

УДК 621.785.532

**М. Н. Пищов**, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);  
**С. Е. Бельский**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);  
**А. И. Сурус**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

### ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье рассмотрена необходимость увеличения срока службы деталей зубчатых передач трелевочных тракторов путем упрочнения их комплексным борированием. Разработана методика проведения сравнительных стендовых испытаний на износ. Результаты сравнительных испытаний на износ зубчатых колес подтверждают возможность упрочнения комплексным борированием с использованием разработанного состава рабочих поверхностей зубьев деталей.

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. Results of comparative tests for wear of gears confirm the possibility of strengthening integrated borating using the developed structure of the working surfaces of the teeth parts.

**Введение.** Условия эксплуатации ряда сложнонагруженных деталей лесных машин характеризуются значительным трением, интенсивным износом на их рабочих поверхностях, а также вибрациями широкого амплитудно-частотного диапазона. В связи с этим возникает необходимость в их дополнительном упрочнении методами, позволяющими получать более высокую поверхностную твердость [1]. Для повышения износостойкости деталей машин, а также их восстановления при ремонте широко применяют различные виды поверхностного упрочнения: цементацию, азотирование, цианирование и др. В процессе упрочнения борированием при высокой температуре происходит диффузия бора в поверхностный слой зубьев на некоторую глубину  $h$ , мм. В результате зуб конической шестерни можно рассматривать состоящим из двух слоев: сердцевинного слоя из основного материала с модулем упругости  $E_c$ , МПа, и температурным коэффициентом линейного расширения  $\alpha_c$ , и поверхностного слоя толщиной  $h$ , мм, в пределах которого модуль упругости меняется от  $E_c$  на границе с сердцевинным слоем до  $E_n$ , МПа, на поверхности зуба, и аналогично температурный коэффициент линейного расширения меняется от  $\alpha_c$  до  $\alpha_n$ , град<sup>-1</sup>. В качестве температуры  $T_0$  для сталей, используемых в машиностроении, можно принять температуру 250–300°C, так как ниже этой температуры восстанавливаются стабильные физико-механические свойства.

**1. Методики проведения сравнительных 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, работаю-

щие 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.

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 охлаждается водой, протекающей через змеевики, расположенные в масляной станции. Для определения величины износа в ходе проведения сравнительных испытаний было предложено некоторое смещение зубьев. Данное смещение повышает нагрузку на зуб, что позволяет приблизить параметры испытаний на стенде с режимом работы трелевочного трактора.

**2. Основные результаты испытаний цементированных зубчатых колес.** Основной задачей при проведении сравнительных испы-

таний было установление преобладающих механизмов разрушения поверхности зубьев (изнашивание, пластическая деформация поверхности, усталостное выкрашивание, заедание). 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. 1). Заедание главным образом проявляется в виде глубоких борозд, вырвов, наростов, рисок и т. д.

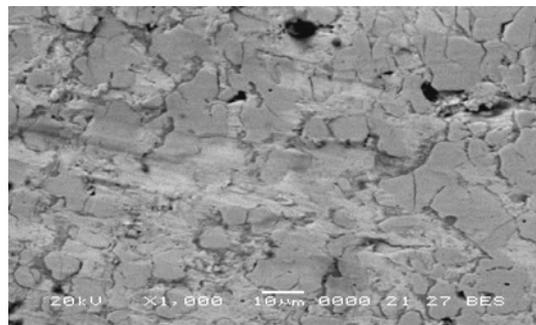


Рис. 1. Изношенные поверхности цементированных зубчатых колес после  $1,8 \times 10^7$  циклов нагружения при моменте  $M = 100$  Нм ( $\times 500$ )

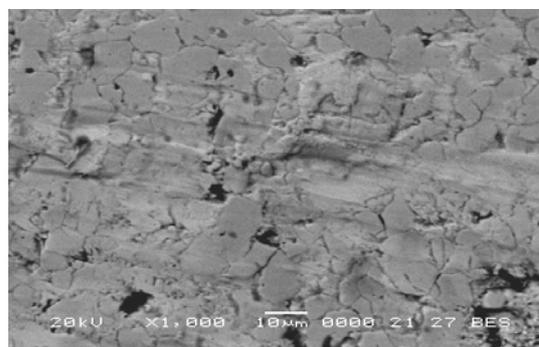
Также в ходе проведения сравнительных испытаний на поверхности зубьев цементованных колес было установлено наличие задиров и пластической деформации (рис. 1). Основной причиной возникновения этого является недостаточная твердость поверхности цементованных зубчатых колес, что подтверждается расчетами при моделировании напряженного состояния зубчатых колес.

**3. Основные 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  $Fe_2B$ . 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, находящихся на менее твердой фазе  $Fe_2B$  (рис. 2, а, б).



а



б

Рис. 2. Изношенные поверхности при упрочнении комплексным борированием зубчатых колес после  $1,8 \times 10^7$  циклов нагружения ( $\times 1000$ )

Наличие на поверхности зубьев менее твердой фазы способствует лучшей приработке зубчатых колес и повышает их ресурс.

**Заключение.** Результаты проведенных сравнительных испытаний на износ зубчатых колес подтверждают возможность упрочнения комплексным борированием с использованием разработанного состава [2] 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 – производство: взаимодействие, эффективность, перспективы. – Минск, 2008. – С. 88–89.

2. 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. – № а20061174; заявл. 23.11.2006; опубл. 05.09.2008.

Поступила 21.02.2013