



УДК 621.785.532

Поступила 06.07.2015

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО БОРИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРОЧНЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

EFFECT OF COMPLEX BORATING ON THE CHARACTERISTICS OF HARDENING GEARS IN BENCH TESTS

М. Н. ПИЦОВ, С. Е. БЕЛЬСКИЙ, Э. П. АНДРЕЙКОВЕЦ, М. М. ЖИШКЕВИЧ, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

M. N. PISCHOV, S. E. BELSKIY, E. P. ANDREYKOVETS, M. M. ZHISHKEVICH, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

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. Так, было установлено, что для переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР - 401 производства МТЗ характерна пластическая деформация зубьев конической передачи, которая приводит к необходимости проведения внеплановых ремонтов или ее замены. Для того чтобы решить данную проблему, было предложено дополнительно ввести в состав упрочняющей смеси кремний, который при диффузионном насыщении создает менее хрупкие фазы. Это позволяет избежать охрупчивания упрочненного слоя и способствует его лучшей приработке.

The paper dwells upon the necessity to increase the operating life of the toothed gearing of skidder transmission by means of strengthening by complex borating. The methodology of comparative testing of tooth gear as well as the stand construction are described. The causes of destruction of tooth gear surface strengthened by different methods have been determined.

Ключевые слова. *Износостойкость, трелевочный трактор, зубья, коническая передача, боросилицирование, испытания, трансмиссия.*

Keywords. *Durability, skidder, teeth, conical transmission borosilitsirovanie, testing, transmission.*

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. Так, было установлено, что для переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР - 401 производства МТЗ характерна пластическая деформация зубьев конической передачи, которая приводит к необходимости проведения внеплановых ремонтов или ее замены [1].

Процесс борирования позволяет получить твердость и износостойкость выше, чем при проведении базовой цементации и азотирования. Однако основным недостатком боридных слоев прежде всего является их повышенная хрупкость. Доказано, что при высоких нагрузках происходит выкрашивание упрочненного борированного слоя, которое приводит к потере работоспособности детали в целом. Для того чтобы решить данную проблему, было предложено дополнительно ввести в состав упрочняющей смеси кремний, который при диффузионном насыщении создает менее хрупкие фазы. Это позволяет избежать охрупчивания упрочненного слоя и способствует его лучшей приработке [2].

На основании лабораторных исследований износостойкости, а также усталостных испытаний упрочненных образцов был разработан состав для проведения комплексного борирования, оптимизированы температурно-временные параметры процесса и определена необходимая толщина упрочненного слоя 100–120 мкм. Эти данные подтверждаются и расчетами на контактную прочность теоретической моде-

ли напряженного состояния зубьев при действии максимальных нагрузок с учетом остаточных напряжений. Однако для практической реализации нового процесса упрочнения деталей трансмиссии трелевочных тракторов необходимо проведение сравнительных стендовых испытаний зубчатых колес, упрочненных цементацией и комплексным борированием.

Методики проведения стендовых испытаний. Сравнительные испытания были проведены на стенде с замкнутым силовым контуром СИ-4. На практике в основном для проведения ресурсных испытаний зубчатых передач используются стенды, работающие по схеме с замкнутым силовым контуром или схеме с циркулирующей мощностью, при которой испытываемые зубчатые колеса или целые узлы включаются в замкнутую силовую цепь, нагружаемую с помощью различных устройств, а приводной электродвигатель служит для приведения зубчатых колес во вращение. Такие стенды просты конструктивно, так как в них отсутствует дополнительное тормозное устройство, и весьма экономичны, поскольку мощность привода расходуется только на преодоление внутренних потерь в замкнутом силовом контуре. При реализации одинакового крутящего момента на испытываемых зубчатых колесах для привода стенда, работающего по схеме двигатель – зубчатая передача – тормозное устройство, расход энергии в 6–10 раз больше, чем для привода стенда, работающего по схеме замкнутого силового контура.

Принципиальная схема стенда СИ-4 для ресурсных испытаний зубчатых колес показана на рис. 1. Стенд состоит из двух редукторов 1 и 3, зубчатые колеса которых и служат объектами испытаний. Редуктор 1 может свободно качаться вокруг оси 2. Обе пары зубчатых колес соединены в замкнутый контур карданными валами 2 и 6. Редуктор 3 жестко закреплен болтами на станине. Редуктор 1 является нагрузочным. С помощью закрепленного на нем рычага 7 и груза 8 происходит поворот корпуса редуктора 1 на некоторый угол относительно оси вала 2 до тех пор, пока нагружающий момент не будет уравновешен силой упругой деформации закручивающихся осей замкнутого контура.

При этом замкнутый контур оказывается нагруженным статическим моментом, определяемым длиной плеча L , а также суммарным действием груза 8 и части массы самого редуктора.

Из условия равновесия моментов в замкнутом контуре следует:

$$P = \frac{M(R_1 + R_2)}{LR_2} - P_0 = \frac{M(1+i)}{iL} - P_0, \quad (1)$$

где P – величина требуемого груза для создания расчетного момента; M – расчетный момент для загрузки испытываемой пары зубчатых колес; R_1 и R_2 – радиусы начальной окружности испытываемых зубчатых колес; L – плечо рычага; P_0 – составляющая масса редуктора, приведенная к точке приложения груза P ; $i = R_2/R_1$ – передаточное отношение испытываемой пары зубчатых колес.

При наладке стенда зубчатые колеса и карданные валы монтируются таким образом, чтобы редуктор 1

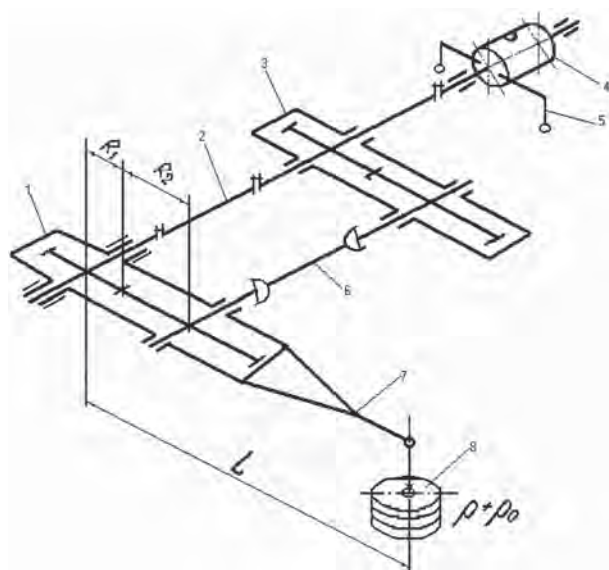


Рис. 1. Схема стенда для испытания зубчатых колес: 1, 3 – редукторы с испытываемыми зубчатыми колесами; 2, 6 – соединительные валы; 4 – электродвигатель; 5 – устройство измерения КПД стенда; 7 – рычаг; 8 – груз

занимал строго горизонтальное положение. После нагружения стенда выбранным моментом путем установки на рычаг груза, величина которого рассчитывается по формуле (1), проводят испытания зубчатых передач. Стабильность загрузки стенда во время его работы контролируется постоянством горизонтального положения нагрузочного рычага. Вращение зубчатых колес в замкнутом контуре осуществляется с помощью электродвигателя 4 постоянного тока, позволяющего плавно установить необходимое число оборотов испытываемых зубчатых колес. Статор электродвигателя установлен в подшипниках (т. е. выполнен балансирным) для контроля реализуемого вращающего момента и точных измерений изменений КПД стенда. Электромотор 4 соединяется с редуктором 3 упругой муфтой. Общий вид стенда показан на рис. 2.

Испытывали зубчатые колеса с модулем $m = 3$ мм и числом зубьев $z = 20$. Испытываемые колеса смазывали трансмиссионным маслом, поступающим под давлением из масляной станции в зону зацепления

и по стоку возвращающимся в масляную станцию. Возможно также осуществление смазки по схеме окунания в масляную ванну. Масло охлаждается водой, протекающей через змеевики, расположенные в масляной станции.

Сравнительные испытания проводили при частоте вращения $n = 1500$ об/мин и моменте нагружения $M = 100$ Н·м до начала появления существенной деформации на поверхности зубьев цементированных колес. Этому соответствует $1,8 \cdot 10^7$ циклов нагружения.

Для определения величины износа в ходе проведения сравнительных испытаний было предложено некоторое смещение зубьев (рис. 3), которое повышает нагрузку на зуб, что позволяет приблизить параметры испытаний на стенде с режимом работы трелевочного трактора.

Также при проведении сравнительных испытаний периодически визуально контролировали состояние рабочих поверхностей зубьев и с помощью пьезоакселерометра и виброанализатора «Кварц» – общий уровень и амплитудно-частотные спектры виброускорений на подшипниковых узлах испытательных редукторов.

Результаты испытаний цементированных зубчатых колес. Основной задачей при проведении сравнительных испытаний было установление преобладающих механизмов разрушения поверхности зубьев (изнашивание, пластическая деформация поверхности, усталостное выкрашивание, заедание).

Установлено, что заедание имеет место в тяжело нагруженных зубчатых передачах, которые работают при высоких динамических нагрузках.

Изнашивание при заедании является наиболее опасным видом разрушения поверхностей, которое приводит к нарушению зацепления зубчатых колес и потере их работоспособности. Схватывание и глубинное вырывание материала при заедании способствуют переносу материала с одной поверхности трения на другую, что приводит к образованию неровностей на поверхности зуба (рис. 4, а). Заедание главным образом проявляется в виде глубоких борозд, выровов, наростов, рисок и т. д.

В ходе проведения сравнительных испытаний на поверхности зубьев цементированных колес также было установлено наличие задиров и пластической деформации (рис. 4, б – г). Основная причина возникновения этого – недостаточная твердость поверхности цементированных зубчатых колес, что подтверждается расчетами при моделировании напряженного состояния зубчатых колес. После окончания

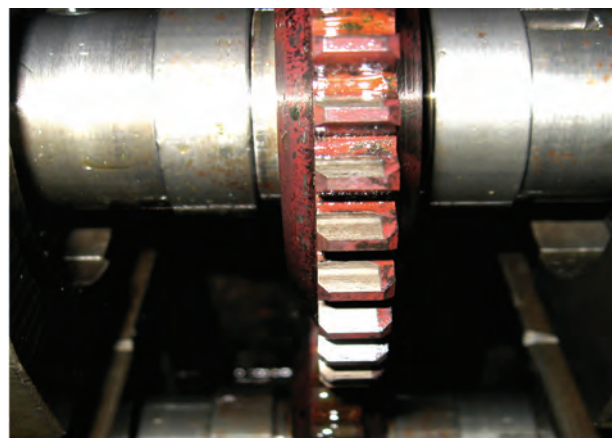


Рис. 3. Смещение зубчатых колес при проведении сравнительных испытаний

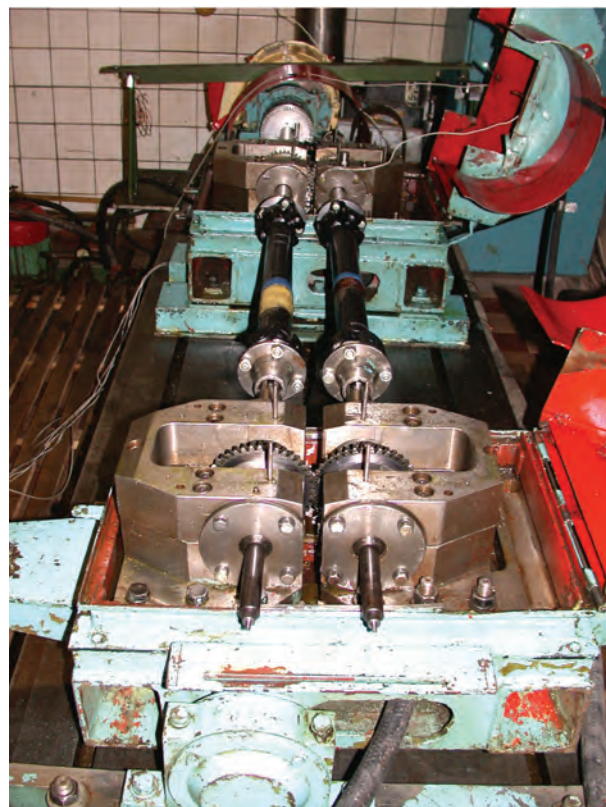


Рис. 2. Стенд с замкнутым силовым контуром для испытаний зубчатых передач СИ-4

сравнительных испытаний на поверхности зубьев цементированных колес было обнаружено и выкрашивание. Доказано, что усталостное выкрашивание поверхности цементированных зубьев происходит при максимальных пиковых нагрузках. На рис. 5 показаны поверхности зубьев цементированных зубчатых колес с усталостным выкрашиванием после $1,8 \cdot 10^7$ циклов нагружения при нагрузке $M = 100$ Н·м.

Возникновению микротрещин при циклических контактных воздействиях способствует влияние концентраторов напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений относятся дефекты в виде царапин, вмятин, рисок, прижогов и т. д. Существуют еще и подповерхностные концентраторы напряжений – неметаллические включения, микропоры, рако-

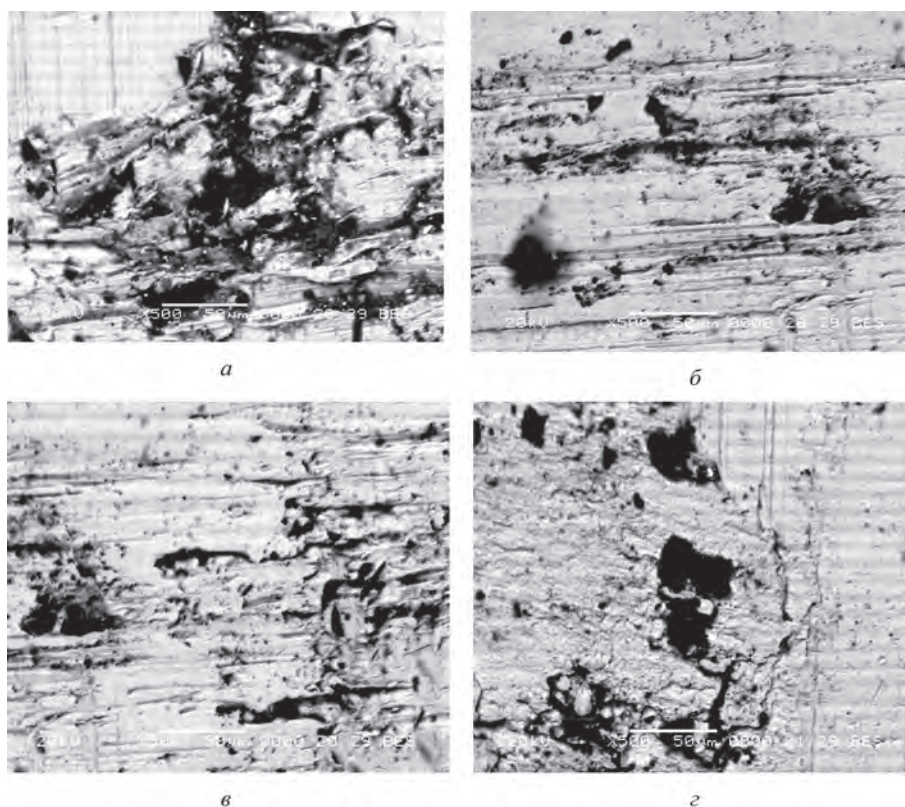


Рис. 4. Изношенные поверхности цементированных зубчатых колес после $1,8 \cdot 10^7$ циклов нагружения при моменте $M = 100$ Н·м. $\times 500$

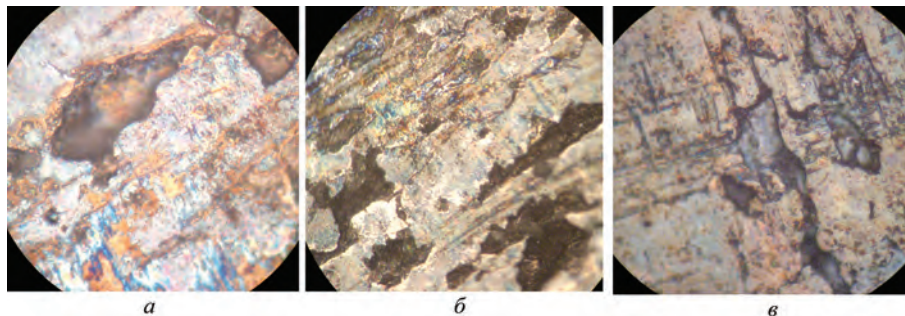


Рис. 5. Усталостное выкрашивание поверхности цементированных зубчатых колес после $1,8 \cdot 10^7$ циклов нагружения. $\times 1000$

вины, карбиды. Большое влияние оказывают значения максимальных касательных напряжений, которые главным образом возникают при резком трогании трелевочного трактора либо при наезде на препятствие. Доказано, что первичная трещина чаще возникает на поверхности контакта, но может зарождаться и в приповерхностных слоях материала.

Установлено, что скорость развития усталостного изнашивания зависит от многих факторов: механических свойств материала, физико-механических свойств поверхности, качества обработки поверхности, остаточных напряжений в приповерхностных и поверхностных слоях материалов, от концентрации напряжений и степени приработки, частоты изменения напряжений, уровня температуры, химической активности окружающей среды.

Установлено, что при проведении упрочнения зубчатых колес основной задачей является выбор необходимой толщины упрочненного слоя и крепкая связь его с основным металлом. В некоторых случаях при высокой толщине упрочненного слоя (150–280 мкм) происходит его выкрашивание с поверхности зубьев [3].

Результаты испытаний зубчатых колес, упрочненных комплексным борированием. При исследовании упрочненных комплексным борированием зубчатых колес на поверхности зубьев было выявлено наличие двух фаз. Первая фаза FeB, перенасыщенная бором, обладает высокой твердостью (1500–

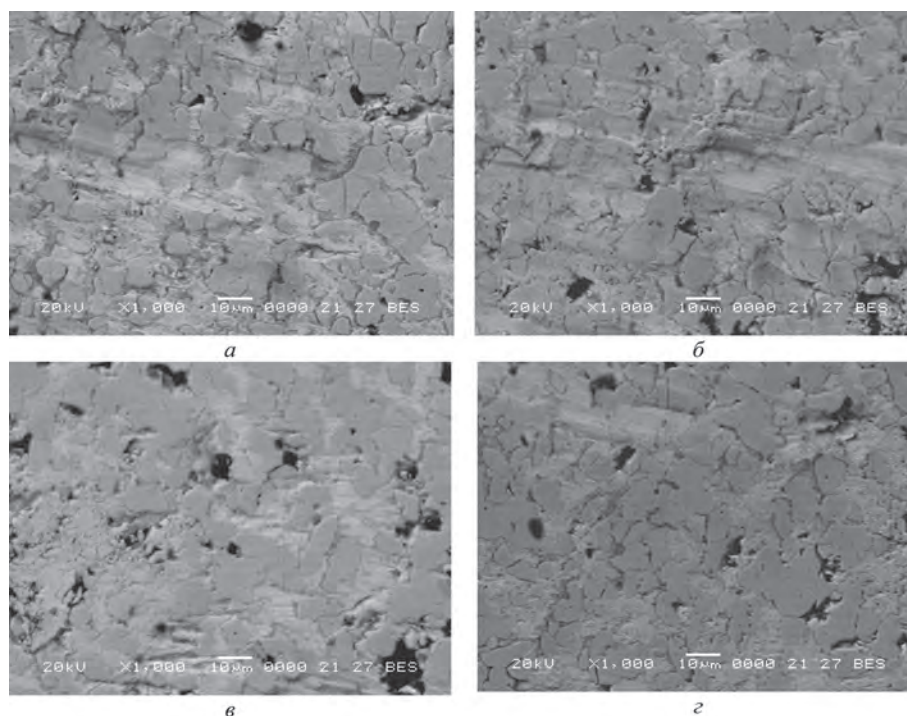


Рис. 6. Изношенные поверхности при упрочнении комплексным борированием зубчатых колес после $1,8 \cdot 10^7$ циклов нагружения. $\times 1000$

2000 HV) по сравнению со второй Fe_2B . Данная фаза (Fe_2B), обладая меньшей твердостью, является и менее хрупкой.

Наличие на поверхности зубьев двух фаз приводит к снижению общего охрупчивания упрочненного слоя и препятствует его выкрашиванию с поверхности зубьев. Также установлено, что с добавкой в состав упрочняющей смеси кремния лучше происходит приработка зубчатых колес и повышается возможность их работы при высоких динамических нагрузках.

После проведения сравнительных испытаний упрочненных зубчатых колес было установлено наличие на поверхности зубьев небольших вмятин, которые разместились на менее твердой фазе Fe_2B (рис. 6, а – б). Наличие на поверхности зубьев менее твердой фазы способствует лучшей приработке зубчатых колес и повышает их ресурс. При проведении сравнительных испытаний также было показа-

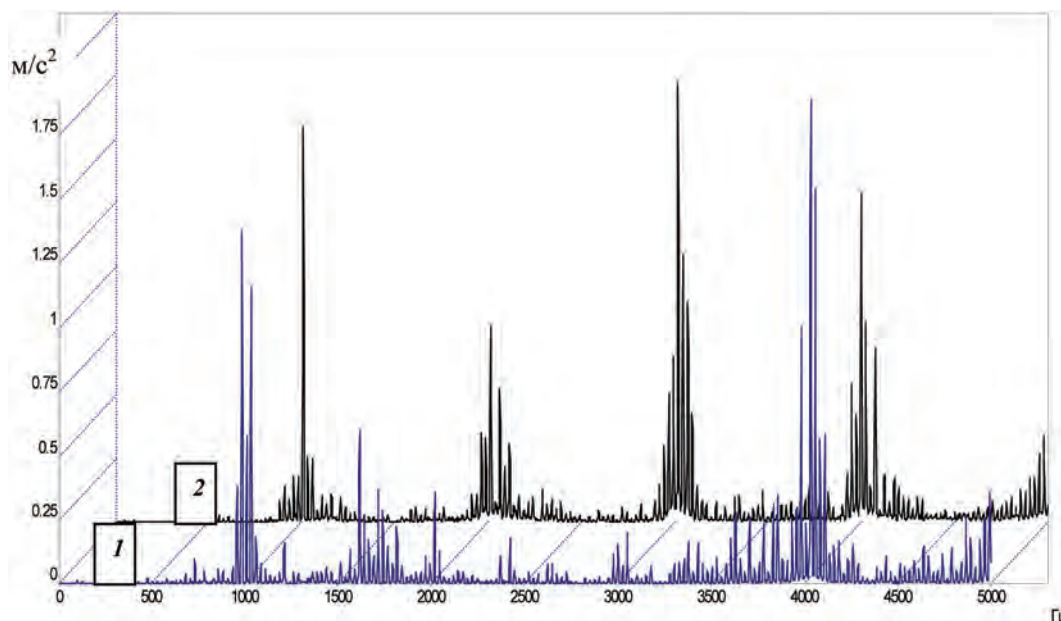


Рис. 7. Сравнение спектров виброускорений цементованной (1) и упрочненной комплексным борированием (2) пар зубчатых колес

но, что на зубчатых колесах, упрочненных комплексным борированием пластической деформации, выкрашивание и задиры на поверхности зубьев не наблюдаются (рис. 6, в-г). Прежде всего это объясняется высокой твердостью поверхности упрочненного слоя.

Выводы

По данным визуального анализа пятна контакта с использованием микроскопов МБС-9 и JEOL, установлено, что на рабочих поверхностях зубьев, упрочненных цементацией, имеют место явно выраженные следы контактного взаимодействия с образованием мелких царапин, вмятин и задиры. Отмечено развитие процесса усталостного выкрашивания поверхности зубьев, а в некоторых случаях и заедание.

На рабочих поверхностях зубьев, упрочненных комплексным борированием, видимых изменений состояния упрочненного поверхностного слоя не установлено.

Сравнительный анализ зарегистрированных уровней и амплитудно-частотных спектров виброускорений (рис. 7), полученных в ходе проведения испытаний зубчатых пар, свидетельствует об отсутствии существенных различий рассматриваемых характеристик.

Результаты проведенных сравнительных испытаний на износ зубчатых колес подтверждают возможность упрочнения комплексным борированием с использованием разработанного состава [4] рабочих поверхностей зубьев деталей трансмиссии трелевочных тракторов для повышения их износостойкости.

Литература

1. 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. 2008. С. 88–89.
2. Григоров П. К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П. К. Григоров, А. И. Катханов // Повышение надежности и долговечности деталей машин. 1972. Вып. 16. С. 97–98.
3. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск, 1981.
4. Пат. 11380, 09.05.2008. Состав для борирования металлов / С. Е. Бельский, М. Н. Пищов, А. И. Сурус, В. А. Симанович, С. Н. Пищов; заявитель Белорусский государственный технологический университет. № а20061174; заявл. 23.11.2006; опублик. 05.09.2008.

References

1. Pischov M. N., Belskiy S. E. Prichiny razrusheniya i vozmozhnost povysheniya dolgovechnosti konicheskoy peredachi perednego veduschego mosta trelevochnogo traktora [The reasons for the destruction and the possibility of increasing the durability of bevel gear of the front axle skidder]. *Nauka i innovacii vuzov – proizvodstvu: vzaimodejstvie, effektivnost, perspektivy – Science and Innovation universities – production: interaction, efficiency, prospects*. 2008. pp. 88–89.
2. Grigorov P. K., Kathanov A. I. Metodika opredeleniya hrupkosti borirovannogo sloya [Methods of determining the fragility of borated layer]. *Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti detalej mashin – Improving the reliability and durability of machine parts*. 1972, vyp. 16, pp. 97–98.
3. Voroshnin L. G. *Borirovanie promyshlennykh stalej i chugunov* [Boronization industrial steel and cast iron]. Minsk, 1981.
4. Pat. 11380, 09.05.2008. *Sostav dlya borirovaniya metallov* [Composition Boriding metals]. S. E. Belskiy, M. N. Pischov, A. I. Surus, V. A. Simanovich, S. N. Pischov.

Сведения об авторах

Пищов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, Белорусский государственный технологический университет. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. Тел. +375-29-570-72-76.

Бельский Сергей Евграфович, канд. техн. наук, Белорусский государственный технологический университет. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а, тел. +375-29-110-17-93.

Information about the authors

Pischov Mikhail, Ph. D in Engineering, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, Sverdlova str., 13a. Tel. +375-29-110-17-93.

Belsky Sergey, Ph. D in Engineering, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, Sverdlova str., 13a. Tel. +375-29-570-72-76.