



УДК 621.833: 621.785.4.52

Поступила 13.05.2016

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ВАКУУМНАЯ ЦЕМЕНТАЦИЯ – РЕЗЕРВ ПО СНИЖЕНИЮ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТРАНСМИССИЙ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАШИН

HIGH-TEMPERATURE VACUUM CEMENTATION – THE RESERVE TO REDUCE THE ENERGY INTENSITY OF MANUFACTURE AND IMPROVE THE QUALITY OF TRANSMISSIONS GEARWHEELS OF HIGH-ENERGY MACHINES

А. А. ШИПКО, С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, А. Н. ЧИЧИН, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

A. A. SHIPKO, S. P. RUDENKO, A. L. VALKO, A. N. CHICHIN, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Academicheskaya str. E-mail: sprud.47@mail.ru

Приведены результаты исследований влияния высокотемпературной вакуумной химико-термической обработки на величину зерна конструкционных сталей. Показана эффективность применения наследственно мелкозернистой стали для высокотемпературной вакуумной цементации.

Results of research of influence of high-temperature vacuum chemical heat treatment on the amount of grain structural steels are presented. The efficiency of hereditary fine-grained steel for high temperature vacuum carburizing are shown.

Ключевые слова. *Высокотемпературная вакуумная цементация, конструкционные наследственно мелкозернистые стали, величина зерна.*

Keywords. *High-temperature vacuum carburizing, structural hereditary fine-grained steel, size of grain.*

Проблема обеспечения эксплуатационной надежности и ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин является комплексной и предполагает применение современных методов химико-термической обработки. Главная задача этой проблемы – улучшение свойств поверхностно-упрочненного слоя материала деталей, в частности путем цементации.

Свойства цементованного слоя и определяемый ими ресурс работы зубчатых колес в большой степени зависят от кривой распределения углерода по толщине слоя [1]. Опыт эксплуатации цементационных печей показывает, что получение регулируемого профиля распределения углерода по толщине цементованного слоя возможно лишь на автоматизированном и легко перестраиваемом печном оборудовании. Одним из перспективных с точки зрения производительности, качества и повторяемости результатов современных типов цементационного оборудования является вакуумная цементация в атмосфере ацетилена.

Процесс вакуумной цементации имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, основными из которых являются отсутствие газоприготовительных установок и приборов контроля углеродного потенциала; возможность эффективного регулирования профиля распределения углерода в цементованном слое; уменьшение удельного расхода электроэнергии и технологического газа; отсутствие кислородсодержащих компонентов в атмосфере, что исключает внутреннее окисление деталей; большая мобильность оборудования; сокращение длительности процесса в результате проведения его при высокой температуре.

Первая информация о процессе вакуумной цементации относится к началу 80-х годов прошлого столетия, когда специалисты фирмы «Хейсс» (США) осуществили вакуумную цементацию в модернизированных печах типа VSQ [2]. Создание подобных установок оказалось возможным вследствие использо-

вания в вакуумных печах графитовых нагревателей и новых изоляционных материалов (графитового войлока) для нагревательной камеры, способных выдерживать температуру до 1300 °С.

Эффективность использования вакуумных печей для цементации изделий массового производства была подтверждена на ОАО «АвтоВАЗ», ОАО «Волгабурмаш» и др. Опыт их эксплуатации показал увеличение производительности, улучшение условий труда, повышение экономичности оборудования и высокую управляемость процессом по сравнению с традиционными методами цементации [2].

Один из недостатков процесса цементации по сравнению с другими видами термообработки – длительность технологического процесса. Наиболее реальный путь ускорения процесса цементации – повышение температуры. Значительное ускорение процесса может быть достигнуто в результате использования высокотемпературной цементации при давлении, ниже атмосферного.

Так, повышение температуры от 940 до 1040 °С способствовало увеличению общей глубины цементованного слоя с 0,7 до 1,15 мм, т. е. в 1,6 раза [3], а нагрев до 1100 °С не оказал отрицательного влияния на механические свойства сталей 25ХГТ и 12ХН3А [4].

Однако в этом случае встает вопрос об эксплуатационных характеристиках деталей, в частности зубчатых колес, определяемых не в последнюю очередь величиной действительного зерна упрочненного слоя и сердцевины [1]. Применение высокотемпературной цементации без последующей перекристаллизации перед закалкой приводит к росту величины действительного зерна, неблагоприятному для механических свойств детали, а также к повышенным деформациям после полного цикла химико-термической обработки.

Так, цементуемые стали 19ХГН и 20ХГН после вакуумной цементации при 1050 °С имели аустенитное зерно 2–5-го балла [5, 6]. Закалка с повторного нагрева привела к получению мелкозернистой структуры и высоких прочностных характеристик изделий из этих сталей. Значительное измельчение зерна стали 20ХГНМ после вакуумной цементации по сравнению с величиной зерна после газовой цементации соответственно отразилось на повышении ударной вязкости (в 2,5 раза), сопротивления усталости (на 25%) и прочности на изгиб (на 8%).

Результаты других исследований показали, что склонность к росту зерна аустенита в наследственно мелкозернистой стали 23ХН2М проявляется при 1000 °С (рис. 1) [7]. При 1100 °С зерно выросло до № 3.

В настоящее время на ОАО «Минский тракторный завод» химико-термическая обработка зубчатых колес трансмиссий тракторов «Беларус» проводится на оборудовании «ModulTherm 7/1» фирмы «ALD Vacuum Technologies GmbH» (Германия) (рис. 2).

Цементация в вакуумных печах осуществляется с циклической подачей ацетилена при 940–960 °С при ориентировочной скорости насыщения 0,2 мм диффузионного слоя в час, затем следует подстуживание до 850 °С с последующей выдержкой. Закалка производится в среде инертного газа-гелия при давлении 2,0 МПа [8].

Качество химико-термической обработки на линии вакуумных печей «ModulTherm 7/1» контролируется в основном по наиболее объективному показателю упрочнения – по распределению микротвердости по толщине цементованного слоя. На рис. 3 приведено распределение микротвердости по сечению контрольных образцов из стали 20ХН3А после цементации при температуре 960 °С, закалки в потоке инертного газа и низкого отпуска.

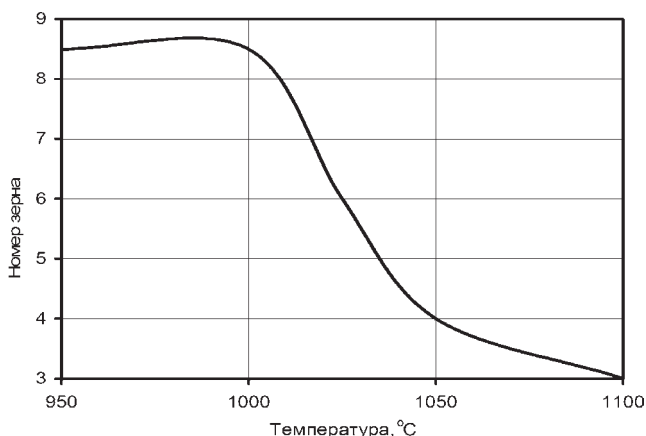


Рис. 1. Зависимость величины зерна стали 23ХН2М от температуры нагрева [7]



Рис. 2. Общий вид линии вакуумных печей «ModulTherm 7/1»

При одинаковой поверхностной твердости микротвердость более глубоких слоев несколько отличается, что объясняется различным давлением и скоростью подаваемого в закалочный модуль инертного газа. Менее интенсивное охлаждение в газовом потоке приводит к понижению прокаливаемости слоев с содержанием углерода менее 0,5% (кривая 1) по сравнению с закалкой при давлении охлаждающего газа более 1 МПа при скорости потока более 10 м/с (кривые 2 и 3).

Технология вакуумной химико-термической обработки на линии «ModulTherm 7/1» по сравнению с ХТО в безмуфельных агрегатах экономически выгодна с точки зрения роста производительности (905 и 342 кг/ч соответственно), снижения продолжительности цикла цементации на толщину слоя 1,0–1,4 мм (5,8 и 17,5 ч), исключения операции очистки деталей после закалки и необходимости утилизации промасленной окалины, вывода из процесса закалочного масла, снижения практически до нуля брака обрабатываемых изделий, резкого сокращения времени вывода термического оборудования на рабочий температурный режим. Годовой экономический эффект от внедрения оборудования фирмы «ALD» взамен БМА исходя из стоимости теплоэнергетических ресурсов, технологических газов (азот, метан, водород, ацетилен, гелий), закалочного масла, очистки деталей, величины брака составляет около 2 млрд. руб. в год [9].

Для выявления склонности к росту зерна были обработаны по полной программе ХТО четыре партии (садки) деталей из широко применяемых сталей 25ХГТ, 20ХНЗА, 20ХНР, 15ХГН2ТА, ГОСТ 4543-71, а также из новой стали 20ХГНМБ, ТУ ВУ 100185302.ХХХ-2013 при следующей температуре цементации: 960, 1000, 1030 и 1050 °С. Толщину диффузионного слоя образцов определяли по полупереходной зоне с заданным содержанием углерода 0,35%С, что соответствует микротвердости 550 HV_{0,2} или твердости 50 HRC. Время цементации на толщину слоя 1,3 мм при поверхностной концентрации углерода 0,7% рассчитывали программой и варьировали применительно, например, к стали 20ХНЗА от 7,3 до 4,1 ч в зависимости от температуры насыщения.

Изготовленные из образцов металлографические шлифы исследовали после травления в реактиве [10]. Величину действительного зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639–82 методом измерения длин хорд, используемым при разнотернистой структуре.

На рис. 4 приведены результаты исследований величины действительного зерна цементованного слоя после ХТО на линии вакуумной цементации исследованных марок сталей. Получено, что при закалке непосредственно после подстуживания от температуры цементации 1000–1050 °С до температуры

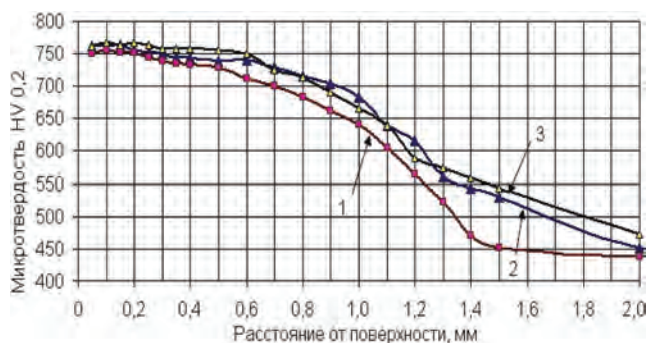


Рис. 3. Распределение микротвердости после химико-термической обработки в вакуумных печах «ModulTherm 7/1» при разных давлениях охлаждающего газа: 1 – 0,6 МПа; 2 – 1,0; 3 – 1,5 МПа

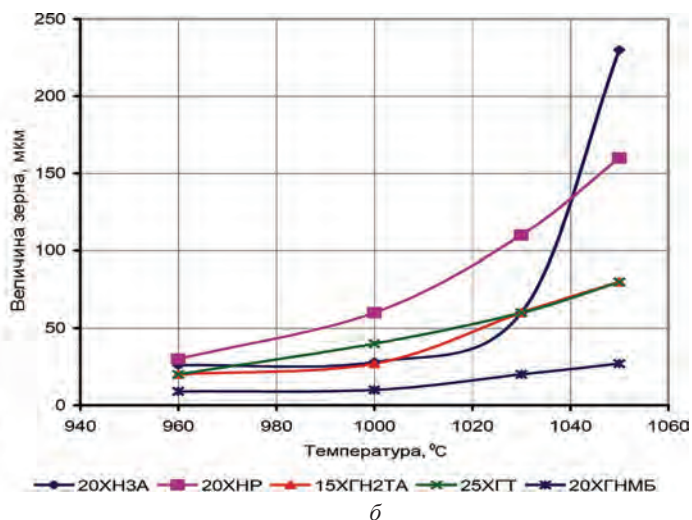
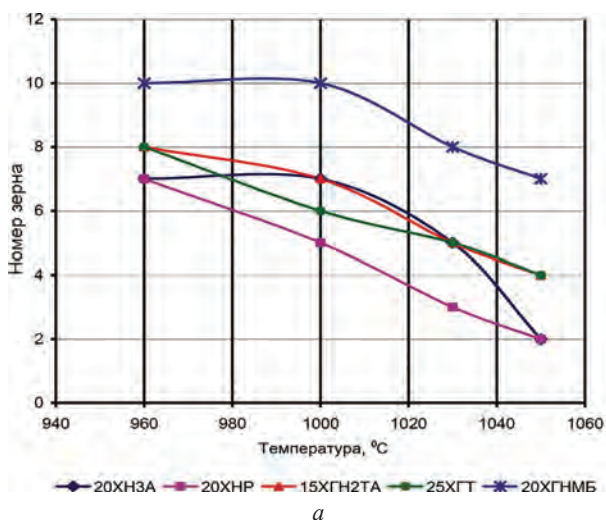


Рис. 4. Величина действительного зерна сталей 25ХГТ, 20ХНЗА, 20ХНР, 15ХГН2ТА, 20ХГНМБ после ХТО на линии вакуумной цементации «ModulTherm 7/1»

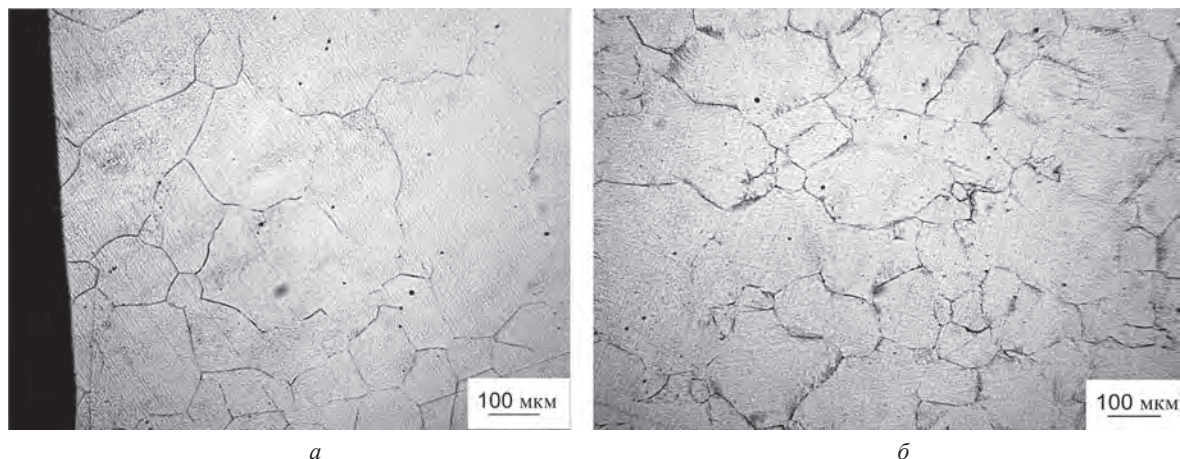


Рис. 5. Микроструктура цементованного слоя (а) и сердцевины (б) стали 20XН3А после ХТО на линии «ModulTherm 7/1» при температуре цементации 1050 °С: а – действительное зерно № 1–3; б – действительное зерно № 0–3

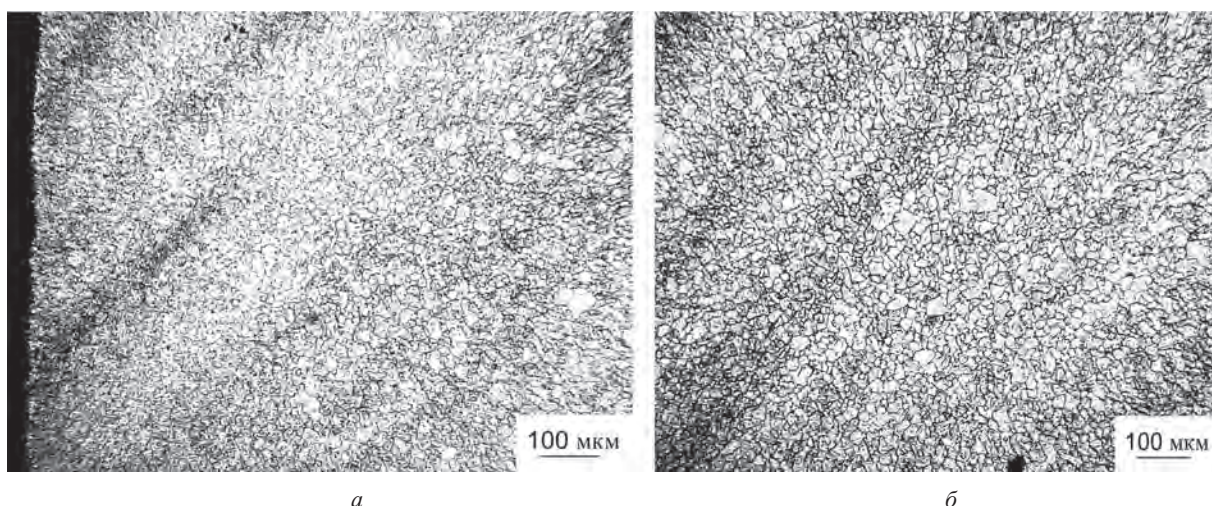


Рис. 6. Микроструктура цементованного слоя (а) и сердцевины (б) стали 20XГНМБ после ХТО на линии «ModulTherm 7/1» при температуре цементации 1050 °С: а – действительное зерно № 7; б – действительное зерно № 6–8

850 °С в структуре исследованных марок сталей, кроме стали 20XГНМБ, формируется достаточно крупное зерно. Причина состоит в отсутствии операции повторного нагрева стали под закалку, при котором происходит перекристаллизация и формирование мелкого начального зерна. В процессе выдержки зубчатых колес при температуре, намного превышающей точку A_{c3} , наблюдается дальнейший рост первичного зерна за счет собирательной рекристаллизации.

По полученным данным для сталей 20XН3А, 25ХГТ, 20ХНР, 15ХГН2ТА свойственна разнотернистость цементованного слоя и сердцевины. Так, для стали 20XН3А при температуре цементации 1050 °С диаметр зерна в цементованном слое увеличивается до 230 мкм, а в сердцевине – до 320 мкм (зерно соответственно № 1 и 0 по ГОСТ 5639-82, рис. 5). Величина зерна для указанных сталей превышает допустимые величины [1], поэтому эти стали являются непригодными для высокотемпературной цементации.

Наследственно мелкозернистая сталь 20XГНМБ по величине зерна значительно отличается от остальных исследованных марок сталей. При температуре цементации 1030 °С и закалке после подстуживания до 850 °С в цементованном слое формируется зерно № 8–9, в сердцевине – № 7–8 (рис. 6), что является допустимым по техническим требованиям, предъявляемым к высоконапряженным зубчатым колесам трансмиссий [1]. Наличие в данной стали ниобия способствует уменьшению величины зерна, устранению химической и структурной неоднородности, разнотернистости, повышению предела текучести и прочности, ударной вязкости и хладностойкости.

Полученные результаты исследований показывают невосприимчивость стали 20XГНМБ к повышению температуры цементации, что обуславливает ее перспективность в широком применении для высокотемпературной вакуумной цементации зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин.

Эффективность применения стали 20ХГНМБ для высоконапряженных зубчатых колес подтверждена результатами стендовых испытаний в сравнении с серийной сталью 20ХНЗА в составе коробки передач трактора «Беларус-1221». Зубчатое колесо, изготовленное из стали 20ХГНМБ, отработало полный цикл испытаний при максимальном контактном напряжении в полюсе зацепления 1700 МПа в объеме 340 ч без замечаний. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя показано на рис. 7, вид шестерни после испытаний приведен на рис. 8, а.

Зубчатое колесо, изготовленное из серийной стали 20ХНЗА, отработало при том же режиме 300 ч и было преждевременно снято с испытаний вследствие прогрессирующего глубинного контактного выкрашивания. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя показано на рис. 7, вид шестерни после испытаний приведен на рис. 8, б.

Для цементации стали 20ХГНМБ на толщину слоя 1,25–1,35 мм при температуре 960 °С потребовалось 391 мин, а при температуре 1030 °С – 248 мин. В результате сокращения времени цементации снижается стоимость производства (сокращается расход газа и электроэнергии и др.) и повышается производительность при изготовлении цементованных деталей.

Годовой экономический эффект при снижении потребления электроэнергии от повышения температуры цементации до 1030 °С на вакуумном оборудовании фирмы «ModulTherm 7/1» составляет свыше 1,5 млрд. руб. в год.

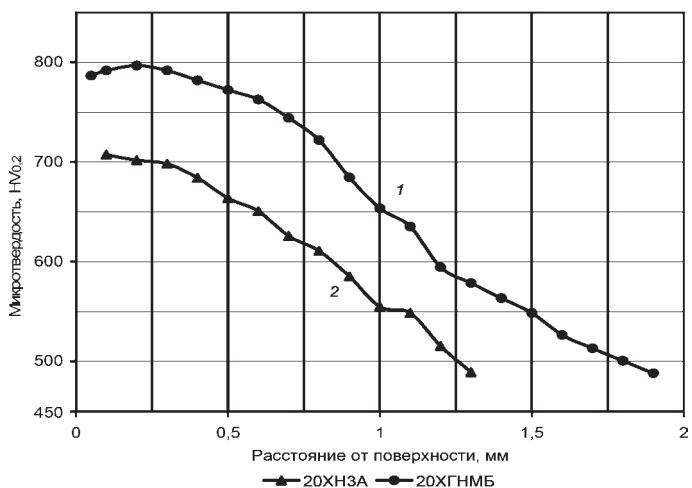


Рис. 7. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя зубчатых колес из стали 20ХГНМБ (1) и 20ХНЗА (2) после ХТО на вакуумных печах «ModulTherm 7/1»

Выводы

Технология вакуумной цементации с закалкой в среде инертных газов на линии «ModulTherm 7/1» является экономически выгодной с точки зрения роста производительности и обеспечивает годовую экономию энергетических ресурсов около 2 млрд. руб. в год по сравнению с химико-термической обработкой в безмуфельных агрегатах.

Более значительного увеличения производительности вакуумного оборудования и снижения энергозатрат можно достичь за счет повышения температуры цементации. Годовой экономический эффект от применения высокотемпературной цементации составляет свыше 1,5 млрд. руб. в год. Однако в этом случае необходимо использовать наследственно мелкозернистые марки сталей с добавками карбидо-

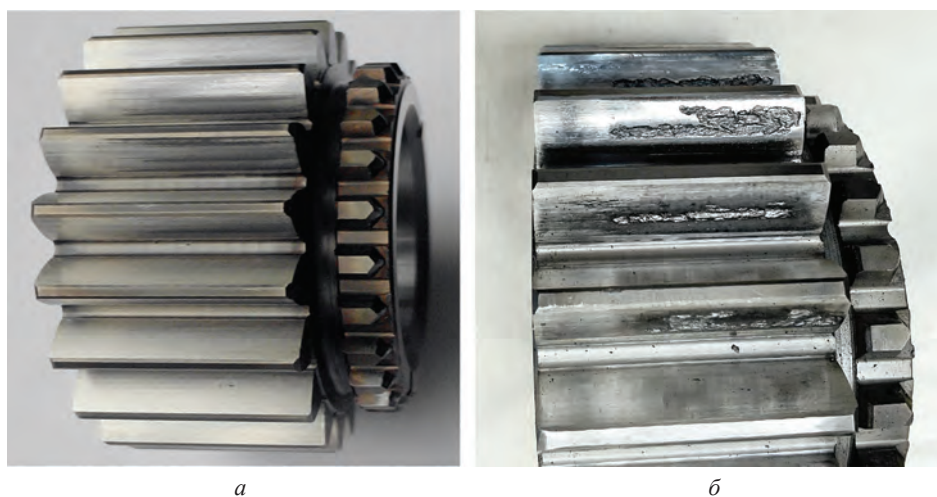


Рис. 8. Общий вид шестерни 112-1701351 из стали 20ХГНМБ (а) после стендовых испытаний в течение 340 ч; стали 20ХНЗА (б) после стендовых испытаний в течение 300 ч

образующих элементов, например, ванадия, ниобия и др. Эффективность применения таких сталей заключается в возможности проведения высокотемпературной цементации без ухудшения эксплуатационных характеристик деталей.

Литература

1. Руденко С. П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько. Минск: Беларуская навука, 2014. 126 с.
2. Цепов С. Н. Особенности науглероживания стали при вакуумной цементации // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1979. № 8. С. 50–54.
3. Усатый Ю. П. Вакуумная цементация стали 18ХГТ / Ю. П. Усатый, Э. Н. Мармер, С. Г. Мурованная, Ф. А. Палей, Л. И. Волкова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1977. № 11. С. 74–76.
4. Гончаров А. Г. Механические свойства сталей после вакуумной и газовой цементации / А. Г. Гончаров, Р. П. Уварова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1990. № 5. С. 10–12.
5. Цепов С. Н. Особенности структурообразования в приповерхностных слоях металла при вакуумной цементации / С. Н. Цепов, М. А. Криштал // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1983. № 5. С. 27–29.
6. Криштал М. А. Свойства сталей после высокотемпературной вакуумной цементации / М. А. Криштал, С. Н. Цепов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1980. № 6. С. 2–7.
7. Рожков И. И. Разработка оптимальных режимов термической обработки тяжело нагруженных деталей с переменным химическим составом: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2009. 164 с.
8. Валько А. Л. Влияние вакуумной высокотемпературной цементации на величину зерна конструкционных сталей / А. А. Валько, С. П. Руденко, А. Н. Чичин // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2014. Вып. 3. С. 343–346.
9. Повышение эффективности вакуумной цементации зубчатых колес тракторов «Беларус» / А. Н. Карась, И. В. Фирсов, А. Н. Чичин, А. А. Шипко, С. П. Руденко, А. Л. Валько // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2015. Вып. 4. С. 313–316.
10. Металлографический реактив для выявления границ действительного зерна стали: пат. 14748, Республика Беларусь: МПК С 23 F 1/28 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, А. А. Шипко, Е. И. Мосунов; заявитель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. № а20100154; заявл. 04.02.2010; опубл. 30.08.2011 // *Афицыйны бюл. / Вынаходства. Карасныя мадэлі. Прамысловыя узоры*. 2011. № 4. С. 109.

References

1. Rudenko S. P., Valko A. L. *Kontaktynaya ustalost' zubchatykh koles transmissiy energonasyshennykh mashin* [Contact fatigue of transmissions gearwheels of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, 126 p.
2. Tsepov S. N. Osobennosti nauglerozhivaniya stali pri vakuumnoy tsementatsii [Features of carburizing steel during vacuum carburizing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1979, no 8, pp. 50–54.
3. Usatyy Yu. P., Marmer E. N., Murovannaya S. G. i dr. Vakuumnaya tsementatsiya stali 18KHGT [Vacuum carburizing 18CrMnTi]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1977, no. 11, pp. 74–76.
4. Gonharov F. G., Uvarova R. P. Mehanicheskie svoystva staley posle vakuumnoy i gazovoy tsementatsii [Mechanical properties of steels after vacuum and gas carburizing furnace]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1990, no. 5, pp. 10–12.
5. Tsepov S. N., Krishtal M. A. Osobennosti strukturoobrazovaniya v poverhnostnykh sloyakh metalla pri vakuumnoy tsementatsii [Features structurization in subsurface layers of metal by vacuum carburizing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1983, no. 5, pp. 27–29.
6. Krishtal M. A., Tsepov S. N. Svoystva staley posle vysokotemperaturnoy vakuumnoy tsementatsii [Properties of steels after high-temperature vacuum carburizing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1980, no. 6, pp. 2–7.
7. Rozhkov I. I. *Razrabotka optimalnykh rezhimov termicheskoy obrabotki tyazhelonagruzhennykh detaley s peremennym himicheskim sostavom. Dis. ... Cand. tech. nauk* [Development of optimal modes of heat treatment of heavy parts with varying chemical composition]. *Cand. tech. sci. diss.* Nizhniy Novgorod, 2009, 164 p.
8. Valko A. L., Rudenko S. P., Chichin A. N. Vliyanie vakuumnoy vysokotemperaturnoy tsementatsii na velichinu zerna konstruktsionnykh staley [Influence of vacuum high-temperature carburizing on amount of grain structural steels]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya = Current issues of Engineering*, 2014, vol. 3, pp. 343–346.
9. Caras A. N., Firsov I. V., Chichin A. N., Shipko A. A., Rudenko S. P., Valko A. L. Povyschenie effektivnosti vakuumnoy tsementatsii zubchatykh koles traktorov Belarus [Enhancing the effectiveness of vacuum carburizing of tractors «Belarus» gears]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya = Current issues of Engineering*, 2015, vol. 4, pp. 313–316.
10. **Metallographic** reagent to identify the boundaries of the actual grain steel: *Patent* 14748, Republic of Belarus.