочнения.

Основная часть. Проведенные исследования [1–3] показывают, что многие процессы поверхностного упрочнения, реализуемые посредством химико-термической обработки, обеспечивают на поверхности изделий остаточные напряжения сжатия, благоприятно влияющие на комплекс механических свойств, и в частности усталостные характеристики. При эксплуатации многих деталей, таких как зубчатые колеса трансмиссий мобильных машин, преобладают напряжения растяжения [4, 5]. Установлено, что комплексное борирование обеспечивает снижение суммарных контактных напряжений в поверхностных слоях деталей [6].

Для определения влияния температурно-временных параметров борирования на усталостные

характеристики конструкционных сталей проведены испытания экспериментальных образцов в условиях знакопеременного изгиба с использованием оборудования и методик, приведенных в работах [7–12].

Исследования, проведенные на образцах из стали 20ХНЗА при разном составе упрочняющей смеси [3], показали, что повышение времени обработки свыше 2,5 ч приводит к постепенному снижению величины числа циклов до наступления разрушения $N_{ц}$ вследствие коагуляции фазы Fe_2B , а также, как уже отмечалось, образованию в поверхностном слое фазы FeB . По этой причине при использовании традиционного процесса борирования (без дополнительного введения кремния) существенное снижение усталостной долговечности наблюдается уже после обработки в насыщающей смеси в течение 3,0 ч (рис. 1, а).

Повышение плотности поверхностного слоя, получаемого при боросилицировании, а также отсутствие фазы FeB приводит к существенному снижению по сравнению с борированием его микрочрупкости [13], что обеспечило возрастание его усталостных характеристик. Преобладание в поверхностном слое фазы Fe_2B способствовало как существенному повышению $N_{ц}$, так и стабильности данной характеристики при возрастании времени упрочнения до 3,0–4,5 ч (рис. 1, а, б, кривые 3, 4).

Увеличение усталостных характеристик объясняется образованием в поверхностных слоях при боросилицировании остаточных напряжений сжатия. Подобный вывод подтверждает и анализ влияния толщины упрочненного слоя на усталостные характеристики образцов (рис. 2). Показано, что при боросилицировании (содержание в насыщающем составе кремния не менее 20%) повышение толщины слоя не приводит к снижению характеристик усталости.

Результаты испытаний позволили установить повышение предела выносливости σ_{-1} боросилицированных образцов (содержание Si от 20%) по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза при меньшем разбросе долговечности благодаря более однородной структуре упрочненного слоя.

Наряду с повышением усталостных характеристик конструкционной стали посредством комплексного борирования изучена возможность упрочнения штамповой стали 45ХЗВЗМФС цементацией. Данная сталь широко используется для замены быстрорежущей при изготовлении режуще-деформирующего инструмента, работающего на истирание и испытывающего ударные нагрузки.

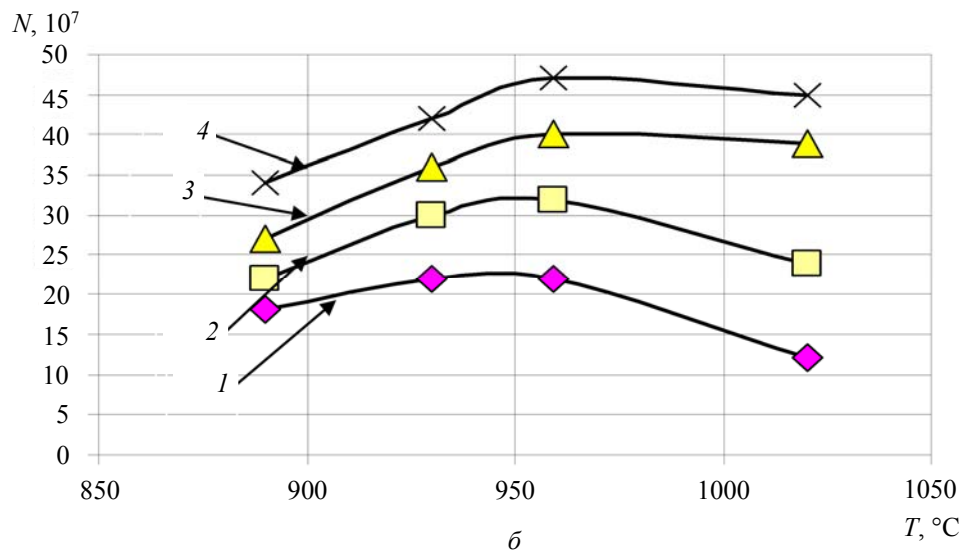
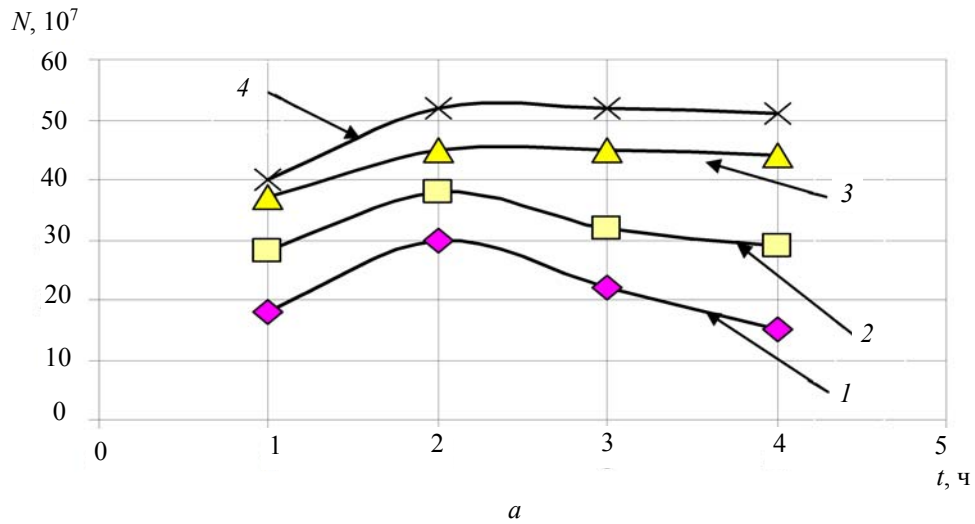


Рис. 1. Влияние времени насыщения (а) и температуры (б) при комплексном борировании на усталостную прочность стали 20ХН3А:
 1 – борирование; 2–4 – боросилицирование
 (2 – 10% Si; 3 – 20% Si; 4 – 25% Si)

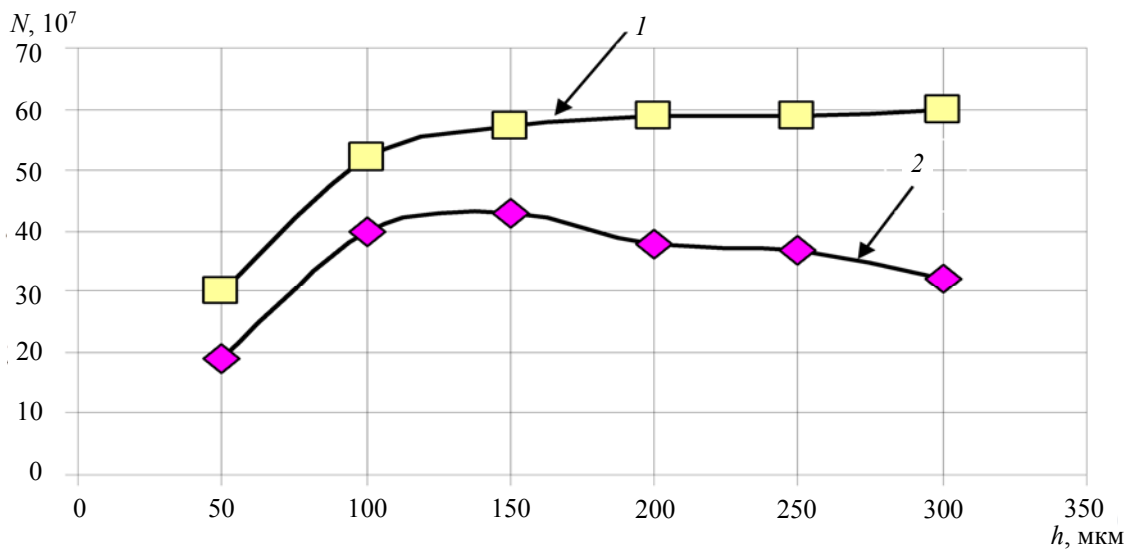


Рис. 2. Влияние толщины упрочненного слоя на усталостную прочность стали 20ХН3А:
 1 – боросилицирование (25% Si); 2 – борирование

Результаты испытаний (рис. 3–5) показывают достаточно высокие характеристики усталости как при комнатных, так и при повышенных температурах, что создает предпосылки использования такой стали для изготовления штампов.

Следует отметить, что существенное повышение характеристик усталости достигается при толщине упрочненного слоя 1,0 мм, что обеспечивается при продолжительности процесса порядка 6–7 ч температуре 950°C

(рис. 3). Основной причиной повышения числа циклов до разрушения является возникновение в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, благоприятных при работе в условиях знакопеременного нагружения [4, 5]. Как правило, остаточные напряжения сжатия в области локальных пластических деформаций будут замедлять процессы разрушения, протекающие обычно с образованием остаточных напряжений растяжения.

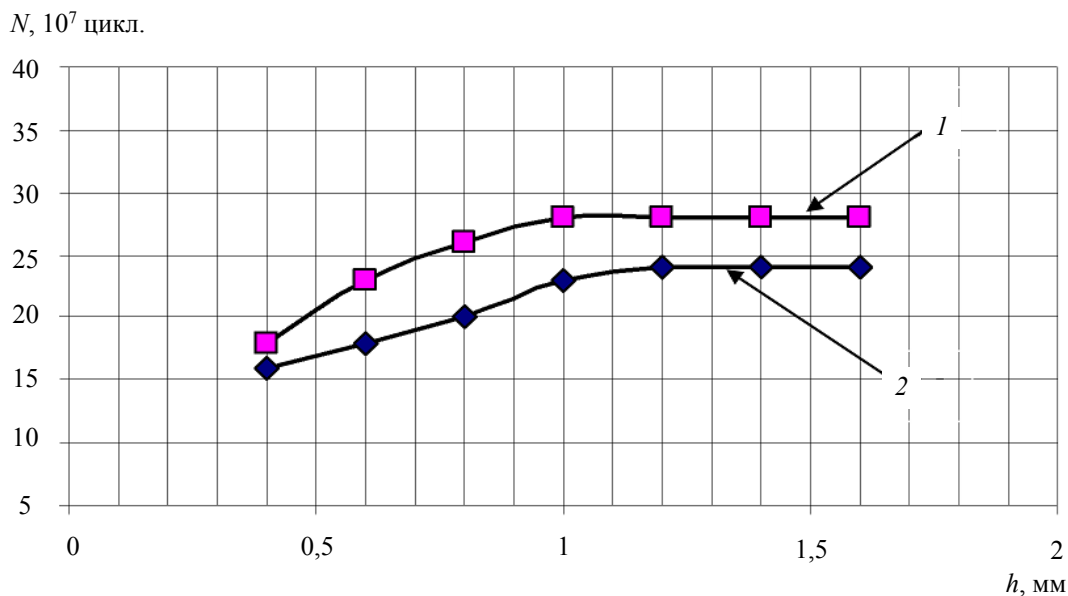


Рис. 3. Влияние толщины упрочненного слоя на усталостную прочность стали 45X3B3MФC при различных температурах испытаний:
1 – 20°C; 2 – 200°C

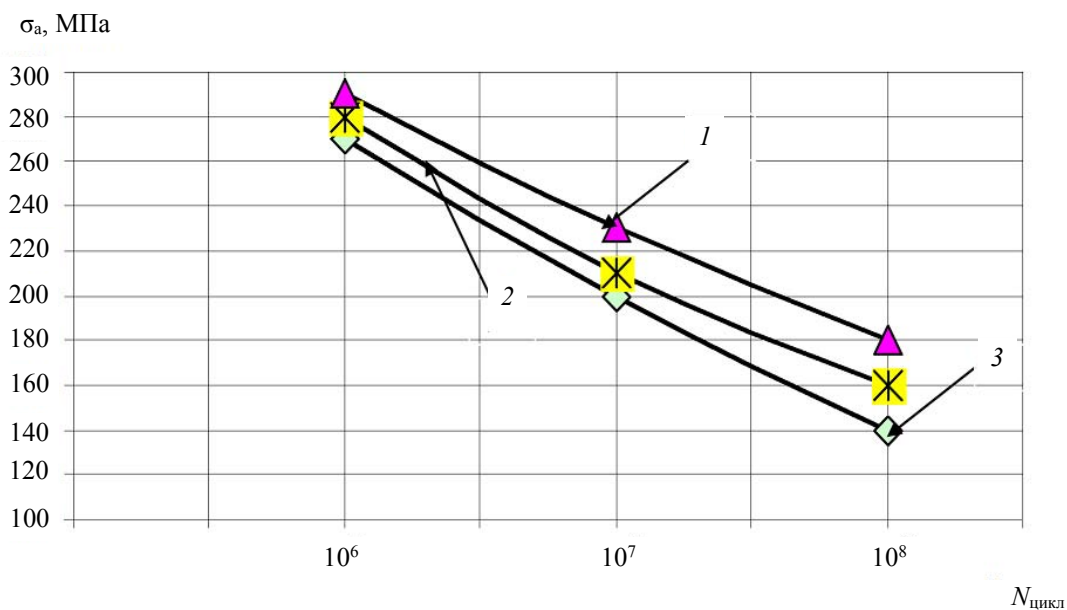


Рис. 4. Усталостные кривые стали 45XBВ3MФC при различных температурных испытаниях:
1 – 20°C; 2 – 200°C; 3 – 250°C

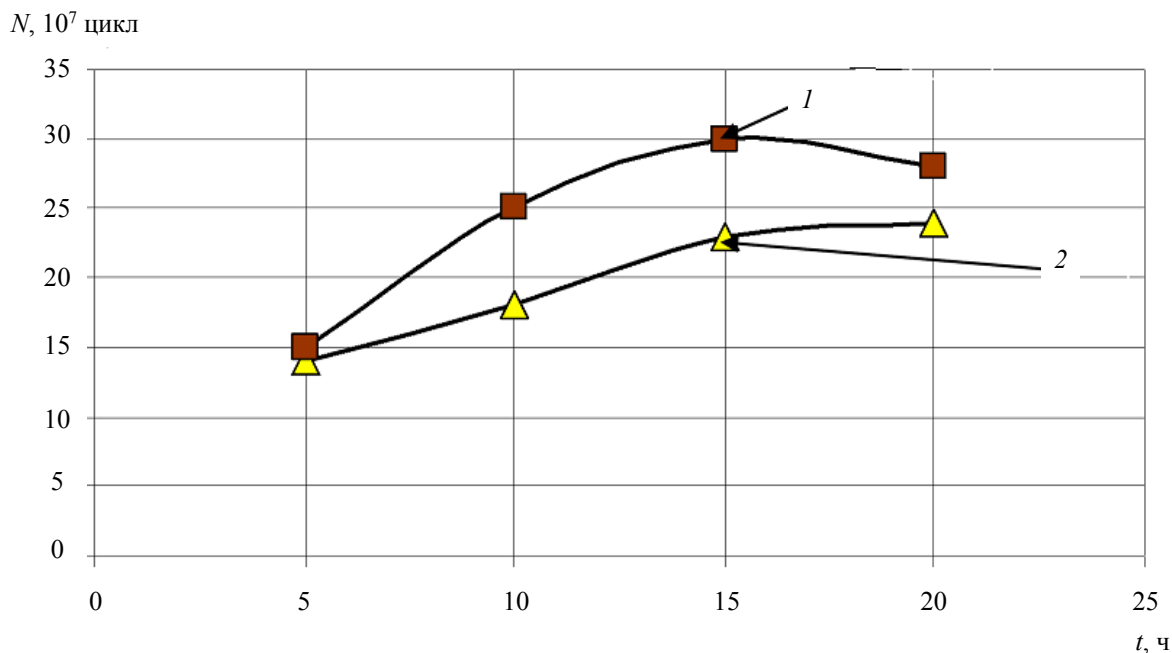


Рис. 5. Влияние температуры и продолжительности цементации на характеристики усталости стали 45ХЗВЗМФС:
1 – 950°C; 2 – 920°C

Заключение. Существенное (в 1,6–1,7 раза) повышение пределов выносливости образцов из стали 20ХНЗА обеспечивается проведением комплексного борирования. Установлено, что наиболее перспективно использование боросилицирования (содержание кремния в смеси 20–25% при температуре обработки 950°C и времени 3–4 ч). Тем самым обеспечивается повышение эксплуатационного ресурса деталей машин, работающих в условиях цик-

лического нагружения. Для повышения усталостной прочности штампованной стали 45ХЗВЗМТС наиболее перспективно проведение газовой цементации при температуре 950°C и времени 12–16 ч. Показано, что повышение пределов выносливости данной стали обеспечивается как при нормальных, так и повышенных (до 200–250°C) температурах, что необходимо для работы некоторых видов инструмента.

Список литературы

1. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / П. Н. Ящерицын [и др.] // Весті НАН Беларусі. Серія фізіка-тэхнічных наук. 2000. № 2. С. 62–65.
2. Остаточные напряжения: учеб. пособие / Ж. А. Мрочек [и др.]. Минск. 2003. С. 124–136.
3. Ситкевич М. В., Пишов М. Н., Бельский С. Е. Влияние комплексного боридного упрочнения на структуру и свойства поверхностных слоев сталей для изготовления деталей зубчатых передач трелевочных лесных машин // Литье и металлургия. 2008. С. 140–146.
4. Пишов М. Н., Симанович В. А., Бельский С. Е. Исследование условий эксплуатации и динамической нагруженности деталей трансмиссий трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 113–115.
5. Макаревич С. С., Пишов М. Н., Бельский С. Е. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 327–330.
6. Пишов М. Н., Бельский С. Е., Сурус А. И. Методика упрочнения тяжело нагруженных деталей трансмиссии трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 283–287.
7. Блохин А. В., Царук Ф. Ф., Гайдук Н. А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2002. Вып. X. С. 213–215.
8. Блохин А. В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2004. Вып. XII. С. 263–266.

9. Царук Ф. Ф., Бельский С. Е., Блохин А. В. К методике исследования усталостных свойств конструкционных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2003. Вып. XI. С. 233–236.

10. Царук Ф. Ф., Блохин А. В. Развитие метода ускоренного определения усталостных характеристик материалов с использованием высокочастотного нагружения // Трибофатика: тр. IV Международ. симпозиума, Тернополь, 23–27 сентября 2002 г.: в 2 т. / Тернополь. гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя; редкол.: В. Т. Трощенко [и др.]. Тернополь, 2002. Т. 1. С. 503–506.

11. Царук Ф. Ф., Блохин А. В. Выбор оптимальных геометрических параметров образцов для усталостных испытаний при различных частотах нагружения // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Международ. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 ноября 2005 г.: в 2 ч. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. Минск. 2005. Ч. 2. С. 262–263.

12. Бельский С. Е., Царук Ф. Ф., Блохин А. В. Пороговые напряжения – важная характеристика сопротивления усталости конструкционных материалов // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. тр. 1-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 дек. 2002 г.: в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; под общ. ред. П. А. Витязя. Минск. 2002. Т. 2. С. 380–382.

13. Ситкевич М. В., Пищов М. Н., Бельский С. Е. Структура и свойства поверхностных слоев зубчатых передач, упрочненных комплексным борированием // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 10-й Международ. науч.-практ. конф., СПб., 15–18 апреля 2008 г.: в 2 ч. СПб., 2008. Ч. 2. С. 346–353.

References

1. Yashcheritsyn P. N. [et. al.]. Residual stresses. At electromagnetic surfacing. *Vesti NAN Belarusi* [Vesti NAS Belarus], series of physical and technical sciences, 2000, no. 2, pp. 62–65 (In Russian).

2. Mrochek Zh. A., Makarevich S. S., Kozhuro L. M., Pashkevich M. F., Il'yushchenko A. F. *Ostatochnyye napryazheniya: uchebnoye posobiye* [Residual stresses: textbook]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2003. 352 p.

3. Sitkevich M. V., Pishchov M. N., Belsky S. E. Influence of complex boride hardening on the properties and properties of surface layers of steels for the manufacture of gear parts of skidding forest machines. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2008, pp. 140–146 (In Russian).

4. Pishchov M. N., Simanovich V. A., Belsky S. E. Research of operating conditions and dynamic loading of transmission parts of skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 113–115 (In Russian).

5. Makarevich S. S., Pishchov M. N., Belsky S. E. Model of the stress state of the teeth of the transmission parts of skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 327–330 (In Russian).

6. Pishchov M. N., Belsky S. E., Surus A. I. Method of hardening heavily loaded parts of the transmission of skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 283–287 (In Russian).

7. Blokhin A. V., Tsaruk F. F., Gaiduk N. A. Complex of equipment for fatigue testing of technological equipment elements. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2002, issue X, pp. 213–215 (In Russian).

8. Blokhin A. V. Development of a complex of equipment for fatigue testing of structural materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2004, issue XII, pp. 263–266 (In Russian).

9. Tsaruk F. F., Belsky S. E., Blokhin A. V. On the method of investigation of fatigue properties of structural materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2003, issue XI, pp. 233–236 (In Russian).

10. Tsaruk F. F., Blokhin A. V. Development of the method for determining the fatigue characteristics of materials using high-frequency loading. *Tribofatika: trudy IV Mezhdunarodnogo simpoziuma: v 2 t.* [Tribo-fatigue: works of International symposium: in 2 vol.]. Ternopil, 2002, vol. 1, pp. 503–506 (In Russian).

11. Tsaruk F. F., Blokhin A. V. Selection of optimal geometric parameters for samples of fatigue tests at different loading frequencies. *Resurso- i energosberegayushchiye tekhnologii i oborudovaniye, ekologicheski bezopasnyye tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of the International scientific and technical conference “Resource and energy saving technologies

and equipment, environmentally friendly technologies”: in 2 vol.]. Minsk, 2005, vol. 2, pp. 262–263 (In Russian).

12. Belsky S. E., Tsaruk F. F., Blokhin A. V. Threshold stresses – an important characteristic of fatigue resistance of structural materials. *Sovremennyye metody proyektirovaniya mashin. Raschet, konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya: sbornik trudov: v 3 t.* [Collection of works of 1st International scientific and technical conference “Modern methods of machine design. Calculation, design and manufacturing technology”: in 2 vol.]. Minsk, 2002, vol. 2, pp. 380–382 (In Russian).

13. Sitkevich M. V., Pishchov M. N., Belsky S. E. The structure and properties of the surface layers of gears, strengthened by complex borating. *Tekhnologii remonta, vosstanovleniya detaley mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoy osnastki: materialy 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2 ch.* [Materials of the 10th International scientific and practical conference “Technologies for repair, restoration and hardening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological equipment”. In 2 parts]. St. Petersburg, 2008, part 2, pp. 346–353 (In Russian).

Информация об авторах

Пишов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Pishchou@belstu.by

Бельский Сергей Евграфович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiptu@belstu.by

Адель Абдель Вассет Рашид – Бейрутский Арабский Университет. E-mail: adel_rasheed_1975@hotmail.com

Вергейчик Алексей Викторович – студент факультета технологии органических веществ. Белорусский государственный технологический университет. (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: myshavolodarsky1@gmail.com

Information about the authors

Pishchov Mikhail Nikolayevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Pishchou@belstu.by

Belsky Sergey Yevgrafovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmiptu@belstu.by

Adel Abdel Wasset Rashid – Beirut Arab University, Lebanon, Tyre. E-mail: adel_rasheed_1975@hotmail.com

Vergeichik Aleksey Viktorovich – student, Faculty of Technology of Organic Substances. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Republic of Belarus). E-mail: myshavolodarsky1@gmail.com

Поступила 22.03.2021