

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ 25X13H2

И.М. Иванов

dr.mgtu@yandex.ru

Spin-код: 3387-6730

К.И. Шебешев

vladisl-2013@yandex.ru

Spin-код: 5042-1153

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен технологический процесс термической обработки заготовок зубчатых колес. Исследованы предварительная и окончательная термическая обработка зубчатого колеса, включающая в себя определение необходимой температуры нагрева, времени выдержки и используемой при обработке среды. На основе экспериментальных данных установлены закономерности, с помощью которых определяют эксплуатационные свойства зубчатых колес, имеющих повышенные требования к коррозионной стойкости. Составлен технологический режим окончательной термической обработки, содержащий два этапа: 1) закалка с высоким отпуском; 2) закалка токами высокой частоты с низким отпуском. Определены необходимые значения температуры нагрева, времени выдержки и параметры используемой при обработке среды.

Ключевые слова

Зубчатые колеса, сталь 25X13H2, технология термической обработки, контактная выносливость, твердость, закалка, закалка токами высокой частоты, отпуск

Поступила в редакцию 02.04.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Современная промышленность требует применения новых материалов, обладающих специальными свойствами: износостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, высокой удельной прочностью и др.

Зубчатые колеса относятся к числу наиболее распространенных деталей машин, представляющих собой диск с зубьями на цилиндрической или конической поверхности, которые входят в зацепление с зубьями другого зубчатого колеса. Зубчатые колеса обычно применяют парами, при этом колеса в паре имеют разное число зубьев для преобразования вращающего момента и числа оборотов валов. Зубчатые колеса входят в конструкции двигателей внутреннего сгорания автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин, самолетов, турбин, станков и во многие другие машины и изделия.

При проектировании, изготовлении и ремонте шестерен и зубчатых колес необходимо знать не только свойства материалов, но и методы их обработки, применяемые для достижения заданных эксплуатационных характеристик.

Технология изготовления зубчатых колес требует решения ряда конструктивных и материаловедческих проблем.

Контактная выносливость характеризует прочность рабочей поверхности зуба на смятие. Недостаточная контактная выносливость способствует усталостному выкрашиванию поверхностных слоев зубьев. Усталостное выкрашивание — самый распространенный вид повреждений для большинства закрытых передач, который заключается в появлении на рабочих поверхностях небольших углублений — раковин. У зубьев с поверхностным упрочнением часто наблюдается отслаивание упрочненного слоя. Таким образом, контактная выносливость является важнейшей характеристикой работоспособности зубчатой передачи.

Цель данной работы — исследование возможности повышения контактной выносливости зубчатых колес из коррозионно-стойкой стали 25X13H2.

Материал и методика исследования. Зубчатое колесо предназначено для работы в аппаратуре метеостанций, применяемой для определения параметров ветра на высоте 20...25 м от поверхности земли в прибрежных (морских) зонах. Деталь подвержена воздействию окислительной среды при повышенных температурах, что может привести к процессу коррозии, поэтому необходимо рассматривать коррозионно-стойкие стали мартенситного класса по ГОСТ 5632–72 [1].

Химический состав исследуемой стали 25X13H2 приведен ниже:

Элемент	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	S	P
Состав, % (масс.)	~82 (ост.)	0,2...0,3	12,0...14,0	1,5...2,0	до 0,3	до 0,5	0,8...1,2	0,15...0,25	0,08...0,15

Стали мартенситного класса характеризуются способностью к самозакаливанию на воздухе. Данные стали при нагреве приобретают структуру аустенита, а при охлаждении на воздухе могут претерпевать γ – α -превращение с образованием мартенсита. Эта особенность сталей мартенситного класса вводит в технологию изготовления деталей обязательные условия медленного охлаждения или отжига после операций, связанных с горячей обработкой металла, в рассматриваемом случае — после горячей обработки давлением. Назначение отжига — снижение твердости, измельчение зерна, улучшение обрабатываемости, повышение пластичности и вязкости, снятие внутренних напряжений, уменьшение структурной неоднородности, подготовка к последующей термической обработке.

Согласно справочным данным [1], для отжига мартенситных сталей достаточно нагрев до 750...800 °С и последующее очень медленное охлаждение со скоростью порядка 30...70 °С/ч, поэтому в данном случае подходит охлаждение с печью.

В работе проведены классические исследования макро- и микроструктуры и испытания твердости. Испытания на контактную выносливость выполняли при контактных напряжениях $\sigma_{Zmax} = 4000$ МПа с нормальной температурой на

модернизированной установке для исследования малоциклового усталости МКВ-К [2]. Скорость обкатки составляла 7,94 м/с. В каждой партии испытывали 11 образцов. Образцы были изготовлены из квадратных прутков со стороной квадрата 10 мм.

Результаты экспериментов и обсуждение. Для получения необходимых характеристик сердцевины детали в качестве окончательной термообработки проводят закалку и отпуск. В большинстве случаев при закалке необходимо получить высокую твердость и при последующем отпуске снять внутренние напряжения, повысить ударную вязкость и пластичность стали.

Поскольку сталь 25X13H2 является доэвтектоидной, для нее проводят полную закалку (на 30...50 °С выше точки A_{c3}). Влияние температуры нагрева под закалку на твердость стал после охлаждения показано на рис. 1.

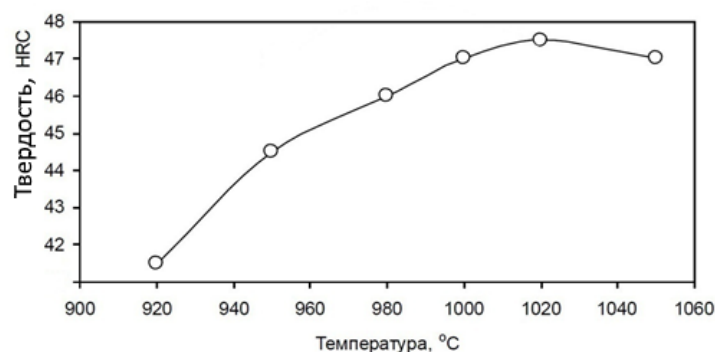


Рис. 1. Зависимость твердости стали 25X13H2 от температуры закалки

На рис. 1 видно, что с повышением температуры до 1020 °С наблюдается закономерный рост твердости, связанный с растворением карбидов хрома $Cr_{23}C_6$. При дальнейшем повышении температуры нагрева твердость уменьшается, зерно сильно укрупняется, заметно увеличивается количество остаточного аустенита в структуре после закалки. Это является нежелательным, поэтому оптимальная температура закалки составляет 1020 °С.

При выборе охлаждающей среды (воздух) было учтено, что присутствие в составе стали хрома, никеля, молибдена, вольфрама уменьшает критическую скорость закалки и увеличивает прокаливаемость.

Сразу после закалки (во избежание самопроизвольного растрескивания) изделия из сталей мартенситного класса необходимо подвергнуть отпуску. Температуру отпуска при окончательной термообработке необходимо выбирать по сочетанию необходимых характеристик, в рассматриваемом случае это ударная вязкость $KCU > 60$ кДж/м² и твердость сердцевины HB 269–302.

Исследование влияния температуры отпуска на свойства стали 25X13H2 представлено на рис. 2.

Согласно графикам (см. рис. 2), требованиям по твердости соответствует диапазон температур отпуска 680...780 °С, а для удовлетворения требованиям по ударной вязкости температура должна превышать 650 °С, поэтому отпуск

данной стали назначен при температуре 680...700 °С. Рекомендованное время выдержки составляет 1,0...1,5 ч, охлаждение на воздухе [3, 4].

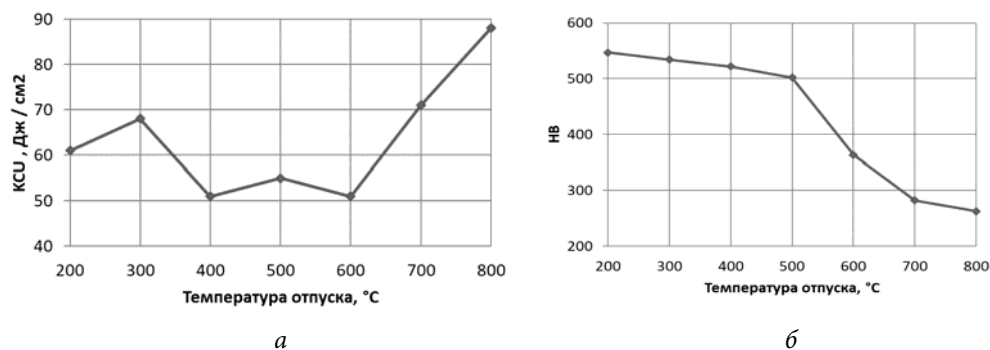


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на ударную вязкость (а) и твердость (б) стали 25X13H2

Для повышения контактной выносливости поверхность зубчатых колес необходимо упрочнить. Это можно сделать несколькими способами: химико-термической обработкой (цементацией [5, 6] или обработкой в коронном разряде [7]), электрохимической обработкой [8, 9], пластической деформацией [10, 11] или с помощью токов высокой частоты. В работе исследован последний вариант, имеющий множество преимуществ [12], среди которых возможность нагрева на определенную регулируемую глубину, отсутствие перегрева и мелкозернистая структура.

Технические параметры выпускаемых на производстве индукционных установок определяются мощностью и частотой их работы. Для создания закаленного слоя применяют индукционные нагревающие устройства мощностью 40...300 кВА при показателях частоты 20...40 либо 40...70 кГц. Если необходимо провести закалку слоев, которые находятся глубже, следует применять частоту 6...20 кГц. Диапазон частот выбирают с учетом номенклатуры марок стали, а также уровня глубины закаленной поверхности изделия. Существует огромный ассортимент комплектаций индукционных установок, что помогает выбрать рациональный вариант для конкретного технологического процесса [12].

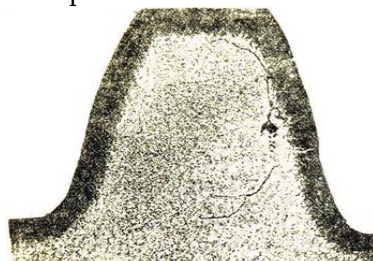


Рис. 3. Макроструктура зуба колеса из стали 25X13H2 после закалки методом ТВЧ

При поверхностной закалке ТВЧ температура закалки составляет 900 °С, время нагрева 8 с. В результате такой обработки была получена толщина закаленного слоя

около 3 мм и твердость поверхности HRC 50. Макроструктура зуба колеса из стали 25X13H2 после закалки методом ТВЧ показана на рис. 3.

После охлаждения на поверхности металла остаются высокие сжимающие напряжения, которые повышают эксплуатационные свойства детали. Напряжения между поверхностным слоем и серединой необходимо устранить. Это делают с помощью низкотемпературного отпуска в печи. Чтобы избежать появления на поверхности микротрещин, нужно свести к минимуму время между закалкой и отпуском. Результаты исследования влияния температуры отпуска на контактную выносливость стали 25X13H2 после закалки ТВЧ (900 ± 5 °C) и отпуска (1 ч) представлены ниже:

Температура отпуска, °C	150 ± 5	175 ± 5	200 ± 5	225 ± 5
Долговечность N_{50} , млн циклов	93,0–94,5	105–107	133–135	98–101

Из этих данных видно, что оптимальная температура отпуска составляет 200 ± 5 °C. Превышение этого значения приводит к разупрочнению поверхностного слоя.

Заключение. Исследования показали, что окончательная термическая обработка зубчатых колес из стали 25X13H2 должна включать закалку с температуры 800 ± 5 °C и высокий отпуск при температуре 680 ± 5 °C в течение 1,5 ч. Для повышения контактной выносливости зубьев необходимо дополнительно провести закалку ТВЧ с температуры 900 ± 5 °C и последующим низким отпуском при температуре 200 ± 5 °C в течение 1 ч.

Литература

- [1] Вознесенская Н.М., Каблов Е.Н., Петраков А.Ф. Высокопрочные коррозионностойкие стали аустенитно-мартенситного класса. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2002, № 7, с. 34–37.
- [2] Пахомова С.А. Особенности преподавания курса «Инженерия поверхности» студентам по направлению «материаловедение и технологии материалов». *Инженерный вестник*, 2015, № 9. URL: <http://engsi.ru/doc/812901.html>.
- [3] Новиков И.И. *Теория термической обработки металлов*. Москва, Металлургия, 1978, 392 с.
- [4] Ульянов Е.А. *Коррозионные стали и сплавы*. Москва, Металлургия, 1991, 256 с.
- [5] Фахуртдинов Р.С., Пахомова С.А., Рыжова М.Ю. Проблемы модернизации оборудования для вакуумной цементации. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2017, № 2, с. 113–118.
- [6] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polymer Science. Series D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83.
- [7] Помельникова А.С., Фетисов Г.П., Пахомова С.А. К вопросу упрочнения различных легированных сталей обработкой в коронном разряде. *Технология металлов*, 2017, № 2, с. 20–24.

- [8] Alekseeva J.S., Fedorova L.V., Fedorov S.K., Kapustin I.N. Improving the quality of the surface layer of steel parts. *Proc. 5th Int. Mechanical Engineering Forum (IMEF)*, 2012. Prague, Czech Republic, pp. 65–74.
- [9] Федорова Л.В., Федоров С.К., Бохонов Г.Ю. Упрочняющее электромеханическое восстановление вторичного вала коробки перемены передач автомобилей семейства «Газель». *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 9, с. 14–16.
- [10] Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тягелонагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности. *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*, 2016, № 3, с. 243–251.
- [11] Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1999, № 2, с. 61–68.
- [12] Закалка металлов токами высокой частоты. URL: <http://www.m-deer.ru/tehnologiya/zakalka-metallov-tokami-vysokoj-chastoty.html> (дата обращения 17.02.2018).

Иванов Иван Максимович — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Шебешев Кирилл Иванович — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Пахомова Светлана Альбертовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

INCREASING THE BACK-TO-BACK ENDURANCE OF THE COG WHEELS MADE OF STEEL 25X13H2

I.M. Ivanov

dr.mgtu@yandex.ru

K.I. Shebeshev

Spin-code: 3387-6730

vladisl-2013@yandex.ru

Spin-code: 5042-1153

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers a technological procedure of the cog wheels workpieces heat treatment. It investigates the initial and finishing heat treatment of the cog wheel including the heating temperature determination, the holding time and the medium used for treatment. Based on the experiment data we have elicited the regularities by means of which the performance characteristics of the cog wheels with strict requirements for corrosion resistance can be defined. The article presents a technical regime of the finishing heat treatment consisting of two stages: 1) toughening; 2) deep drawing hardening with high-frequency current. We determine the required values of heating temperature, the holding time and the parameters of the medium used for treatment.

Keywords

Cog wheels, steel 25X13H2, heat treatment procedure, back-to-back endurance, hardness, hardening, high-frequency current hardening, drawing

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Voznesenskaya N.M., Kablov E.N., Petrakov A.F. High-tensile noncorrosive steel of austenite-to-martensite group. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 7, pp. 34–37.
- [2] Pakhomova S.A. Special aspects of teaching “Surface engineering” discipline to the students of “material engineering and material technology” course. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 9. Available at: <http://engsi.ru/doc/812901.html>.
- [3] Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of metals thermal treatment]. Moscow, Metallurgiya publ., 1978, 392 p.
- [4] Ul'yanin E.A. *Korroziionnye stali i splavy* [Corrosion steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya publ., 1991, 256 p.
- [5] Fakhurtdinov R.S., Pakhomova S.A., Ryzhova M.Yu. On the problems of modernizing equipment for vacuum carburization. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2017, no. 2, pp. 113–118. (Eng. version: *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 2, pp. 187–192.)
- [6] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polymer Science. Series D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83.
- [7] Pomel'nikova A.S., Fetisov G.P., Pakhomova S.A. On problem of hardening of differently alloyed steels by treatment in corona discharge. *Tekhnologiya metallov*, 2017, no. 2, pp. 20–24.

- [8] Alekseeva J.S., Fedorova L.V., Fedorov S.K., Kapustin I.N. Improving the quality of the surface layer of steel parts. *Proc. 5th Int. Mechanical Engineering Forum (IMEF)*, 2012. Prague, Czech Republic, pp. 65–74.
- [9] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bokhonov G.Yu. Strengthening electromechanical recondition of gearbox main-shaft for “Gazel” family automobiles. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2015, no. 9, pp. 14–16.
- [10] Pakhomova S.A., Makushina M.A., Kovalenko S.V. Deformatsionnoe uprochnenie tyazhelonagruzhennykh poverkhnostey zubchatykh peredach dlya gornodobyvayushchey promyshlennosti [Deformation hardening of the heavily loaded gear surfaces for the mining industry]. *Sovremennyye innovatsionnyye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta* [Contemporary innovation technique of the engineering personnel training for the mining and transport industry], 2016, no. 3, pp. 243–251.
- [11] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M. Efficiency of the strain hardening of the rose steels. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 1999, no. 2, pp. 61–68.
- [12] Zakalka metallov tokami vysokoy chastoty [Metal hardening high-frequency current]. Available at: <http://www.m-deer.ru/tehnologiya/zakalka-metallov-tokami-vysokoj-chastoty.html> (accessed 17 February 2018).

Ivanov I.M. — student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Shebeshev K.I. — student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — S.A. Pakhomova, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.