

Применение вакуумной термической и химико-термической обработки для упрочнения тяжело нагруженных деталей машин, приборов и инструмента

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0700036

Смирнов А. Е.¹, Семенов М. Ю.²

УДК 621.785.4:621.785.5

¹ Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

²Россия, Москва, ФГУП "ЦНИИЧерМет им. И.П. Бардина"

smirnoff@bmstu.ru

shigona.podzhogin@yandex.ru

Введение

Как показано в работах [1-3] вакуумная цементация и нитроцементация гарантируют высокие эксплуатационные свойства диффузионных слоев, хорошую воспроизводимость результатов насыщения, оптимальное соотношение цены и качества обработки. При этом известные преимущества имеет совместное насыщение поверхности углеродом и азотом. В работах [4, 5] рассмотрены вопросы математического моделирования указанных процессов и управления ими.

Вместе с тем, указанные работы посвящены вакуумной химико-термической обработке (ХТО) низколегированных сталей, насыщение которых углеродом и азотом осуществляется в пределах области твердого раствора.

Значительно больше возможностей по повышению прочностных свойств насыщенных слоев представляет вакуумная обработка комплексно-легированных сталей, которая реализуется на практике только в последнее время.

Теоретический анализ закономерностей формирования карбидной фазы при вакуумной цементации теплостойких сталей выполнен в работах [6, 7]. Разработана математическая модель вакуумной цементации с образованием легированного цементита и специальных карбидов.

Управление вакуумной цементацией (нитроцементацией) существенно упрощается ввиду саморегулирования процесса насыщения [8].

В вышеперечисленных работах показано, что применение вакуумного термического оборудования предоставляет большие возможности по упрочнению широкой номенклатуры обрабатываемых изделий, включая тяжелонагруженные детали машин и приборов, а также инструменты.

Вопросам повышения эксплуатационных свойств деталей путем измельчения зерна посвящен ряд отечественных и зарубежных исследований, в частности [9, 10].

Вместе с тем, применение вакуумного термического оборудования, упрощающего управление процессами термической обработки (ТО), в частности направленными на измельчение зерна, в отечественной научной литературе должным не рассмотрено.

Следует отметить, что в научной литературе отсутствуют данные о практической реализации больших технологических возможностей вакуумной ТО и ХТО, наиболее ярко проявляющихся при обработке деталей и инструмента, к эксплуатационным свойствам которых предъявляются особые требования, выходящие за пределы требований, обычно предъявляемых к типовым изделиям. Применению вакуумной термической и химико-термической обработки в отношении таких деталей и инструмента посвящена представленная статья.

В этой связи, в качестве цели настоящей работы выбрано обобщение выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана исследований режимов ТО и ХТО в атмосферах низкого давления, реализующих на практике максимальные возможности вакуумных процессов.

Оборудование, объекты и методика исследования

Проведение опытно-конструкторских разработок, предназначенных для эффективного решения задач проектирования инновационных технологий упрочнения, стало возможным благодаря применению современного вакуумного оборудования фирмы SECO/WARWICK S.A. (рис. 1), дающему возможность не только проводить процессы термической обработки, но и диффузионное насыщение в бескислородных средах, исключая образование дефектных структур.



а)



б)

Рис. 1. Вакуумное оборудование фирмы SECO/WARWICK S.A.: а) внешний вид; б) вид рабочей камеры в ходе загрузки

Данное оборудование предоставляет возможность проводить процессы термической и химико-термической обработки в одной камере, при этом обеспечивается точное регулирование технологических факторов процесса; закалка проводится в потоке инертного газа высокого давления [11].

Цементацию проводили в атмосфере ацетилена, нитроцементацию – в смеси ацетилена и аммиака. Указанные газы термически диссоциируют на поверхности обрабатываемых деталей [8]. Насыщение проводили в интервале температур 850-950 °С; давление при этом составляло от 1 до 20 мм рт.ст.

Объекты исследований:

- высоконагруженные зубчатые колеса газотурбинных двигателей, изготовленные из низкоуглеродистых комплексно-легированных теплостойких сталей, содержащих наряду с хромом и никелем также ванадий, вольфрам, молибден, ниобий;
- детали шарикоподшипников для авиационных измерительных приборов из высокоуглеродистой стали, легированной большим количеством хрома, вольфрама и значительным количеством ванадия;
- штампы из высокоуглеродистой инструментальной стали, содержащей наряду с большим количеством хрома также молибден и ванадий.

Несущая способность современных зубчатых передач газотурбинных двигателей определяется комплексом эксплуатационных требований, которые в большинстве случаев являются взаимоисключающими [6,7,12]. Так, например, к высоконагруженным авиационным

зубчатым колесам предъявляют высокие требования по контактной выносливости, сопротивлению циклическим изгибным нагрузкам, а также адгезионному и абразивному изнашиванию.

Для деталей шарикоподшипников определяющими свойствами являются контактная выносливость и высокая прочность сердцевины.

Для штампов наиболее существенны высокая твердость поверхности и ударная вязкость сердцевины.

Перечисленные в таблице стали, которые использовали для изготовления названных выше изделий, предоставляют большие возможности по получению максимальных значений эксплуатационных свойств при проведении обработки по оптимальным режимам.

Таблица. Комплексно-легированные конструкционные и инструментальные стали

Марка стали	Химический состав, % по массе										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Nb	S	P
16X3HВФМБ	0,14 - 0,19	0,6- 0,8	0,4- 0,7	2,6- 3,0	1,0- 1,5	1,0- 1,4	0,4- 0,6	0,35 - 0,55	0,1- 0,2	≤ 0,02	≤ 0,03
20X3МВФ	0,15 - 0,20	0,17 - 0,37	0,25- 0,50	2,4- 3,3	≤ 0,50	0,3- 0,5	0,35 - 0,55	0,60 - 0,85	-	≤ 0,025	≤ 0,03
13X3H3M2BФБ	0,10 - 0,15	0,17 - 0,37	0,3- 0,6	3,0- 3,4	2,7- 3,0	0,2- 0,5	1,9- 2,3	0,05 - 0,15	0,05 - 0,15	≤ 0,015	≤ 0,015
8X4B9Ф2	0,7- 0,8	≤ 0,4	≤ 0,4	4,0- 4,6	-	8,5- 9,5	-	1,4- 1,7	-	≤ 0,03	≤ 0,03
X12МФ	1,45 – 1,65	0,1 – 0,4	0,15 – 0,45	11 – 12,5	≤ 0,4	-	0,4 – 0,6	0,15 – 0,3	-	≤ 0,03	≤ 0,03

Указанные стали, содержащие 5-15 % сильных карбидообразующих элементов, дают возможность получить в поверхностном слое в результате цементации (нитроцементации) до 75 % карбидной (карбонитридной) фазы.

Особенностью всех перечисленных сталей является образование развитой карбидной или карбонитридной фазы, которая оказывает определяющее влияние на большинство эксплуатационных свойств указанных деталей и инструментов.

Установлено, что зависимость предела контактной усталости теплостойких сталей от количества карбидов имеет выраженный максимум, соответствующий 20-25 % избыточной фазы в зависимости от марки стали. При этом протяженность приповерхностной зоны высокой насыщенности должна быть достаточно велика.

Для обеспечения максимальной износостойкости объемную долю карбонитридной фазы на поверхности обрабатываемого изделия следует максимально увеличивать.

На сопротивление усталостному разрушению при изгибе наличие карбидов в упрочненном слое оказывает отрицательное влияние, при этом протяженность слоя ограничивается необходимостью сохранения вязкой сердцевины.

Размер зерна мартенситной матрицы оказывает определяющее влияние на ударную вязкость материала; для измельчения зерна штамповых сталей их обрабатывали по неизотермическим режимам.

Названные выше способы химико-термической обработки характеризуются большими возможностями по изменению в широких пределах схем насыщения и технологических факторов. Их экспериментальный перебор не рационален. При этом, как показано ранее, необходимо обеспечивать соблюдение сложного комплекса требований к результатам химико-термической обработки [6,7].

Таким образом, выбор режимов вакуумной цементации и нитроцементации целесообразно осуществлять на основе решения оптимизационной задачи [13].

Расчетная методика проектирования технологии ХТО зубчатых колес предполагает решение двух последовательных задач: определение требований к характеристикам упрочненного слоя (его химический и фазовый состав, распределение насыщенности по толщине слоя с учетом особенностей полной технологии изготовления зубчатого колеса) в зависимости от конкретных эксплуатационных свойств и оптимальный выбор технологического режима в зависимости от требуемых параметров насыщенного слоя (рис. 2).

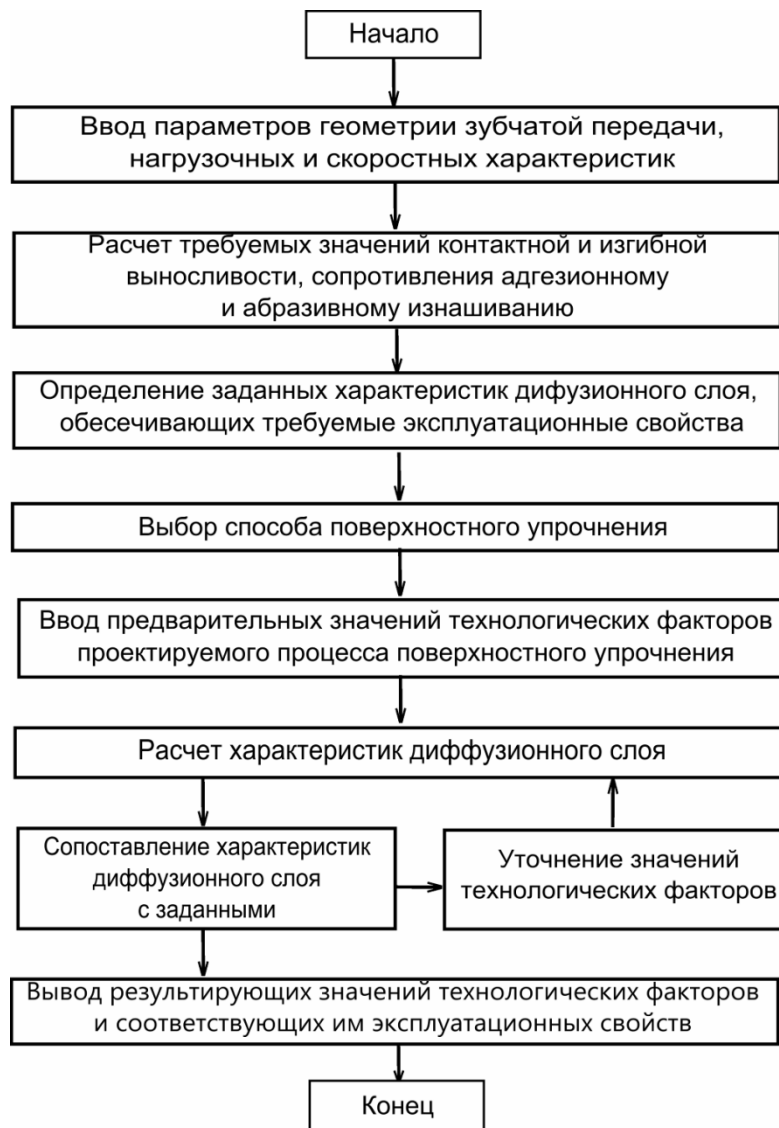


Рис. 2. Схема алгоритма технологического процесса цементации (нитроцементации)

Расчетная методика установления требований к характеристикам диффузионных слоев на основе задаваемых значений сопротивления контактной усталости, сопротивления адгезионному изнашиванию и заеданию, а также изгибной прочности, основана на решении задачи определения напряженного состояния в слое, тепловой задачи в зависимости от нагрузочно-скоростного режима работы зубчатых колес и подшипников, применении регрессионных соотношений, связывающих износостойкость с насыщенностью диффузионного слоя.

Для обеспечения заданного уровня эксплуатационных свойств сформулированы требования, предъявляемые не только к насыщенности слоя углеродом и азотом, но и к его структуре: морфологии и размерно-количественным распределениям частиц карбонитридов.

При цементации и нитроцементации сталей, легированных большим количеством сильных карбидообразующих элементов, образуется развитая избыточная фаза сложного состава, включающая в себя легированный цементит и специальные карбиды или карбонитриды сильных карбидообразующих элементов.

Ключевое звено решаемой оптимизационной задачи проектирования технологического режима химико-термической обработки – математическая модель диффузионного насыщения углеродом (углеродом и азотом при нитроцементации). Она включает в себя совокупность термокинетических соотношений, описывающих диффузионный массоперенос насыщающих элементов по сечению детали в условиях зарождения, диффузионного роста, а также частичного или полного растворения частиц цементита и специальных карбидов с учетом влияния содержания легирующих элементов [13].

Формирование указанных структур существенно затрудняет расчет насыщенности диффузионного слоя углеродом и азотом.

При математическом описании неизотермических режимов цементации (нитроцементации) применяли эффективные коэффициенты диффузии, полученные в результате теоретико-экспериментальных исследований [14].

Граничные условия модели представляют собой параметрические выражения, связывающие углеродный и азотный потенциал, а также коэффициенты массопереноса с химическим составом атмосферы и температурой процесса.

Результаты исследований и их обсуждение

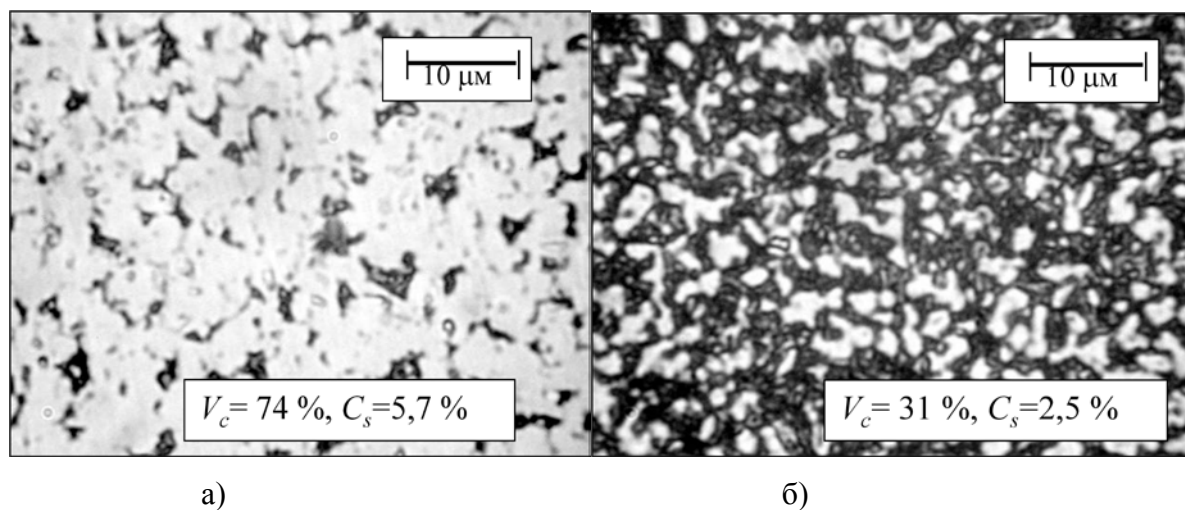
На основании рассмотренных выше закономерностей определены оптимальные режимы обработки указанных групп деталей.

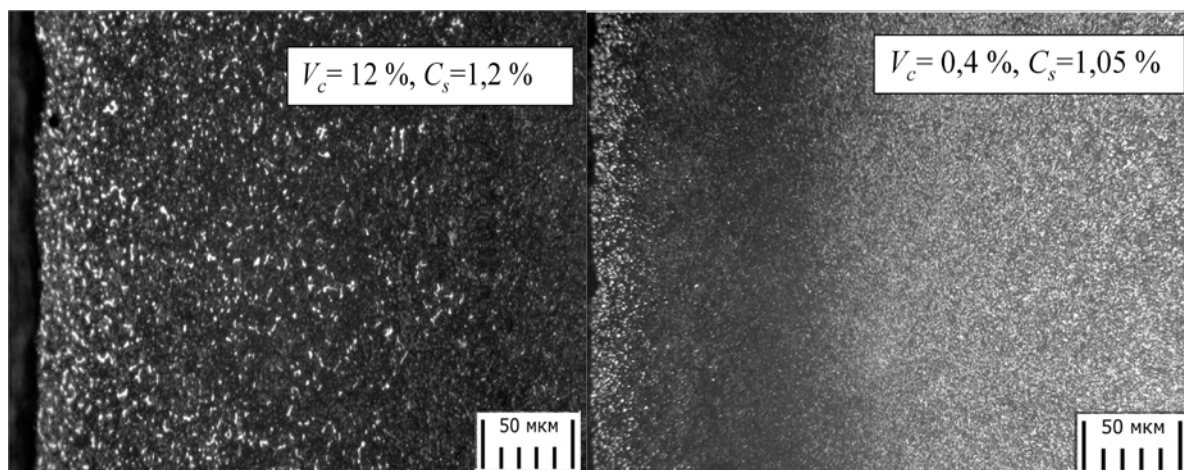
С использованием математического моделирования разработан ряд вариантов технологических режимов вакуумной цементации и нитроцементации для зубчатых передач, характеризующихся различными сочетаниями приоритетных эксплуатационных свойств. Микроструктуры поверхностных слоев существенно отличаются в зависимости от объемной доли карбидной (карбонитридной) фазы (V_c) и концентрации насыщающих элементов (углерода и азота) (C_s) на поверхности (рис. 3).

Вакуумная ХТО впервые применена для упрочнения новой дисперсионно-твердеющей стали 13Х3Н3М2ВФБ. Учитывали, что полная ТО данной стали включает вместо традиционных цементации (нитроцементации), закалки, обработки холодом и низкого отпуска, применяющихся для обычных теплостойких сталей 20Х3МВФ и 16Х3НВФМБ, цементацию (нитроцементацию), закалку с температуры 1010 °С, обработку холодом и трехкратный отпуск. При этом упрочнение на вторичную твердость обеспечивается за счет выделения частиц карбидов и карбонитридов в ходе трехкратного отпуска.

Изменение схемы общей ТО потребовало внедрения аperiodических режимов подачи ацетилена в ходе цементации (нитроцементации). В отличие от существующих схем при вакуумной нитроцементации впервые применена в промышленной технологии постоянная подача аммиака.

Применение новой технологии позволило повысить предел текучести на сдвиг упрочненного слоя на 30 %, а контактную выносливость более чем в 1,5 раза по сравнению с традиционной технологией ХТО.





в)

г)

Рис. 3. Микроструктуры цементованных (а и б) и нитроцементованных (в и г) слоев авиационных зубчатых колес, обработанных для обеспечения: а) максимальной износостойкости и сопротивления заеданию; б) умеренных значений износостойкости, сопротивления адгезионному износу и контактной выносливости; в) максимальной контактной выносливости; г) повышенного сопротивления усталостному разрушению зубьев при изгибе

При нитроцементации колец малоразмерных шарикоподшипников из стали 8Х4В9Ф2 с учетом различных типоразмеров деталей (рис. 4, а) использовали различную технологическую оснастку (рис. 4, б-в).

Для колец шарикоподшипников были получены высокие значения механических свойств, как на поверхности (68-70 HRC), так в сердцевине (59-61 HRC). Приповерхностная зона детали упрочнена карбонитридными частицами благоприятной глобулярной формы оптимального размера (рис. 4, г). Требуемое количество карбонитридной фазы в слое и размерно-количественное распределение ее частиц обеспечено путем решения оптимизационной задачи по математической модели [6,7].

Впервые принятые технологические решения позволили получить тонкие высокопрочные слои на поверхности деталей, содержащие большое количество карбонитридной фазы, при сохранившихся высоких значениях механических свойств сердцевины. Возможность сочетания таких эксплуатационных свойств, как высокие контактная выносливость поверхности и объемная прочность сердцевины обусловлена применением вакуумных технологии ТО и ХТО, дающих возможность проводить высокоскоростную закалку в потоке газа.

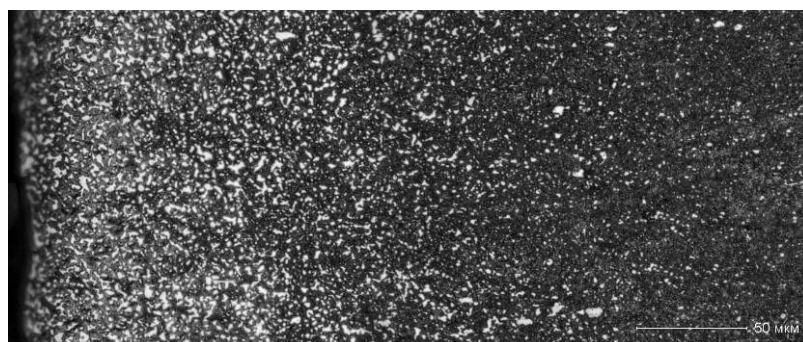


а)

б)



в)



г)

Рис. 4. Кольца шарикоподшипников авиационных приборов: а) размеры обрабатываемых деталей; б) и в) - технологическая оснастка; г) результирующая микроструктура приповерхностной зоны и сердцевины.

Для подвергнутых термической обработке по неизотермическим режимам в вакууме штампов из стали X12МФ получили высокую твердость поверхности (62-64 HRC) при среднем размере зерна 6-8 мкм, обеспечивающем заданную ударную вязкость. Результаты оптической микроскопии показывают, что размеры частиц мартенсита превосходят размеры карбонитридных частиц не более, чем на 1,0-1,5 порядка (рис. 5, б).

Возможность применения штампового инструмента из указанной стали без ХТО позволяет сократить вдвое время ТО, включающей в себя ионное азотирование, штамповой стали 4X5B2ФС, то есть технологии, которая до настоящего времени считалась наиболее прогрессивной [15]. При этом твердость поверхности штампа сохраняется на том же уровне.



Рис. 5. Микроструктура штамповой стали X12МФ после неизотермической обработки

Заключение

В настоящей статье представлены примеры разработки инновационных технологий вакуумной ТО и ХТО, эффективность которых существенно превосходит эффективность традиционных технологий.

Выполненное впервые обобщение принципиально различающихся конкретных примеров практической реализации технологических возможностей вакуумного термического оборудования дает возможность сделать вывод об универсальности данного производственного оборудования.

Показаны большие технологические возможности вакуумных технологий обработки деталей и инструмента из сложнолегированных сталей различного назначения (дисперсионно-твердеющих, шарикоподшипниковых, инструментальных), обеспечивающих необходимую совокупность эксплуатационных свойств для конкретного изделия.

Для любой стали можно разработать технологию термической или химико-термической обработки в вакууме, с тем, чтобы все потенциальные возможности данного материала раскрылись в полном объеме, при этом оптимальный вариант технологического режима обработки определяют экспериментальным или расчетным методом. Применение математического моделирования дает возможность максимально интенсифицировать проектирование технологических режимов.

Список литературы

1. Edenhofer B. An overview of advances in atmosphere and vacuum heat treatment // Heat treatment of metals. 1999. Vol. 26, no. 1. P. 1-5.
2. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology // Heat treatment progress. 2001. Vol. 1, no. 1. P. 57-65.
3. Kula P., Siniarski D., Pietrasik R., Kaczmarek Ł., Korecki M., Adamek A. Niskociśnieniowe węglonawęglanie i wysokowydajne niskociśnieniowe nawęglanie – nowe możliwości technologii FINECARB // Inżynieria materiałowa. 2006. Vol. 27, no. 5. S. 1092-1095.
4. Kula P. Komputerowe wyznaczanie twardości warstwy wierzchniej w kołach zębatych po procesie nawęglania próżniowego i hartowania gazowego / P. Kula, R. Atraszkiewicz, E. Wołowicz // Inżynieria materiałowa. 2010. Vol. 31, no. 4. S. 1053-1055.
5. Семенов М.Ю., Смирнов А.Е., Рыжова М.Ю. Расчет концентрационных кривых углерода при вакуумной цементации сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 1 (691). С. 38-42.
6. Семенов М.Ю. Управление строением цементованных слоев теплостойких сталей. Часть I // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 5 (695). С. 31-38.
7. Семенов М.Ю. Управление строением цементованных слоев теплостойких сталей. Часть II // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 6 (696). С. 32-37.
8. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление характеристиками диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 8. С. 22-27.
9. Баранов А.А. Структурные изменения при термоциклической обработке металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 12. С. 2-10.
10. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
11. Официальный сайт фирмы SECO/WARWICK S.A. Режим доступа: <http://www.secowarwick.com> (дата обращения 05.02.2014).
12. Starzhinskii V.E., Soliterman Yu.L., Goman A.M., Osipenko S.A. Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention // Journal of Friction and Wear. 2008. Vol. 29, no. 5. P. 340-353.
13. Семенов М.Ю., Смирнов А.Е., Лашнев М.М., Ступников В.В. Математическая модель вакуумной нитроцементации теплостойкой стали ВКС-10 // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0813.0569132>
14. Рыжов Н.М., Семенов М.Ю. Определение коэффициента диффузии углерода для расчета неизотермических режимов высокотемпературной ионной нитроцементации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 6. С. 26-30.

15. Братухин А.Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А.Г. Братухин, Г.К. Язов, Б.Е. Карасев, Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.

The application of vacuum heat and thermo-chemical treatment to improve strength of different heavily loaded machine parts and engineering instruments

02, February 2014

DOI: 10.7463/0214.0700036

A.E. Smirnov¹, M.Yu. Semenov²

¹Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

²I. P. Bardin Central Research Institute of Iron and Steel Industry, 105005, Moscow, Russian Federation

smirnoff@bmstu.ru

shigona.podzhogin@yandex.ru

The paper analyzes an application of vacuum equipment for heat and thermo-chemical treatment of aviation gear wheels, small bearings for aircraft equipment parts, and high strength stamps.

The generalization of designed vacuum technologies of heat and thermo-chemical treatment results compared with traditional processes is accepted as objective of the paper.

The practical use of vacuum processes (low pressure ones) has been first discussed in the specific context of the problem solution to design hardening technologies for critical parts from complex alloyed steels with exclusive operational properties. To solve this problem by traditional methods is impossible.

The research techniques included the complex combination of experimental studies conducted using an industrial universal vacuum furnace of SECO/WARWICK S.A. company (Poland), and of metallographic exams and mechanic tests as well as of numerical simulations accomplished by original vacuum carburizing (nitrocarburizing) models.

The study objects were as follows:

- a) steels containing chromium, nickel, molybdenum, tungsten and vanadium, which were used for gear wheels. In particular, a precipitation-hardening steel 13Kh3N3M2VFB was for the first time applied at carburized (nitrocarburized) condition;
- b) Steel 8Kh4V9F2, which was used for bearing rings;
- c) Steel Kh12MF, which was used for stamps.

The following operation properties are critical for gears: high contact fatigue endurance on the pitch circle; high bending fatigue endurance on the gears tooth-root; wear resistance on entire surface. Designing the technological operating conditions is complicated due to need to combine high values of all these properties, which stipulate the little-compatible requirements for physical and phase composition of the diffusion layers. Due to the advantages of thermo-chemical vacuum processes in oxygen-free atmosphere, namely technological flexibility and high reproducibility, the aperiodic cycles of carburization and nitrocarburization have been developed to ensure the increase of shear strength by 30 %, of contact fatigue resistance by 50 % as compared with the gas processes results.

The bearing rings operability is determined by high strength of both the surface and the core. These strength properties are provided owing to use of vacuum heat and thermo-chemical treatments, which enable us to obtain the thin nitrocarburized layers and produce the high-speed quenching in the gas flow. As the result of treatment we have obtained the surface strength at the level of 68-70 HRC and the strength of core at the level of 59-61 HRC.

Using the vacuum heat treatment for stamps enables us to choose the high carbon steel instead of the medium-carbon alloyed tool steel subjected to nitride hardening. The high viscosity of core was achieved owing to the non-isothermal processes of heat treatment, which are extremely difficult for implementation using the usual thermal equipment. Excluding the long nitride hardening procedure results in twice reduced total time of process.

Results of the study justify the extended introduction of vacuum technology of heat and thermo-chemical treatment instead of traditional and outdated processes.

The paper shows that using the specific innovative technologies increases an efficiency of vacuum thermal and thermo-chemical treatment.

Generalizing the fundamentally different examples for practical implementation of technological capabilities of thermal vacuum equipment allows us to come to conclusion that it is universal.

The technological capabilities of vacuum technology for various applications of complex alloyed steels were shown providing a predetermined complex of properties for a specific product.

It has been found that it is possible to develop the technology heat or thermo-chemical treatment in a low-pressure atmosphere for any steel, so that the potential of this material may be completely revealed. The use of the information technologies greatly intensifies the heat treatment process design.

Publications with keywords: [vacuum thermal and thermo-chemical treatment](#), [carburizing](#), [carbonitriding](#), [non-isothermal heat treatment](#), [stamping tools](#)

Publications with words: [vacuum thermal and thermo-chemical treatment](#), [carburizing](#), [carbonitriding](#), [non-isothermal heat treatment](#), [stamping tools](#)

References

1. Edenhofer B. An overview of advances in atmosphere and vacuum heat treatment. *Heat treatment of metals*, 1999, vol. 26, no. 1, pp. 1-5.
2. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology. *Heat treatment progress*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 57-65.
3. Kula P., Siniarski D., Pietrasik R., Kaczmarek Ł., Korecki M., Adamek A. Niskociśnieniowe węglazotowanie i wysokowydajne niskociśnieniowe nawęglanie – nowe możliwości technologii FINECARB. *Inżynieria materiałowa*, 2006, vol. 27, no. 5, pp. 1092-1095. (In Polish)
4. Kula P., Atraszkiewicz R., Wołowicz E. Komputerowe wyznaczanie twardości warstwy wierzchniej w kołach zębatych po procesie nawęglania próżniowego i hartowania gazowego. *Inżynieria materiałowa*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 1053-1055. (In Polish)
5. Semenov M.Yu., Smirnov A.E., Ryzhova M.Yu. [Computation of carbon concentration curves in vacuum carburizing of steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 1, pp. 38–42. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, May 2013, vol. 55, iss. 1-2, pp. 38-42. DOI: 10.1007/s11041-013-9576-x).
6. Semenov M.Yu. [Control of the structure of carburized layers of refractory steels. Part 1]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 5, pp. 31-38. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, iss. 5-6, pp. 257-264. DOI: 10.1007/s11041-013-9616-6).
7. Semenov M.Yu. [Control of the structure of carburized layers of refractory steels. Part 2]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 6, pp. 32-37. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, iss. 5-6, pp. 316-321. DOI: 10.1007/s11041-013-9627-3).
8. Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. [Control of Carbon Saturation of the Diffusion Layer in Vacuum Carburizing of Heat-Resistant Steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 8, pp. 22-27. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 46, iss. 7-8, pp. 340-344. DOI: 10.1023/B:MSAT.0000048845.35526.09).
9. Baranov A.A. [Structural changes in metals after heat cycling]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1983, no. 12, pp. 2-10. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 1983, vol. 25, iss. 12, pp. 875-883. DOI: 10.1007/BF00701949).
10. Fedyunin V.K., Smagorinskiy M.E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin* [Heat cycling of metals and machine parts]. Leningrad, Mashinostroenie, 1989. 255 p. (in Russian).

11. Official website of company SECO/WARWICK S.A. Available at: <http://www.secowarwick.com>, accessed 05.02.2014.
12. Starzhinskii V.E., Soliterman Yu.L., Goman A.M., Osipenko S.A. Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention. *Journal of Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 340-353.
13. Semenov M.Yu., Smirnov A.E., Lashnev M.M., Stupnikov V.V. [Mathematical model of vacuum nitrocarburizing of the complex-alloyed VKS-10 steel]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0813.0569132> (in Russian).
14. Ryzhov N.M., Semenov M.Yu. [Determination of the coefficient of carbon diffusion for calculating nonisothermal regimes of high-temperature ion nitrocarburizing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2000, no. 6, pp. 26-30. (English Translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 2000, vol. 42, iss. 6, pp. 228-233.).
15. Bratukhin A.G., Yazov G.K., Karasev B.E., Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.P. *Sovremennye tekhnologii v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley* [Modern technologies in production of gas-turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1997. 416 p. (in Russian).