

УДК 621.785.531

**М. Н. Пищов, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук**

Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ БОРИРОВАНИЯ И БОРОСИЛИЦИРОВАНИЯ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ  
ДЕТАЛЕЙ ТРАНСМИССИЙ ЛЕСНЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

В статье установлено, что при упрочнении деталей лесных мобильных машин различными методами химико-термической обработки могут изменяться шероховатость поверхности, а также точность их размеров. В связи с этим необходимо применение дополнительной финишной обработки упрочненных поверхностей. Также изучено влияние температурно-временных параметров процесса упрочнения на микротвердость упрочненного слоя.

**Ключевые слова:** детали трансмиссий лесных машин, поверхностное упрочнение, шероховатость поверхности, микротвердость.

**M. N. Pishchov, S. Ye. Belski, F. F. Tsaruk**

Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF BORING AND BOROSILICATION PROCESSES  
ON THE CHARACTERISTICS OF A SURFACE STRENGTHENED LAYER  
OF TRANSMISSIONS OF FOREST MOBILE MACHINES**

The article established that when hardening the details of forest mobile machines using various methods of chemo-thermal treatment, the surface roughness and the accuracy of their sizes can change. In this regard, it is necessary to use additional finishing processing of hardened surfaces. The effect of temperature-time parameters of the hardening process on the microhardness of the hardened layer was also studied.

**Key words:** transmission details of forest machines, surface hardening, surface roughness, microhardness.

**Введение.** В настоящее время в условиях эксплуатации ряд сложнонагруженных деталей лесных машин характеризуется значительным трением, интенсивным износом их рабочих поверхностей, а также вибрациями широкого амплитудно-частотного диапазона [1–6]. В связи с этим возникает необходимость в их дополнительном упрочнении методами, позволяющими получать более высокую поверхностную твердость. Для повышения износостойкости деталей машин, а также их восстановления при ремонте широко применяют различные виды поверхностного упрочнения: цементацию, азотирование, цианирование и др. Однако в условиях максимальных нагрузок, возникающих при работе ряда лесных машин, например трелевочных тракторов, твердость зубчатых колес трансмиссии является недостаточной.

**Основная часть.** Технологический процесс упрочнения деталей борированием и боросилицированием по сравнению с другими способами диффузионного насыщения (например, цементацией) проводится при относительно меньшем времени насыщения. Это преимущество наряду с практически одинаковой температурой насыщения (920–950°C) и обусловило использование данного метода упрочнения, который может осуществляться в ремонтных мастерских лесо-

промышленных предприятий для деталей трансмиссий трелевочных тракторов.

Шероховатость поверхности определяли по параметру  $Ra$  на профилографе-профилометре. Исследование проводилось на образцах из сталей 45, 40X и 25ХГТ, обработанных с различной чистотой поверхности, а затем подвергнутых упрочнению борированием и боросилицированием при температуре насыщения 950°C и времени выдержки 3 ч. Использование составов данных смесей и особенности технологии данного процесса упрочнения рассмотрены в статьях [7–10]. Результаты исследований показывают, что состояние поверхности после диффузионного насыщения как при борировании, так и боросилицировании ухудшается на всех образцах. Процент возрастания  $Ra$  примерно одинаковый при всех исходных значениях шероховатости. При борировании наблюдается большее возрастание параметра  $Ra$  (на 10–20%), чем при боросилицировании. Это в первую очередь связано с высокой поверхностной твердостью при борировании и образовании крупных игл фазы Fe<sub>3</sub>C, что подтверждается структурным анализом упрочненного слоя. Аналогично были получены результаты изменения шероховатости поверхности образцов после борирования и боросилицирования при

разных температурно-временных параметрах процессов ХТО.

Как видно из приведенных данных (рис. 1), с повышением времени обработки более 3,0–3,5 ч величина  $Ra$  начинает быстро возрастать. Следует отметить, что уменьшение исходной шероховатости эффективно влияет на качество поверхности даже при значительной продолжительности процесса. Улучшение чистоты упрочненной поверхности является одной из причин сокращения периода приработки, установленного при испытаниях на износ.

Важным фактором при назначении ХТО зубчатых колес трансмиссий трелевочных тракторов является стабильность их линейных размеров после проведения обработки. Многие процессы диффузионного насыщения наряду с деформациями изделий вызывают изменения их линейных размеров, что связано с активной адсорбцией атомов легирующих элементов на поверхности и образованием в упрочненном слое твердых растворов внедрения. Информация об изменении размеров детали в зависимости от режимов обработки необходима для грамотного назначения соответствующих допусков на предшествующую механическую обработку. При этом изменения линейных размеров после проведения ХТО не должны выходить за пределы допуска на погрешность профиля зуба конического колеса.

Исследования проведены на цилиндрических образцах из стали 25ХГТ диаметром 20 мм и длиной 10 мм, подвергнутых борированию и боросилицированию при температуре 950°C и времени обработки от 0,5 до 5,0 ч. Изменения диаметров образцов фиксировались при помощи вертикального оптиметра типа ИКВ с ценой деления 0,001 мм. Отмечен (рис. 2) прирост размеров ( $\Delta l$ ), пропорциональный увеличению времени выдержки и толщин  $l$  поверхностного упрочненного слоя.

Увеличение размеров составляет приблизительно 18–22% от толщины как борированного, так и боросилицированного слоев. При общей толщине упрочненного боросилицированием слоя деталей трансмиссий трелевочных тракторов в 200–250 мкм увеличение размеров составит около 36–55 мкм, что практически не превышает допуск на погрешность зубчатых колес.

Близкий к линейному характер зависимости прироста размеров от времени обработки облегчает установление соответствующих корреляционных зависимостей ( $\Delta l$  от  $t$ ) и, тем самым, назначение оптимальных допусков на механическую обработку. В ряде случаев, наоборот, погрешности механической обработки могут быть исправлены установлением соответствующего времени поверхностного насыщения.

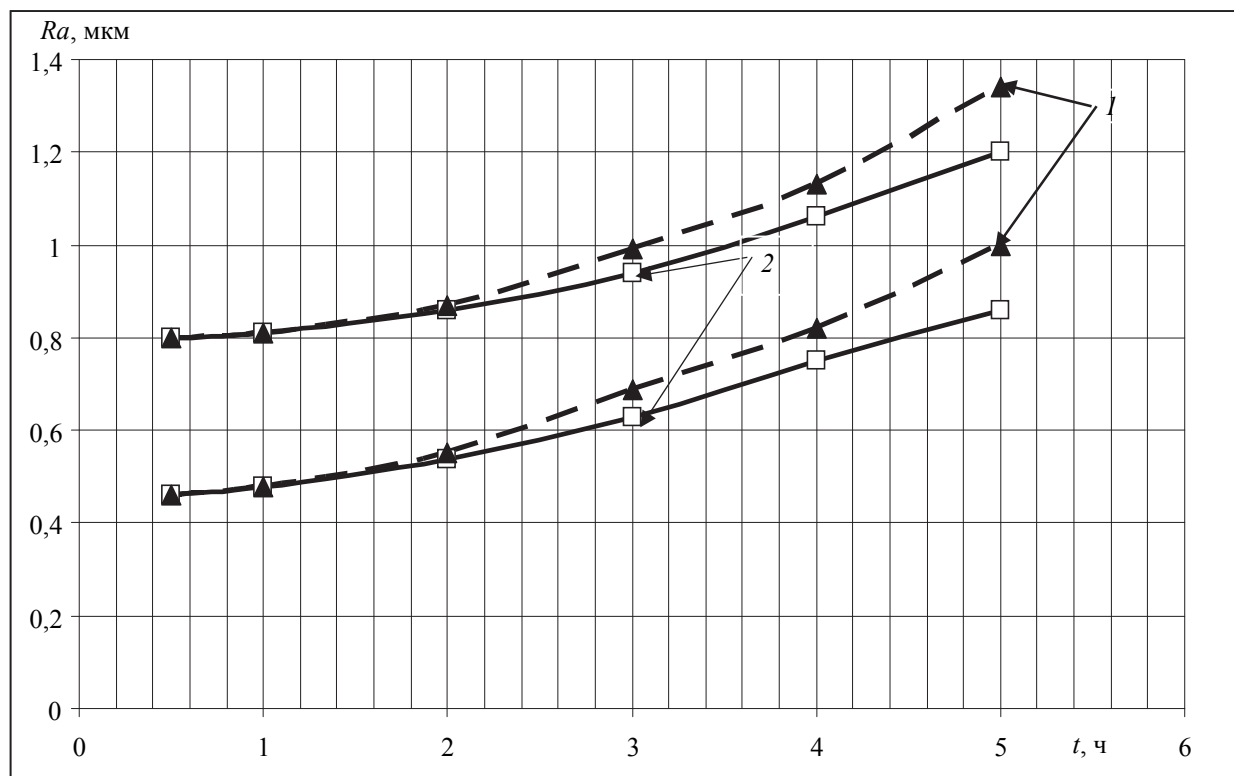


Рис. 1. Влияние времени насыщения на шероховатость поверхности при различной величине исходной  $Ra$  при борировании и боросилицировании: 1 – борирование; 2 – боросилицирование

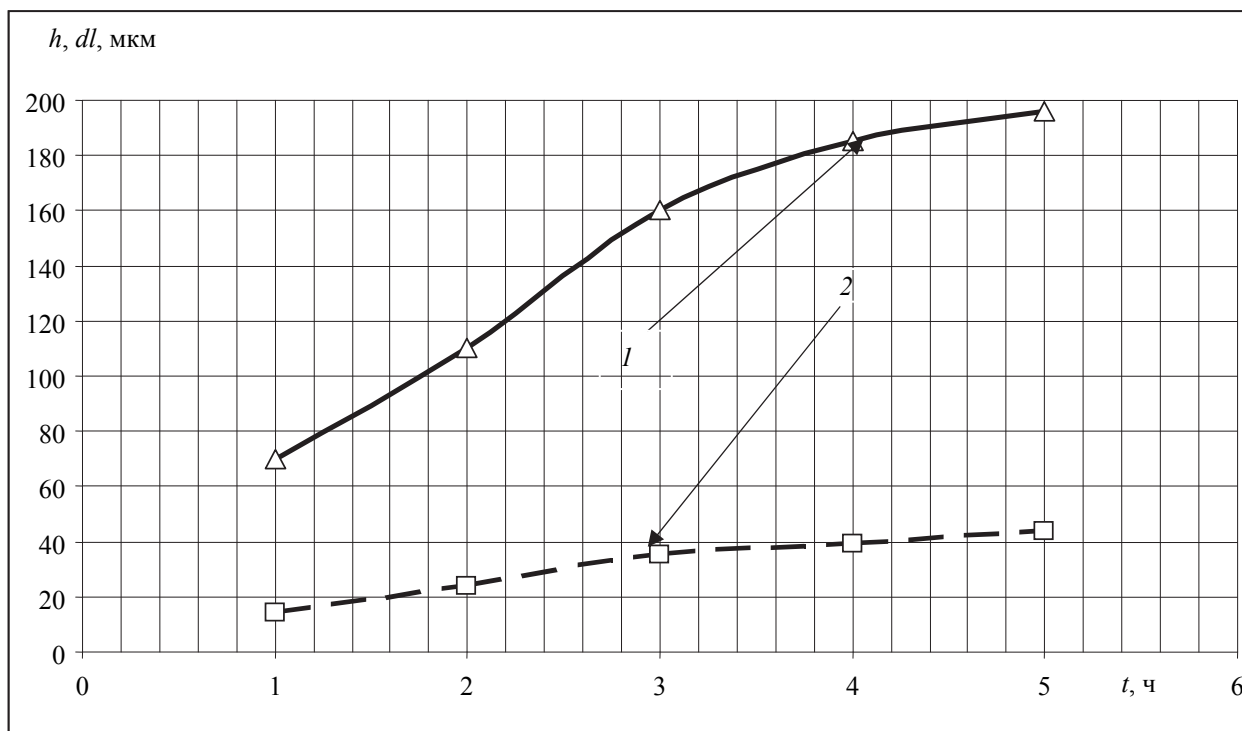


Рис. 2. Влияние времени насыщения на толщину упрочненного боросилицированием слоя ( $h$ ) и прирост размеров ( $dl$ ) образцов из стали 25ХГТ:  
 1 – толщина слоя; 2 – прирост размеров

Как показали проведенные исследования, прирост размеров при боросилицировании не превышает допуск на погрешность профиля зуба конических передач, что не предполагает использования дополнительной механической обработки, связанной с уменьшением размеров. Однако промышленное внедрение операции поверхностного упрочнения методом боросилицирования в качестве финишной требует оценки влияния технологических параметров процесса ХТО на состояние поверхности и размерную стабильность изделий после обработки. Так, для уменьшения шероховатости упрочненных конических зубчатых колес деталей трансмиссии трелевочного трактора ТТР-401М после проведения боросилицирования в качестве финишной обработки предусматривается хонингование [10, 11].

На основании изучения изменения шероховатости и линейных размеров деталей после обработки было установлено, что после борирования и боросилицирования увеличение размеров находится в пределах 18–22% от толщины упрочненного слоя (200–250 мкм), что составляет около 36–55 мкм и не превышает допуск на погрешность крупномодульных зубчатых колес. Незначительное увеличение значений шероховатости (в среднем с  $Ra = 1,6$  мкм перед обработкой до  $Ra = 1,72$ – $1,94$  мкм после проведения ХТО) наблюдается как при борировании, так и боросилицировании, в связи с чем

в качестве финишной обработки упрочненных зубчатых колес целесообразно проводить хонингование.

Упрочненный слой наряду с обеспечением высокой поверхностной твердости должен обладать и низкой хрупкостью. Установлено, что данные параметры взаимосвязаны и зависят в первую очередь от химического и фазового состава слоя [12, 13]. Как было отмечено [5, 7], работа трелевочного трактора сопровождается высокими динамическими нагрузками на детали трансмиссии, которые при неправильном назначении ХТО могут привести к скалыванию поверхностного упрочненного слоя с контактных поверхностей зубьев. В связи с этим важно при проведении исследований изучение как микротвердости упрочненного слоя, так и его хрупкости.

Требуемая при эксплуатации трелевочного трактора микротвердость поверхностного слоя зубьев конических передач определялась на основании предотвращения образования пластических деформаций контактных поверхностей зубьев. С возрастанием твердости, как правило, достигается повышение допустимых контактных и изгибных напряжений. Необходимая поверхностная микротвердость зубьев конической передачи трелевочного трактора рассчитывалась согласно [13] и составила для заданных условий эксплуатации 11 000–12 000 МПа при общей толщине 200–250 мкм.

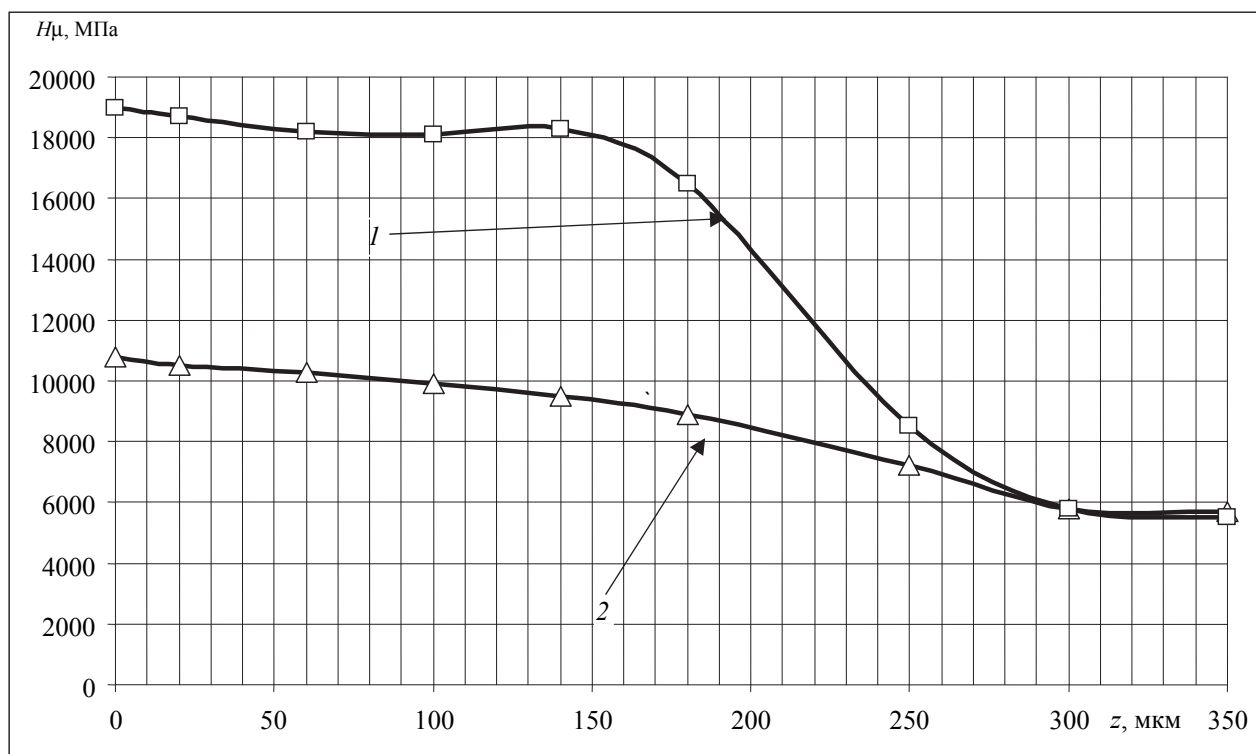


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине упрочненного борированием и боросилицированием слоя с различной толщиной образцов стали 25ХГТ: 1 – борирование; 2 – боросилицирование (толщина слоя 200–220 мкм)

Исследование распределения микротвердости по глубине упрочненных слоев при борировании и боросилицировании проводилось на микротвердомере ПМТ-3М. На рис. 3 приведено распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов стали 25ХГТ при борировании и боросилицировании. При различных температурно-временных параметрах процесса полученные результаты показывают, что понижение твердости идет постепенно на всех исследуемых образцах сталей. Установлено, что как при борировании, так и при боросилицировании максимальная твердость достигается на поверхности стали с постепенным уменьшением по глубине упрочненного слоя.

Распределение микротвердости по глубине упрочненного борированием и боросилицированием слоя связано с его фазовым составом. Было установлено, что при борировании образуется достаточно резкий переход от упрочненного слоя к основе металла, что способствует созданию на границе дополнительных напряжений. Связано это с образованием в упрочненном слое фазы FeB. При упрочнении боросилицированием наблюдается более плавный переход к основе металла, отсутствуют резкие изменения микротвердости по глубине слоя, что свидетельствует об образовании в слое менее твердых фаз Fe<sub>2</sub>B и FeSi. Это делает воз-

можным применение данного способа упрочнения для зубчатых колес трансмиссии трелевочных тракторов.

Можно выделить три зоны с соответствующей микротвердостью при боросилицировании: зона, насыщенная бором и кремнием (11200–11800 МПа), переходная зона (7800–9000 МПа) и сердцевина (5000–5600 МПа).

Приведенная микротвердость характеризует образование и расположение по глубине упрочненного слоя различных по своей структуре и химическому составу фаз.

Аналогичный характер изменения микротвердости можно отметить и для различных составов насыщающей смеси. Приведенные значения микротвердости фаз с разными составами насыщения при комплексном борировании хорошо согласуются с данными других авторов.

**Выводы.** На основании полученных в ходе исследований изменений шероховатости и линейных размеров деталей после обработки установлено, что после борирования и боросилицирования увеличение размеров находится в пределах 18–22% от толщины упрочненного слоя (200–250 мкм), что составляет около 36–55 мкм и не превышает допуск на погрешность крупномодульных зубчатых колес. Также в ходе полученных результатов распределения микротвердости по толщине упрочненного слоя

было установлено, что при боросилицировании повышение допустимых контактных напряжений для предотвращения образования пластических деформаций обеспечивается не только на поверхности, но и на глубине 200–250 мкм,

что полностью соответствует требованиям теоретических расчетов. Повышение твердости на глубине 200–250 мкм также обеспечивает предотвращение глубинного контактного выкрашивания упрочненного слоя.

### Литература

1. Аникин Н. И. Снижение динамической нагруженности и повышение долговечности трансмиссий лесопромышленных колесных тракторов на основе анализа динамических процессов в характерных условиях эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 20 с.
2. Островерхов Н. Л., Русецкий И. К., Бойко Л. И. Динамическая нагруженность трансмиссий колесных машин. Минск: Наука и техника, 1977. 191 с.
3. Симанович В. А., Исаченков В. С. Разработка приведенной расчетной модели «колесный тягач – прицепной модуль – пачка деревьев» // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2005. Вып. XIII. С. 138–142.
4. Жорин А. В. Обоснование параметров трелевочной машины на базе сельскохозяйственного трактора кл. 1,4: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск: БГТУ, 1997. 18 с.
5. Симанович В. А., Пишов М. Н., Смяян А. И. Эксплуатационная оценка работы колесных лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 92–95.
6. Пишов М. Н., Симанович В. А., Бельский С. Е. Исследование условий эксплуатации и динамической нагруженности деталей трансмиссии трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 113–115.
7. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск: Беларусь, 1981. 205 с.
8. Ворошнин Л. Г., Ляхович Л. С., Фунштейн Я. Н. Борирование порошкообразными смесями // МиТОМ. 1966. № 12. С. 67–69.
9. Ляхович Л. С., Ворошнин Л. Г., Панич Г. Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1974. 289 с.
10. 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.
11. Ситкевич М. В., Пишов 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 Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2008 г. СПб., 2008. Ч. 2. С. 346–353.
12. Бельский С. Е., Сурус А. И., Пишов М. Н. Определение оптимальных параметров процесса борирования деталей лесных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 267–270.
13. 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.

### References

1. Anikin N. I. *Snizheniye dinamicheskoy nagruzhennosti i povysheniye dolgovechnosti transmissiy lesopromyshlennykh kolesnykh traktorov na osnove analiza dinamicheskikh protsessov v kharakternykh usloviyakh ekspluatatsii. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Decrease in dynamic loading and increase in durability of trans-missions of forestry wheeled tractors based on the analysis of dynamic processes in characteristic operating conditions. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Moscow, 1988. 20 p.
2. Ostroverkhov N. L., Rusetskiy I. K., Boyko L. I. *Dinamicheskaya nagruzhennost' transmissiy kolesnykh mashin* [Dynamic loading of transmissions of wheeled vehicles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1977, 191 p.
3. Simanovich V. A., Isachenkov V. S. Development of the design model “wheeled tractor – trailer module – pack of trees”. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2005, issue XIII, pp. 138–142 (In Russian).
4. Zhorin A. V. *Obosnovaniye parametrov trelevochnoy mashiny na baze sel'skokhozyaystvennogo traktora kl. 1,4. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Justification of the parameters of a skidder based on an agricultural tractor class. 1.4. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 1997. 18 p.

5. Simanovich V. A., Pishchov M. N., Smeyan A. I. Operational evaluation of the work of wheeled forest modular machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue X, pp. 92–95 (In Russian).

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

7. Voroshnin L. G. *Borirovaniye promyshlennyykh staley i chugunov* [Boroning of industrial steels and cast irons]. Minsk, Belarus' Publ., 1981. 205 p.

8. Voroshnin L. G., Lyakhovich L. S., Funshteyn Ya. N. Boronirovanie powdered mixtures. *MiTOM* [MiTOM], 1966, no. 12, pp. 67–69 (In Russian).

9. Lyakhovich L. S., Voroshnin L. G., Panich G. G. *Mnogokomponentnyye diffuzionnye pokrytiya* [Multicomponent diffusion coatings]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974. 289 p.

10. Sitkevich M. V., Pishchov M. N., Belski S. Ye. The effect of complex boride hardening on the structure and properties of the 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).

11. Sitkevich M. V., Pishchov M. N., Belski S. Ye. The structure and properties of the surface layers of gears hardened by complex boronation. *Materialy 10-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Tekhnologii remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoy osnastki"* [Materials of the 10th International scientific and practical conference "Technologies for repair, restoration and hardening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological equipment"]. St. Petersburg, 2008, part 2, pp. 346–353 (In Russian).

12. Belski S. Ye., Surus A. I., Pishchov M. N. Determination of the optimal parameters of the process of boring parts of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 267–270 (In Russian).

13. Makarevich S. S., Pishchov M. N., Belski S. Ye. The model of the stress state of the teeth of the parts of the transmissions of skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue X, pp. 327–330 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Пищов 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: dmipstu@belstu.by

**Царук Федор Федорович** – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Tsaruk@belstu.by

#### 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

**Belski 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: dmipstu@belstu.by

**Tsaruk Fedor Fedorovich** – 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: Tsaruk@belstu.by

Поступила 14.10.2019