



УДК 669.18.33:621.78

Поступила 26.03.2013

С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, А. А. ШИПКО, ОИМ НАН Беларуси,
В. В. БЫЛИЦКИЙ, П. Г. КАРПОВИЧ, ОАО «БелАЗ»

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Проведено обследование камерных агрегатов Ипсен и выполнен контроль распределения углерода по толщине диффузионного слоя после химико-термической обработки по серийному технологическому процессу. Выявлена нестабильность показаний используемых на линии камерных агрегатов Ипсен кислородных датчиков после эксплуатации одного года.

The examination of Ipsenchamber units are held. Control of carbon distribution through the thickness of the diffusion layer after thermochemical treatment for serial manufacturing process is executed. The instability of indications used in the line of Ipsenchamber units oxygen sensors after one year of exploitation is identified.

Габариты редукторов мотор-колес (РМК) определяются размерами шин, в связи с чем детали РМК должны иметь допустимые размеры при достаточной прочности и долговечности. В настоящее время весьма актуальна задача обеспечения ресурса редукторов мотор-колес карьерных самосвалов не менее 600 тыс. км пробега. Наиболее эффективный путь обеспечения долговечности зубчатых колес состоит в применении новых конструкционных сталей с повышенными физико-механическими свойствами, а также в совершенствовании технологии химико-термической обработки.

Применяемая в настоящее время для изготовления зубчатых колес РМК сталь 20Х2Н4А имеет высокие физико-механические свойства и прочность, однако весьма нетехнологична на всех стадиях металлургического передела. Она склонна к образованию литейных дефектов и требует сложной технологииковки и применения специальных длительных режимов отжига поковок, а также усложненной технологии последующей химико-термической обработки. В цементованных слоях зубчатых колес из стали 20Х2Н4А трудно избежать повышенного содержания остаточного аустенита, что вызывает трудности в стабильном получении требуемых твердости (≥ 59 HRC) и эффективной толщины слоя с микротвердостью не ниже

750 HV 0,2. Под действием контактных нагрузок из-за недостаточной эффективной твердости возможны преждевременные разрушения поверхностей зубьев вследствие глубинного контактного выкрашивания [1–3].

В производственной нормативной документации принято регламентировать поверхностную твердость, твердость сердцевины и толщину цементованного слоя зубчатых колес. Эти величины являются основными контролируемыми параметрами при химико-термической обработке, однако они недостаточны для высоконапряженных зубчатых колес. Важными характеристиками, определяющими работоспособность высоконапряженных зубчатых колес, являются эффективные твердость и толщина упрочненного слоя при бездефектной микроструктуре [4, 5]. Регламентирование указанных показателей – гарантия высокой долговечности зубчатых колес РМК.

Требуемые эффективные толщина и твердость упрочненного слоя назначаются исходя из расчета ресурса по значениям микротвердости в каждой зоне слоя и сравнения полученных значений с регламентированной величиной. Ресурс зубчатых колес определяется по методике [6], разработанной применительно к зубчатым колесам автотракторной техники. Методика основана на экспериментально

доказанном факте, что глубинная контактная усталость поверхностей зубьев является основным критерием работоспособности высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин.

Перечисленные выше технологические недостатки используемой в настоящее время стали 20X2H4A вызвали необходимость проведения исследований по повышению эксплуатационных свойств зубчатых колес редукторов путем применения перспективных марок стали и оптимизации технологических режимов химико-термической обработки. В качестве перспективной была выбрана сталь 20XH3MA с более низким содержанием хрома и никеля, дополнительно легированная молибденом [7].

Для обоснованного выбора режимов химико-термической обработки зубчатых колес послужили результаты обследования технологических параметров камерных агрегатов Ипсен и контроля качества образцов после ХТО по серийному технологическому процессу. Выявлены случаи, когда максимальное содержание углерода в упрочненном слое было доэвтектоидным и не превышало 0,7 мас.% при задаваемом системой «Carb-o-Prof 4.0» значении 0,9 % C, толщина диффузионного слоя составляла 2,2–2,3 мм (рис. 1) при заданной толщине 2,45 мм (при содержании углерода 0,35%). Согласно серийному техпроцессу, контрольной точкой завершения процесса насыщения углеродом деталей является момент совпадения содержания углерода 0,35% на заданной глубине. Существует более точный метод управления процессом цементации – по полному совпадению задаваемого и расчетного профилей распределения углерода по толщине диффузионного слоя. В обоих случаях моделирование процесса выполняется на основании уровня выходного сигнала кислородного зонда. Оценка точности регулирования углеродного

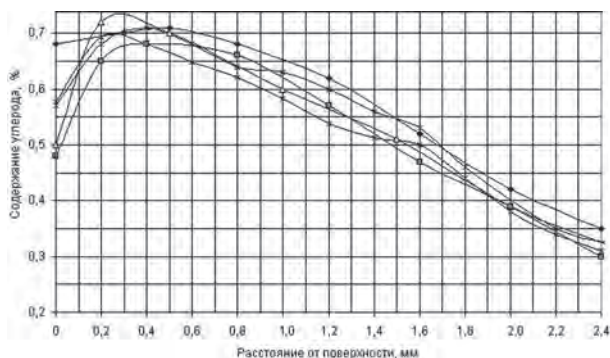


Рис. 1. Распределение углерода по толщине цементованного слоя образцов для случая нестабильной работы кислородного зонда при химико-термической обработке по серийной технологии

потенциала эндотермической атмосферы показала, что одной из причин пониженного содержания углерода в диффузионном слое служат завышенные показания датчиков относительно реального углеродного потенциала в печном пространстве. При длительной работе погружных кислородных датчиков с неизбежными циклами нагрева и охлаждения образование сажи на поверхности зонда уменьшает проходное сечение, что приводит к искажению показаний в сторону завышенных значений. В итоге процесс цементации проводится при заниженном относительно задаваемого углеродном потенциале.

Анализ работы кислородных зондов погружного типа, установленных на цементационном оборудовании ряда белорусских предприятий (ОАО «БелАЗ», РУП «МТЗ», ОАО «МАЗ»), показал их недолговечность, а также нестабильность показаний датчиков после их эксплуатации более одного года. Учитывая возможное несоответствие расчетного углеродного потенциала реальному, можно рекомендовать непосредственный контроль эндотермической атмосферы методом фольговой пробы. При несовпадении расчетного углеродного потенциала с определенным прямым методом по фольге производится либо корректировка коэффициентов пересчета электродвижущей силы датчика в углеродный потенциал, либо замена кислородного зонда на новый. Можно также рекомендовать индивидуальный прожиг кислородного зонда в трубчатой лабораторной печи при температуре 850 °С и времени не менее 10 ч.

Наиболее перспективными для контроля углеродного потенциала, по нашему мнению, являются кислородные датчики выносного типа, которые производит ФГУП СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск) или ООО «Уралэлектропечь» (г. Екатеринбург). Выносные датчики не подвергаются тепловым колебаниям (термостатированы), что и объясняет их высокую надежность и долговечность.

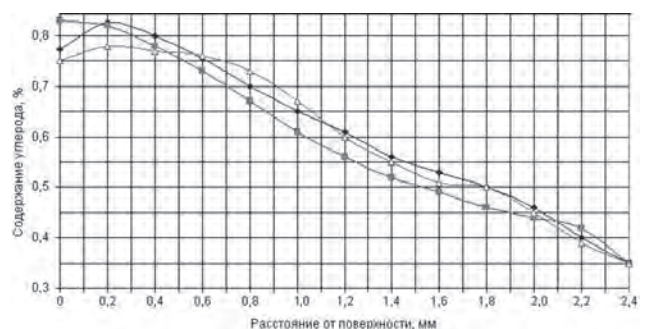


Рис. 2. Распределение углерода по толщине цементованного слоя образцов после химико-термической обработки по оптимальным технологическим режимам

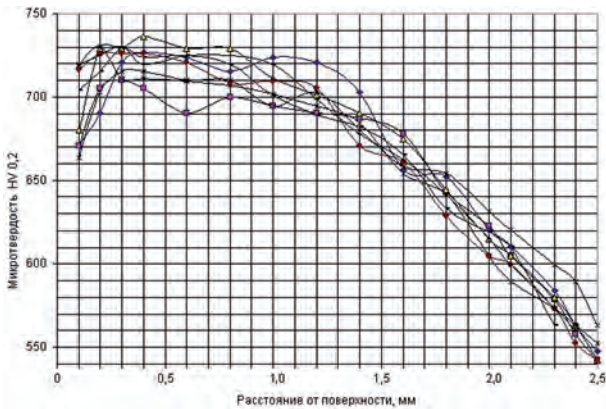


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя образцов из стали 20X2H4A после химико-термической обработки по оптимальным технологическим режимам

На основании результатов исследований на линии камерных агрегатов Ипсен проведены ремонтно-наладочные работы, в частности, произведена обоснованная замена кислородных датчиков, выполнена корректировка программных коэффициентов расчета углеродного потенциала и технологических режимов цементации и нагрева под закалку зубчатых колес.

Химико-термическая обработка образцов, изготовленных из серийных марок сталей 20X2H4A, 20XН3А и перспективной марки 20XН3МА, выполняли на линии камерных агрегатов «Ипсен» по технологическому режиму: цементация при 930 °С на толщину слоя до полупереходной зоны (0,35 %С) 2,2–2,6 мм, высокий отпуск при 650 °С, нагрев до 830 °С под закалку, закалка в масло АКС МЗ–38, низкий отпуск при 180 °С в течение 3 ч. Выбранные размеры образцов по скоростям охлаждения соответствовали зубчатому венцу шестерен с модулем 8–10 мм [1, 8]. На рис. 2 показано распределение углерода по толщине упрочненного слоя опытных образцов, прошедших полный цикл химико-термической обработки на линии Ипсен.

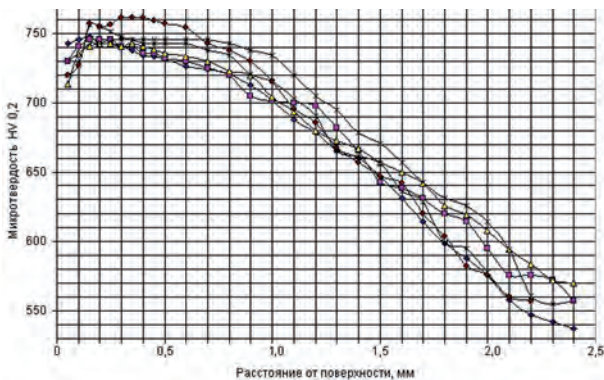


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя образцов из стали 20XН3МА после химико-термической обработки по оптимальным технологическим режимам

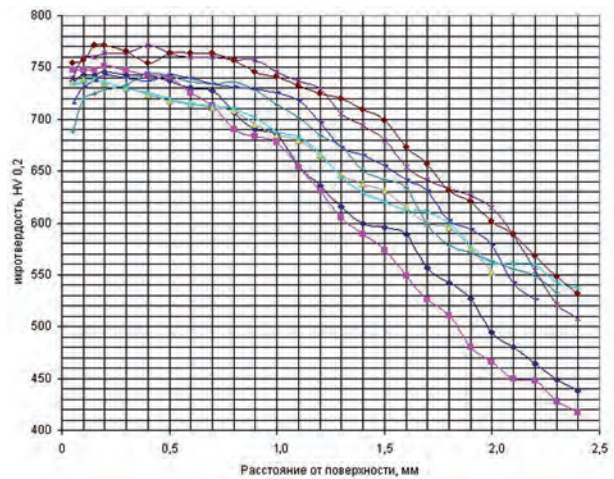


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя образцов из стали 20XН3А после химико-термической обработки по оптимальным технологическим режимам

Из рисунка видно, что корректировка технологических режимов цементации и нагрева под закалку в сочетании с оптимальными коэффициентами расчета углеродного потенциала позволила получить эвтектоидное содержание углерода (0,8 %) в поверхностных слоях зубчатых колес при требуемом распределении углерода по толщине упрочненного слоя, причем при неизменном времени цементации толщина слоя увеличилась на 10 %.

Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя исследованных образцов после полного цикла ХТО приведено на рис. 3–6. Согласно ГОСТ 30634, эффективная толщина упрочненного слоя должна быть обеспечена для значений микротвердости 750, 700 и 600 HV 0,2. Из полученных данных видно, что из-за повышенного содержания в цементованном слое остаточного аустенита минимальную поверхностную твердость и микротвердость при узкой полосе рассеяния имеют образцы из стали 20X2H4A (см. рис. 3). Отме-

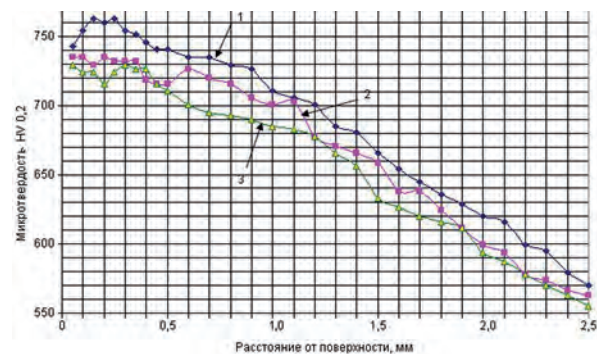


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя образцов из стали 20X2H4A после химико-термической обработки: 1 – цементация, высокий отпуск, закалка; 2 – цементация, высокий отпуск, закалка, низкий отпуск 180 °С, 1,5 ч; 3 – цементация, высокий отпуск, закалка, низкий отпуск 180 °С, 3 ч

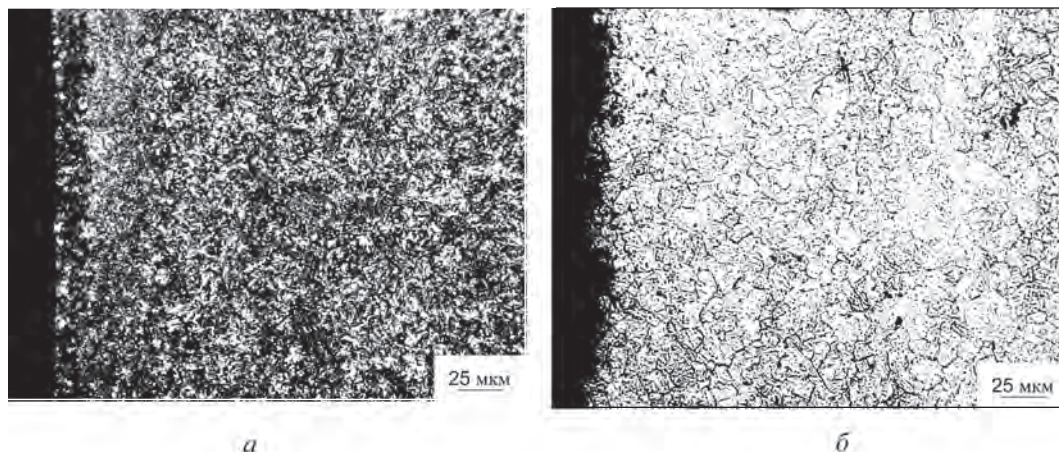


Рис. 7. Бездефектная микроструктура цементованного слоя образца из стали 20XN3MA: *а* – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты; *б* – травление по пат. № 15273

тим, что непосредственно после закалки твердость поверхности образцов из серийной стали не превышала 60–61 HRC (760 HV 0,2) при содержании остаточного аустенита 28–30 об.%. Одним из возможных вариантов повышения поверхностной твердости зубчатых колес из стали 20X2H4A является сокращение длительности низкого отпуска при 180 °С с 3 до 1,5–2 ч (рис. 6). Тем не менее, данный режим низкого отпуска не позволит получить рекомендуемую ГОСТ 30634 эффективную толщину упрочненного слоя для значений микротвердости 750 HV 0,2.

Величина микротвердости цементованного слоя образцов из сталей 20XN3A и 20XN3MA имеет более высокий уровень (до 770 HV 0,2). Широкая полоса рассеяния микротвердости, полученная на образцах из стали 20XN3A (см. рис. 4), объясняется ее ограниченной прокаливаемостью при содержании углерода менее 0,5%. Образцы из стали 20XN3MA имеют узкую полосу распределения микротвердости при эффективной толщине цементованного слоя до 750 HV – 0,5–0,7 мм, до 700 HV – 1,0–1,2 мм, до 600 HV – 1,8–2,0 мм (см. рис. 5), причем значения микротвердости на расстоянии от поверхности 2,2 – 2,6 мм (полупереходная зона) не ниже, чем для стали 20X2H4A. По данным рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре D 8 Advance Bruker (Германия), максимальное содержание остаточного аустенита для образцов из сталей 20XN3A и 20XN3MA не превышало 20 об.%.

Установлено, что микроструктура цементованного слоя образцов из стали 20XN3MA после ХТО состояла из мелкоигольчатого мартенсита 3–4-го балла [9] и остаточного аустенита 1–2-го балла [10] (рис. 7, *а*). Величина зерна цементованного слоя, выявленного химическим травлением по методике пат. № 15273 [11], соответствовала № 10 согласно ГОСТ 5639, со-

держание карбидов не превышало 1-го балла (рис. 7, *б*). Микроструктура сердцевины содержала малоуглеродистый мартенсит при величине зерна № 9. Формирование мелкозернистой микроструктуры и невысокое содержание остаточного аустенита в упрочненном слое позволяет в перспективе скорректировать схему технологического процесса ХТО зубчатых колес из стали 20XN3MA в части исключения промежуточного высокого отпуска.

Выводы

1. Проведено обследование камерных агрегатов Ипсен и выполнен контроль распределения углерода по толщине диффузионного слоя после ХТО по серийному технологическому процессу. Были выявлены случаи, когда максимальное содержание углерода в упрочненном слое являлось доэвтектоидным и не превышало 0,7 мас.% при задаваемом системой управления процессом на стадии диффузионного выравнивания значением 0,9 % С.

2. Выявлена нестабильность показаний используемых на линии камерных агрегатов Ипсен кислородных датчиков после эксплуатации более одного года. Наиболее перспективными для контроля и регулирования углеродного потенциала, по нашему мнению, являются термостатированные кислородные датчики выносного типа.

3. Установлены технологические недостатки серийной стали 20X2H4A, которая характеризуется повышенным содержанием остаточного аустенита и недостаточной эффективной толщиной цементованного слоя, определяемой как расстояние от поверхности до участка с микротвердостью не ниже 750 HV 0,2.

4. Выполнена оптимизация технологических режимов цементации и закалки зубчатых колес из серийной стали 20X2H4A и перспективной 20XN3MA на линии камерных агрегатов Ипсен.

Микроструктура и эффективная толщина цементованного слоя образцов из новой стали 20ХНЗМА соответствуют требованиям к высоконапряженным зубчатым колесам. Замену стали 20Х2Н4А на 20ХНЗМА наряду с проведенной оптимизацией

технологических режимов цементации и закалки можно рассматривать как вариант повышения эксплуатационных характеристик зубчатых колес редукторов мотор-колес карьерных самосвалов ОАО «БелАЗ».

Литература

1. С у с и н А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей. Минск: Беларуская навука, 1999.
2. З и н ч е н к о В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001.
3. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / В. Е. Антонюк [и др.]; под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. СПб.: Профессия, 2007.
4. Р у д е н к о С. П., В а л ь к о А. Л., М о с у н о в Е. И. Структура цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 4. С. 38–42.
5. Р у д е н к о С. П., В а л ь к о А. Л., М о с у н о в Е. И. Технические требования к качеству цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Автомобильная промышленность. 2011. № 9. С. 33–36.
6. Р у д е н к о 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.
7. Конструкционная легированная сталь: пат. 16513 Республика Беларусь: МПК С 22С 38/46 / Моисеенко В. И., Шкатуло Н. Д. № а20110892; заявл. 21.06.2011; опубл. 30.10.2012. Бюл. № 5.
8. Р у д е н к о С. П., Ш и п к о А. А., В а л ь к о А. Л., К у з ь м е н к о в О. В. Проектирование высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 2. С. 67–70.
9. ГОСТ 8233–76. Сталь. Эталоны микроструктур.
10. К а л ь н е р В. Д. и др. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: Справ. М.: Машиностроение, 1984.
11. Металлографический реактив для выявления микроструктуры цементованной конструкционной стали: пат. 15273 Республика Беларусь: МПК С 23 F 1/28 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, Е. И. Мосунов, А. И. Михлюк № а20101136; заявл. 23.07.2010; опубл. 30.12.2011. Бюл. № 6.