

УДК 621.833

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наукведущий научный сотрудник¹

E-mail: sprud.47@mail.ru

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией¹

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

А.Л. ВАЛЬКОстарший научный сотрудник¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

С.А. ШИШКОзаместитель генерального конструктора²

E-mail: kbst@belaz.minsk.by

П.Г. КАРПОВИЧначальник конструкторского бюро²

E-mail: ogk@belaz.minsk.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь*Поступила в редакцию 10.03.2018.*

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Рассмотрены результаты стендовых испытаний зубчатых колес из сталей 18ХГН2МФБ, 20ХН3МА и 20Х2Н4А. Установлены причины преждевременного выхода из строя зубчатых колес при форсированных режимах нагружения. Установлены закономерности формирования механических свойств по толщине упрочненного слоя для условий стендовых испытаний и эксплуатации. Показана эффективность применения расчетного метода оценки ресурса зубчатых колес, учитывающего неоднородность напряженного состояния и механических характеристик упрочненных слоев зубьев по сравнению с натурными стендовыми испытаниями.

Ключевые слова: *зубчатые колеса, комплексно-легированные стали, стендовые испытания*

Условия эксплуатации карьерных самосвалов в настоящее время характеризуются увеличением глубины карьеров и повышением уклонов технологических трасс. В этих условиях работоспособность зубчатых колес во многом зависит от положения спектра эксплуатационных нагрузок относительно кривых усталости материала зубьев, что определяет основной вид их предельных состояний — глубинное контактное выкрашивание активных поверхностей зубьев [1, 2]. Эти факторы обуславливают высокие требования к материалам зубчатых передач, которые традиционно изготавливают из конструкционных хромоникелевых сталей, упрочняемых химико-термической обработкой (ХТО).

Эксплуатационные условия работы зубчатых колес определяют особенности напряженно-деформированного состояния поверхностно-упрочненных зубьев, характеризующегося значительной нестабильностью и неравномерностью распределения рабочих напряжений, которые достигают

своего максимального значения в поверхностных слоях, а также неоднородностью свойств по сечению зубьев, обуславливающих величину предела контактной выносливости материала [1–3].

Совместное рассмотрение этих факторов с применением методик компьютеризированного расчета сопротивления усталости и прокаливаемости материала зубчатых колес [2, 4–7] позволяет определять требуемый градиент механических свойств и характеристик сопротивления усталости в диффузионном слое, обеспечивающих заданный уровень эксплуатационных свойств зубчатых колес, что дает возможность выбирать эффективный метод упрочнения, обеспечивающий конструкционную прочность деталей.

В данной работе на основе вышеуказанного подхода приведены результаты оценки применимости новых конструкционных материалов для зубчатых колес редукторов мотор-колес карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности, конструктивной особенностью которых является

Таблица — Химический состав сталей 18ХГН2МФБ, 20ХН3МА и 20Х2Н4А, %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb
18ХГН2МФБ	0,15	0,34	0,55	0,45	1,54	0,36	0,11	0,07
20ХН3МА	0,20	0,23	0,45	0,78	2,78	0,27	0,026	—
20Х2Н4А	0,21	0,25	0,44	1,46	3,25	—	—	—

применение планетарных передач с прямозубыми зубчатыми колесами с модулем до 12 мм.

Исследовали зубчатые колеса ($m = 10$ мм), изготовленные из опытных комплексно-легированных сталей 18ХГН2МФБ (ТУ 14-1-5183-93), 20ХН3МА (ТУ 14-132-242-2014), а также из серийной стали 20Х2Н4А (ГОСТ 4543-71). Химический состав исследованных сталей приведен в таблице.

Разработанная для тяжело нагруженных зубчатых колес угольных комбайнов ($m = 9-14$ мм) сталь 18ХГН2МФБ [8] характеризуется мелкозернистостью, высокими механическими свойствами, значительно меньшей деформацией деталей при ХТО (на 30%) и увеличенным пределом выносливости при изгибе на 20–25% по сравнению со сталью 20Х2Н4А. Сталь 18ХГН2МФБ применяется также на Волгоградском тракторном заводе для изготовления зубчатых колес бортовой передачи трактора ДТ–75М ($m = 6,5$ мм) [9]. Показано, что использование стали 18ХГН2МФБ вместо 20ХН3А позволило сократить длительность ХТО зубчатых колес за счет применения непосредственной закалки после насыщения и снижения требуемой толщины диффузионного слоя. При этом существенно снизился уровень остаточных деформаций зубчатых колес, а их долговечность повысилась в 2–2,5 раза [9].

Сталь 20ХН3МА, разработанная в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, характеризуется более высокими механическими характеристиками и рекомендована к освоению на ОАО «БЕЛАЗ» [10].

Зубчатые колеса из упомянутых выше марок сталей изготавливали по серийному технологическому процессу ОАО «БЕЛАЗ». Химико-термическую обработку выполняли на линии печей Irpen на толщину слоя 2,2–2,6 мм. Сравнительную оценку ресурса зубчатых колес проводили по результатам испытаний на стенде с замкнутым силовым контуром при расчетном контактном напряжении в полюсе зацепления зубьев 1800–2400 МПа. На первом этапе исследований оценивалась работоспособность зубчатых колес из сталей 18ХГН2МФБ и 20Х2Н4А, результаты испытаний которых показали одинаковую наработку — 136 часов до появления контактного выкрашивания поверхностей зубьев при величине контактных напряжений в полюсе зацепления 1830 МПа. Общий вид испытанных зубчатых колес показан на рисунке 1. Видно, что на зубьях колес из стали 18ХГН2МФБ контактное выкра-

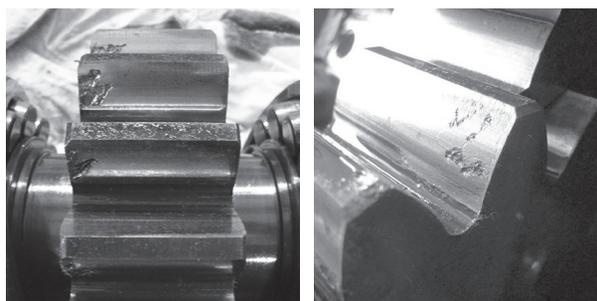


Рисунок 1 — Вид зубчатых колес из сталей 18ХГН2МФБ (а) и 20Х2Н4А (б) после стендовых испытаний

шивание прогрессирует, а на зубьях колес из стали 20Х2Н4А — только зарождается.

Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя испытанных зубчатых колес из сталей 18ХГН2МФБ и 20Х2Н4А представлено на рисунке 2. Стрелками показаны опасные, с точки зрения образования усталостных трещин, зоны слоя, которым соответствует время наработки на стенде, полученное при расчете сопротивления глубинной контактной усталости зубчатых колес по режимам стендовых испытаний с использованием оригинальной методики и программы расчета [2, 4–6]. Особенностью разработанной методики является возможность определения ресурса зубчатых колес в километрах пробега или часах работы, обеспечиваемого сопротивлением глубинной контактной усталости

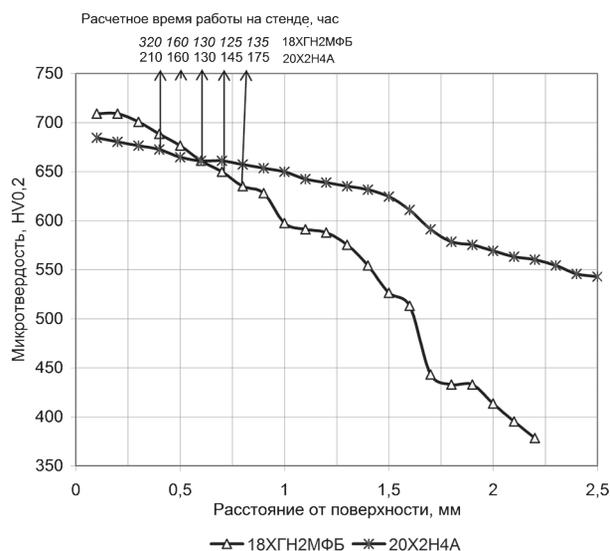


Рисунок 2 — Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя колес из сталей 18ХГН2МФБ и 20Х2Н4А после стендовых испытаний

активных поверхностей зубьев в зависимости от микротвердости и ее распределения по упрочненному слою.

Из рисунка 2 видно, что для колес из стали 20X2H4A опасная зона слоя с наименьшей расчетной долговечностью 130 ч находится на расстоянии 0,6 мм от поверхности зубьев.

Несмотря на то, что на расстоянии 0,6 мм от поверхности контакта величина микротвердости слоя для обоих материалов одинаковая ($660 \text{ HV}_{0,2}$), для колес из стали 18XГН2МФБ имеется еще одна опасная зона на расстоянии 0,7 мм от поверхности зубьев с расчетной долговечностью 125 ч, в которой величина микротвердости составляет $650 \text{ HV}_{0,2}$, что на $10 \text{ HV}_{0,2}$ меньше, чем для колес из стали 20X2H4A. Полученные расчетные данные согласуются с результатами стендовых испытаний. Прогрессирующее выкрашивание зубьев колес из стали 18XГН2МФБ объясняется более длительной работой при наличии усталостных трещин в глубине поверхностного слоя.

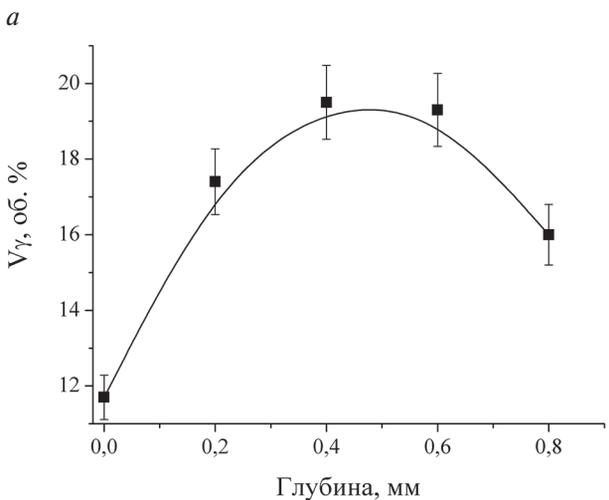
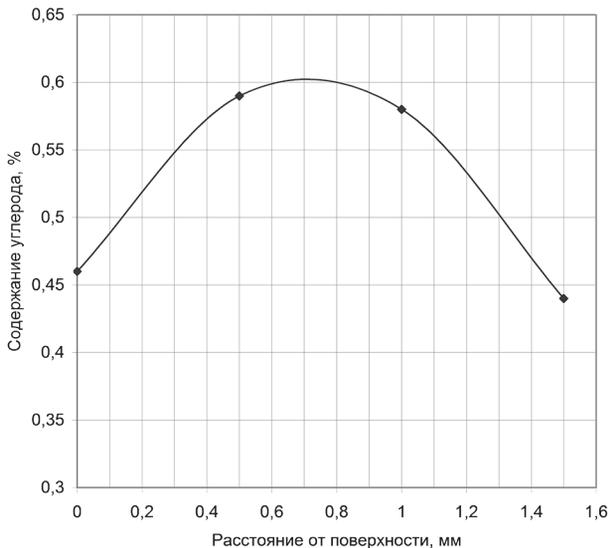


Рисунок 3 — Содержание углерода (а) и остаточного аустенита (б) в диффузионном слое стали 18XГН2МФБ

Результаты сравнительных стендовых испытаний не выявили преимущество экономно-легированной стали 18XГН2МФБ перед 20X2H4A и не соответствуют результатам других исследований [8, 9]. Это связано с тем, что величина микротвердости в опасном сечении диффузионного слоя (на глубине 0,6–0,7 мм от поверхности зубьев) для данной стали равна и даже меньше, чем для стали 20X2H4A.

Причиной низкой твердости поверхностного слоя исследованных деталей является недостаточное насыщение углеродом при цементации на печах Irsen из-за нестабильной работы кислородных зондов погружного типа [11]. Низкое содержание углерода обусловило невысокое содержание остаточного аустенита в диффузионном слое (рисунок 3). Кроме того, имеется значительное обезуглероживание поверхностного слоя на глубину до 0,5 мм.

Для определения максимальной закаливаемости и прокаливаемости стали 18XГН2МФБ была выполнена повторная ХТО секторов зубчатых колес по режиму: доцементация при $930 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч, закалка в масло после подстуживания до $860 \text{ }^\circ\text{C}$, низкий отпуск при $170 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч. Распределение твердости и микротвердости по толщине диффузионного слоя образцов из стали 18XГН2МФБ после повторной ХТО представлено на рисунке 4, из которого видно, что при исключении операции высокого отпуска максимальная твердость на глубине 0,6–0,7 мм диффузионного слоя составляет 61 HRC или $780 \text{ HV}_{0,2}$. Данной величине твердости соответствует содержание углерода в диффузионном слое 0,9%. При таком качестве упрочнения расчетный ресурс зубчатых колес при данном режиме стендовых испытаний составит не менее 900 ч.

Приведенные выше результаты показывают, что применение новых материалов зубчатых колес требует корректировки технологии химико-термической обработки, а несоблюдение технологических режимов приводит к существенному отклонению качественных показателей упрочнения от нормированных для данных материалов. По нашему мнению сталь 18XГН2МФБ имеет достаточно высокую закаливаемость и прокаливаемость цементованного слоя и является наследственно мелкозернистой, что позволяет применять ресурсосберегающую технологию ХТО без операции высокого отпуска. При обеспечении требуемого качества ХТО, исключающей обезуглероживание и стабилизирующей содержание углерода в поверхностных слоях, можно достичь значительно повышения ресурса зубчатых колес из стали 18XГН2МФБ по сравнению с серийно применяемой 20X2H4A.

На втором этапе исследований выполняли сравнительную оценку ресурса при испытании зубчатых колес из опытной стали 20XН3МА

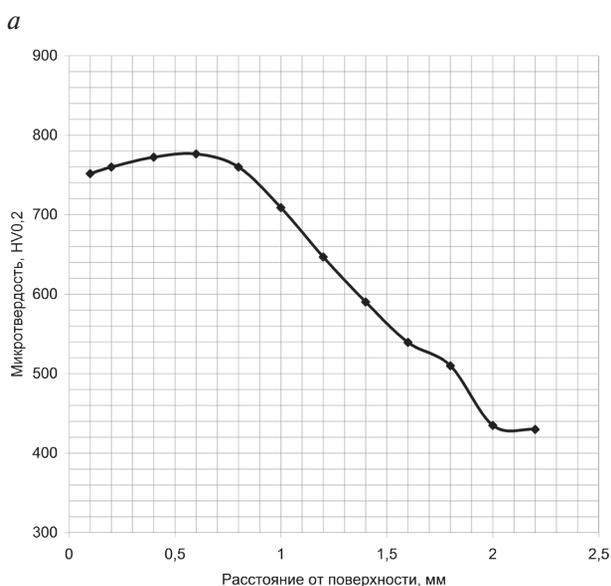
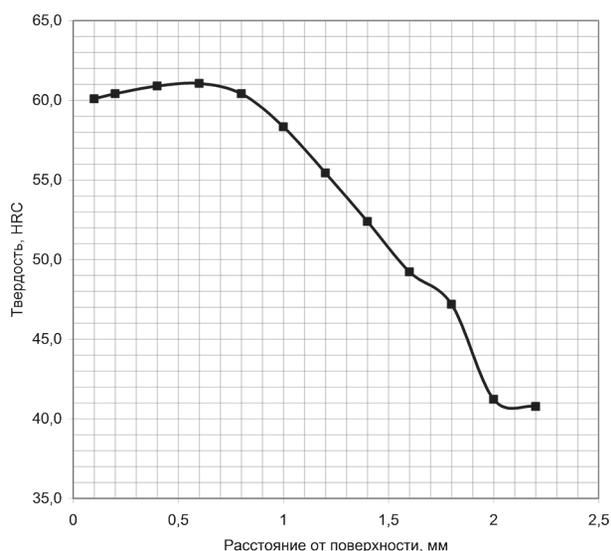


Рисунок 4 — Распределение твердости (а) и микротвердости (б) по толщине диффузионного слоя образцов из стали 18ХГН2МФБ после повторной ХТО

и серийной 20Х2Н4А. Химико-термическую обработку опытной садки с исследуемыми деталями выполняли в печах Ipsen после обоснованной замены кислородных датчиков и корректировки технологических режимов цементации и нагрева под закалку по разработанным режимам [11].

Общий вид испытанных зубчатых колес приведен на рисунке 5. Видно, что после наработки на стенде 213 ч на зубьях испытанных зубчатых колес присутствует и глубинное контактное выкрашивание, и питтинг, и скол головок зубьев. К такому виду предельного состояния привела значительная концентрация нагрузки по ширине зубьев колес, в результате чего расчетное контактное напряжение в полюсе зацепления составляло 2400 МПа.

Исследование распределения микротвердости по вершине зуба зубчатых колес из стали

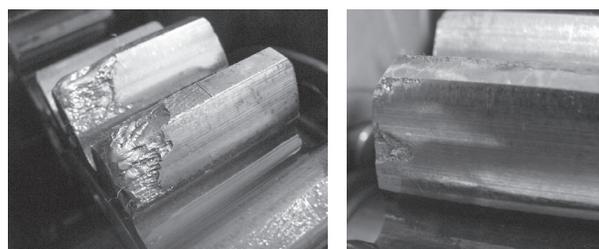


Рисунок 5 — Вид повреждения зубьев зубчатого колеса из сталей 20ХН3МА (а) и 20Х2Н4А (б) после стендовых испытаний длительностью 213 ч

20ХН3МА показало глубокое обезуглероживание поверхностного слоя до 0,6 мм при нагреве под закалку. Об обезуглероживании поверхности свидетельствует также график распределения остаточного аустенита по толщине цементованного слоя вершины зуба (рисунок 6), максимальная величина которого составляет 35% на глубине

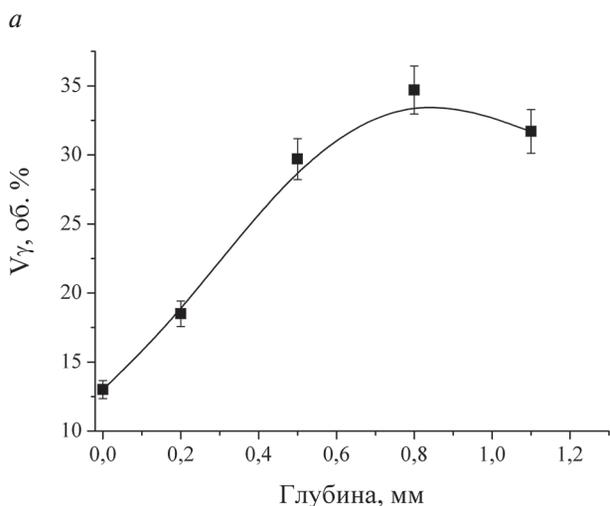
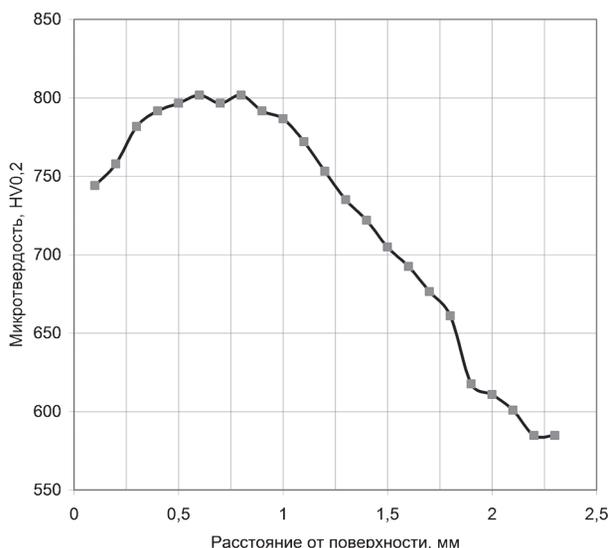


Рисунок 6 — Распределение микротвердости (а) и остаточного аустенита (б) по толщине цементованного слоя в вершине зуба зубчатого колеса из стали 20ХН3МА

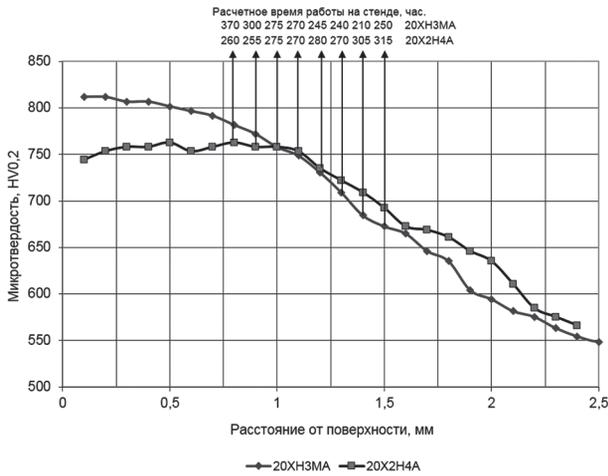


Рисунок 7 — Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя колес из сталей 20ХНЗМА и 20Х2Н4А после стендовых испытаний

слоя 0,8 мм. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя в районе делительной окружности зубьев исследованных зубчатых колес после полного цикла ХТО и шлифования зубьев приведено на рисунке 7.

Расчет ресурса испытанных зубчатых колес по режимам стендовых испытаний показал, что в зависимости от величины микротвердости и ее распределения по толщине слоя (см. рисунок 7) положение опасной зоны и величина ресурса для каждой испытуемой шестерни различны. Опасная зона слоя с минимальным ресурсом для зубчатого колеса из стали 20ХНЗМА находится на расстоянии 1,4 мм от поверхности, а расчетный ресурс в этой зоне составляет 210 ч. Опасная зона слоя для зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А находится на расстоянии 0,9 мм от поверхности, расчетный ресурс в этой зоне составляет 255 ч. Полученные расчетные данные коррелируют с результатами стендовых испытаний.

Следует отметить, что при фактическом режиме стендовых испытаний в условиях значительного перекоса по ширине зубчатых колес максимальная величина контактных напряжений превышала 2400 МПа. При таком форсировании нагрузочных режимов за глубинные контактные разрушения зубьев ответственны более глубокие зоны упрочненного слоя с совершенно другими механическими свойствами и структурными характеристиками, чем в условиях эксплуатации. Поэтому оценка эксплуатационного ресурса зубчатых колес по результатам стендовых испытаний при особо форсированных режимах не является обоснованной.

Проведенные стендовые испытания не показали преимущество повышенной закаливаемости цементованного слоя опытной стали 20ХНЗМА перед серийной 20Х2Н4А из-за недопустимого превышения уровня нагружения при стендовых

испытаниях. В связи с этим сравнительный анализ применимости исследованных марок сталей проводили на основании расчета ресурса зубчатых колес с учетом качества их ХТО. Расчет ресурса исследуемых зубчатых колес по режиму стендовых испытаний при величине поверхностного контактного напряжения в полюсе зацепления 1830 МПа показал следующие результаты. Опасная зона с наименьшим сопротивлением контактной усталости находится на глубине 0,7–0,8 мм от поверхности. Ресурс зубчатого колеса из стали 20ХНЗМА при величине микротвердости в этой опасной зоне 770–790 HV_{0,2} (см. рисунок 7) составляет 1000–1150 ч. Ресурс зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А, имеющего величину микротвердости в опасной зоне 760 HV_{0,2}, составляет 700 ч. В результате данного расчета можно сделать вывод, что в условиях стендовых испытаний ресурс зубчатых колес из стали 20ХНЗМА будет превышать ресурс колес из стали 20Х2Н4А в 1,5 раза.

Проведенные исследования показывают эффективность применения расчетного метода оценки ресурса высоконапряженных зубчатых колес с учетом качества их химико-термического упрочнения по сравнению с натурными стендовыми испытаниями и выявляют пути достижения требуемых эксплуатационных свойств зубчатых передач за счет целенаправленного выбора материала на основе применения расчетных моделей прогнозирования ресурса зубчатых передач с учетом изменения механических свойств по толщине упрочненного слоя, расчета прокаливаемости цементованных слоев и сердцевины зубьев, а так же процесса диффузии углерода в стали [2, 4–7, 12, 13].

Заключение. Анализом результатов сравнительных стендовых испытаний зубчатых колес из сталей 18ХГН2МФБ, 20ХНЗМА и 20Х2Н4А выявлены причины преждевременного выхода из строя зубчатых колес при форсированных режимах стендовых испытаний. Установлены закономерности в формировании механических свойств по толщине упрочненного слоя для условий стендовых испытаний и эксплуатации. Показана эффективность применения расчетного метода оценки ресурса зубчатых колес, учитывающего неоднородность напряженного состояния и механических характеристик упрочненных слоев зубьев, по сравнению с натурными стендовыми испытаниями.

Результаты исследований позволяют осуществлять обоснованный выбор материала и назначать технические требования к качеству химико-термического упрочнения зубчатых колес, принципиальным положением которых является стабилизация требуемых механических свойств поверхностно упрочненных слоев с учетом эксплуатационных нагрузочных режимов.

Список литературы

1. Тескер, Е.И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно-упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е.И. Тескер. — М.: Машиностроение, 2011 — 434 с.
2. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
3. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справ. в 3 т. / А.В. Супов [и др.]; под общ. ред. А.Г. Рахштада, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина, А.В. Супова. — М.: Интермет Инжиниринг, 2007. — Т. 3: Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна. — 920 с.
4. Руденко, С.П. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом качества химико-термического упрочнения / С.П. Руденко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 4. — С. 58–60.
5. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий (GearProg): комп. программа: св-во № 530 Респ. Беларусь / С.П. Руденко, О.В. Кузьменков, А.А. Шипко, А.Л. Валько; правообладатель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. — № С20130054; заявл. 26.07.13; опубл. 14.08.13 // Реестр зарегистр. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. — 2013. — 54 с.
6. Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 5–7.
7. Расчет прокаливаемости конструкционных сталей (H-Steel): комп. программа: св-во № 846 Респ. Беларусь; правообладатель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. — № С20150109; заявл. 03.11.15; опубл. 12.01.16 // Реестр зарегистр. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. — 2016. — 55 с.
8. Меньшикова, Т.Я. Высокопрочная цементуемая сталь для тяжело нагруженных деталей машин / Т.Я. Меньшикова, В.И. Повар // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1988. — № 6. — С. 17–19.
9. Тельдеков, В.А. Комплекснолегированная сталь для тяжело нагруженных цементуемых зубчатых колес / В.А. Тельдеков, Е.А. Мерилова, В.П. Шевчук // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1987. — № 5. — С. 21–26.
10. Повышение ресурса крупногабаритных зубчатых колес с использованием новых сталей / А.С. Шишко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 6. — С. 219–225.
11. Повышение эксплуатационных характеристик зубчатых колес карьерных самосвалов посредством оптимизации режимов химико-термической обработки / С.П. Руденко [и др.] // Литье и металлургия. — 2013. — № 2. — С. 110–114.
12. Руденко, С.П. Выбор марки стали для высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий / С.П. Руденко, А.А. Шипко, А.Л. Валько // Автомобил. пром-сть. — 2013. — № 8. — С. 33–36.
13. Руденко, С.П. Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономно легированной стали / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2. — С. 34–38.

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: sprud.47@mail.ru.

SANDOMIRSKY Sergei G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

SHYSHKO Sergei A.

Deputy Designer General²

E-mail: kbst@belaz.minsk.by

KARPOVICH Peter G.

Head of the Design-Engineering Department²

E-mail: ogk@belaz.minsk.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 10 March 2018.

ANALYSIS OF APPLICATION OF COMPLEX-ALLOYED STEELS FOR GEAR WHEELS OF CAREER DUMP TRUCKS

Results of bench tests of gearwheels from steels 18KhGN2MFB, 20KhN3MA and 20Kh2N4A are considered. The reasons of premature failure of gear wheels at the forced modes loading are established. Laws of formation of mechanical properties on thickness of the strengthened layer for conditions of bench tests and operation are established. Efficiency of application of a settlement method of an estimation of a resource of the gear wheels is shown. The method considers heterogeneity of an intense condition and mechanical characteristics of strengthened layers of teeth, in comparison with natural bench tests.

Keywords: gear wheels, complex-alloyed steels, bench tests

References

1. Tesker E.I. *Sovremennye metody rascheta i povysheniya nesushchey sposobnosti poverkhnostno-uprochnennykh zubchatykh peredach transmisyi i privodov* [Modern methods of calculation and increase of carrying capacity of the face-hardened tooth gears of transmissions and drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 434 p.
2. Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин* [Contact fatigue of transmissions gearwheels of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p.
3. Supov A.V., Kanev V.P., Odesskiy P.D. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali i chuguna: Sprav. T. 3. Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka stali i chuguna* [Metallurgy and heat treatment of steel and pig iron. Vol. 3. Thermal and thermomechanical machining of steel and pig iron]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2007. 920 p.
4. Rudenko S.P. Raschet resursa zubchatykh kolez transmisyi energonasyshchennykh mashin s uchedom kachestva khimiko-termicheskogo uprochneniya [Calculation of the resource of high-loaded gears car transmissions taking into account quality chemical heat hardening]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2010, no. 4, pp. 58–60.
5. Rudenko S.P., Kuzmenkov O.V., Shipko A.A., Valko A.L. *Raschet resursa zubchatykh kolez transmisyi (GearProg)* [Account of a resource of tooth gears of transmissions (GearProg)]. The Certificate on official registration of the computer program, no. C20130054, 2013.
6. Rudenko S.P., Valko A.L. Osobnosti rascheta zubchatykh kolez transmisyi na glubinnuyu kontaktную выносливость [Features of account of tooth gears of transmissions on deep-seated contact endurance]. *Vestnik mashinostroeniya* [Herald of mechanical engineering], 2015, no. 11, pp. 5–7.
7. *Kompyuternaya programma "Raschet prokalivaemosti konstruktsionnykh staley (H-Steel)"* [The computer program "Account of a hardness penetration of a structural steel (H-Steel)"]. The Certificate on official registration of the computer program, no. C20150109, 2013.
8. Menshikova T.Ya., Povar V.I. Vysokoprochnaya tsementuemaya stal dlya tyazhelonagruzhennykh detaley mashin [High-strength cemented steel for heavy-duty machine components]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1988, no. 6, pp. 17–19.
9. Teldekov V.A., Merilova E.A., Shevchuk V.P. Kompleksnolegirovannaya stal dlya tyazhelonagruzhennykh tsementuemykh zubchatykh kolez [Complex alloyed steel for high-tensional case-hardening tooth gears]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1987, no. 5, pp. 21–26.
10. Shishko A.S., Moiseenko V.I., Sidorenko A.G. Povyshenie resursa krupnogabaritnykh zubchatykh kolez s ispolzovaniem novykh staley [Raise of a resource of large-sized tooth gears with use of new steels]. *Trudy OIM NAN Belarusi "Aktualnye voprosy mashinovedeniya"* [Proc. of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus "Topical Issues of Mechanical Engineering"], 2017, no. 6, pp. 219–225.
11. Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik zubchatykh kolez karernykh samosvalov posredstvom optimizatsii rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki [Raise of operational characteristics of gears of career dump trucks by means of optimization of regimes of chemical heat treatment]. *Lite i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2013, no. 2, pp. 110–114.
12. Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L. Vybór marki stali dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh kolez transmisyi [Selection of steel grades for high-tension transmission gear wheels]. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Automotive Industry], 2013, no. 8, pp. 33–36.
13. Rudenko S.P., Valko A.L. Razrabotka rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki zubchatykh kolez iz ekonomno legirovannoy stali [Development of modes of chemical and thermal treatment of gear wheels from sparingly alloyed steel]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 2, pp. 34–38.