

6. Murnane R. J., Levy F. The new division of labor: How computers are creating the next job market. – Princeton University Press, 2012.

7. Clark A., Ernst J. Computational modeling: Projects and innovations for technology education //INTED2010 Proceedings. – IATED, 2010. С. 2056-2067.

8. Clark A. C., Ernst J. V. STEM-Based Computational Modeling for Technology Education //Journal of Technology Studies. 2008. Т. 34. №.1.С. 20-27.

9. Аманов М. Э. Феномен мотивации при изучении иностранных языков как объект педагогического исследования //Проблемы современной науки и образования. 2017. №. 38 (120). С. 45-52.

10. Аманов М. Э. Эмоциональный эффект как фактор формирования мотивации в организации учебно-образовательного процесса //Вестник Сургутского государственного педагогического университета. 2020. №.4 (67). С. 21-30.

УДК 621.785.532

## **АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ИЗНАШИВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИХ УПРОЧНЕНИЯ**

### **ANALYSIS OF WEAR KINETICS OF STRUCTURAL STEEL AT DIFFERENT METHODS OF THEIR HARDENING**

**Пищов Михаил Николаевич**, кан. техн. наук, доцент,  
**Бельский Сергей Евграфович**, кан. техн. наук, доцент  
**Pishchov Mikhail Nikolaevich**, can. tech. Sciences, Associate Professor,  
**Belsky Sergey Evgrafovich**, Can. tech. Sciences, Associate Professor

*Белорусский государственный технологический университет  
Belarusian State Technological University*

**Аннотация:** В данной статье изучена кинетика изнашивания конструкционных сталей при различных способах их упрочнения. Испытывались образцы из конструкционных сталей 25ХГТ, 40Х и 45 прошедших улучшение с последующим поверхностным упрочнением методами борирования и боросилицирования по различным схемам. Сравнительная оценка износостойкости упрочненных методами борирования, боросилицирования и цементированных по заводской технологии поверхностных слоев полученных на образцах из различных сталей проводилась по потере массы при пути трения между измерениями 10 км. Установлено, что наибольшего значения износостойкости контактной поверхности достигается при проведении процессов борирования, а также боросилицирования.

**Abstract:** This article studies the wear kinetics of structural steels using various methods of their hardening. Samples of structural steels 25KhGT, 40Kh and 45 were tested and underwent improvement, followed by surface hardening using boriding and borosiliconization methods according to various schemes. A comparative assessment of the wear resistance of surface layers strengthened by boriding, borosiliconation and cemented using factory technology, obtained on samples of various steels, was carried out based on mass loss over a friction path between measurements of 10 km. It has been established that the highest wear resistance of the contact surface is achieved during boriding and borosiliconization processes.

**Ключевые слова:** конструкционные стали, износостойкость, твердость, поверхностный слой, поверхностное упрочнение, образцы, микротвердость, контртела, борирование, боросилицирование.

**Key words:** structural steels, wear resistance, hardness, surface layer, surface hardening, samples, microhardness, counterbodies, boriding, borosiliconization.

Для определения эксплуатационных характеристик упрочненных слоев в разработанных насыщающих составах и оптимизации температурно-временных параметров процесса упрочнения тяжело нагруженных деталей трансмиссий лесных машин исследована кинетика изнашивания экспериментальных образцов после проведения различной ХТО. Необходимо отметить, что как показали проведенные исследования, диффузионные слои характеризуются неоднородностью структуры и химического состава, наличием дефектов в виде пор, микротрещин, а также значительными колебаниями по толщине и твердости.

В связи с этим сопротивление изнашиванию является важным критерием физико-механических и эксплуатационных свойств, так как позволяет оценить служебные свойства материалов, упрочненных при различных условиях.

Исследования износостойкости упрочненных различными составами экспериментальных образцов проводились в лабораторных условиях. Созданная на кафедре деталей машин и ПТУ БГТУ установка для проведения испытаний по сопротивлению изнашиванию экспериментальных образцов частично моделирует реальные условия работы конструкционных деталей.

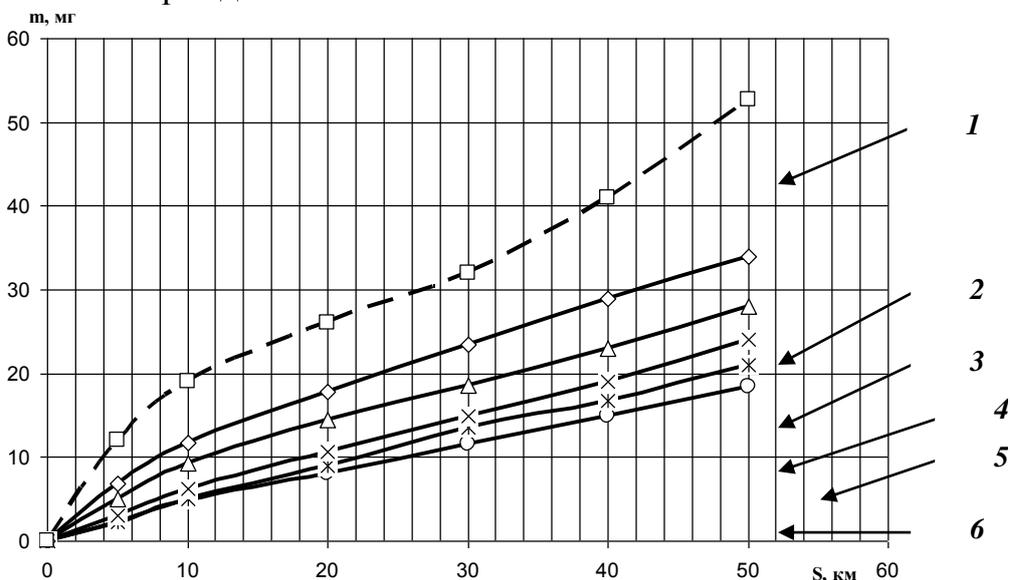
В данной работе приведены результаты исследований кинетики изнашивания образцов из материалов наиболее часто используемых для изготовления различных деталей трансмиссии лесных машин, подверженных различным методам поверхностного упрочнения [1-2]. Исследования образцов проводились в режиме полусухого трения с минимальным добавлением индустриального масла 20 для исключения явления задира. Испытывались образцы из конструкционных сталей 25ХГТ, 40Х и 45 прошедших улучшение с последующим поверхностным упрочнением методами борирования и боросилицирования по различным схемам. Для сравнения испытывались образцы из стали 25ХГТ, цементированные по заводской технологии и

сталей 25ХГТ, 40Х и 45, прошедшие предварительно улучшение и закалку ТВЧ. Температура борирования составляла 950°С, время – 2–4 часа. Боросилицирование осуществлялось при температуре насыщения 950°С, времени насыщения 2–4 часа.

При проведении исследований шероховатость контртела, выполненного из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 с твердостью HRC 64–66, поддерживалась постоянной в пределах Ra 1,25 в результате перешлифовки на заданную шероховатость [3-5]. Для создания условий, способствующих более интенсивному износу, неровности выполнялись в направлении перпендикулярном движению образца.

Сравнительная оценка износостойкости упрочненных методами борирования, боросилицирования и цементированных по заводской технологии поверхностных слоев полученных на образцах из различных сталей проводилась по потере массы при пути трения между измерениями 10 км. Следует отметить, что полученные кривые износа (рис.1) в целом соответствуют общепринятым представлениям и зависимостям характерным для эксплуатации деталей, работающих в условиях интенсивного нагружения [6-7].

Для кривой износа, полученной при упрочнении методом цементации (традиционная технология при изготовлении зубчатых колес трансмиссии) характерно наличие трех основных участков, соответствующих основным стадиям развития процесса изнашивания и разрушения поверхностного слоя образца. На первом этапе (до 20 км пробега), соответствующем периоду приработки, наблюдается более интенсивное изнашивание с потерей массы около 50% за весь период испытаний.



1—цементация; 2—боросилицирование 2 ч; 3—3,5 ч; 4—4 ч;  
5—борирование 3 ч; 6—4 ч

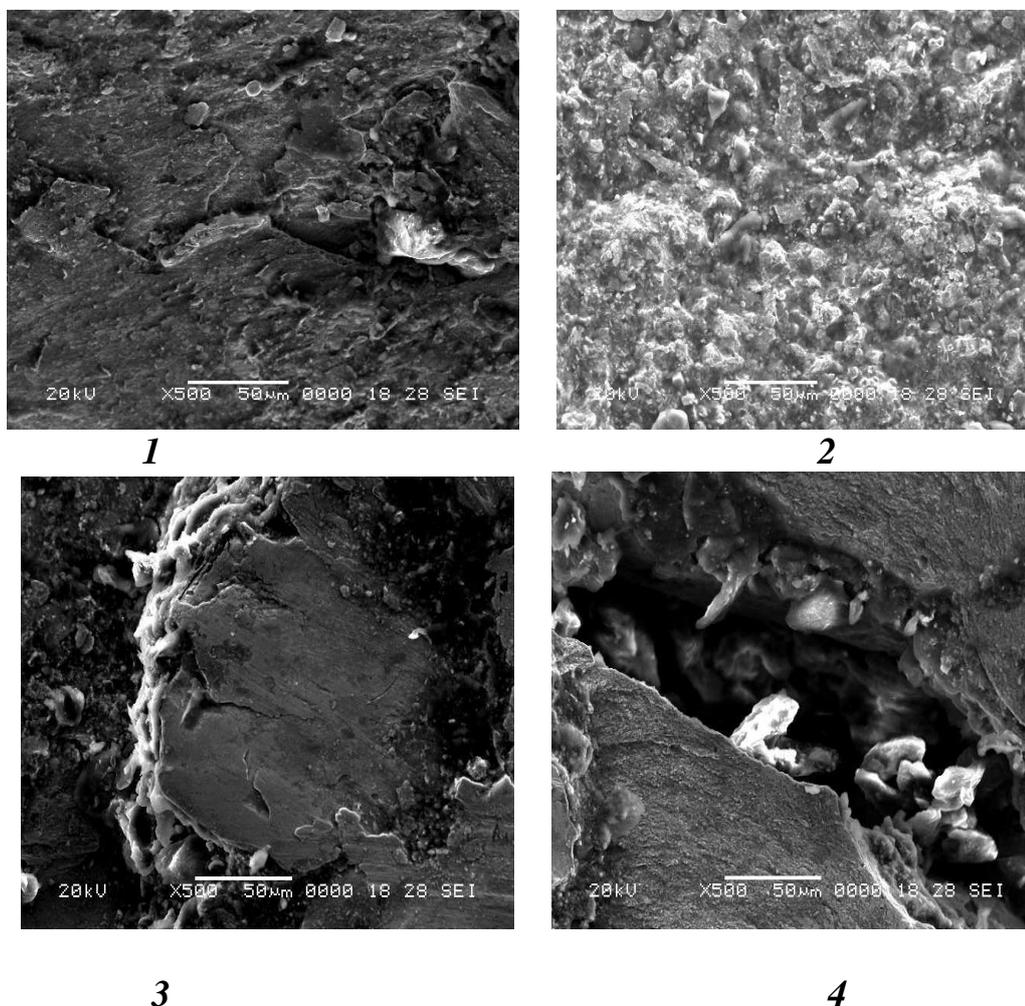
Рис.1. Изменение зависимости величины изнашивания образцов из стали 25ХГТ от пути трения при разных составах сред и времени насыщения (нагрузка 1,155 МПа)

В отличие от цементации, при упрочнении образцов боросилицированием интенсивность изнашивания на всем протяжении пути трения остается практически постоянной [8].

При этом на некоторых участках пути трения наблюдается ее уменьшение, что вероятно связано со стабильностью поверхностной твердости и остаточных напряжений сжатия.

Характер кривых изменения величины изнашивания исследованных образцов из конструкционных сталей 40Х и 45 аналогичен приведенным на рис 1 результаты для стали 25ХГТ при более высокой количественной оценке интенсивности износа.

Также было установлено, что с увеличением времени обработки до 10 ч изменяется и картина разрушения поверхности. Элементы смятия участков поверхности и выкрашивания отдельных ее фрагментов наблюдаются только при пути трения 50 км (рисунок 2), что подтверждает результаты испытаний на сопротивление изнашиванию.



*1 – путь трения 5 км, 2 – 20 км, 3 – 40 км, 4 – 50 км*

Рис. 2. Кинетика изнашивания образцов стали 25ХГТ, упрочненных цементацией при времени 5 ч при нагрузке 3,5 МПа

Полученные результаты исследований позволяют определить рациональные параметры процесса поверхностного упрочнения, обеспечивающие требуемую износостойкость поверхностного упрочненного слоя деталей трансмиссий лесных мобильных машин.

## ЛИТЕРАТУРА

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

2. Макаревич С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов // С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Серия П «Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2009. Выпуск XVII. – С. 327–330.

3. Бельский С.Е. Влияние параметров диффузионного упрочнения на шероховатость поверхности обработанных деталей и стабильность их размеров // Труды БГТУ. Сер.П лесн. и деревообраб. пром-сти. 2002. Вып. X. – С. 204–207.

4. Довгялло И.Г., Каледин Б.А., Сурус А.И., Бельский С.Е. Влияние механических колебаний на качество диффузионного слоя стальных деталей при низкотемпературной карбонитрации // Труды БГТУ. Сер.П лесн. и деревообраб. пром-сти. 2000. Вып. II. – С. 207–213.

5. Бельский С.Е., Сурус А.И. Влияние высокочастотных механических колебаний при поверхностном упрочнении на формирование и структуру упрочненных слоев конструкционных сталей // Литье и металлургия, 2003. № 2. – С. 124–127.

6. Ворошнин Л.Г. Борирование стали / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович // – М.: Металлургия, 1978. – 230 с.

7. Ляхович Л.С. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 289 с.

8. 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. Мн., 2008. – С. 140–146.