

УДК 621.833

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук

ведущий научный сотрудник¹

E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО

старший научный сотрудник¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

С.А. ШИШКО

заместитель генерального конструктора²

E-mail: kbst@belaz.minsk.by

П.Г. КАРПОВИЧ

начальник 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 29.01.2019.

СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Приведены результаты комплексных исследований крупномодульных зубчатых колес, изготовленных из цементуемой хромоникелевой стали 20X2H4A. Показано, что при стабильной работе термического оборудования, оснащенного компьютеризированными системами автоматического регулирования параметров техпроцесса химико-термической обработки, в крупномодульных зубчатых колесах из стали 20X2H4A формируется диффузионный слой с поверхностной твердостью 60–61 HRC и эффективной толщиной (0,08–0,1)т до микротвердости 750 HV_{0,2}. Установлено, что повышенная кинематическая погрешность после химико-термической обработки зубчатых колес из стали 20X2H4A приводит к неравномерному съему припуска при финишном шлифовании зубьев, что является причиной снижения сопротивления контактной усталости в локальных зонах диффузионных слоев зубьев.

Ключевые слова: крупномодульные зубчатые колеса, хромоникелевая сталь, химико-термическая обработка, кинематическая погрешность, сопротивление контактной усталости

Введение. Зубчатые колеса трансмиссий энергонасыщенных машин изготавливают, как правило, из цементируемых хромоникелевых сталей, подвергаемых химико-термической обработке. Условия эксплуатации таких зубчатых колес характеризуются длительной работой под действием переменных нагрузок в условиях нестационарного нагружения, при котором контактные напряжения могут превышать предел контактной выносливости ($23 N_{HRC}$, ГОСТ 21354). Лимитирующим работоспособность фактором в этом случае является глубинная контактная усталость активных поверхностей зубьев [1–3], характеризующаяся особенностями зарождения трещин контактной усталости от действия преобладающей доли касательных напряжений, максимальной величина которых располагается в глубине диффузионного слоя. Наибольшее сопротивление глубинной контактной усталости достигается при величине микротвердости в опасной зоне слоя не менее 750–770 HV_{0,2} и бездефектной

мартенситно-аустенитной структуре [3–5]. Обеспечение указанных параметров достигается применением современного высокопроизводительного печного оборудования, оснащенного компьютеризированными системами автоматического регулирования параметров техпроцесса [6–8]. С учетом этих требований представляется целесообразным оценить возможность обеспечения сопротивления контактной усталости крупномодульных зубчатых колес, применяемых в редукторах мотор-колес автосамосвалов особо большой грузоподъемности, которые традиционно изготавливают из хромоникелевых сталей высокой прокаливаемости с содержанием никеля до 4 %.

Исследованиями установлено [9, 10], что детали из сталей с таким содержанием никеля (типа 20X2H4A) подвержены значительному короблению в процессе термической обработки, которое почти в 2 раза может быть больше, чем у деталей из стали 20XН3А. Отмечается также, что для крупномодуль-

ных зубчатых колес с повышенным содержанием остаточного аустенита и повышенной деформацией в процессе химико-термического упрочнения не достижимо обеспечение требуемой величины микротвердости 750 HV_{0,2} на глубине 0,1*m* мм (*m* — модуль зубчатого колеса) диффузионного слоя шлифованных поверхностей зубьев [8, 10].

В данной работе приведены результаты комплексных исследований зубчатых колес с модулем $m = 10$ мм, изготовленных из цементуемой хромоникелевой стали 20X2H4A (ГОСТ 4543–2016) по серийному технологическому процессу ОАО «БЕЛАЗ».

Методика исследований. В процессе изготовления зубчатых колес на каждой стадии технологического передела выполняли контроль их точностных параметров на зубоизмерительном центре SIGMA GLEASON 100 GNS. Измерялись следующие параметры точности изготовления зубчатых колес: радиальное биение зубчатого венца (F_r), погрешность профиля зуба (f_p), накопленная погрешность шага зубчатого колеса (F_p) и предельное отклонение шага зацепления (f_{pb}).

Химико-термическую обработку зубчатых колес выполняли на линии печей Irsen на толщину слоя до середины переходной зоны 2,2–2,6 мм: цементация в печи Irsen при температуре 930 °С и углеродном потенциале 1,2 %С в течение 25 ч; диффузионное выравнивание при температуре 930 °С и углеродном потенциале 0,85 %С в течение 1,5 ч; высокий отпуск при 670 °С; закалка с температуры 830 °С; низкий отпуск при 180 °С; выдержка 3 ч.

Распределение микротвердости по толщине диффузионных слоев определяли с использованием микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке 1,96 Н по ГОСТ Р ИСО 6507.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Микро-200. Для рентгеноструктурного анализа применяли ДРОН-3М. Металлографические шлифы исследовали после травления в специальном реактиве [11] и в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты. Содержание углерода определяли кулонометрическим методом на установке АН-7529М.

Исследования сопротивления контактной усталости зубчатых колес проводили при испытаниях на стенде с замкнутым силовым контуром с частотой 5 Гц. За критерий усталостного разрушения принимали появление прогрессирующего глубинного контактного выкрашивания в однопарной зоне зубчатого зацепления.

Результаты исследований. На рисунке 1 показано распределение твердости (HRC), а на рисунке 2 — распределение микротвердости (HV_{0,2}) по сечению образца ($\varnothing 74 \times 24$) (а) и зуба (b) зубчатого колеса из стали 20X2H4A после полного цикла ХТО по приведенному выше режиму. Получена максимальная поверхностная твердость образца 62 HRC, по эвольвенте зуба — 61 HRC, по впадине зуба — 60 HRC. Толщина цементованного

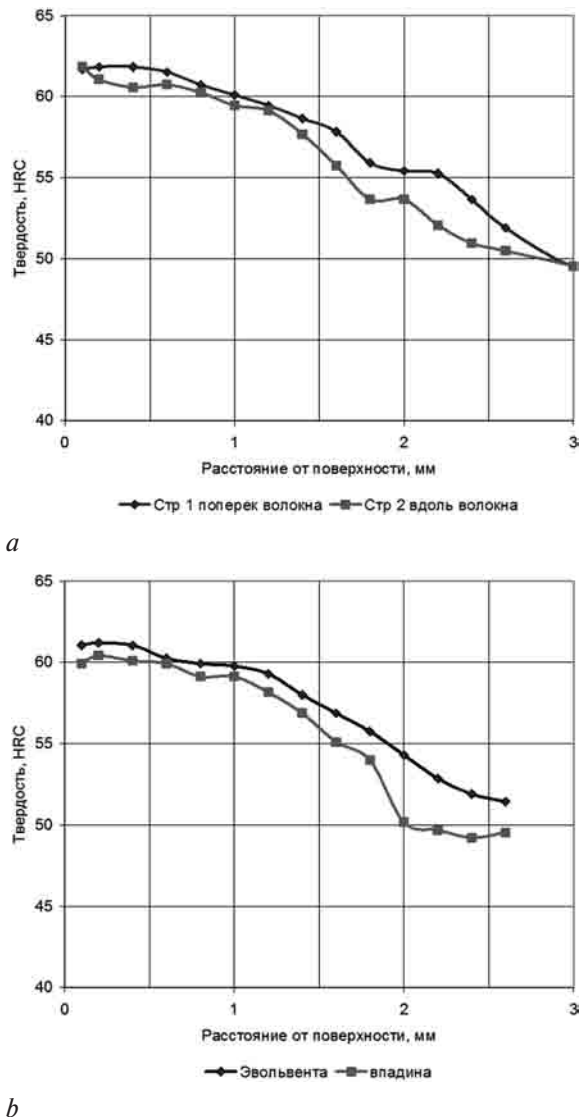


Рисунок 1 — Распределение твердости по сечению образца (а) и зуба шестерни (b) из стали 20X2H4A
 Figure 1 — Distribution of hardness over cross section of sample (a) and gear tooth (b) of steel 20Kh2N4A

слоя до середины переходной зоны, определяемая по распределению твердости до зоны слоя с величиной 50 HRC (см. рисунок 1) и микротвердости до зоны слоя с величиной 570 HV_{0,2} (см. рисунок 2), составляет 2,6 мм, как для образца, так и для зуба шестерни из стали 20X2H4A.

На рисунке 3 приведена микроструктура цементованного образца-свидетеля из стали 18ХГТ после цементации по приведенному режиму, согласно которой толщина цементованного слоя до середины переходной зоны составляет 2,5–2,6 мм.

Результаты исследований показывают полное совпадение регламентированной толщины цементованного слоя 2,6 мм, определяемой как по микроструктуре образца-свидетеля из стали 18ХГТ, так и по распределению твердости и микротвердости образцов и зубчатого колеса, после цементации в печи Irsen, что указывает на стабильную работу печного оборудования и достоверность методик исследований. Эффективная толщина

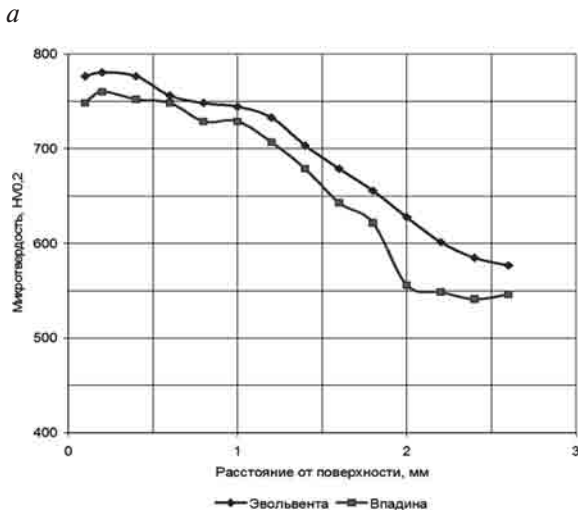
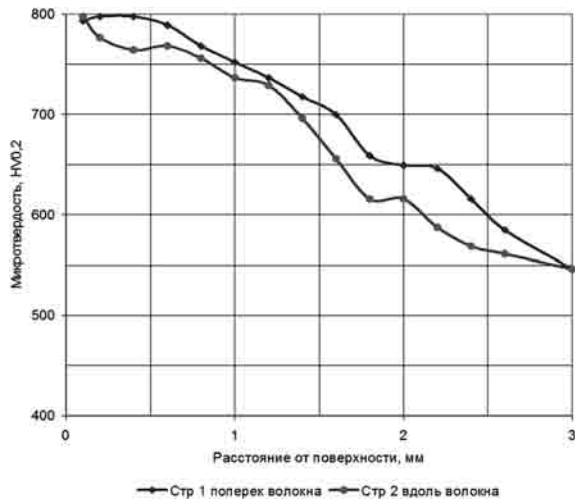


Рисунок 2 — Распределение микротвердости по сечению образца (а) и зуба шестерни (b) из стали 20X2N4A
Figure 2 — Distribution of microhardness over cross section of sample (a) and gear tooth (b) of steel 20Kh2N4A

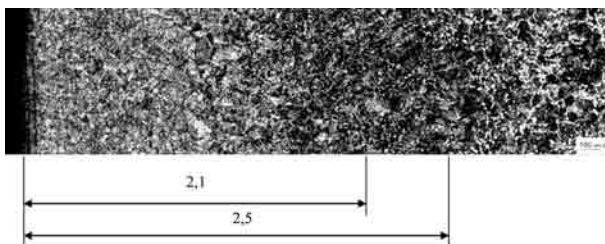


Рисунок 3 — Микроструктура цементованного слоя образца-свидетеля из стали 18ХГТ
Figure 3 — Microstructure of cemented layer of the check test sample of steel 18KhGT

цементованного слоя до микротвердости 750 HV_{0,2} составляет 0,8–1,0 мм или (0,08–0,1)*m* (см. рисунок 2). На расстоянии 0,2 мм от поверхности максимальное содержание остаточного аустенита равно 36 %, а углерода — 0,9 % (рисунок 4). Относительно невысокое содержание в диффузионном слое остаточного аустенита объясняется наличием в технологическом процессе химико-термической обработки операции высокого отпуска, при котором происходит перераспределение легирующих

элементов (особенно хрома) между твердым раствором и карбидами [9]. При нагреве для закалки часть таких карбидов не растворяется, что способствует снижению легированности аустенита и повышению точки мартенситного превращения. При закалке благодаря более полному мартенситному превращению в структуре формируется значительно меньше остаточного аустенита.

В результате исследований установлено, что поверхностная твердость 60–61 HRC зубчатых колес с модулем 10 мм из стали 20X2N4A достижима при стабильной работе печного оборудования, оснащенного системами автоматического регулирования параметров техпроцесса. Эффективная толщина цементованного слоя до микротвердости 750 HV_{0,2}, равная (0,08–0,1)*m* для нешлифованных деталей, обеспечивается.

В технологическом процессе изготовления зубчатых колес финишной операцией является шлифование зубьев. В связи со снятием поверхностного «полезного» слоя при шлифовании зубьев и предполагаемым снижением уровня микротвердости по толщине диффузионного слоя сопротивление контактной усталости шлифованных зубчатых колес должно понижаться. Влияние величины припуска под шлифование зубьев на сопротивление усталости зубчатых колес с фактическим градиентом микротвердости в диффузионном слое с учетом данных рисунка 2 б оценивали с помощью разработанной методики расчета ресурса зубчатых передач мобильных машин [3, 12]. Расчет по режимам стендовых испытаний при величине контактных напряжений в полюсе зацепления 1700–1800 МПа показал, что опасная зона зарождения трещин контактной усталости с учетом припуска под шлифование на сторону зубьев 0,4 мм находится на расстоянии от поверхности 0,7–0,8 мм, а прогнозируемый ресурс при условии равномерного снятия припуска при шлифовании всех зубьев с величиной микротвердости в данной зоне 730–740 HV_{0,2} составляет 600–700 ч.

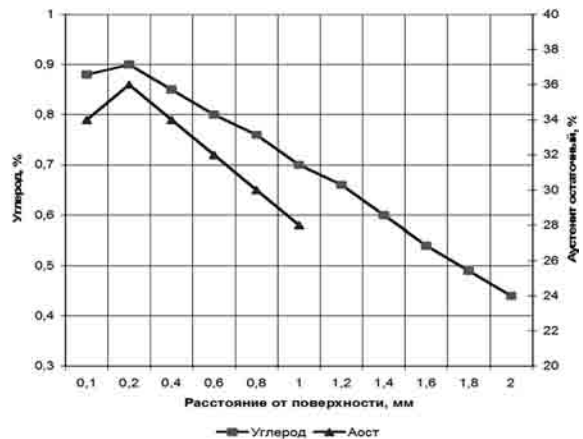


Рисунок 4 — Распределение углерода и остаточного аустенита по сечению образца из стали 20X2N4A
Figure 4 — Distribution of carbon and retained austenite over cross section of sample of steel 20Kh2N4A

Для подтверждения полученных результатов прогнозирования выполнены стендовые испытания зубчатых колес, которые были остановлены после появления прогрессирующего контактного выкрашивания на рабочей поверхности зуба (рисунок 5) испытуемого колеса при значительно меньшей наработке (406 ч) по сравнению с расчетными величинами.

Для выявления причин преждевременного выхода из строя зубчатого колеса при стендовых испытаниях выполнены металлографические исследования шлифов, представляющих собой сектор из двух зубьев, вырезанный из испытанного зубчатого колеса. На рисунке 6 показано распределение микротвердости по сечению зуба с глубинным контактным выкрашиванием (1) и соседнего с ним зуба без выкрашивания (2). Получено, что из-за неравномерного съема припуска при шлифовании распределение микротвердости по сечению соседних зубьев резко отличается. Для зуба (1) с контактным выкрашиванием величина микротвердости в опасном сечении диффузионного слоя (на расстоянии от поверхности ~0,7 мм) значительно ниже (690 HV_{0,2}), чем для соседнего зуба (2), для которого данная величина составляет 730 HV_{0,2}.



Рисунок 5 — Общий вид зубьев с глубинным контактным выкрашиванием зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А после наработки на стенде 406 ч
Figure 5 — General view of teeth with deep contact chipping of gears of steel 20Kh2N4A after bench running of 406 h

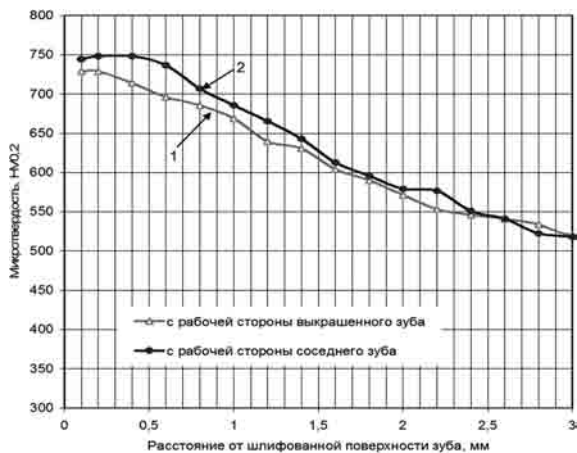


Рисунок 6 — Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя в зоне делительной окружности выкрашенного (1) и соседнего (2) зубьев зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А
Figure 6 — Distribution of microhardness over thickness of hardened layer in area of pitch circle of spalled (1) and neighboring (2) teeth of the gear wheel of steel 20Kh2N4A

Расчетный ресурс зубчатого колеса, обеспечиваемый сопротивлением глубинному контактному выкрашиванию зуба (1) при фактическом градиенте микротвердости по толщине диффузионного слоя (см. рисунок 6), составляет 340 ч, что согласуется с экспериментальными данными с учетом того, что зубчатое колесо продолжительное время работало после появления контактного выкрашивания исследуемого зуба (см. рисунок 5).

Анализ результатов исследований точности изготовления зубчатых колес на всех стадиях технологического передела дает возможность сделать вывод, что причиной неравномерного съема припуска при шлифовании соседних зубьев послужила повышенная величина коробления зубчатого колеса после химико-термической обработки, которая не устраняется после подготовки технологических баз. Точность изготовления зубчатых колес измеряли после следующих этапов технологического передела (рисунок 7): 1 — зубофрезерование; 2 — химико-термическая обработка; 3 — подготовка технологических баз; 4 — шлифование зубьев. Результаты измерений показывают, что основное влияние на неравномерность съема припуска при шлифовании зубьев оказывает повышенная величина кинематической погрешности зубчатого колеса после химико-термической обработки, а именно: радиальное биение зубчатого венца (F_r) и накопленная погрешность шага зубчатого колеса (F_p), величины которых после ХТО соответствуют 12-й степени точности по ГОСТ 1643–81 (см. рисунок 7).

Повышенное коробление цементованных деталей из стали 20Х2Н4А обусловлено в основном неодинаковой устойчивостью аустенита в сердцевине и в различных зонах диффузионного слоя из-за различного содержания в них углерода, что является причиной значительных деформаций



Рисунок 7 — Погрешность направления зуба зубчатых колес из стали 20Х2Н4А на разных стадиях технологического передела: 1 — зубофрезерование; 2 — химико-термическая обработка; 3 — подготовка технологических баз; 4 — шлифование зубьев
Figure 7 — Imprecision of tooth direction of gear wheels of steel 20Kh2N4A at different stages of technological conversion: 1 — gear milling; 2 — chemical heat treatment; 3 — preparation of processing datum surface; 4 — teeth grinding

детали вследствие изменения удельного объема стали при фазовых превращениях. Склонность к повышенной деформации вызывает также высокая прокаливаемость стали. На деформацию деталей можно влиять, регулируя условия охлаждения при химико-термической обработке [9]. Однако более эффективный путь снижения деформаций деталей — применение экономнолегированных сталей с пониженной прокаливаемостью сердцевинны [13], величина деформации которых в 2,5 раза меньше, чем из высоколегированных сталей.

Выводы. При стабильной работе термического оборудования, оснащенного компьютеризированными системами автоматического регулирования параметров техпроцесса химико-термической обработки, в крупномодульных зубчатых колесах из стали 20X2H4A формируется диффузионный слой с поверхностной твердостью 60–61 HRC и эффективной толщиной $(0,08–0,1) m$ до микротвердости 750 HV_{0,2}.

Повышенная кинематическая погрешность после химико-термической обработки зубчатых колес из стали 20X2H4A приводит к неравномерному съему припуска при финишном шлифовании зубьев, что способствует снижению сопротивления контактной усталости в локальных зонах диффузионных слоев зубьев.

Список литературы

1. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Белорус. наука, 1999. — 175 с.
2. 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.
3. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
4. Руденко, С.П. Структура цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, Е.И. Мосунов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2012. — № 4. — С. 38–42.
5. Руденко, С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 1. — С. 58–62.
6. Проектирование высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 2. — С. 67–70.
7. Руденко, С.П. Определение параметров химико-термической обработки высоконапряженных зубчатых колес на основе расчетных моделей / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2018. — № 8. — С. 353–358.
8. 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.
9. Сагарадзе, В.С. Повышение надежности цементуемых деталей // В.С. Сагарадзе. — М.: Машиностроение, 1975. — 216 с.
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. Металлографический реактив для выявления микроструктуры цементованной конструкционной стали: пат. ВУ 15273: МПК С 23 F 1/28 / А.Л. Валько, С.П. Руденко, Е.И. Мосунов; А.И. Михлюк. — Опубл. 30.12.2011.
12. Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 5–11.
13. Руденко, С.П. Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Сталь. — 2018. — № 8. — С. 54–58.

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

Leading Researcher¹

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

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

SHYSHKO Sergei A.

Deputy General Designer²

E-mail: kbst@belaz.minsk.by

KARPOVICH Peter G.

Head of the Design Office²

E-mail: ogk@belaz.minsk.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

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

Received 29 January 2019.

RESISTANCE TO CONTACT FATIGUE OF COARSE-GRAINED GEARS OF CHROMIUM-NICKEL STEELS

The results of complex studies of coarse-grained gears made of carburized chromium-nickel steel 20Kh2N4A are presented. It is shown that with the stable operation of thermal equipment fitted with computer-aided systems for automatic control of the parameters of the technological process of chemical heat treatment in coarse-grained gears of steel 20Kh2N4A, a diffusion layer is formed with a surface hardness of 60–61 HRC and an effective thickness (0.08–0.1) m to a microhardness of 750 HV0.2. It is found that the increased kinematic error after chemical heat treatment of gears made of steel 20Kh2N4A leads to uneven removal of the allowance at the final grinding of the teeth, which is the reason for reducing the resistance of contact fatigue in the local area of the diffusion layers of the teeth.

Keywords: coarse-grained gear wheels, chromium-nickel steel, chemical heat treatment, kinematic error, resistance to contact fatigue

References

1. Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley* [Chemical heat reinforcement of heavily stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 175 p.
2. Tesker E.I. *Sovremennye metody rascheta i povysheniya neshchey sposobnosti poverkhnostno-uprochnennykh zubchatykh peredach transmissiy i privodov* [Modern methods of calculation and increase of carrying capacity of the strengthened toothed gearings of transmissions and drive gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 434 p.
3. Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktynaya ustalost zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of transmissions gearwheels of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p.
4. Rudenko S.P., Valko A.L., Mosunov T.I. *Struktura tsementovannykh sloev zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [The structure of carburized layers of transmissions gears of power-saturated machines] *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgical science and heat treatment of steels], 2012, no. 4, pp. 38–42.
5. Rudenko S.P., Valko A.L. *Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti tsementovannykh zubchatykh koles iz khromonikelevykh staley* [Resistance of contact fatigue of carburized gears from chromium-nickel steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgical science and heat treatment of steels], 2017, no. 1, pp. 58–62.
6. Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L., Kuzmenkov O.V. *Proektirovanie vysokoeffektivnykh tekhnologicheskikh protsessov khimiko-termicheskoy obrabotki zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [Designing of highly effective technological processes of chemical heat treatment of the vehicles transmission gears]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2011, no. 2, pp. 67–70.
7. Rudenko S.P., Valko A.L. *Opreделение parametrov khimiko-termicheskoy obrabotki vysokonapryazhennykh zubchatykh koles na osnove raschetnykh modeley* [Definition of parameters of chemical and heat treatment for high-stressed gear wheels on basis of computational models]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2018, no. 8, pp. 353–358.
8. Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A. *Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik zubchatykh koles karernykh samovalov posredstvom optimizatsii rezhimov khimikotermicheskoy obrabotki* [Increase of operational characteristics of the dump trucks gear wheels by means of optimization of chemico-thermal treatment regimes]. *Lite i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2013, no. 2, pp. 110–114.
9. Sagaradze V.S. *Povyshenie nadezhnosti tsementuemykh detaley* [Improving the reliability of carburized parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 216 p.
10. Shishko A.S., Moiseenko V.I., Sidorenko A.G. *Povyshenie resursa krupnogabaritnykh zubchatykh koles s ispolzovaniem novykh staley* [Increase of lifetime of large-sized tooth gears using new steels]. *Sbornik nauchnykh statey "Aktualnye voprosy mashinovedeniya"* [Collection of scientific papers "Topical issues of mechanical engineering"], 2017, issue 6, pp. 219–225.
11. Valko A.L., Rudenko S.P., Mosunov E.I., Mikhlyuk A.I. *Metallograficheskiy reaktiv dlya vyyavleniya mikrostruktury tsementovannoy konstruktsionnoy stali* [Metallographic reagent for detection of microstructure of cemented structural steel]. Patent RB, no. 15273, 2011.
12. Rudenko S.P., Valko A.L. *Osobennosti rascheta zubchatykh koles transmissiy na glubinnuyu kontaktnuyu vynoslivost* [Features of analysis of gear wheels of transmissions on deep back-to-back endurance]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2015, no 11, pp. 5–11.
13. Rudenko S.P., Valko A.L. *Osobennosti primeneniya ekonomolegirovannykh staley dlya krupnomodulnykh zubchatykh koles* [Application features sparingly alloyed steels for coarse-grained gear wheels]. *Stal* [Steel], 2018, no. 8, pp. 54–58.