



УДК 621.785:621.833

Поступила 05.03.2014

С. П. РУДЕНКО, А. А. ШИПКО, А. Л. ВАЛЬКО, ОИМ НАН Беларуси, А. Н. ЧИЧИН, ОАО «МТЗ»

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 20ХГНМБ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

По результатам спектрального, металлографического, рентгеноструктурного и дюрOMETрических анализов установлено, что структурные характеристики деталей, изготовленных из промышленной плавки стали, соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству цементованного слоя и сердцевины высоконапряженных зубчатых колес.

It is established that structural characteristics of the parts produced of industrial steel melting correspond to the requirements rendered to quality of the cemented layer and core of high-intense gear wheels according to the results of spectral, metallographic, X-ray structural and durometric analyses.

К производителям различного промышленного оборудования и машин все чаще предъявляются требования по повышению эффективности работы и срока службы изделий, снижению их материалоемкости и себестоимости изготовления, уменьшению эксплуатационных затрат, соответствию экологическим требованиям. Все это обуславливает разработку и использование в промышленности новых марок сталей, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами при снижении их себестоимости.

Машиностроительные предприятия Республики Беларусь, такие, как ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Минский автомобильный завод» и др., для производства зубчатых колес трансмиссий широко применяют сталь 20ХН3А (ГОСТ 4543), которая имеет достаточно высокие физико-механические свойства и прочность, однако склонна к сохранению в цементованных слоях повышенного содержания остаточного аустенита, что вызывает трудности в стабильном получении требуемых твердости (≥ 59 HRC) и эффективной толщины слоя с микротвердостью не ниже $750 \text{ HV}_{0,2}$. При работе зубчатых колес под действием контактных нагрузок именно из-за недостаточной эффективной твердости наблюдаются преждевременные разрушения поверхностей зубьев вследствие глубинного контактного выкрашивания [1–3]. Наиболее эффективный путь повышения сопротивления контактной усталости зубчатых колес состоит в применении новых конструкционных сталей с повышенными физико-механическими свойствами,

а также в совершенствовании технологии химико-термической обработки (ХТО).

В целях повышения надежности работы трансмиссии тракторов «Беларус» был разработан состав экономнолегированной конструкционной стали с требуемым уровнем прочности и запасом вязкости (микролегирование карбидообразующими элементами при пониженном в 3–4 раза содержании никеля по сравнению со сталью 20ХН3А), применяемой для изготовления зубчатых колес коробок передач [4]. Физико-механические свойства стали 20ХГНМБ приведены в таблице. По сравнению со сталью 20ХН3А экономнолегированная сталь 20ХГНМБ имеет примерно одинаковые значения временного сопротивления σ_B и предела текучести σ_T , однако значительно увеличенную величину ударной вязкости КСУ.

Физико-механические свойства сталей

Марка стали	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, кДж/м ²
20ХГНМБ	1497	1269	7,0	58,0	1300
20ХН3А	1420	1220	12,0	55,0	860

Свойства упрочненного слоя зубчатых колес в значительной степени зависят от концентрационного распределения углерода по толщине диффузионного слоя, формируемого в процессе химико-термической обработки по конкретной технологии. Для получения оптимальной концентрации углерода на поверхности и требуемого его градиента по слою современное оборудование ХТО

оснащают системами автоматического регулирования углеродного потенциала насыщающей атмосферы. Однако на промышленных предприятиях зачастую продолжают использовать устаревшие технологические процессы цементации и нитроцементации, проводимые на оборудовании без автоматического управления составом насыщающей атмосферы. Таким оборудованием являются, например, безмуфельные проходные агрегаты, применяемые в настоящее время на ОАО «МТЗ» для химико-термической обработки зубчатых колес. В процессе проведения масштабной модернизации производства в рамках выполнения программы технического переоснащения на ОАО «МТЗ» были поставлены и внедрены современные технологии химико-термической обработки деталей на оборудовании с автоматическим регулированием параметрами технологического процесса: камерные агрегаты «Ipsen» и вакуумные печи «ModulTherm 7/1» фирмы «ALD Vacuum Technologies GmbH» (Германия).

Целью настоящей работы являлось исследование структурных характеристик новой экономнолегированной стали после химико-термического упрочнения по технологиям, соответствующим трем технологическим уровням: на оборудовании без контроля и регулирования углеродного потенциала насыщающей атмосферы, в камерных агрегатах с автоматическим регулированием состава эндогазовой атмосферы, в современных вакуумных печах с автоматическим регулированием условий насыщения в атмосфере ацетилена и закалки в потоке инертного газа – гелия.

Исследовали образцы зубчатых колес из новой экономнолегированной конструкционной стали 20ХГНМБ промышленной плавки, проведенной в условиях ЗАО ВМЗ «Красный Октябрь» (г. Волгоград).

Образцы для исследования вырезали из натуральных зубчатых колес после химико-термического упрочнения по трем серийным технологиям: нитроцементация в проходном безмуфельном агрегате, цементация в камерных печах «Ипсен» и на линии вакуумных агрегатов «ModulTherm 7/1».

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере «Durascan 20» при нагрузке 1,96 Н (0,2 кгс). Для структурных исследований использовали световой микроскоп Микро-200 при увеличении 100, 400, 1000 с регистрацией изображения на цифровую видеокамеру. Металлографические шлифы исследовали после травления в реактиве [5] или 4%-ном растворе азотной кислоты. Объемное содержание остаточного аустенита определяли на дифрактометре «D8 Advance» по данным рент-

геноструктурного анализа. Спектрально-эмиссионный анализ по марке стали и послойному распределению углерода выполняли на приборе «Spectro-Lab».

Химико-термическую обработку (нитроцементация) в проходном безмуфельном агрегате выполняли по следующему режиму: нагрев деталей и нитроцементация в первой зоне при 880 °С с подачей эндогаза в количестве 25 м³/ч, подсушивание и выдержка при 860 °С во второй зоне с подачей природного газа 0,7–1,3 м³/ч, выдержка в третьей зоне при 860 °С с подачей аммиака в количестве 0,9–1,0 м³/ч, выдержка в четвертой зоне с той же подачей аммиака, закалка в масло МС-20, низкий отпуск при 170 °С. Поверхностная твердость и твердость сердцевины зуба составляла соответственно 63–64 HRC и 34–36 HRC. Толщина диффузионного слоя до полупереходной зоны – 1,3 мм. Распределение углерода по толщине диффузионного слоя приведено на рис. 1. Несмотря на доэвтектоидное содержание углерода в цементованном слое, максимальная величина микротвердости составляла 840 HV_{0,2} на глубине 0,4 мм благодаря дополнительному насыщению азотом до 0,1 %N. Эффективная толщина цементованного слоя по эвольвенте зуба составляла до участков с микротвердостью 750 HV_{0,2} 0,7 мм и 700 HV_{0,2} 0,9 мм и с микротвердостью 600 HV_{0,2} – 1,2 мм (рис. 2). Микроструктура нитроцементованного слоя включала мелкоигльчатый мартенсит и остаточный аустенит 1–2-го балла. Величина действительного зерна в цементованном слое соответствовала № 10–11 по ГОСТ 5639, а в сердцевине – № 9. Микроструктура сердцевины зуба содержала малоуглеродистый мартенсит, бейнит и 5–7% феррита.

Химико-термическая обработка в камерных агрегатах «Ipsen» проводилась на толщину слоя

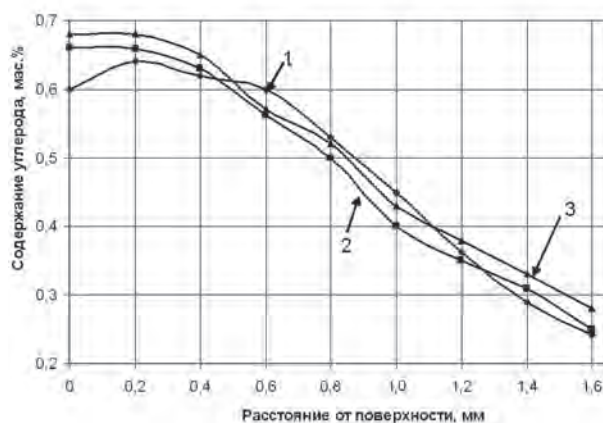


Рис 1. Распределение углерода по толщине цементованного слоя зубчатых колес из стали 20ХГНМБ после ХТО по серийной технологии: 1 – в безмуфельных агрегатах; 2 – в камерных печах «Ipsen»; 3 – в вакуумных печах «ModulTherm 7/1»

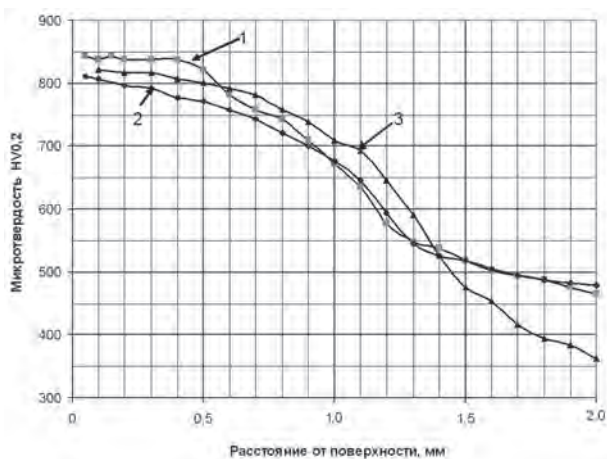


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине упрочненных слоев зубчатых колес из стали 20ХГНМБ после ХТО по серийной технологии: 1 – в проходных безмуфельных агрегатах; 2 – камерных агрегатах «Irsen»; 3 – в вакуумных печах «ModulTherm 7/1»

1,0–1,4 мм и включала цементацию в течение 14 ч при 930 °С, подстуживание до 860 °С с выдержкой 30 мин, закалку в масле высокой вязкости МС-20 и последующий низкий отпуск при 170 °С в течение 3 ч. Поверхностная твердость упрочненного слоя составляла 63–64 HRC, сердцевины – 32–34 HRC. Величина действительного зерна в цементованном слое № 10–11 по ГОСТ 5639, в сердцевине – № 9. Толщина цементованного слоя до полупереходной зоны составляет 1,3 мм при насыщении ниже эвтектоидного (см. рис. 1). Эффективная толщина слоя с микротвердостью 750 HV_{0,2} составляет 0,65 мм, 700 HV_{0,2} – 0,9 мм, 600 HV_{0,2} – 1,2 мм (рис. 2). Микроструктура цементованного слоя зубчатого сектора состояла из мелкоигльчатого мартенсита и остаточного аустенита 2-го балла (рис. 3). Микроструктура сердцевины – сорбит и 5 об.% видманштеттова феррита.

Химико-термическая обработка шестерен из экономнолегированной стали в вакуумных печах «ModulTherm 7/1» состояла из следующих технологических операций: вакуумирование и конвективный нагрев до 500 °С в течение 40–60 мин, вакуумный нагрев до температуры цементации 960 °С; цементация с циклической подачей ацетилена при скорости насыщения диффузионного слоя ~0,2 мм/ч в течение 6 ч 33 мин на слой 1,2 мм (15 циклов); диффузия в течение 1 ч 40 мин; охлаждение до 850 °С и закалка в среде инертного газа при давлении гелия до 2,0 МПа; низкотемпературный отпуск при 175 °С в течение 2 ч.

После полного цикла вакуумной ХТО поверхностная твердость цементованного слоя составила 61–62 HRC, сердцевины – 30–32 HRC. Толщина слоя до полупереходной зоны, определяемой по

микротвердости 550 HV_{0,2}, составляла 1,3 мм при содержании углерода на данной глубине 0,35 % (см. рис. 1). Эффективная толщина слоя с микротвердостью не ниже 750 HV_{0,2} составляла 0,8 мм; 700 HV_{0,2} – 1,1 мм, а с микротвердостью 600 HV_{0,2} – 1,3 мм (см. рис. 2). Микроструктура цементованного слоя состояла из мелкоигльчатого мартенсита 3-го балла по ГОСТ 8233 и остаточного аустенита (рис. 4). Микроструктура сердцевины – троостосорбит и пакетный мелкоигльчатый мартенсит 3–4-го балла при величине зерна № 9–10 по ГОСТ 5639 (рис. 5). Формирование троостосорбитной микроструктуры сердцевины объясняется более низкими скоростями охлаждения при закалке деталей в потоке инертного газа по сравнению с закалкой в масло [8].

Полученные результаты измерения микротвердости показали, что величина эффективной толщины цементованного слоя зубчатых колес, прошедших ХТО по трем технологиям, соответствует техническим требованиям к высоконапряженным зубчатым колесам [6, 7]. При этом содержание

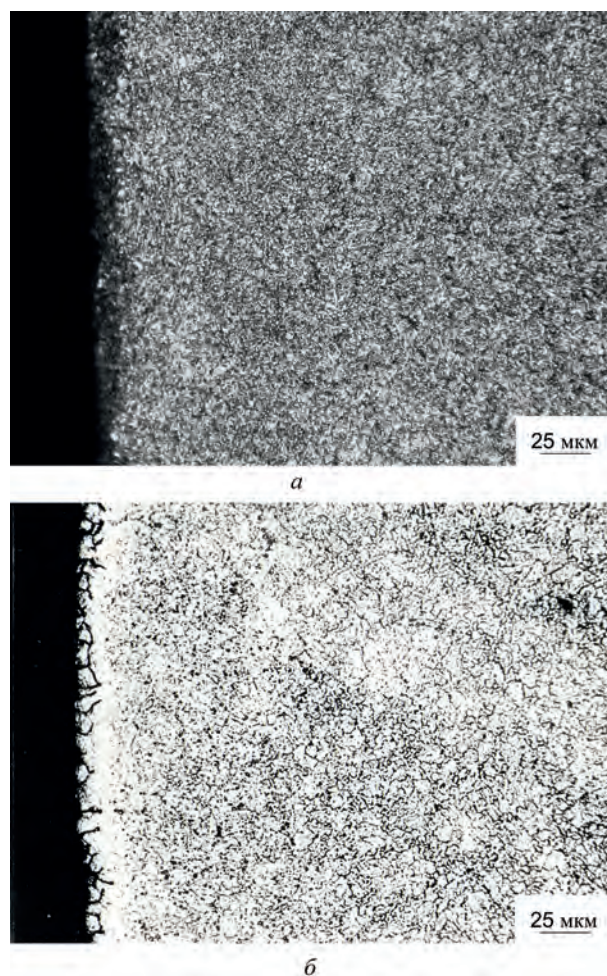


Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя зубчатого колеса после ХТО на линии «Irsen»: а – травление в 4%-ном растворе азотной кислоты; б – травление по патенту [5]

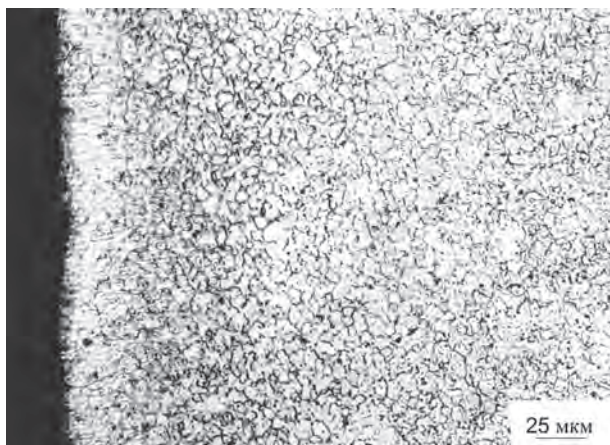


Рис. 4. Микроструктура цементованного слоя зубчатого колеса после ХТО в вакуумных печах «ModulTherm 7/1». Травление по патенту [5]

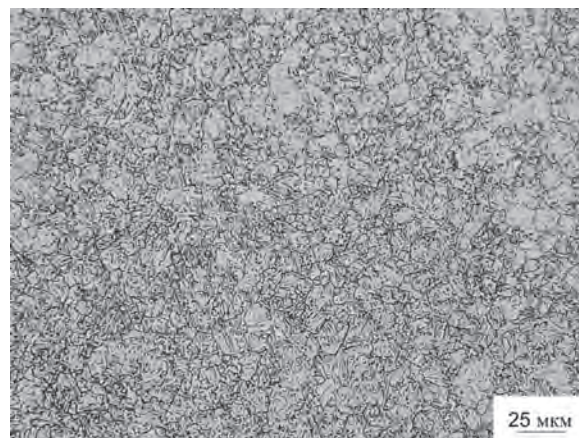


Рис. 5. Микроструктура сердцевины зубчатых колес после ХТО в вакуумных печах «ModulTherm 7/1». Травление по патенту [5]

остаточного аустенита, определенное рентгеноструктурным методом, не превышало 16 – 20 об.%, что является оптимальным для твердого и достаточно хрупкого цементованного слоя [9].

Установлено, что при содержании углерода 0,6–0,68 % С в поверхностных слоях (см. рис. 1) обеспечивается твердость 61–64 HRC. Это указывает на высокую закаливаемость экономнолегированной стали 20ХГНМБ и ее невосприимчивость к колебаниям углеродного потенциала насыщающей атмосферы при проведении ХТО (цементации или нитроцементации) по широко применяемым в настоящее время технологиям.

По металлографическим параметрам микроструктура цементованных слоев после цементации (нитроцементации) в эндотермической атмосфере или при вакуумной цементации в ацетилене различается незначительно. Во всех случаях диффузионный слой состоит из мелкоигольчатого мартенсита 2–3-го балла по ГОСТ 8233 и остаточного аустенита при величине действительного зерна цементованного слоя № 10–11 по ГОСТ 5639. Такая структура является оптимальной и соответствует техническим требованиям, предъявляемым к высоконапряженным зубчатым колесам [6, 7].

Выводы

Выполнена проверка на технологическую устойчивость новой экономнолегированной конструкционной стали 20ХГНМБ, детали из которой прошли химико-термическое упрочнение по серийным технологиям трех уровней: в проходных безмуфельных агрегатах, камерных агрегатах «Ipsen» и вакуумных печах «ModulTherm 7/1».

По результатам спектрального, металлографического, рентгеноструктурного и дюрOMETРИЧЕСКИХ анализов установлено, что структурные характеристики деталей, изготовленных из промышленной плавки стали, соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к качеству цементованного слоя и сердцевины высоконапряженных зубчатых колес. Сталь 20ХГНМБ при содержании углерода в цементованном слое не выше эвтектидного позволяет получить гарантированную поверхностную твердость 61–64 HRC при твердости сердцевины 30–42 HRC. Микроструктуру цементованного слоя зубчатых колес отличает мелкозернистое строение при содержании остаточного аустенита не выше 20 об.%.

Литература

- Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Из-во МГТУ им. Баумана, 2001.
- Сусин А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей. Минск: Беларуская навука, 1999.
- Руденко С. П., Валько А. Л., Мосунов Е. И. Структура цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 4. С. 38–42.
- Руденко С. П., Валько А. Л., Дудецкая Л. Р., Емельянов И. В. Новая цементуемая сталь с регламентируемой прокаливаемостью для зубчатых колес трансмиссий // Механика машин, механизмов и материалов. 2013. № 3. С. 57–61.
- Металлографический реактив для выявления микроструктуры цементованной конструкционной стали: пат. 15273 Республика Беларусь: МПК С 23 F 1/28 / Валько А. Л., Руденко С. П., Мосунов Е. И., Михлюк А. И. № а20101136; заявл. 23.07.2010; опубл. 30.12.2011, Бюл. № 6. 1с.
- Руденко С. П., Валько А. Л., Мосунов Е. И. Технические требования к качеству цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Автомобильная промышленность. 2011. № 9. С. 33–36.

7. Система менеджмента качества. Качество микроструктуры цементованного слоя и сердцевины зубчатых колес трансмиссий автотракторной техники. Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2010.

8. Л ю т ы В. Закалочные среды: справ. изд. / Пер. с польск.; под ред. С. Б. Масленкова. Челябинск: Metallurgia, 1990.

9. Р ы ж о в Н. М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 7. С. 39–45.

ежегодная международная конференция **ЛИТЕЙНЫЙ КОНСИЛИУМ®**

VIII ЛИТЕЙНЫЙ КОНСИЛИУМ

4-5 декабря 2014 года

г. Челябинск, отель «Рэдиссон»

Уважаемые господа!

Российский Сайт Литейщиков приглашает Вас к участию в ежегодной международной конференции Литейный Консилиум № 8 на тему: «Литейная форма. Совершенство формы – путь к успеху», которая состоится с 4 по 5 декабря 2014 года, г. Челябинск, отель «Рэдиссон». Участники предстоящего Литейного Консилиума – руководители и главные специалисты литейных предприятий, главные металлурги, потребители литейной продукции а также производители и поставщики оборудования. Предыдущие конференции уже посетили представители более 250 предприятий и научных организаций из России, Украины, Белоруссии, Германии, Австрии, Словении и Италии.

Обсуждаемые темы предстоящего Литейного Консилиума:

1. Формовочное оборудование, стержневое оборудование, смесеприготовительное оборудование, оборудование для регенерации смесей, средства контроля.

2. Расходные материалы: пески, связующие, противопопригарные краски, бентониты, модельная оснастка, пенополистеролы и т.д.

3. Оборудование для центробежного литья, литья под давлением, оборудование для ЛГМ и ЛВМ.

4. Дефекты литья, причины и методы борьбы с ними, модифицирование.

Первый день - круглые столы по темам ЛК. Второй день - круглые столы по темам ЛК, информационный опыт в литейном производстве от ведущих специалистов, банкет.

Участие в консилиуме бесплатно* для одного представителя от предприятий стран Таможенного Союза, имеющее литейное производство, за каждого последующего (или представителей иных предприятий) регистрационный взнос составляет 10.000 руб. (за каждого участника). В регистрационный взнос входит: участие в качестве слушателя, раздаточный материал, обеды и кофе-брейки во время семинара, участие в неформальных мероприятиях (банкет).

* Количество бесплатных мест ограничено! (в первую очередь бесплатные места предоставляются литейным предприятиям, ранее не участвовавшим в ЛК).

Контактное лицо: *Курочкина Наталья*

Телефоны для справок: +7 (351) 210-37-37 (доб.188), 262-46-58 (факс), моб. 89090795161

E-mail: natalia@npp.ru Skype: [natalia.npp](https://www.skype.com/name/natalia.npp) ICQ: 449441058

Адрес оргкомитета: 454901, Россия, г. Челябинск, ул. Водрем-40, 25