

## РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 15X2ГН2ТРА ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ

К.А. Бузаверов

dr.mgtu@yandex.ru  
SPIN-код: 3719-1740

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

---

### Аннотация

*Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик тяжело нагруженных авиационных зубчатых колес, изготовленных из низкоуглеродистой экономно легированной стали 15X2ГН2ТРА. Приведены сведения о режимах окончательной термической обработки, используемых 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 HRC 60, твердость сердцевины HRC 40. Определены оптимальные температурные условия проведения высокого отпуска после цементации и низкого отпуска после закалки.*

### Ключевые слова

*Вакуумная цементация, низкоуглеродистая сталь, зубчатые колеса, цементованный слой, закалка, отпуск, контактная выносливость, твердость*

Поступила в редакцию 04.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** Зубчатые передачи получили широкое распространение во всех сферах промышленности, что обусловлено высокими значениями их нагрузочной способности, надежности и 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 подразделяют на улучшаемые и поверхностно упрочненные. Улучшаемые стали применяют в слабо- и средненагруженных передачах [1, 2]. С помощью поверхностного термического или химико-термического упрочнения достигают высокой твердости 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 [3, 4]. При химико-термической обработке достигается наибольшая твердость поверхности зубьев, что обеспечивает высокую несущую способность зубчатых передач по контактной прочности, позволяет снизить

массу и уменьшить 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 ( $\epsilon$ -фазы) применение азотируемых сталей при высоких контактных нагрузках ограничено.

После цементации можно получить эффективный диффузионный слой 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.

С учетом 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, 2], что в настоящее время в авиации широко применяется высокопрочная сталь ВКС5-Ш. Однако в связи с тем, что это высоколегированная и дорогая сталь, в настоящее время возникает вопрос о возможности применения менее дорогих материалов. Свойства базовой (ВКС5-Ш) и альтернативной экономно-легированной стали 15Х2ГН2ТРА (ГОСТ 2590–2006) представлены в таблице. При выборе материала необходимо также учесть его условную стоимость.

Сравнение свойств и стоимости цементуемых сталей

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

Согласно таблице, 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 °С, 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 [3–5] или обработкой в коронном разряде [6]), электромеханической обработкой [7], пластической деформацией [8, 9] или с помощью токов высокой частоты [10]. В работе исследован вариант вакуумной цементации, имеющий множество преимуществ [4].

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

**Методика и объекты исследования.** Объектами исследований служили образцы из стали 15X2ГН2ТРА, которые подвергали типичной для зубчатых колес ХТО: вакуумной цементации (ВЦ) при температуре 930...950 °С, высокому отпуску, закалке в масло при температуре 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 Baird 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, 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.

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 15X2ГН2ТРА (согласно ТУ 14-1-950-74) представлен ниже:

Элемент	Химический состав, % материала
C .....	0,12–0,18
Si .....	0,17–0,37
Mn .....	0,7–1,0
Cr .....	1,4–1,8
Ni .....	1,4–1,8
Ti .....	0,02–0,06
B .....	0,002–0,005
S .....	≤ 0,025
P .....	≤ 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 (соответствует критической точке  $A_{c1}$  цементованного слоя) карбиды сфероидизируются и из аустенита выделяются очень мелкие вторичные карбиды. Таким образом распределение карбидной фазы становится более равномерным, а ее сферическая форма позволяет быстрее растворяться в аустените при нагреве до температуры первой закалки, которую проводят после высокого отпуска.

Для определения оптимального режима высокого отпуска его температуру изменяли в пределах 600...700 °С, поскольку этот диапазон является зоной

наименьшей устойчивости аустенита подобной стали. При этом продолжительность нагрева составила 2 ч, время выдержки 2 ч, охлаждение до 200 °С в печи (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  $760 \pm 10$  °С (на 50 °С выше  $A_{c1}$ ).

Оптимальной по свойствам является температура высокого отпуска 660...680 °С. Результаты измерения твердости поверхности цементованных образцов из стали 15X2ГН2ТРА после высокого отпуска (2 ч) и закалки с  $760 \pm 10$  °С приведены ниже:

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

Исследованиями установлено, что в структуре стали после закалки присутствует 15...20 % остаточного аустенита, поскольку 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 воздействие обработки холодом проявилось не только в повышении твердости стали, но и в процессе эксплуатации деталей обеспечит их размерную стабильность [11].

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 показало, что оптимальной температурой нагрева является 180...200 °С. Результаты испытаний образцов из стали 15X2ГН2ТРА на контактную выносливость  $N_{50}$  после низкого отпуска (2 ч) приведены ниже:

Температура отпуска, °С	Контактная выносливость $N_{50}$ , млн циклов
140±5	93,0–94,5
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 (см. рисунок).

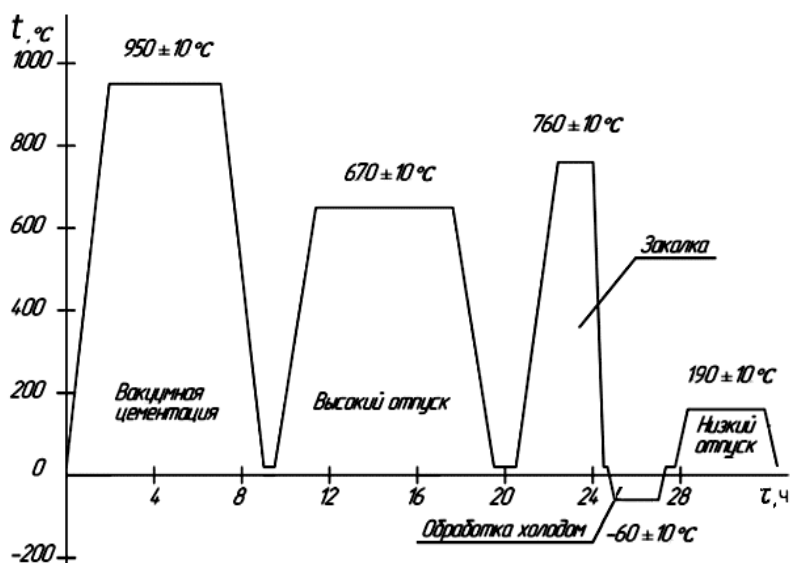


Схема химико-термической обработки стали 15X2ГН2ТРА

**Заключение.** По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Оптимальная температура высокого отпуска после вакуумной цементации составляет 660...680 °С, время отпуска 2 ч.
2. Для повышения контактной выносливости необходимо провести послезакалочный низкий отпуск при температуре 180...200 °С в течение 2 ч.

### Литература

- [1] Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М., Машиностроение, 2008.
- [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] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polym. Sci. Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83. DOI: 10.1134/S1995421217010063  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1995421217010063>
- [4] Смирнов А.Е., Семенов М.Ю. Применение вакуумной термической и химико-термической обработки для упрочнения тяжело нагруженных деталей машин, при-

- боров и инструмента. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 2. URL: <http://engineering-science.ru/doc/700036.html>
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1999, № 2, с. 61–68. URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/proc/hidden/727.html>
- [10] Закалка металлов токами высокой частоты. *m-deer.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.m-deer.ru/tehnologiya/zakalka-metallor-tokami-vysokoj-chastoty.html> (дата обращения: 15.12.2018).
- [11] Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2004, № 8, с. 22–27.

**Бузаверов Кирилл Алексеевич** — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

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

## MODES OF THERMAL TREATMENT OF STEEL 15H2GN2TRA AFTER CARBURIZATION

K.A. Buzaverov

dr.mgtu@yandex.ru  
SPIN-code: 3719-1740

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The paper addresses the issues of improving the performance characteristics of heavy duty 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

Vacuum carburizing, low carbon steel, gears, carburised layer, hardening, tempering, contact fatigue durability, hardness

Received 04.04.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Suslov A.G. Inzheneriya poverkhnosti detaley [Parts surface engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008 (in Russ.).
- [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. URL: <http://engsi.ru/doc/812901.html> (in Russ.).
- [3] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polym. Sci. Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83. DOI: 10.1134/S1995421217010063  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1995421217010063>
- [4] Smirnov A.E., Semenov M.Yu. The application of vacuum heat and thermo-chemical treatment to improve strength of different heavily loaded machine parts and engineering instruments. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 2. URL: <http://engineering-science.ru/doc/700036.html> (in Russ.).
- [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, c. 113–118 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2017, vol. 46, no. 2, pp. 187–192. DOI: 10.3103/S1052618816060066  
URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1052618816060066>)
- [6] 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 (in Russ.).

- 
- [7] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bokhonov G.Yu. Reinforcing electromechanical restoring output shaft gear box change the family car "Gazelle". *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, restoration, modernization], 2015, no. 9, pp. 14–16 (in Russ.).
- [8] Pakhomova S.A., Makushina M.A., Kovalenko S.V. Deformation hardening of the heavily loaded gear surfaces for the mining industry. *Sovremennye innovatsionnye 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 (in Russ.).
- [9] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M. Efficiency of the strain hardening of the rose steels. *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.  
URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/proc/hidden/727.html> (in Russ.).
- [10] Zakalka metallov tokami vysokoy chastoty [Metals hardening by high-frequency currents]. *m-deer.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.m-deer.ru/tehnologiya/zakalka-metallov-tokami-vysokoj-chastoty.html> (accessed: 15.12.2018).
- [11] Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. Control on diffusion layer saturation at active vacuum carburizing of heat-resisting steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 8, pp. 22–27 (in Russ.).

**Buzaverov K.A.** — 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.