

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.833.01:630*377.44(043.3)

ПИЦОВ
Михаил Николаевич

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННОГО БОРОСИЛИЦИРОВАНИЕМ СЛОЯ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПЕРЕДНЕГО ВЕДУЩЕГО МОСТА
ТРЕЛЕВОЧНЫХ ТРАКТОРОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.02.02 – машиноведение,
системы приводов и детали машин

Минск, 2010

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель

Бельский Сергей Евграфович,
кандидат технических наук, доцент,
учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств

Официальные оппоненты:

Басинюк Владимир Леонидович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий лабораторией «Трибодиагностика» ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»;

Михлюк Анатолий Игнатьевич,
кандидат технических наук, начальник управления лабораторных и исследовательских работ, ОАО «Минский автомобильный завод»

Оппонирующая организация

РУП «Минский тракторный завод»

Защита состоится «26» февраля 2010 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202.

Телефон ученого секретаря совета: 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «26» января 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно
© Пищов М.Н., 2010
© БНТУ, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема заготовки деловой древесины является важной народнохозяйственной задачей. В лесозаготовительной промышленности предпочтение, как правило, отдается колесным трелевочным машинам.

Режим работы трелевочных тракторов характеризуется невысокими скоростями и большими удельными нагрузками на зубья деталей трансмиссий, в связи с чем основным видом их разрушения является интенсивное изнашивание, сопровождаемое пластическими деформациями, что приводит к снижению их ресурса с 7500 до 3200–3500 моточасов. Причинами таких нагрузок являются постоянные трогания с места трактора при трелевке пачки деревьев, а также наезды на препятствия различного рода в виде пней, валежников и других неровностей. В таких условиях эксплуатации наиболее интенсивно изнашиваются конические пары переднего ведущего моста трелевочного трактора, что приводит к необходимости внеплановых ремонтов. Применяемая в настоящее время для упрочнения многих зубчатых колес трансмиссий трелевочных тракторов цементация не обеспечивает требуемую твердость и износостойкость их контактной поверхности. Данная проблема может быть решена использованием других процессов химико-термической обработки (ХТО), позволяющих повысить твердость и износостойкость зубчатых колес. Однако для выбора процесса и обеспечения рациональных параметров упрочненного слоя необходимо разработать методику расчета напряженного состояния зубьев конических колес переднего ведущего моста трелевочного трактора, которая до настоящего времени не разработана.

Одним из наиболее эффективных способов повышения износостойкости зубчатых колес является применение процессов борирования и боросилицирования, позволяющих получать высокую твердость поверхности с сохранением качественных показателей передач. Однако в настоящее время данный метод ХТО для упрочнения зубчатых колес практически не используется, также не изучены возникающие после проведения ХТО остаточные напряжения, которые существенно влияют на их твердость, износостойкость и усталостные характеристики.

В связи с этим разработка методов расчета, обеспечивающих выбор рациональных параметров упрочненного слоя контактных поверхностей зубчатых колес с учетом остаточных напряжений после проведения ХТО, а также их экспериментальная проверка и опытно-промышленная апробация в настоящее время весьма актуальны.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Диссертация является самостоятельной частью исследований, проводимых в соответствии с научным направлением кафедры «Детали машин и ПТУ» УО БГТУ в 2006–2009 гг., заданием ГКПНИ «Механика», раздел 3.–01 «Развитие теории и разработка методов определения параметров надежности сложных техниче-

ских систем, мониторинга расходования и путей повышения ресурса работоспособности (на примере трансмиссий и несущих конструкций тракторов МТЗ и др.) с учетом оптимизации экономической эффективности их жизненного цикла» (ГБ 26-142, № ГР 20064122 2005–2010 гг.), отдельным заданием Исполнительной программы межгосударственного научно-технического сотрудничества Беларуси и Украины «Исследование механизмов усталостного повреждения и повышение циклической прочности конструкционных материалов, работающих в экстремальных условиях» (БС 24–081, № ГР 2004–2006 гг.) и грантом на проведение исследований Министерства образования РБ «Повышение долговечности деталей трансмиссии лесных машин путем разработки и внедрения на предприятии процесса их упрочнения» (ГБ 29-031, № ГР 20064122 2009 г.).

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка методов расчета и обеспечения рациональных параметров упрочненного слоя зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401 с учетом условий их работы для повышения ресурса.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

1. Обосновать актуальность разработки метода расчета рациональных параметров упрочненного слоя контактных поверхностей зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов, учитывающего особенности условий их эксплуатации и основные причины выхода из строя.

2. Разработать математическую модель для расчета контактных напряжений в поверхностном слое сопряженных зубчатых колес трансмиссии трелевочного трактора, позволяющую с учетом остаточных напряжений после проведения ХТО выбрать процесс упрочнения и обосновать необходимую поверхностную микротвердость и толщину упрочненного слоя, обеспечивающих повышение ресурса зубчатых передач.

3. Провести экспериментальную проверку выполненных расчетов путем исследования влияния состава насыщающей смеси и температурно-временных параметров процессов борирования и боросилицирования на структуру, свойства и эксплуатационные характеристики поверхностных слоев, а также распределение в них остаточных напряжений.

4. Оценить механизм и интенсивность изнашивания рабочих поверхностей сопряженных зубчатых колес упрочненных борированием и боросилицированием при проведении лабораторных, стендовых и производственных испытаний, определить усталостные характеристики упрочненных образцов.

5. Разработать и внедрить методику расчета износостойкости упрочненных поверхностей зубчатых колес с учетом влияния остаточных напряжений после проведения упрочнения, технические условия на состав насыщения и процесс упрочнения.

Объект исследования: крупномодульные закрытые эвольвентные конические зубчатые передачи трелевочных тракторов ТТР-401.

Предмет исследований: ресурс зубчатых передач и пути его увеличения.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель напряженного состояния зубьев конических передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов, учитывающая особенности их нагружения при трелевке древесины и позволяющая определить на основании расчетов эквивалентных контактных напряжений (с учетом остаточных напряжений после проведения химико-термической обработки) требования к упрочненным рабочим поверхностям зубьев;

– методика расчета остаточных напряжений в зубьях конических передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов после проведения ХТО, учитывающая особенности их геометрических параметров, а также физико-механические характеристики структурных составляющих упрочненного слоя, что позволило выбрать необходимый способ упрочнения;

– установленный в результате экспериментальных исследований необходимый состав насыщения при реализации процесса боросилицирования, обеспечивающий требуемый ресурс конических зубчатых передач, а также закономерности его влияния на структуру, свойства и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя зубьев, что позволило выбрать температурно-временные параметры процесса;

– результаты исследования кинетики и механизмов изнашивания упрочненных поверхностей, а также усталостных характеристик упрочненных образцов из различных конструкционных сталей, позволившие обеспечить рациональные параметры упрочненного слоя и определить для зубчатых колес допустимые контактные напряжения и допустимые напряжения при изгибе;

– методика расчета на износостойкость упрочненных зубчатых колес с учетом остаточных напряжений после проведения химико-термической обработки, позволяющая на стадии проектирования оценить влияние параметров упрочненной ХТО поверхности на интенсивность их изнашивания.

Личный вклад соискателя. Диссертация является результатом личной работы автора. Самостоятельно обоснована актуальность исследований, разработана методика расчетов и обеспечения рациональных параметров упрочненного слоя зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов. Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным руководителем, канд. техн. наук, доцентом С.Е. Бельским. Соискателем разработаны математическая модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссии колесных трелевочных тракторов, что позволило научно обосновать необходимость поверхностного упрочнения деталей и состав для диффузионного насыщения. Автором определены влияние температурно-временных параметров процесса боросилицирования на структуру и эксплуатационные характеристики упрочненных поверхностей, организованы опытно-промышленные испытания партии упрочненных деталей и внедрены результаты исследований. Теоретические исследования остаточных напряжений проводились совместно с канд. техн. наук, профессором С.С. Макаревичем, условий работы трелевочных тракторов с канд. техн. наук, доцентом В.А. Симановичем и канд. техн. наук, доцентом А.И. Смяном, экспериментальные исследования составов насыще-

ния с д-ром техн. наук, профессором М.В. Ситкевичем, что отражено в совместных публикациях.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2006–2009 гг.); Международных конференциях «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2006–2007 гг.); республиканских научно-технических конференциях «Исследования и разработка в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2006–2008 гг.); 59-ой научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Россия, г. Ярославль, 2007 г.); научно-практическом семинаре «Наука и инновации ВУЗов–производству: взаимодействие, эффективность, перспективы» (Минск 2007 г.); III Международной научно-технической конференции «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технологии» (Минск, 2008 г.); Международной научно-технической конференции «Современные материалы в машиностроении» (Украина, г. Запорожье, 2008 г.); 10 и 11 Международных научно-технических конференциях «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2008–2009 гг.); Международной научно-технической конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных конструкционных материалов и сплавов» (Россия, г. Орск, 2008 г.).

Опубликованность результатов диссертации. По результатам исследований опубликовано 20 печатных работ, в том числе 9 научных статей в изданиях включенных в Перечень ВАК, объемом 3,6 авторских листа, 7 материалов и 1 тезис доклада научных конференций, 1 научная статья в сборнике трудов, получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5-ти глав, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 142 наименований и список публикаций соискателя из 20 наименований, приложений. Работа изложена на 186 страницах, включая 83 иллюстрации на 78 страницах, 7 таблиц на 8 страницах, 8 приложений на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику состояния исследований в рассматриваемой области и краткое обоснование актуальности темы диссертации.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященный анализу условий эксплуатации колесных трелевочных тракторов, их влиянию на долговечность и надежность ответственных деталей трансмиссии.

Расчетами нагруженности и ресурсов работоспособности таких деталей занимались Л.А. Калякин, Д.И. Громов, А.В. Жуков, Г.М. Анисимов, Ю.Д. Силуков и ряд других исследователей. При изучении условий работы и методов прогнозирования ресурса колесных лесных машин было установлено,

что основным источником внешних нагрузок является волок, по которому они транспортируют древесину. При движении трелевочного трактора с пачкой деревьев по лесосеке приходится преодолевать неровности различного характера, которые вызывают колебательные процессы в узлах и агрегатах трансмиссии, ходовой части и несущих системах технологического оборудования. В ходе проведенных исследований было установлено, что постоянные трогания трелевочного трактора с места и наезды на препятствия в виде пней и валежников при трелевке древесины приводят к мгновенному увеличению крутящего момента в деталях трансмиссии, в частности в конической передаче переднего ведущего моста. На основании этого установлено, что для таких деталей трансмиссий наиболее перспективными являются методы расчета, основанные на гипотезах суммирования повреждений.

Установлено, что при максимальных нагрузочных режимах работы трелевочного трактора в поверхностных слоях зубьев конической передачи переднего ведущего моста вследствие недостаточно высокой для этих условий нагрузки поверхностной твердости возникают пластические деформации в виде полос, которые приводят к интенсивному изнашиванию контактных поверхностей зубьев и тем самым уменьшают их ресурс с расчетных 7500 до 3200–3500 моточасов. Поскольку зубчатые колеса конических передач трелевочных тракторов являются тихоходными (150–200 об/мин), а износы сопряжений интенсивными, то контактное выкрашивание поверхностей зубьев при эксплуатации данной передачи не возникает. Эксплуатационные характеристики деталей переднего ведущего моста трелевочных тракторов должны быть обеспечены необходимой поверхностной твердостью и износостойкостью, что достигается при правильном назначении химико-термического упрочнения. При этом правильный выбор способа и режимов ХТО может быть определен путем совершенствования расчетов контактных напряжений в зубчатых колесах.

Анализ литературы показал, что для зубчатых передач трансмиссии трелевочного трактора с учетом специфики его работы на лесосеке недостаточно изучены напряжения в поверхностных слоях зубьев. Применяемая в настоящее время цементация зубчатых колес не обеспечивает для данных условий эксплуатации трелевочного трактора требуемую поверхностную твердость, что приводит к возникновению задиров, заедания и пластической деформации на контактных поверхностях. На основании изученных процессов поверхностного упрочнения стальных деталей обоснована перспективность использования для конических передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов диффузионного насыщения методами борирования и боросилицирования с разработкой составов насыщения, позволяющих получать более высокую поверхностную твердость и износостойкость. Эксплуатационные характеристики контактных поверхностей зубчатых колес также зависят от остаточных напряжений, которые возникают после проведения ХТО. В связи с этим важной задачей при определении контактных напряжений в конических передачах является изучение остаточных напряжений после проведения химико-термического упрочнения деталей с последующими сравнительными ресурсными испытаниями.

Однако, как уже отмечалось, влияние остаточных напряжений после проведения различной ХТО на кинетику изнашивания и эксплуатационную долговечность деталей трансмиссий трелевочных тракторов практически не изучено. Проведение исследований в данной области и применение их результатов позволит разработать методику расчета рациональных параметров упрочненного слоя и выбрать процесс упрочнения деталей, а учет конкретных условий эксплуатации трелевочных тракторов научно обосновать требования, предъявляемые к упрочненным поверхностям зубьев. На основании выполненного обзора сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе проведены по третьей и четвертой (энергетической) теории прочности теоретические расчеты контактных напряжений цементированных конических колес переднего ведущего моста трелевочного трактора, результаты которых установили неизбежность возникновения в поверхностных слоях зубьев пластических деформаций связанных со спецификой эксплуатации трактора. Расчетами установлено, что для предотвращения пластического разрушения контактных поверхностей зубчатых колес данной передачи необходимо повышение их допускаемых контактных напряжений, что может быть достигнуто увеличением поверхностной твердости за счет применения других методов ХТО. Однако применение других процессов ХТО приводит к изменению в поверхностных слоях зубьев конических колес остаточных напряжений, которые могут существенно влиять на действующие эквивалентные контактные напряжения, и в зависимости от знака увеличивать либо уменьшать их.

Разработана математическая модель напряженного состояния зубьев конических колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов, позволяющая расчетным путем определять контактные напряжения в поверхностных слоях зубьев с учетом влияния остаточных напряжений после проведения ХТО. Расчеты остаточных и суммарных контактных напряжений зубьев конического колеса проводились согласно схеме, приведенной на рисунке 1. При остывании после проведения ХТО по граням выделенного параллелепипеда возникают остаточные напряжения σ_x , σ_y , σ_z , расчет которых учитывает геометрические параметры конических зубчатых колес и проводится как для упрочненного поверхностного слоя, так и сердцевины стали.

На расчетной схеме (рисунок 1) приняты следующие обозначения: оси X , Y , Z ; индексы 1, 2 – сердцевина стали и упрочненный слой; R_k – радиус кривизны на границе упрочненного слоя, мм; R_2 – радиус кривизны боковых поверхностей зубьев, мм; σ_x , σ_y , σ_z – расчетные напряжения, МПа; h – толщина упрочненного слоя, мм; a – расстояние от центра кривизны до оси зуба, мм; dr – элементарный участок. В расчетной схеме радиальное напряжение на границе слоев заменено давлением p_1 , МПа.

Получены зависимости, позволяющие рассчитывать суммарные контактные напряжения с учетом влияния остаточных напряжений после проведения ХТО различными методами (азотирование, цементация, борирование и боросилицирование) как для упрочненного слоя (рисунок 1, 2), так и сердцевины стали (рисунок 1, 1).

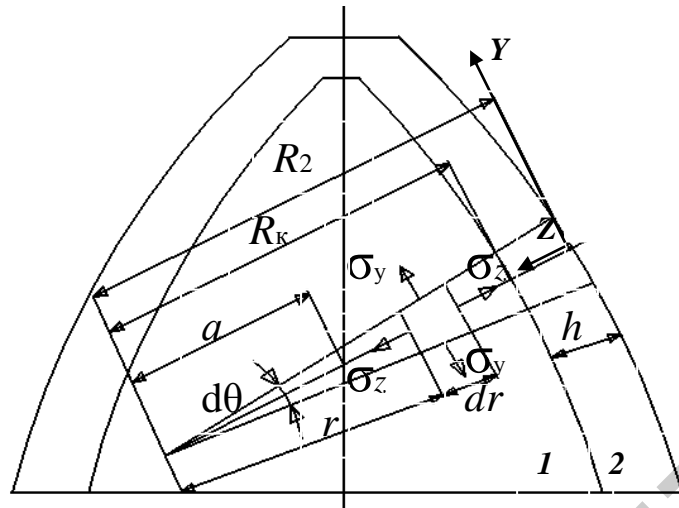


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения остаточных и суммарных напряжений по глубине зуба после проведения ХТО

При $0 \leq Z \leq h$

$$\left. \begin{aligned}
 y_{x(s)} &= -\frac{2M p_{0(k)}}{b_k} \left(\sqrt{b_k^2 + z^2} - z \right) + \frac{2M R_k^2}{R_2^2 - R_k^2} p_1 + \frac{2M E_2 \Delta T \Phi B}{(-M)(R_2^2 - R_k^2)} + E_2 e - \frac{E_2 \Delta T \Phi}{1-M} \beta_2 \left(\right) \\
 y_{y(s)} &= -\frac{p_{0(k)}}{b_k} \left(\frac{b_k^2 + 2z^2}{\sqrt{b_k^2 + z^2}} - 2z \right) + \frac{p_1}{R_2^2 - R_k^2} \left(R_k^2 + \frac{R_2^2 R_k^2}{R_2^2 - z^2} \right) + \frac{E_2 \Delta T \Phi B}{(-M)(R_2^2 - R_k^2)} \left(1 + \frac{R_k^2}{R_2^2 - z^2} \right) + \\
 &+ \frac{E_2 \Delta T \Phi}{(-M)(R_2^2 - z^2)} \int_{R_2 - z}^{R_k} \left(R_2 - z \right) \beta_2 \left(\right) dz - \frac{E_2 \Delta T \Phi}{1-M} \beta_2 \left(\right) \\
 y_{z(s)} &= -p_{0(k)} \frac{b_k}{\sqrt{b_k^2 + z^2}} + \frac{p_1}{R_2^2 - R_k^2} \left(R_k^2 - \frac{R_2^2 R_k^2}{R_2^2 - z^2} \right) + \frac{E_2 \Delta T \Phi B}{(-M)(R_2^2 - R_k^2)} \left(1 - \frac{R_k^2}{R_2^2 - z^2} \right) - \\
 &- \frac{E_2 \Delta T \Phi}{(-M)(R_2^2 - z^2)} \int_{R_2 - z}^{R_k} \left(R_2 - z \right) \beta_2 \left(\right) dz
 \end{aligned} \right\} (1)$$

При $Z \geq h$

$$\left. \begin{aligned}
 y_{x(s)} &= -\frac{2M p_{0(k)}}{b_k} \left(\sqrt{b_k^2 + z^2} - z \right) + E_1 e - 2M p_1 - E_1 \beta_1 \Delta T \Phi, \\
 y_{y(s)} &= -\frac{p_{0(k)}}{b_k} \left(\frac{b_k^2 + 2z^2}{\sqrt{b_k^2 + z^2}} - 2z \right) - p_1, \quad y_{z(s)} = -p_{0(k)} \frac{b_k}{\sqrt{b_k^2 + z^2}} - p_1
 \end{aligned} \right\} (2)$$

где $p_{0(k)}$ – наибольшее давление, МПа; b_k – половина ширины полосы контакта, мм; z – ордината по оси Z , мм; m – коэффициент Пуассона; E_1, E_2 – модуль упругости стали и упрочненного слоя, МПа; ΔT – разность температур, град; e – деформация в направлении оси X ; β_1 – коэффициент линейного расширения стали, град⁻¹.

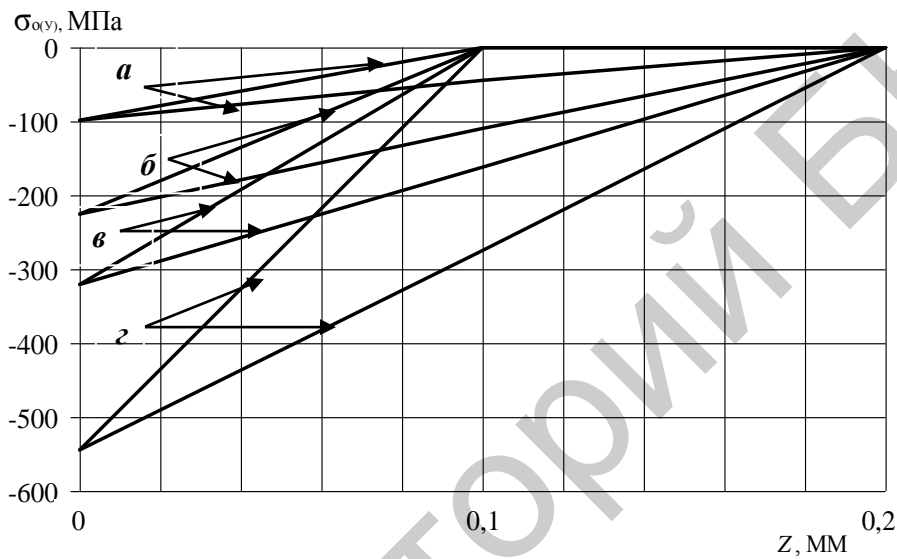
Расчетные зависимости включают в себя следующие параметры:

$$A = \int_{R_2}^{R_k} (R_2 - z) \bar{\alpha}_2 dz, \text{ мм}^2/\text{град}; \quad \bar{\alpha}_2 = \bar{\alpha}_n - \kappa z, \text{ град}^{-1}; \quad \kappa = \frac{\bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}_1}{R_2 - R_k}, \text{ град}^{-1}/\text{мм};$$

$$e = \frac{E_1 \alpha_1 (R_k^2 - a^2) \Delta T - 2ma^2 p_1 + 2E_2 \Delta T A}{E_1 (R_k^2 - a^2) + E_2 (R_2^2 - R_k^2)}, \quad (3)$$

$$p_1 = \frac{E_1 E_2 \Delta T \left(\frac{R_2^2 - R_k^2}{-2m} + \frac{2A}{E_1 R_k^2} + \frac{2A}{E_1 R_2^2} \right)}{E_1 (R_k^2 - a^2) + E_2 (R_2^2 - R_k^2)}, \text{ МПа}, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_n$ – коэффициент линейного расширения на поверхности упрочненного слоя, град⁻¹.



a – цементация; *б* – азотирование;
в – боросилицирование; *г* – борирование

Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений сжатия σ_{ox} по глубине упрочненного слоя

сжатия достигают на поверхности зубьев при проведении борирования и боросилицирования (320–545 МПа) (рисунок 2 *в, г*), при цементации они составляют 95–110 МПа. В связи с этим было установлено, что применение для упрочнения зубчатых колес таких методов ХТО как борирование и боросилицирование позволит наряду с увеличением поверхностной твердости зубьев уменьшить контактные напряжения в их поверхностных слоях за счет образования остаточных напряжений сжатия.

Суммарные контактные напряжения, учитывающие остаточные напряжения сжатия, рассчитывались по третьей и четвертой (энергетической) теориям прочности для деталей, упрочненных борированием, обеспечивающим поверхностную микротвердость зубьев 18000–19000 МПа, боросилицированием 11000–12000 МПа, азотированием 8000–8500 МПа, цементацией 5500–6000 МПа; распределение их по глубине зубьев конических передач после проведения различных процессов ХТО при максимальных нагрузочных режимах работы трелевочного трактора приведено на рисунке 3.

Расчетами установлено, что при всех видах ХТО в упрочненном слое возникают сжимающие остаточные напряжения (рисунок 2), которые по оси *X* и *Y* имеют одинаковые значения, а по оси *Z* незначительные в связи с чем при расчетах ими можно пренебречь.

Максимальных значений остаточные напряжения

Установлено, что с увеличением микротвердости зубьев, достигаемой применяемыми методами ХТО, уровень суммарных напряжений в поверхностном слое уменьшается. Так как наибольших значений остаточные напряжения достигают при борировании и боросилицировании, то в поверхностных слоях зубьев деталей при данных способах упрочнения наблюдается снижение уровней эквивалентных суммарных напряжений на 35–40 %, что создает предпосылки повышения эксплуатационного ресурса для деталей трансмиссий, работающих в условиях

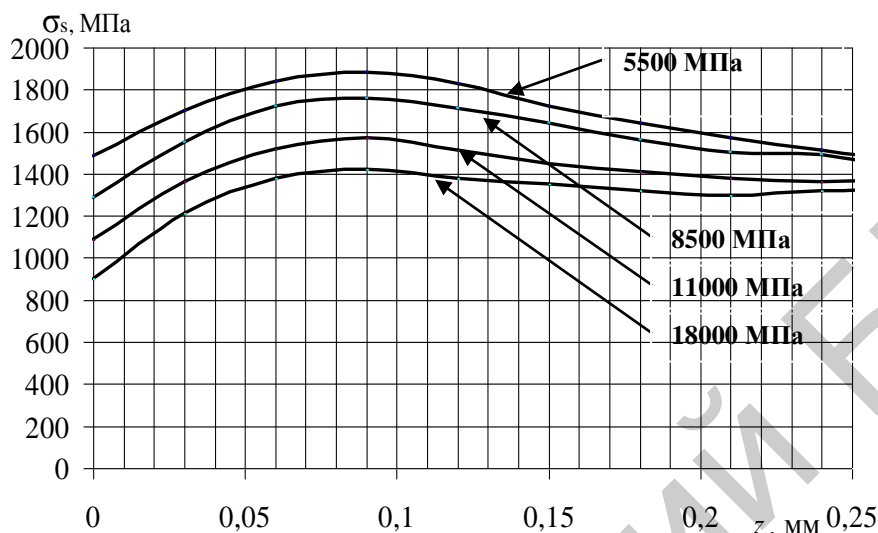


Рисунок 3 – Расчетные зависимости суммарных напряжений σ_s по глубине поверхностного слоя при различной микротвердости с учетом остаточных напряжений сжатия

высоких динамических нагрузок. При цементации остаточные напряжения сжатия имеют невысокие значения, в результате чего значительного уменьшения суммарных напряжений по глубине упрочненного слоя при данном способе ХТО не установлено. Поэтому расчеты на прочность цементированных зубчатых колес можно проводить без учета

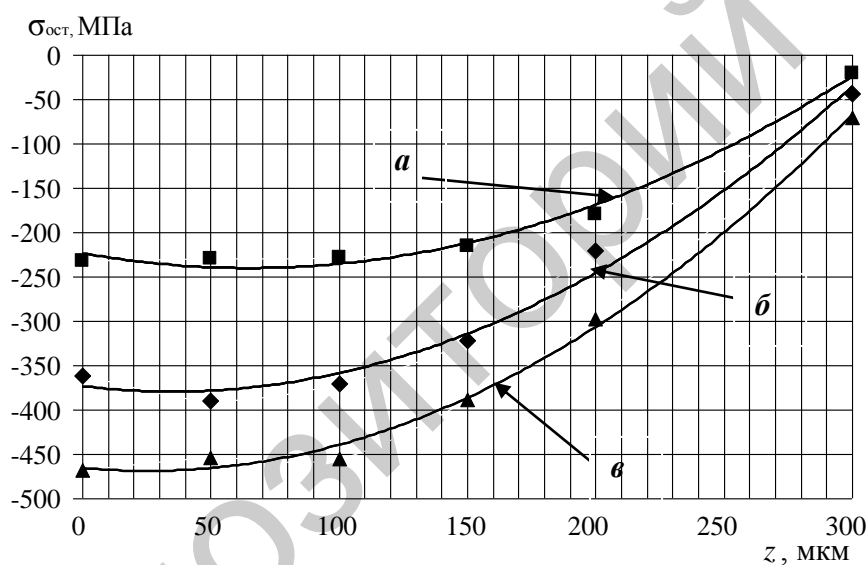
остаточных напряжений.

Установленные на основе расчетов остаточных напряжений, возникающих после проведения ХТО, зависимости суммарных напряжений в поверхностных слоях позволяют выбрать требуемые параметры упрочненного слоя зубьев конических передач переднего ведущего моста трелевочного трактора при максимальных нагрузочных режимах его работы и тем самым повысить их долговечность. Так, необходимая толщина упрочненного слоя при боросилицировании составляет 200–250 мкм при микротвердости поверхности не менее 11000–12000 МПа, что обеспечивает достаточное сопротивление его продавливанию, а также износостойкость и усталостную прочность контактных поверхностей зубьев при максимальных режимах работы трелевочного трактора.

В третьей главе для экспериментальной проверки выполненных теоретических расчетов содержатся результаты исследований влияния состава насыщающих сред и технологических параметров диффузионного насыщения на основе борирования и боросилицирования на структуру и свойства упрочненного слоя, а также образование в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия. С учетом возможностей лесозаготовительных и ремонтных предприятий исследовано насыщение в порошковых смесях на основе технического карбида бора, применяемое обычно для упрочнения инструмента и технологической оснастки. При выборе состава руководствовались тем, что в упрочнен-

ном борированием слое образуются фазы FeV и Fe₂V. Фаза FeV обеспечивает более высокую микротвердость поверхности зуба (18000–19000 МПа) по сравнению с фазой Fe₂V (13000–15000 МПа), однако при ее образовании поверхностный слой становится хрупким. Проведено диффузионное насыщение образцов из сталей 25ХГТ и 40Х при различных температурно-временных параметрах упрочнения; микрорентгеноспектральным анализом определен фазовый состав, исследованы структура, толщина, микрохрупкость и микротвердость упрочненного слоя, а также распределение остаточных напряжений сжатия.

Микрохрупкость определялась прибором ПМТ–3 и оценивалась по напряжению скола диффузионноупрочненной поверхности (чем ниже напряжение скола, тем выше хрупкость). Установлено, что при упрочнении зубчатых колес борированием уровень напряжений скола составляет 102–108 МПа при микротвердости поверхности 18000–19000 МПа и остаточных напряжениях сжатия 520–545 МПа, что может вызывать его сильное охрупчивание с возможностью последующего выкрашивания при многоцикловом нагружении конической передачи. При упрочнении боросилицированием отмечается увеличение напряжений скола по сравнению с борлируемыми деталями в 2,8–3,2 раза за счет образования фаз Fe₂V и FeSi при уровне остаточных напряжений сжатия 320–380 МПа, что делает его более перспективным для упрочнения деталей, подвергнутых динамическим нагрузкам, таких как конические передачи переднего ведущего моста тракторных тракторов ТТР-401. Остаточные напряжения в упрочненных слоях изучались с использованием рентгеновского дифрактометра фирмы Bruker. При исследовании распределения по упрочненному боросилицированию слою остаточных напряжений сжатия было установлено, что с повышением температуры насыщения увеличивается как градиент остаточных напряжений, так и их уровень (рисунок 4). Полученные экспериментальными исследованиями значения остаточных напряжений сжатия незначительно отличаются от результатов расчетов напряженного состояния зубьев, что подтверждает корректность использованной модели.



а – температура 890°C; *б* – 950°C; *в* – 1050°C

Рисунок 4 – Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного боросилицированием слоя

При исследовании распределения по упрочненному боросилицированием слою остаточных напряжений сжатия было установлено, что с повышением температуры насыщения увеличивается как градиент остаточных напряжений, так и их уровень (рисунок 4). Полученные экспериментальными исследованиями значения остаточных напряжений сжатия незначительно отличаются от результатов расчетов напряженного состояния зубьев, что подтверждает корректность использованной модели.

Изучены изменения шероховатости и линейных размеров деталей после обработки. Установлено, что после борирования и боросилицирования увели-

чение 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 $R_a=1,6$ мкм перед обработкой до $R_a=1,72$ – $1,94$ 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.

Применительно к условиям работы деталей трансмиссии трелевочных тракторов разработан новый состав для боросилицирования, содержащий карбид бора, кристаллический кремний, натрий борфтористый, магний фтористый и позволяющий обеспечить микротвердость упрочненного слоя 11000–12000 МПа при толщине в 200–250 мкм, что соответствует выполненным расчетам. На основе анализа результатов исследований установлены оптимальные температурно-временные параметры процесса диффузионного насыщения, обеспечивающие требуемый ресурс деталей: температура 920–950°C и время насыщения 3–3,5 ч.

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния составов насыщающих сред и температурно-временных параметров упрочнения боросилицированием и борированием на износостойкость и усталостные характеристики образцов из сталей

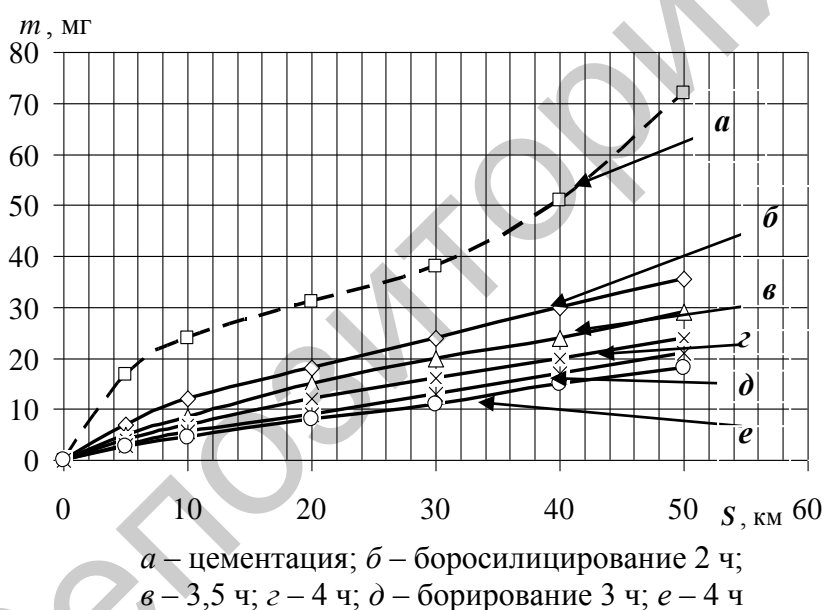


Рисунок 5 – Изменение величины изнашивания образцов из стали 25 ХГТ от пути трения при разных составах сред и времени насыщения

25ХГТ (рисунок 5) и 40Х. Испытания на износостойкость проводились при возвратно-поступательном движении с частичным моделированием условий эксплуатации конических колес трелевочных тракторов. При упрочнении образцов боросилицированием и борированием отмечается значительное уменьшение износа, определяемого потерей массы. Для кривой, полученной использованием цементации (традиционная технология при изготовлении зубчатых колес трансмиссии)

характерно наличие трех основных участков, соответствующих основным стадиям развития процесса изнашивания и разрушения поверхностного слоя образца. Установлено, что на первом этапе (до 20 км пробега), соответствующем периоду приработки, наблюдается более интенсивное изнашивание с потерей массы, превышающей 50% за весь период испытаний. Основными причинами этого является недостаточная поверхност-

ная твердость при цементации образцов и снижение уровня остаточных напряжений сжатия. На заключительном этапе испытаний (путь трения 45–50 км) наблюдается резкое увеличение износа с последующим разрушением контактной поверхности.

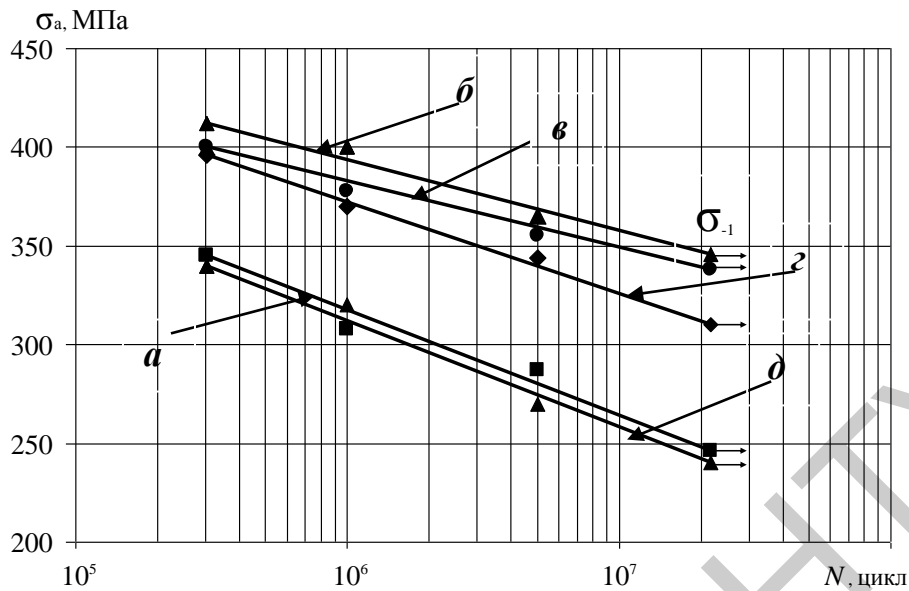
Исследование распределения остаточных напряжений сжатия при проведении испытаний на износостойкость показало, что с увеличением пути трения их уровень при упрочнении борированием и боросилицированием остается практически неизменным, однако установлено значительное уменьшение уровня остаточных напряжений сжатия для цементированных образцов на участках пути трения 20–30 км, особенно при возрастании нагрузки. На этом этапе испытаний как показал электронно-микроскопический анализ, выполненный на приборе JEOL, отмечается пластическая деформация поверхности с образованием в ней растягивающих напряжений, приводящих к полному разрушению поверхности.

Для ускоренного определения усталостных характеристик упрочненных образцов как в условиях знакопеременного изгиба, так и при растяжении-сжатии использовалась магнитострикционная установка (резонансная частота 18,0 кГц). Исследования проводились для разного времени и температур насыщения (рисунок 6), что соответствует формированию в диффузионных слоях разных уровней остаточных напряжений сжатия.

Результаты испытаний позволили установить повышение предела выносливости σ_{-1} боросилицированных образцов по сравнению с улучшенными и закаленными ТВЧ в 1,4–1,9 раза, по сравнению с цементированными в 1,6–1,7 раза и по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза при меньшем разбросе долговечности благодаря более однородной структуре упрочненного слоя. Повышение усталостных характеристик при боросилицировании связано в основном с образованием в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия, которые замедляют образование усталостной трещины. Снижение усталостных характеристик при борировании, отмечаемое при увеличении времени и температуры насыщения, связано с высокой хрупкостью упрочненного данным методом диффузионного слоя.

На основании полученных результатов по усталостной прочности упрочненной поверхности были определены допускаемые контактные напряжения и допускаемые напряжения при изгибе при боросилицировании зубчатых колес, которые увеличиваются по сравнению с цементированными соответственно в 1,45 и 1,4 раза и достаточны для работы конических передач трансмиссий трелевочного трактора. Полученные значения допускаемых напряжений могут использоваться при проектных и проверочных расчетах зубчатых колес.

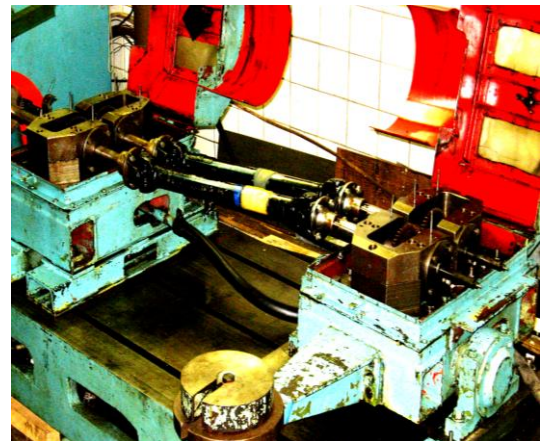
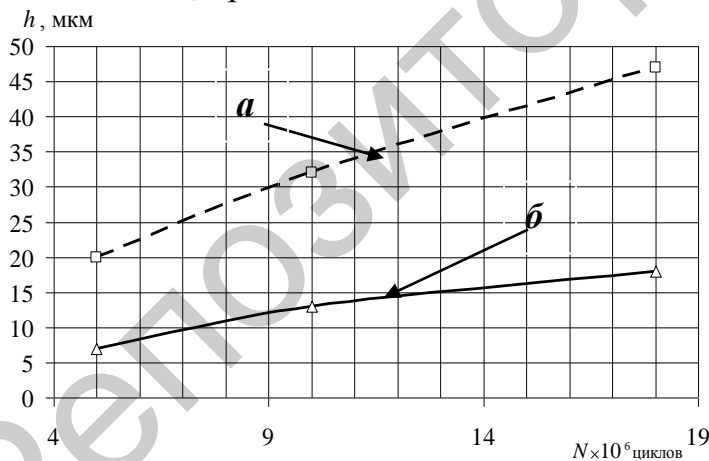
Сравнительные испытания зубчатых колес, упрочненных цементацией и боросилицированием в разработанном составе насыщения проводились в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси на стенде с замкнутым силовым контуром СИ–4 при частоте вращения входного вала передачи 1500 об/мин и крутящем моменте $M = 100$ Нм. Общее время наработки передачи составило 200 часов, что соответствует $1,8 \times 10^7$ циклов нагружения.



a – улучшение + закалка ТВЧ; *b* – боросилицирование ($T = 950^\circ\text{C}$);
v – боросилицирование ($T = 1050^\circ\text{C}$); *z* – борирование ($T = 950^\circ\text{C}$);
d – борирование ($T = 1050^\circ\text{C}$)

Рисунок 6 – Влияние процесса упрочнения на усталостную прочность стали 40X

Построенные кривые изнашивания зубчатых колес, приведенные на рисунке 7, установили, что при наработке в 5×10^6 циклов нагружения изнашивание цементированных зубчатых колес в 2,5 раза выше, чем упрочненных боросилицированием при одинаковом моменте нагружения, а при наработке в 18×10^6 – в 2,7 раза.



1
a – цементированные; *b* – боросилицированные

Рисунок 7 – Результаты испытаний (1) цементированных и боросилицированных зубчатых колес на стенде с замкнутым силовым контуром СИ – 4 (2)

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана методика расчета интенсивности изнашивания зубчатых колес, которая включает в себя: 1 – определение по формулам (1–4) остаточных и суммарных напряжений по глубине упрочненного слоя зубчатых колес после

проведения ХТО, 2 – определение микротвердости упрочненного слоя. На основании определенных параметров рассчитывается интенсивность изнашивания зубчатых колес после проведения различной ХТО. Применительно к рассматриваемым процессам упрочнения было установлено, что при упрочнении зубчатых колес боросилицированием с поверхностной микротвердостью зубьев 11000–12000 МПа и уровнем остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое 320–380 МПа интенсивность их изнашивания уменьшается по сравнению с цементированными в 2,5–2,8 раза, что подтверждается результатами стендовых испытаний.

В пятой главе приведены основные результаты производственных испытаний трелевочного трактора ТТР-401 в ОАО «Плещеницлес». С помощью виброанализатора ВШВ-003-М2 был измерен уровень виброускорений цементированных и упрочненных боросилицированием конических колес на первой, второй и третьей передачах при разной наработке трелевочного трактора ТТР-401. При этом измеритель виброускорения монтировался на переднем ведущем мосту трактора в месте установления подшипников конической передачи. На рисунке 8 приведены октавные спектры виброускорений как новых цементированных и упрочненных боросилицированием конических колес переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401, так и после наработки 2700

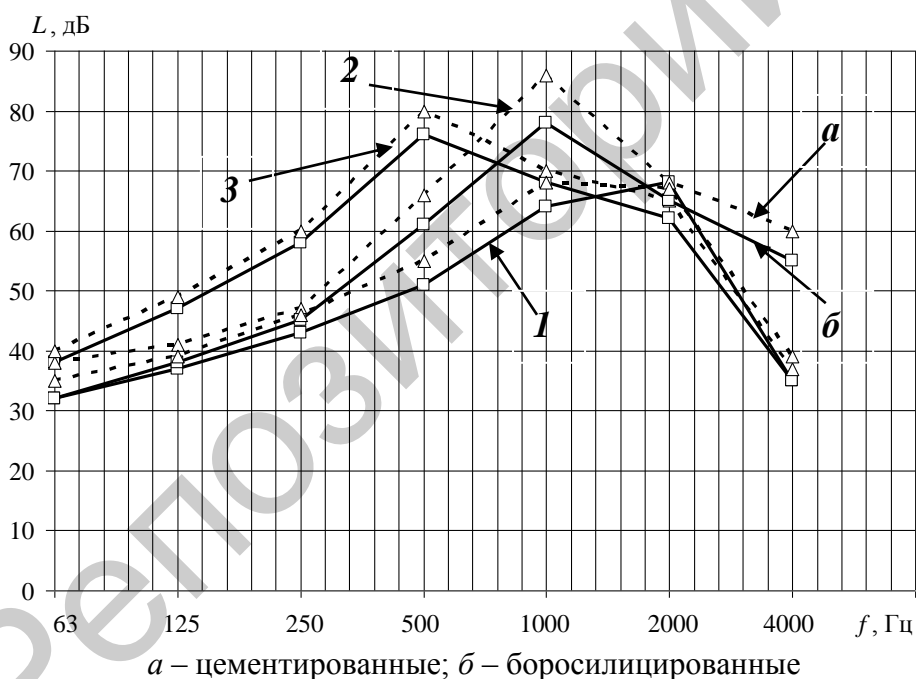


Рисунок 8 – Октавные спектры виброускорений конических колес на первой (1), второй (2) и третьей (3) передачах КПП после 2700 моточасов

моточасов. Было установлено, что уровень виброускорений новых цементированных и упрочненных боросилицированием конических колес на второй передаче трелевочного трактора практически одинаковый. После наработки в 2700 моточасов наблюдается увеличение уровня виброускорений цементированных зубчатых колес при работе на второй передаче по сравнению с базовым на 9,8–10 дБ.

При этом увеличение уровня виброускорений боросилицированных зубчатых колес на этой же передаче составило всего 2–2,5 дБ, что косвенно свидетельствует о повышенной износостойкости упрочненных боросилицированием зубчатых колес, эксплуатация которых продолжается в настоящее время. Результаты оценки уровней виброускорений конических зубчатых передач при

различной наработке трелевочного трактора могут использоваться для мониторинга состояния трансмиссии в целом и необходимого перевода трактора при превышении их на 4–5 дБ для работы при меньших нагрузках. Проведенные в ОАО «Плещеницлес» испытания трелевочных тракторов ТТР-401 установили повышение эксплуатационного ресурса упрочненных боросилицированием зубчатых колес в 1,4–1,8 раза по сравнению с цементированными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа условий работы трелевочных тракторов ТТР-401, изготовленных на базе тракторов Беларус, установлено, что при трелевке древесины в 1,8–2,8 раза возрастает нагруженность конических зубчатых передач переднего ведущего моста по сравнению с использованием трактора в других условиях работы, например, сельскохозяйственных. Это приводит к снижению их ресурса с 7500 до 3200–3500 моточасов вследствие контактных напряжений, достигающих при максимальных нагрузочных режимах работы 2000–2400 МПа. Вследствие недостаточно высокой для этих условий эксплуатации микротвердости поверхностей зубьев, составляющей 5500–6000 МПа, возникают пластические деформации, которые приводят к увеличению интенсивности их изнашивания [1, 4, 6, 12, 14, 16].

2. На основании анализа результатов исследований, проведенных с использованием разработанной математической модели напряженного состояния зубьев конической передачи переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401, учитывающей особенности их нагружения и геометрические параметры и проведенного расчета остаточных и суммарных напряжений по глубине упрочненного слоя после проведения ХТО, установлено, что для обеспечения заданного ресурса данных деталей необходимо обеспечить следующие параметры рабочих поверхностей зубьев: толщина упрочненного слоя 200–250 мкм и микротвердость 11000–12000 МПа. Установлено, что данные требования могут быть достигнуты использованием процесса боросилицирования с разработкой необходимых составов насыщения и выбором температуры и времени насыщения [3, 7].

3. В результате экспериментальных исследований остаточных напряжений сжатия, структуры и свойств упрочненных слоев от составов смесей и режимов боросилицирования разработан новый состав для боросилицирования, позволяющий обеспечить требуемые параметры упрочненного слоя и существенно в 2,8–3,2 раза по сравнению с обычным борированием снизить его микрохрупкость, которая оценивалась напряжениями скола. Состав содержит следующие компоненты: 71% карбида бора, 25% кристаллического кремния, 2% натрия борфтористого, 2% магния фтористого. На основании проведенных экспериментальных исследований состава насыщения определены рациональные параметры процесса упрочнения: температура 920–950°С и время насыщения 3–3,5 ч. [2, 5, 15, 19, 20].

4. На основании анализа результатов проведенных испытаний на износостойкость и усталостную прочность упрочненных слоев установлено, что боросилицирование с применяемыми параметрами упрочненного слоя обеспечило повышение предела выносливости σ_{-1} образцов по сравнению с улучшенными и закаленными ТВЧ в 1,4–1,9 раза, по сравнению с цементированными в 1,6–1,7 раза, по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза, что позволило при боросилицировании увеличить допускаемые контактные напряжения и допускаемые напряжения при изгибе по сравнению с цементацией соответственно в 1,45 и 1,4 раза. Разработанный состав насыщения при проведении сравнительных стендовых испытаний обеспечил повышение износостойкости упрочненного боросилицирование зубчатых колес в 2,5–2,7 раза по сравнению с цементированными, а также преобладание наименее интенсивных видов изнашивания и отсутствие заедания, задиров и пластических деформаций [8, 9, 10, 11, 13, 17, 18].

5. Разработана методика расчета интенсивности изнашивания контактных поверхностей зубчатых колес, включающая в себя определение остаточных и суммарных напряжений по глубине упрочненного слоя после проведения ХТО, а также поверхностной микротвердости зубьев. Погрешность при осуществлении расчетов составляет 5–8%, что подтверждено результатами проведенных сравнительных испытаний упрочненных зубчатых колес.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная методика расчета рациональных параметров упрочненного слоя поверхности зубьев конической передачи переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401 с учетом влияния остаточных напряжений сжатия и состав (ТУ ВУ № 100354659.082–2009) для поверхностного упрочнения прошли апробацию и производственные испытания в ОАО «Плещеницлес» и ГЛХУ «Слуцкий лесхоз», а также применяются в учебном процессе УО «Белорусский государственный технологический университет».

Реализация полученных результатов исследований поверхностного упрочнения при испытаниях в ОАО «Плещеницлес» обеспечила увеличение в 1,4–1,8 раза эксплуатационного ресурса конических зубчатых передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401, в ГЛХУ «Слуцкий лесхоз» в 1,5–2,3 раза за счет снижения их износа и усталостных контактных повреждений. Экономический эффект от внедрения результатов работы составил для предприятия ОАО «Плещеницлес» 14 692 тыс. руб. в 2008 г. Полученные результаты работы могут быть использованы для определения рациональных параметров упрочненного слоя широкой номенклатуры зубчатых колес, работающих в условиях интенсивного изнашивания и динамического нагружения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК

1. Симанович, В.А. Особенности эксплуатационных режимов нагружения лесных агрегатных машин / В.А. Симанович, М.Н. Пищов, А.И. Смеян // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 77–78.
2. Бельский, С.Е. Определение оптимальных параметров процесса борирования деталей лесных машин / С.Е. Бельский, А.И. Сурус, М.Н. Пищов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 267–270.
3. Пищов, М.Н. Методика упрочнения тяжело нагруженных деталей трансмиссии трелевочных тракторов / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский, А.И. Сурус // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 283–287.
4. Симанович, В.А. Эксплуатационная оценка работы колесных лесных агрегатных машин / В.А. Симанович, М.Н. Пищов, А.И. Смеян // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 92–95.
5. Ситкевич, М.В. Влияние комплексного боридного упрочнения на структуру и свойства поверхностных слоев сталей для изготовления деталей зубчатых передач трелевочных лесных машин / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Литье и металлургия. – 2008. – С. 140–146.
6. Пищов, М.Н. Исследование условий эксплуатации и динамической нагруженности деталей трансмиссии трелевочных тракторов / М.Н. Пищов, В.А. Симанович, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 113–115.
7. Макаревич, С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов / С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 327–330.
8. Пищов, М.Н. Влияние комплексного борирования на характеристики упрочненных зубчатых колес при проведении стендовых испытаний / М.Н. Пищов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 322–326.
9. Vplyv technologických parametrov difúzneho nasycovania z taveniny solí na cyklickú pevnosť a oteruvzdornosť ocele 40Ch / A.S. Chauš, S.E. Beľskij, A.I. Surus, M.N. Piščov // In Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. – Bratislava, 2006. – č. 20. – s. 65–69.

Статьи в научных сборниках

10. Пищов, М.Н. Изучение усталостной долговечности сталей 25ХГТ и 40Х, упрочненных комплексным борированием / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Проблеми і задачі освіти і науки: зб. наук. праць ЗНТУ. – Запоріжжя, 2009. – Вып. 1. – С. 40–46.

Материалы научных конференций и тезисы докладов

11. Бельский, С.Е. Влияние структуры борированного слоя на работоспособность зубчатых передач / С.Е. Бельский, М.Н. Пищов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2007 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. Ч. 1. – С. 38–39.

12. Пищов, М.Н. Анализ причин разрушения деталей трансмиссий лесотранспортных машин / М.Н. Пищов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы VII Междунар. межвузовской науч.-техн. конф., Гомель, 2007 г. – Гомель: ГГТУ им. Сухого, 2007. – С. 38–41.

13. Пищов, М.Н. Кинетика и особенности изнашивания борсодержащих слоев / М.Н. Пищов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2007 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. Ч. 1. – С. 62–63.

14. Пищов, М.Н. Причины разрушения и возможность повышения долговечности конической передачи переднего ведущего моста трелевочного трактора / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Наука и инновации ВУЗов – производству: взаимодействие, эффективность, перспективы: сборник статей и тезисов науч.-практ. семинара, Минск, 22–23 мая 2007 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: В.М. Анищик [и др.]. – Минск, 2008. – С. 88–89.

15. Ситкевич, М.В. Структура и свойства поверхностных слоев зубчатых передач, упрочненных комплексным борированием / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // 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. Ч. 2. – С. 346–353.

16. Симанович, В.А. Методика определения динамической нагруженности колесных трелевочных тракторов / В.А. Симанович, С.Е. Бельский, М.Н. Пищов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апреля 2008 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. Ч. 3. – С. 80–81.

17. Пищов, М.Н. Исследование износостойкости деталей трансмиссии трелевочного трактора, упрочненных комплексным борированием / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский, В.А. Симанович // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2009 г. Ч. 3 – С. 115–121.

18. Пищов, М.Н. Кинетика изнашивания деталей трансмиссии лесных машин, упрочненных комплексным борированием / М.Н. Пищов // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных конструкционных материалов и сплавов: материалы Междунар. науч. конф., Москва, 2009. – М., 2009. – С. 179–187.

Патенты:

19. Состав для борирования металлов: пат. 11380 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 8 / 00 / С.Е. Бельский, М.Н. Пищов, А.И. Сурус, В.А. Симанович, С.Н. Пищов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20061174; заявл. 23.11.2006; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2008. – № 6. – С. 118.

20. Состав для термического упрочнения стальных изделий: пат. 11558 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 8 / 00 / С.Е. Бельский, М.Н. Пищов, А.И. Сурус, В.А. Симанович, М.Н. Пищов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20071429; заявл. 23.11.2007; опубл. 27.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 99.

Репозиторий БНТУ

РЭЗІЮМЭ
Пішчоў Міхаіл Мікалаевіч

Метады разліку і забеспячэнне рацыянальных параметраў умацаванага борасіліцыраваннем пласта зубчастых колаў пярэдняга вядучага маста тралёвачных трактароў

Ключавыя словы: зубчастыя перадачы, метадыкі разліку, павярхоўнае ўмацаванне, напружанне, знос, выпрабаванні.

Мэта работы: распрацоўка метадаў разліку і забеспячэння рацыянальных параметраў умацаванага пласта зубчастых колаў пярэдняга вядучага маста тралёвачных трактароў ТТР-401 з улікам умоў іх працы для павышэння рэсурсу.

Метады даследавання і апаратура: ужываліся метады разліку напружанага стану і супраціўлення зносу павярхоўнага пласта зубчастых колаў і праводзіліся даследаванні з выкарыстаннем сучаснай апаратуры для рэгістрацыі і апрацоўкі эксперыментальных даных.

Навуковая навізна атрыманых вынікаў: распрацавана тэарэтычная мадэль напружанага стану зубоў канічных перадач пярэдняга вядучага маста тралёвачных трактароў ТТР-401, якая ўлічвае асаблівасці іх нагружэння пры тралёўцы драўніны і дазваляе вызначыць патрабаванні да умацаваных працоўных паверхняў зубоў, якія забяспечваюць неабходны рэсурс дадзеных дэталей. Упершыню тэарэтычна разлічаны астаткавыя і падсумоўваючыя напружанні пры рэалізацыі розных працэсаў хіміка-тэрмічнай апрацоўкі (ХТА), абгрунтавана мэтазгоднасць выкарыстання працэсаў барыравання і борасіліцыравання. Распрацаваны і запатэнтаваны склад для борасіліцыравання, які дазваляе забяспечыць неабходную таўшчыню умацаванага пласта (200–250 мкм) пры мікрацвёрдасці 11000–12000 МПа і ў 2,8–3,2 разу ў параўнанні з барыраваннем знізіць яго мікракрохкасць. На падставе даследаванняў эксплуатацыйных характарыстык паверхневых пластоў, атрыманых цэментаваннем, барыраваннем і борасіліцыраваннем, вызначаны дапушчальныя кантактныя напружанні і дапушчальныя напружанні пры выгіне для зубчастых колаў, якія пацвярджаюць магчымасць выкарыстання борасіліцыравання для ўмацавання разгледжанай перадачы. Прапанавана метадыка разліку супраціўлення зносу ўмацаваных зубчастых колаў, якая ўлічвае ўплыў астаткавых напружанняў пасля ХТА.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў мэтазгодна выкарыстаць пры выбары неабходнага спосабу ўмацавання зубчастых перадач трансмісіі тралёвачных трактароў.

Галіна прымянення: вынікі працы могуць быць скарыстаны для азначэння рацыянальных параметраў умацаванага пласта шырокай наменклатуры зубчастых колаў, якія працуюць ва ўмовах інтэнсіўнага зносу і дынамічнага нагружэння.

Пищов Михаил Николаевич

Методы расчета и обеспечения рациональных параметров упрочненного боросилицированием слоя зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов

Ключевые слова: зубчатые передачи, методики расчета, поверхностное упрочнение, напряжения, изнашивание, испытания.

Цель работы: разработка методов расчета и обеспечения рациональных параметров упрочненного слоя зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401 с учетом условий их работы для повышения ресурса.

Методы исследования и аппаратура: применялись методы расчета напряженного состояния и сопротивления изнашиванию поверхностного слоя зубчатых колес и проводились исследования с использованием современной аппаратуры для регистрации и обработки экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов: разработана теоретическая модель напряженного состояния зубьев конических передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401, учитывающая особенности их нагружения при трелевке древесины и позволяющая определить требования к упрочненным рабочим поверхностям зубьев, обеспечивающим необходимый ресурс данных деталей. Впервые теоретически рассчитаны остаточные и суммарные напряжения при реализации различных процессов химико-термической обработки (ХТО), обоснована целесообразность использования процессов борирования и боросилицирования. Разработан и запатентован состав для боросилицирования, позволяющий обеспечить необходимую толщину упрочненного слоя (200–250 мкм) при микротвердости 11000–12000 МПа и в 2,8–3,2 раза по сравнению с борированием снизить его микрохрупкость. На основании исследований эксплуатационных характеристик поверхностных слоев, полученных цементированием, борированием и боросилицированием, определены допускаемые контактные напряжения и допускаемые напряжения при изгибе для зубчатых колес, которые подтвердили возможность использования боросилицирования для упрочнения рассматриваемой передачи. Предложена методика расчета сопротивления изнашиванию упрочненных зубчатых колес, учитывающая влияние остаточных напряжений после ХТО.

Степень использования: результаты исследований целесообразно использовать при выборе необходимого способа упрочнения зубчатых передач трансмиссии трелевочных тракторов.

Область применения: результаты работы могут быть использованы для определения рациональных параметров упрочненного слоя широкой номенклатуры зубчатых колес, работающих в условиях интенсивного изнашивания и динамического нагружения.

SUMMARY

Calculation and design methods of rational characteristics of cog wheel layer reinforced with boron siliconizing in skidders front driving axle

Key words: train of gears, design procedures, surface hardening, tension, detri-
tion, tests.

The work purpose: the development of calculation and design methods of rational characteristics of strengthened cog wheel layer in front driving axle of TTR - 401 skidders in light of circumstances of their work for the increasing of their service life.

Analysis and technology: the calculation methods of tension and wear resistance of cogwheels surface were applied. Up-to-date technology was used for registering and processing of experimental data.

Scientific novelty of the results obtained: the theoretical model of bevel drive cog tension in front driving axle of TTR-401 skidders was worked out. This model takes into account the peculiarities of cogs loading while skidding logs and allows to determine the requirements for the hardened working surfaces of cogs, which supply the necessary level of their service life of the given components. For the first time, the residual and summing stresses were theoretically calculated, while chemicothermal processing being fulfilled. The use reasonability of boriding and boron siliconizing processes is validated. The chemical composition for boron siliconizing is developed and patented. It permits to provide the necessary thickness of the impregnated layer (200–250 micrometers) with the microhardness 11000–12000 MPa and to decrease its micro fragility in 2,8–3,2 times in comparison with boroning. On the basis of the operation characteristics recourses of surface layers obtained by boroning, boron siliconizing and carboning, acceptable contact tensions and tensions under bending of cog wheels were defined. These results confirmed the possibility of the boron siliconizing process for the hardening of the transfer being considered. The design procedure of the hardened cog wheels wear resistance, considering the influence residual tensions after chemicothermal processing was suggested.

Efficiency: test results are reasonable to use while selecting the necessary way for hardening train of gears transmission of skidders.

Field of application: the results of this work can be used for the rational characteristics determining of the hardened layer in different cog wheels working in the circumstances of intensive wear and dynamic loading.