

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

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.

Введение. 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 внеплавных 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 модели 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.

1. 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 больший, 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 являются 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 на станине с помощью болтов. Редуктор 1 является загрузочным. 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 веса 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 веса редуктора, приведенная к точке приложения груза P ; $i = R_2/R_1$ – передаточное отношение испытываемой пары зубчатых колес.

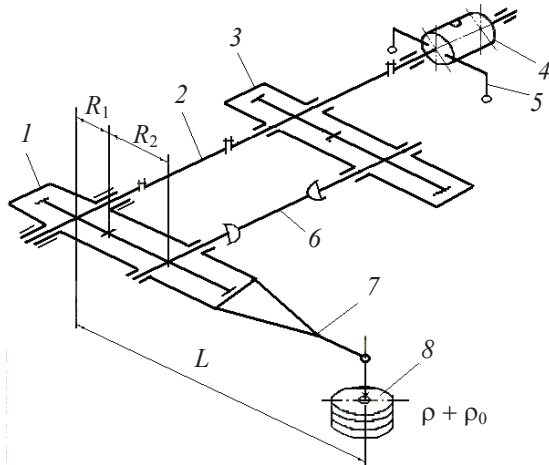


Рис. 1. Схема стенда для испытания зубчатых колес: 1 и 3 – редукторы с испытываемыми зубчатыми колесами; 2 и 6 – соединительные валы; 4 – электродвигатель; 5 – устройство измерения КПД стенда; 7 – рычаг; 8 – груз

При наладке стенда зубчатые колеса и карданные валы монтируются таким образом, чтобы редуктор 1 занимал строго горизонтальное положение. После нагружения стенда выбранным моментом путем установки на рычаг груза, величина которого рассчитывается по формуле (1), ведут 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 приведен на рис. 2.

Испытывались зубчатые колеса с модулем $m = 3$ мм и числом зубьев $z = 20$. Испытываемые колеса смазывались 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 охлаждает-

ся водой, протекающей через змеевики, расположенные в масляной станции.



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

Сравнительные испытания проводились при частоте вращения $n = 1500$ об/мин и моменте нагружения $M = 100$ Нм до начала появления существенной деформации на поверхности зубьев цементованных колес. Этому соответствует $1,8 \times 10^7$ циклов нагружения.

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

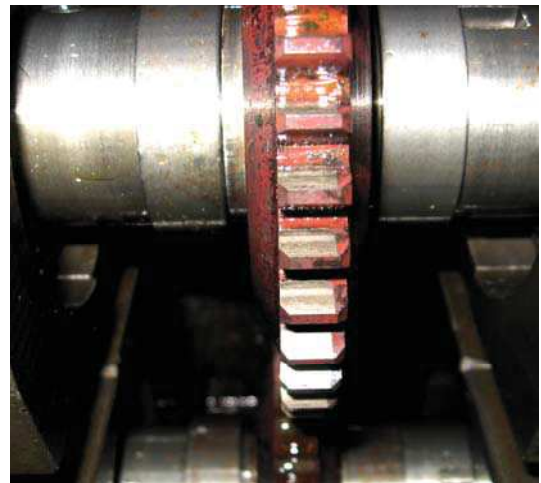


Рис. 3. Смещение зубчатых колес при проведении сравнительных испытаний

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

2. Результаты испытаний цементованных 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.

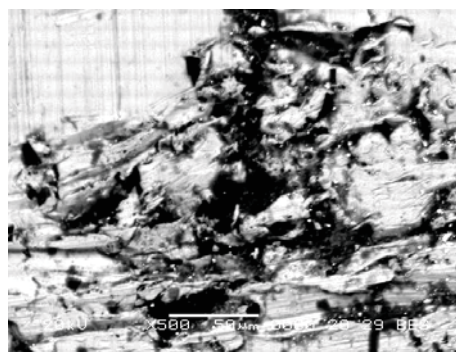
Изнашивание при заедании является наиболее опасным видом разрушения поверхностей, которое приводит к нарушению зацепления зубчатых колес и потере их работоспособности. Схватывание и глубинное вырывание материала при заедании способствует переносу материала с одной поверхности трения на другую, что приводит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

Также в ходе проведения сравнительных испытаний на поверхности зубьев цементованных колес было установлено наличие задиров и пластической деформации (рис. 4, б – з). Основной причиной возникновения этого является недостаточная твердость поверхности цементованных зубчатых колес, что подтверждается расчетами при моделировании напряженного состояния зубчатых колес.

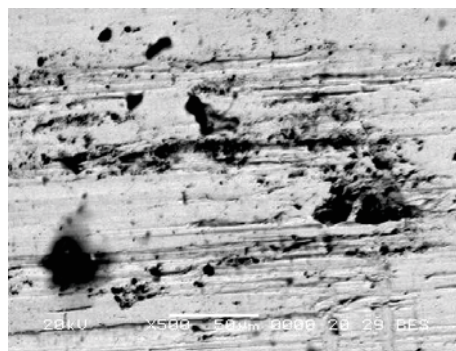
После окончания сравнительных испытаний на поверхности зубьев цементованных колес также было обнаружено выкрашивание. Доказано, что усталостное выкрашивание поверхности цементованных зубьев происходит при максимальных пиковых нагрузках. На рис. 5 представлены поверхности зубьев цементованных зубчатых колес с усталостным выкрашиванием после $1,8 \times 10^7$ циклов нагружения при нагрузке $M = 100$ Нм.

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, раковины, 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.



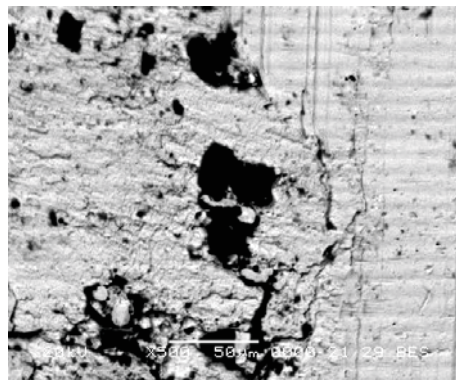
а



б

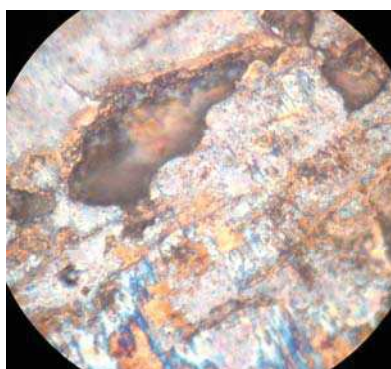


в

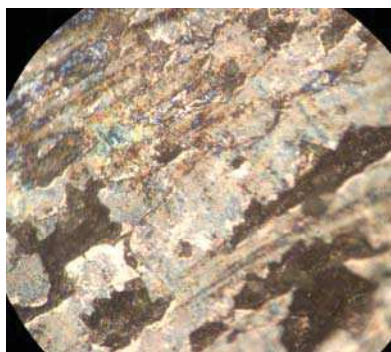


г

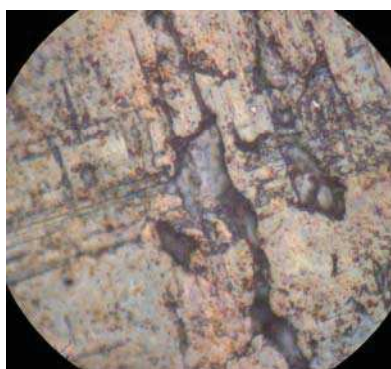
Рис. 4. Изношенные поверхности цементованных зубчатых колес после $1,8 \times 10^7$ циклов нагружения при моменте $M = 100$ Нм ($\times 500$)



a



б



в

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

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 глубины упрочненного слоя и крепкая связь его с основным металлом. В некоторых случаях при высокой глубине упрочненного слоя (150–280 мкм) происходит его выкрашивание с поверхности зубьев [3].

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 (1500–2000 HV) по сравнению со второй Fe₂B. Данная фаза (Fe₂B), 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 Fe₂B (рис. 6, *a – б*). Наличие на поверхности зубьев менее твердой фазы способствует лучшей приработке зубчатых колес и повышает их ресурс. Также при проведении сравнительных испытаний было показано, 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.

Закключение. 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 задигов. Также 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.

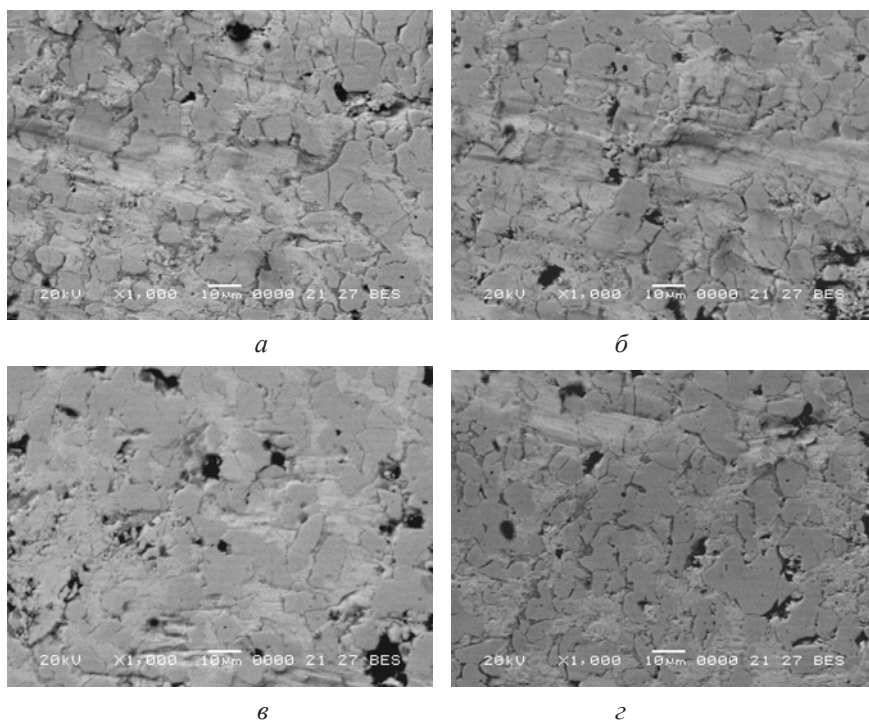


Рис. 6. Изношенные поверхности при упрочнении комплексным борированием зубчатых колес после $1,8 \times 10^7$ циклов нагружения ($\times 1000$)

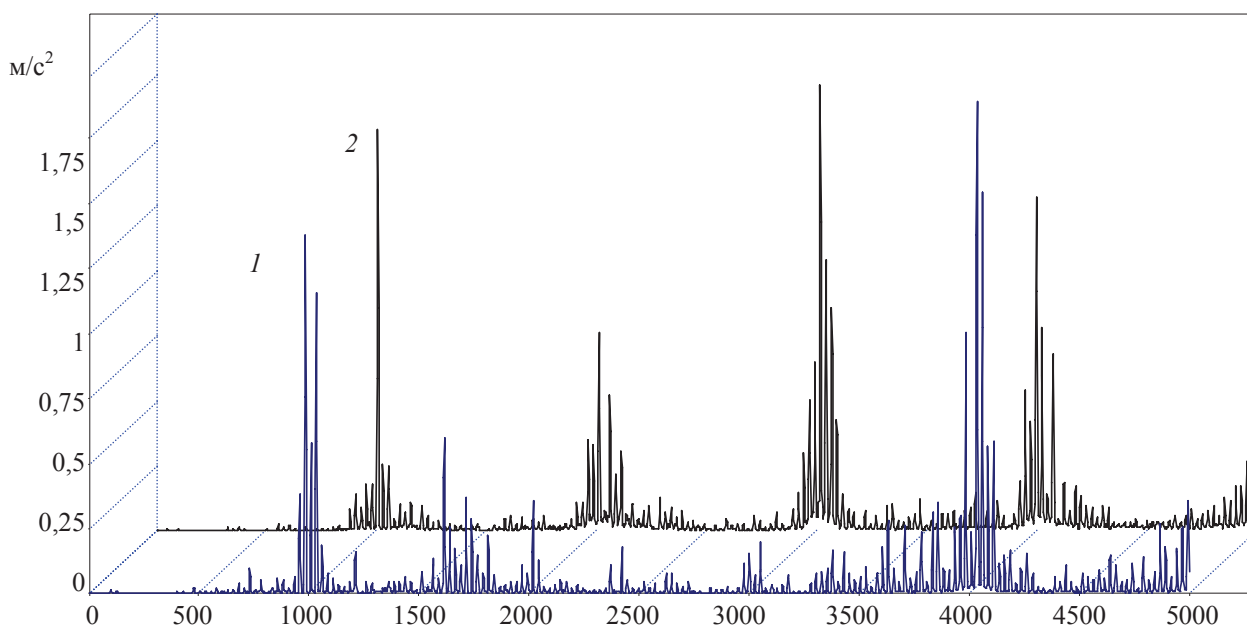


Рис. 7. Сравнение спектров виброускорений цементованной (1) и упрочненной комплексным борированием (2) пар зубчатых колес

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. – Минск, 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 / Л. Г. Ворошнин. – Минск, 1981.

4. Состав для борирования металлов: пат. 11380, 09.05.2008. / 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. 05.09.2008.