

УДК 621. 822.71

УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ

© Кирилл Алексеевич Бузаверов, Марина Алексеевна Гресс, Мария Юрьевна Рыжова,
Кирилл Иванович Шебешев

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
vladisl-2013@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик авиационных зубчатых колес, изготовленных из низкоуглеродистой экономно легированной стали 15X2ГН2ТРА. Приведены сведения о режимах окончательной термической обработки, использующихся после вакуумной цементации. Разработан технологический процесс термической обработки, обеспечивающий наличие карбидов на профилях зубьев, отсутствие карбидной сетки в цементованном слое, минимальное количество остаточного аустенита и оптимальные механические свойства зубчатых колес: твердость на поверхности 60 HRC, твердость сердцевины 40 HRC. Определены оптимальные температурные условия проведения высокого отпуска после цементации и низкого отпуска после закалки.

Ключевые слова: зубчатые колеса, вакуумная цементация, экономно легированная сталь, цементованный слой, закалка, отпуск.

STRENGTHENING THERMAL TREATMENT OF ECONOMY-ALLOYED STEEL AFTER CARBURIZATION

© K.A. Buzaverov, M.A. Gress, M.Yu. Ryzhova, K.I. Shebeshev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

vladisl-2013@yandex.ru

Abstract. The paper addresses the issues of improving the performance characteristics of aviation gear wheels made of low carbon economy-alloyed steel C0,15Cr2MnNi2TiB. Provides information about the modes of final heat treatment, used after vacuum cementation. A heat treatment process was developed to ensure the presence of carbides on the tooth profiles, the absence of a carbide mesh in the carburized layer, the minimum amount of residual austenite, and the optimum mechanical properties of gears: surface hardness of 60 HRC, core hardness of 40 HRC. The optimum temperature conditions for high tempering after carburization and low tempering after quenching are determined.

Keywords: gear wheels, vacuum carburization, economy-alloyed steel, carburized lower, quenching, tempering.

Введение. Зубчатые передачи получили широкое распространение во всех сферах промышленности, что обусловлено их высокой нагрузочной способностью и надежностью, КПД. Для долговечной и надежной работы ответственных зубчатых колес и шестерней необходимо обеспечение контактной и изгибной прочности зубьев. Наиболее высокую работоспособность зубчатых колес обеспечивают стали, которые являются основным материалом для их изготовления.

По технологии термической обработки стали для зубчатых колес делятся на улучшаемые и поверхностно упрочненные. Улучшаемые стали применяют в слабо- и средненагруженных передачах [1, 2]. Поверхностным термическим или химико-термическим упрочнением достигают высокую твердость на поверхности зубьев при сохранении вязкой сердцевины.

В авиационной промышленности для силовых зубчатых колес коробок скоростей самолетных агрегатов в качестве упрочняющей обработки широкое распространение получили технологические процессы цементации, нитроцементации, азотирования [4,5]. При химико-термической обработке достигается наибольшая твердость поверхности зубьев, что обеспечивает высокую несущую способность зубчатых передач по контактной прочности, позволяет снизить массу и габариты зубчатой передачи. При азотировании достигается минимальное коробление деталей, что позволяет не проводить окончательное шлифование поверхности, однако, из-за низкой толщины упрочняющего слоя (0,3...0,5 мм), его хрупкости и наличия дефектного слоя (ϵ -фазы), применение азотируемых сталей ограничено при высоких контактных нагрузках.

После цементации возможно получение эффективного диффузионного слоя толщиной до 1,8 мм, что является более приемлемым для тяжело нагруженных деталей. Цементованные зубчатые колеса после окончательной термической обработки обладают высокой контактной выносливостью зубьев, прочностью зубьев на изгиб, высоким сопротивлением износу и заеданию.

Исходя из назначения и условий работы авиационных зубчатых колес, поиск оптимального материала следует осуществлять в классе конструкционных высококачественных и особовысококачественных средне- и высоколегированных низкоуглеродистых сталей повышенной прочности ($\sigma_b \leq 1500$ МПа), упрочнение которых осуществляется цементацией и последующей термической обработкой.

Известно [1, 3], что в настоящее время в авиации получила широкое применение высокопрочная сталь ВКС5-Ш. Однако в связи с тем, что это высоколегированная и дорогая сталь, в настоящее время встает вопрос о возможности применения менее дорогих материалов. Свойства базовой (ВКС5-Ш) и альтернативной экономно-легированной стали 15Х2ГН2ТРА (ГОСТ 2590-2006) представлены в таблице 1. При выборе материала необходимо также учесть его условную стоимость.

Таблица 1.

Сравнение свойств и стоимости цементуемых сталей

Материал	σ_b	HRC	Теплостойкость, °С	Условная стоимость
ВКС5-Ш	1310	60	300	536,69
15Х2ГН2ТРА	1270	60	250	240,52

Из таблицы 3 видно, что сталь марки ВКС5-Ш обладает лучшим комплексом свойств, однако свойства стали марки 15Х2ГН2ТРА не намного хуже, а если учесть условную стоимость двух материалов, то при эксплуатации при температуре менее 250 оС, предпочтение следует отдать стали марки 15Х2ГН2ТРА, как более экономичному материалу.

Для повышения контактной выносливости поверхность зубчатых колес необходимо упрочнить. Это можно сделать несколькими способами: химико-термической обработкой (цементацией [4-6] или обработкой в коронном разряде [7]), электромеханической обработкой [8], пластической деформацией [9, 10] или с помощью токов высокой частоты [11]. В работе исследован вариант вакуумной цементации, имеющий множество преимуществ [5].

Цель работы состоит в разработке технологии термической обработки после вакуумной цементации экономно-легированной стали 15Х2ГН2ТРА; определении оптимальных температур высокого отпуска после цементации и низкого послезакалочного отпуска.

Методика и объекты исследования. Объектами исследований служили образцы из стали 15Х2ГН2ТРА, которые подвергали типичной для зубчатых колес ХТО: вакуумной цементации (ВЦ) при 930-950 °С, высокому отпуску, закалке в масло от 910 °С, обработке холодом и низкому отпуску. Вакуумную цементацию проводили на оборудовании «SECO/WARWICK SA».

Распределение углерода по толщине диффузионного слоя оценивали спектральным методом на эмиссионном многоканальном спектрометре фирмы «Vaird» с обработкой результатов в соответствии с ГОСТ 18895.

Испытания на контактную выносливость выполняли при контактных напряжениях $\sigma_{Zmax} = 4000$ МПа с нормальной температурой на модернизированной установке для исследования малоциклового усталости МКВ-К [1, 3]. Скорость обкатки составляла 7,94 м/с. В каждой партии испытывали 11 образцов. Образцы были изготовлены из квадратных прутков со стороной квадрата 10 мм.

Твердость измеряли по методу Роквелла, регламентированному ГОСТ 9013, алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кг, а также микротвердомером ПМТ-3 с нагрузкой 200 г. Химический состав исследуемой стали 15Х2ГН2ТРА (ГОСТ 2590-2006) представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Химический состав стали 15Х2ГН2ТРА

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	S	P
0,12-0,18	0,17-0,37	0,7-1,0	1,4-1,8	1,4-1,8	0,02-0,06	0,002-0,005	≤0,025	≤0,025

Результаты экспериментов и обсуждение. После цементации структура поверхностного слоя состоит из перлита и цементита, причем цементит располагается в виде грубой сетки вокруг аустенитного зерна. После закалки в масле из такой структуры образуется значительное количество (иногда до 60%) остаточного аустенита, снижающего твердость и усталостную прочность стали. Именно поэтому после цементации проводят высокий отпуск. Разрыв по времени между цементацией и высокотемпературным отпуском должен быть не более 4–8 часов. При температуре менее 700°С (Ас1 цементованного слоя) карбиды сферодизируются и из аустенита выделяются очень мелкие вторичные карбиды. Таким

образом распределение карбидной фазы становится более равномерным, а её сферическая форма позволяет быстрее растворяться в аустените при нагреве до температур первой закалки, которую проводят после высокого отпуска.

Для определения оптимального режима высокого отпуска, его температуру варьировали от 600 до 680 °С, так как этот диапазон является зоной наименьшей устойчивости аустенита подобной стали. При этом продолжительность нагрева составила 2 ч, время выдержки 2 ч, охлаждение до 200 °С с печью (5-6 ч), далее на воздухе.

Измерения твердости проводили после проводимой вслед высокому отпуску закалке. Высокий отпуск вызывает распад остаточного аустенита и образование легированных карбидов. Цель закалки – придание высокой твердости поверхностному слою, а также исправление дефектов структуры, образовавшихся после цементации (цементитная и ферритная сетка, крупное зерно). Поверхностный слой после цементации имеет заэвтектоидную концентрацию углерода, поэтому закалку проводят из двухфазной области $\gamma + K$, так как после охлаждения со скоростью больше критической, в структуре кроме мартенсита закалки будет присутствовать сферические включения карбидов, дополнительно повышающие твердость и износостойкость. На основании анализа литературных данных температура закалки была назначена 760 ± 10 (на 50 градусов выше A_{c1}).

Из таблицы 3 видно, что оптимальной по свойствам является температура высокого отпуска равная 660...680 °С.

Таблица 3.

Результаты измерения твердости поверхности цементованных образцов из стали 15X2ГН2ТРА после высокого отпуска (2 ч) и закалки с 760 ± 10 °С

Температура отпуска, °С	HRC
600+5	52...54
620+5	53...55
640+5	56...57
660+5	60...61
680+5	60...61
700+5	56...57

Исследованиями установлено, что в структуре стали после закалки присутствует 15-20 % остаточного аустенита, так как практически все легирующие элементы понижают температуру начала мартенситного превращения. Для снижения количества остаточного аустенита после закалки была проведена обработка холодом. Охлаждение изделий до отрицательных температур проводили сухим льдом до температуры -65...-75 °С. Положительное действие обработки холодом проявилось не только в повышении твердости стали, но и в процессе эксплуатации деталей обеспечит их размерную стабильность [12].

Структура, образующаяся после закалки и обработки холодом (мартенсит закалки + карбиды) является термодинамически неустойчивой, также в детали присутствуют высокие упругие напряжения (закалочные напряжения). С целью повышения эксплуатационных свойств и надежности деталей был проведен низкий отпуск (продолжительностью 2 ч), который является заключительной операцией термической обработки изделий после химико-термической обработки.

Исследование влияния температуры низкого отпуска на контактную выносливость стали 15X2ГН2ТРА представлено в таблице 4 и показало, что оптимальной температурой нагрева является 160-180 °С.

Таблица 4.

Результаты испытаний образцов из стали 15X2ГН2ТРА на контактную выносливость N_{50} после низкого отпуска (2 ч)

Температура отпуска, °С	Контактная выносливость N_{50} , млн.цикл.
140+5	93...94,5
160+5	105...107
180+5	133...135
200+5	135...138
220+5	98...101

Таким образом, предлагаемые режимы термической обработки после вакуумной цементации стали изображены на схеме (рис. 1).

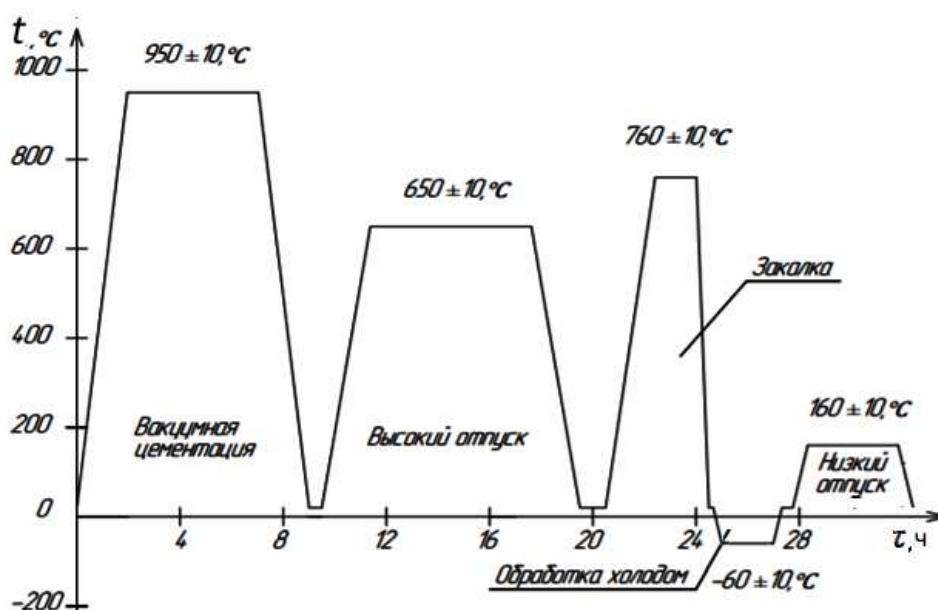


Рис. 1. Схема химико-термической обработки стали 15X2ГН2ТРА

Выводы

- 1). Оптимальная температура высокого отпуска после вакуумной цементации составляет 660...680 °С, 2 ч.
- 2). Для повышения контактной выносливости необходимо провести послезакалочный низкий отпуск при температуре 200+5 °С, 2 ч.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
2. Пахомова С.А. Особенности преподавания курса «Инженерия поверхности» студентам

- по направлению «материаловедение и технологии материалов» // Инженерный вестник. - 2015. - № 9. - С. 19. URL: <http://engsi.ru/doc/812901.html> (дата обращения 15.12.2018).
3. Карапузов О. Г. Особенности вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойких сталей // В сборнике: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы X Международной научно-инновационной молодежной конференции. - 2018. - С. 315-318. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36443515>
 4. Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization // Polymer Science. Series D. - 2017. - Т. 10, № 1. - P. 79-83.
 5. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С., Макушина М.А., Пикалов А.И., Усова В.В., Юшин Н.А. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 9 (109). - С. 19-28.
 6. 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.
 7. Помельникова А.С., Фетисов Г.П., Пахомова С.А. К вопросу упрочнения различно легированных сталей обработкой в коронном разряде // Технология металлов. - 2017. - № 2. - С. 20-24.
 8. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bokhonov G.Yu. Reinforcing electromechanical restoring output shaft gear box change the family car "Gazelle" // Repair, restoration, modernization. - 2015. - № 9. - P. 14-16.
 9. Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тяжело нагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. - 2016. - № 3. - С. 243-251.
 10. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 1999. - № 2. - С. 61.
 11. Закалка металлов токами высокой частоты URL: http://m-deer.ru/tehnologiya/zakalka_metallov_tokami_vysokoj_chastoty (дата обращения 15.12.2018).
 12. Гришин В.И. Повышение контактной выносливости деталей из цементуемой стали 12Х2Н4А // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 11 (111). - С. 3-9.

Дата поступления: 15 февраля 2019 г.