

УДК 621.785.533

В. А. Симанович, М. Н. Пищов, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук, Д. Н. Скворцов
Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ТРАНСМИССИИ ТРЕЛЕВОЧНЫХ ТРАКТОРОВ**

В статье проанализированы условия эксплуатации лесных мобильных машин. Установлено, что при средних режимах нагружения мобильного трелевочного трактора крутящий момент на деталях переднего ведущего моста не превышает 1000 Нм. В случае перегрузки заднего моста трелевочного трактора, когда пачка деревьев подвешена в силовом контуре оборудования максимальные моменты на задних полуосях достигают величин в 2–2,5 раза превышающих момент при трогании трактора. Это приводит к образованию на контактной поверхности зубчатых пар остаточных пластических деформаций, что значительно сокращает их общий ресурс. На основании проведенных исследований определены детали трансмиссии, вышедшие из строя в результате интенсивного износа, также установлен механизм их разрушения. Предложена технология их поверхностного упрочнения порошковыми смесями, содержащими бор, алюминий и кремний (борирование и боросилицирование), которая значительно сокращает износ данных деталей, тем самым увеличивает время эксплуатации тяжело нагруженных деталей трансмиссий лесных мобильных машин.

Установлено, что при упрочнении тяжело нагруженных и быстро изнашивающихся деталей трансмиссий лесных мобильных машин комплексным борированием повышаются допускаемые контактные напряжения на поверхностного слоя, которые предотвращают износ поверхности, а также образование пластических деформаций на глубине 200–250 мкм, что приводит к увеличению эксплуатационного ресурса данных деталей.

Ключевые слова: эксплуатация, детали трансмиссий, лесные машины, износостойкость, зубчатые колеса, поверхностное упрочнение, шероховатость поверхности, микротвердость.

Для цитирования: Симанович В. А., Пищов М. Н., Бельский С. Е., Царук Ф. Ф., Скворцов Д. Н. Анализ основных условий эксплуатации и динамической нагруженности ответственных деталей трансмиссии трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 212–217.

V. A. Simanovich, M. N. Pishchov, S. Ye. Belsky, F. F. Tsaruk, D. N. Skvortsov
Belarusian State Technological University

**ANALYSIS OF THE MAIN OPERATING CONDITIONS
AND DYNAMIC LOADING OF CRITICAL PARTS
OF THE TRANSMISSION OF SKIDDERS**

The article analyzes the operating conditions of forest mobile machines. It was found that under medium loading conditions of a mobile skidder, the torque on the parts of the front drive axle does not exceed 1000 Nm. In case of overloading of the rear axle of the skidder, when a pack of trees is suspended in the power circuit of the equipment, the maximum moments on the rear axle shafts reach values 2–2.5 times higher than the moment when starting the tractor. This leads to the formation of residual plastic deformations on the contact surface of the gear pairs, which significantly reduces their total resource. On the basis of the studies carried out, transmission parts that have failed as a result of intense wear were identified, and the mechanism of their destruction was also established. A technology for their surface hardening with powder mixtures containing boron, aluminum and silicon (boronation and borosilicization) is proposed, which significantly reduces the wear of these parts, thereby increasing the operating time of heavily loaded transmission parts of forest mobile machines.

It was found that when strengthening heavy-loaded and high-wearing parts of transmissions of forest mobile machines by complex boriding, the permissible contact stresses of the surface layer increase, which prevent surface wear, as well as the formation of plastic deformations to a depth of 200–250 microns, which leads to an increase in the service life of these parts.

Key words: operation, transmission parts, forestry machines, wear resistance, gear wheels, surface hardening, surface roughness, microhardness.

For citation: Simanovich V. A., Pishchov M. N., Belsky S. E., Tsaruk F. F., Skvortsov D. N. Analysis of the main operating conditions and dynamic loading of critical parts of the transmission of skidders. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 212–217 (In Russian).

Введение. В настоящее время на заготовке древесины предпочтение отдается колесным машинам, обладающим по сравнению с гусеничными лучшей управляемостью и маневренностью, более высокими скоростными показателями, эргономическими качествами и надежностью, меньшей металлоемкостью и затратами на обслуживание. Создавались лесные трелевочные машины преимущественно на базе тракторов общего назначения с применением навесных приспособлений для специфических условий работы (рис. 1). Как правило, создание отечественных лесных мобильных машин позволит не только нарастить объемы добычи древесины, но и перейти на новые, ресурсосберегающие и экологически чистые методы ее заготовки.

Так, было доказано, что условия эксплуатации ряда сложнонагруженных деталей лесных машин характеризуются 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.



Рис. 1. Трелевочный трактор ТТР-401 с порталным типом переднего ведущего моста

Основная часть. Оценка динамической нагруженности деталей трансмиссии трелевочного трактора. Работа колесных агрегатных машин на трелевке и вывозке древесины должна производиться комплексно с учетом факторов, оказывающих наибольшее влияние на эксплуатационные условия.

Исследования динамической нагруженности узлов и агрегатов лесозаготовительных машин обычно начинаются с выбора и построения физической модели, которая отражает взаимное расположение и влияние основных подсистем машины (двигатель, трансмиссия, шасси, кабина, человек, пачка хлыстов) и возмущающих факторов (неровности поверхности дороги, неравномерность работы двигателя и гидросистем).

При построении математической модели системы «трелевочный трактор – пачка деревьев» необходимо производить учет работы подсистем, обладающих упругодеформируемыми свойствами. Это особенно важно для машин, у которых отсутствуют узлы подвески как рессоры и амортизаторы, балансирная тележка и реактивные рычаги. Основными причинами, вызывающими колебания колесного трелевочного трактора, также являются неровности поверхности пути, которые вызывают колебания нагрузки в вертикальной и продольно-угловой плоскостях, неуравновешенность работы двигателя внутреннего сгорания, вращающихся частей (колеса, шестерни, валы), инерционные силы, изменение скорости и направления движения, а также другие факторы.

Источникам внешних возмущающих воздействий для колесных лесных машин является трелевочный волок, по которому перемещается пачка деревьев. При движении трелевочного трактора с пачкой деревьев по волоку приходится преодолевать неровности различного характера, которые вызывают колебательные явления в узлах и агрегатах трансмиссии, ходовой системе и несущих элементах технологического оборудования.

Автор работы [1] при оценке характера внешних воздействий показал, что ряд типичных препятствий в виде пней, валежин и отдельно лежащих деревьев имеет значительные геометрические размеры, достигающие в отдельных случаях высоты до 0,5 м при небольшой протяженности по линии движения. Препятствия порогового типа являются источниками максимальных пиковых нагрузок, возникающих в агрегатах трелевочного трактора.

Воздействие возмущающих факторов случайного характера на транспортную систему представляется в виде случайного процесса, поэтому объективными критериями оценки могут служить только соответствующие вероятностные показатели. При исследовании переходных процессов в качестве оценочных показателей принимаются пиковые значения линейных и угловых отклонений звеньев динамической системы, а также их продолжительность.

Нами было установлено, что при средних режимах нагружения трелевочного трактора

крутящий момент на деталях переднего ведущего моста не превышает 1000 Нм. В случае перегрузки заднего моста трелевочного трактора, когда пачка деревьев подвешена в силовом контуре оборудования, максимальные моменты на задних полуосях достигают величин, в 2–2,5 раза превышающих момент при трогании трактора. Это, в свою очередь, приводит к разгрузке переднего моста и ухудшению сцепных качеств. Авторами работы [2] установлено, что динамические крутящие моменты в трансмиссии колесного трактора имеют наибольшее значение при трогании с места с пачкой деревьев. Установлено, что для колесных трелевочных тракторов производства МТЗ наиболее нагруженными являются шестерни третьей и четвертой передачи, а также редуктор переднего моста.

Для того чтобы оценить перегрузки при работе трелевочных тракторов на лесосеке, было предложено ввести коэффициент динамичности K_d , который равен отношению максимального крутящего момента M_{\max} к установленному $M_{\text{ср}}$:

$$K_d = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ср}}}.$$

На основании исследований авторов [2] было установлено, что коэффициент динамичности для работы трелевочных тракторов составляет 1,8–3,1, в то время как для сельскохозяйственных тракторов – 1,2–1,3. Резкое увеличение крутящего момента на полуосях переднего ведущего моста трелевочного трактора до 2500–3000 Нм приводит к их выходу из строя.

Разработана расчетная модель колесного трелевочного трактора ТТР-401, позволяющая учитывать внутренние возмущающие воздействия от источника заданной ограниченной мощности, каким является двигатель внутреннего сгорания.

На первом этапе исследований раздельно рассматривались две динамические системы и их поведение в эксплуатационных режимах: колесный трактор как активная система колеса, которой реализуют крутящий момент в касательную силу тяги и взаимосвязь пачки деревьев с базовым трактором через связующий элемент технологического оборудования. Это позволило установить частотные диапазоны двух систем и классифицировать колебательные явления по их величине. Последующим этапом являлось соединение представленных подсистем в единую с целью взаимовлияния их друг на друга. Этот этап исследований позволил выявить влияние параметров пачки и конструкции подвеса на величины уровня динамической нагруженности.

Оценка динамической нагруженности лесного колесного тягача проводилась по величинам спектральной плотности крутящих моментов на полуосях. На рис. 2 приведены спектральные плотности крутящих моментов на задних и передних полуосях трелевочного трактора ТТР-401 на 2–5 передачах с пачкой хлыстов объемом 1,4 м³ при движении по трелевочному волоку. Опыт эксплуатации машин ТТР-401, МЛ-127 показал, что рабочие скорости на трелевке зависят от подготовки волоков и при благоприятных условиях работы составляют 5–12 км/ч. Такой широкий диапазон объясняется тем, что при больших расстояниях трелевки скорость возрастает, а при расстоянии 80–120 м колесные машины не могут использовать свои скоростные возможности.

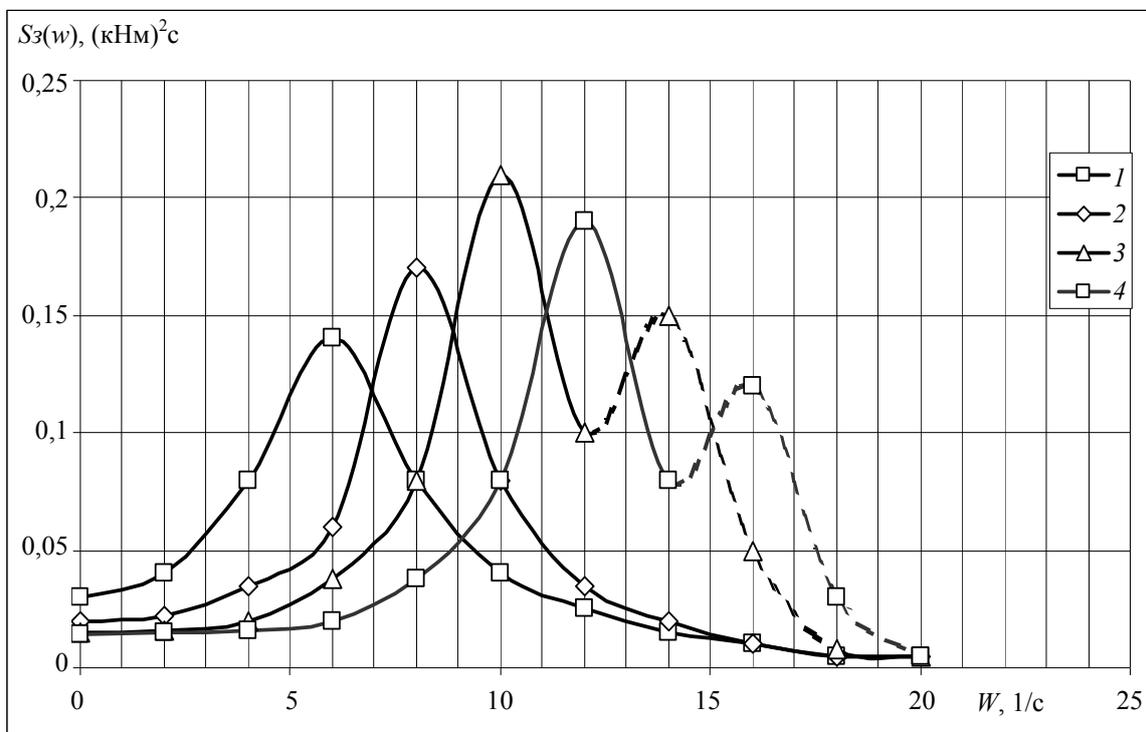
Как уже было отмечено выше, условия эксплуатации ряда ответственных и сложнагруженных деталей лесных мобильных машин характеризуются интенсивным износом их рабочих поверхностей, что приводит к выходу их из строя. В связи с этим возникает необходимость в их дополнительном упрочнении методами, позволяющими получать более высокую поверхностную твердость. Технологический процесс упрочнения деталей трансмиссий лесных машин борированием и боросилицированием по сравнению с другими способами диффузионного насыщения (например, базовой 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 лесопромышленных предприятий для деталей трансмиссий трелевочных тракторов [7–11].

Так, установлено, что как при борировании, так и при боросилицировании максимальная твердость достигается на поверхности стали с постепенным уменьшением по глубине упрочненного слоя, что является весьма оптимальным при упрочнении тяжело нагруженных зубчатых колес [12, 13]. 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 Fe₂B и FeSi. Это делает возможным применение данного способа упрочне-

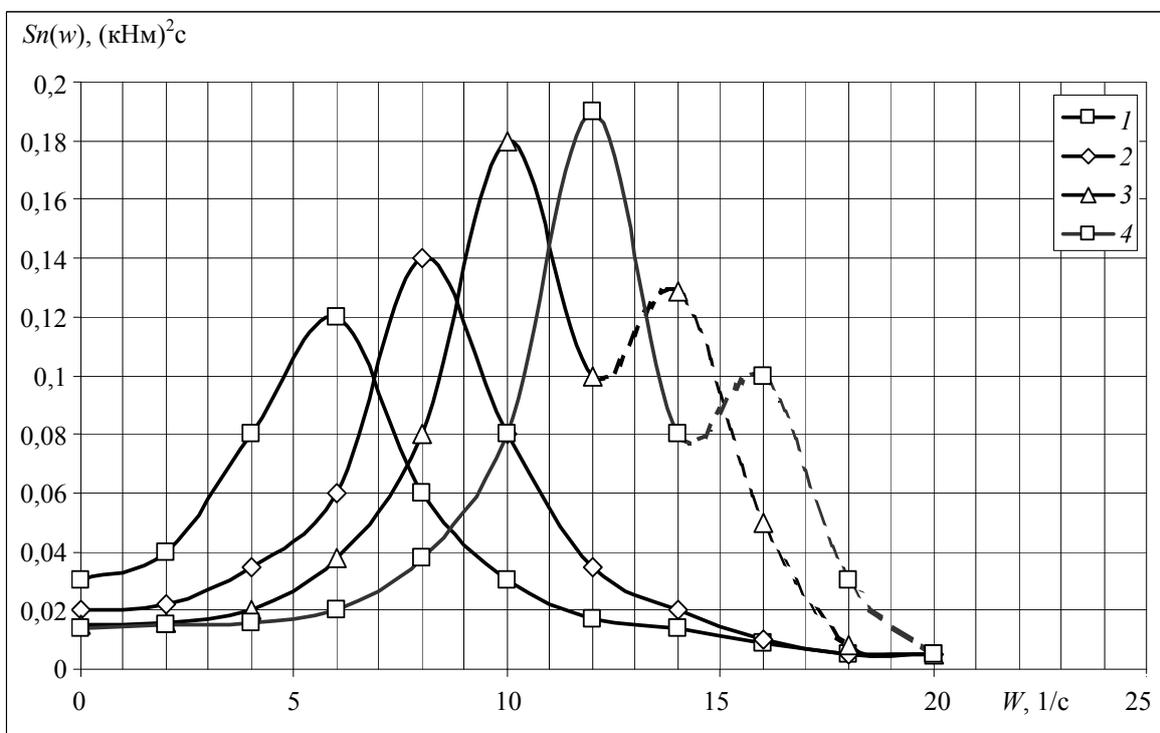
ния для зубчатых колес трансмиссии трелевочных тракторов.

В соответствии с этим можно выделить три зоны с соответствующей микротвердо-

стью при боросилицировании: зона, насыщенная бором и кремнием (11200–11800 МПа), переходная зона (7800–9000 МПа) и сердцевина (5000–5600 МПа).



a



b

Рис. 2. Спектральные плотности крутящих моментов на задних (a) и передних (b) полуосях трелевочного трактора ТТР-401 при движении на различных передачах с пачкой $V = 1,4 \text{ м}^3$:

1, 2, 3, 4 – соответственно первая, вторая, третья, четвертая передачи

Выводы. Как уже было отмечено выше, условия эксплуатации ряда ответственных и сложнагруженных деталей лесных мобильных машин характеризуются интенсивным износом их рабочих поверхностей, что приводит к выходу их из строя. Для того чтобы повысить поверхностную твердость зубьев деталей трансмиссий лесных мобильных машин, применяют борирование и боросилици-

рование. Установлено, что при боросилицировании повышение допускаемых контактных напряжений для предотвращения образования пластических деформаций обеспечивается не только на поверхности, но и на глубине 200–250 мкм. Повышение твердости на глубине 200–250 мкм также обеспечивает предотвращение глубинного контактного выкрашивания упрочненного слоя.

Список литературы

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 // Наука и техника. Минск, 1977. С. 78–80.
3. Симанович В. А., Исаченков В. С. Разработка приведенной расчетной модели «колесный тягач – прицепной модуль – пачка деревьев» // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. 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., Пищов М. Н., Смяян А. И. Эксплуатационная оценка работы колесных лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 92–95.
6. Пищов М. Н., Симанович В. А., Бельский С. Е. Исследование условий эксплуатации и динамической нагруженности деталей трансмиссии трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. 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., Пищов 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., 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 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., Пищов М. Н. Определение оптимальных параметров процесса борирования деталей лесных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 267–270.
13. Макаревич С. С., Пищов М. Н., Бельский С. Е. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 327–330.

References

1. Anikin N. I. *Snizheniye dinamicheskoy nagruzki i uvelicheniye dolgovechnosti transmissiy lesnykh 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 transmissions 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. Dynamic loading of transmissions of wheeled vehicles. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology], 1977, pp. 78–80 (In Russian).
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 XVI, pp. 92–95 (In Russian).

6. Pishchov M. N., Simanovich V. A., Belsky 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. XVII, pp. 113–115 (In Russian).

7. Voroshnin, L. G. *Borirovaniye promyshlennykh 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. *Mnogokompanentnyye diffuzionnyye pokrytiya* [Multicomponent diffusion coatings]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974. 289 p.

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

12. Belsky 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., Belsky 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 XVII, pp. 327–330 (In Russian).

Информация об авторах

Симанович Василий Антонович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Simanovich@belstu.by

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: dmiputu@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

Скворцов Дмитрий Николаевич – студент, факультет ЛИД, 4 курс, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Skvorsh@mail.ru

Information about the authors

Simanovich Vasily Antonovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Machines, Roads and Technologies of Timber Industry. Belarusian State Technological University (220006, Minsk, Sverdlova str, 13a, Republic of Belarus). E-mail: Simanovich@belstu.by

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), 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: dmiputu@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

Skvortsov Dmitry Nikolayevich – student. Belarusian State Technological University (220006, Minsk, Sverdlova str., 13a, Republic of Belarus). E-mail: Skvorsh@mail.ru

Поступила 23.03.2021