

Вакуумная комбинированная химико-термическая обработка стали ВКС-10

12, декабрь 2015

Мохова А. С.^{1,*}, Смирнов А. Е.¹, Алёхин А. П.¹

УДК: 621.785.5

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}all1193@mail.ru

Введение

Совершенствование технологии производства зубчатых передач редукторов газотурбинных двигателей – одна из важнейших проблем для авиационной отрасли. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой газотурбинных двигателей нового поколения, для которых характерен значительный рост силовой и тепловой напряженности всех его деталей, включая зубчатые колеса [1].

Зубчатые колеса относятся к наиболее сложным в конструктивном и технологическом отношении деталям. Для них высокий уровень рабочих напряжений сочетается с требованиями высокой долговечности и эксплуатационной надежности. Выполнение этих требований диктует необходимость применения новых более теплостойких сталей и новых высокоэффективных процессов химико-термической обработки (ХТО).

Производственная практика и результаты исследований показывают, что цементуемая сталь ВКС-5 (16ХЗНВФМБ-Ш) не отвечает возросшим требованиям. Эта сталь не обладает достаточной теплостойкостью. Твердость цементованного слоя этой стали при кратковременной выдержке при температуре 450 °С снижается с 60-61 HRC до 54-56 HRC, что служит причиной снижения износостойкости и контактной прочности.

В соответствии с возникшими проблемами, специалистами ВИАМа разработана теплостойкая сложнолегированная сталь ВКС-10 (13ХЗНЗМ2ВФБ-Ш). В результате комплексного легирования такими карбидообразующими элементами, как Cr, Mo, W, V, Nb, теплостойкость стали повышена до 450 °С. В присутствии таких элементов образование в структуре дисперсной карбидной фазы обеспечивает измельчение зеренной структуры, повышение статической и циклической прочности. Введение никеля (~3%) способствует увеличению ударной вязкости, хладостойкости и прокаливаемости.

Между тем, главное функциональное назначение сталей – обеспечение возросших требований к эксплуатационным свойствам зубчатых колес – контактной и циклической прочности, износостойкости, уровень которых зависит от свойств поверхностного слоя. В

этой связи для реализации потенциальных возможностей новой сложнолегированной стали требуется разработка и внедрение современных упрочняющих технологий. К ним относится процесс комбинированной химико-термической обработки, сочетающий в себе возможности и преимущества высокотемпературной (вакуумная цементация и нитроцементация) и низкотемпературной обработки (ионно-плазменное и вакуумное азотирование, жидкостная карбонитрация).

Разработка технологии комбинированного процесса для новой теплостойкой стали открывает возможности для повышения эксплуатационных свойств ответственных деталей турбо- и моторостроения.

Задачи настоящей работы – исследование влияния параметров вакуумной цементации (ВЦ) (общего времени процесса и соотношений времен активной и пассивной стадий циклической подачи среды) на параметры диффузионных слоев и анализ влияния ионно-плазменного азотирования (ИА) на структуру и свойства приповерхностной части цементованных слоев, исследование износостойкости диффузионных слоев после ВЦ и комбинированной ХТО.

Материалы и методики исследований

Объекты исследований изготавливали из стали мартенситного класса 13Х3НЗМ2ВФБ-Ш (ВКС-10), состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали ВКС-10

Марка стали	Химический состав, %											
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
ВКС-10	0,1-0,15	3,0-3,4	2,7-3,0	1,9-2,3	0,3-0,6	0,2-0,5	0,17-0,37	0,05-0,15	0,05-0,15	≤0,04	≤0,015	≤0,015

Особенность стали – способность к интенсивному науглероживанию поверхности в результате образования в диффузионном слое повышенной объемной доли избыточной карбидной фазы. Эта особенность может обеспечить требования к поверхностному слою зубьев колес после цементации.

Высокая теплостойкость стали обеспечена комплексным легированием хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием и ниобием. Благодаря такой системе легирования сталь способна длительно сохранять при нагреве требуемую высокую твердость (60-63 HRC) цементованной поверхности.

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке по циклическому режиму при температуре 920 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации варьировали от 1 до 3 ч. Параметры циклической подачи ацетилена изменяли следующим образом: время активной стадии τ_a составляло от 1 до 7 мин, время пассивной стадии τ_n – от 27 до 57 мин. При этом суммарное время активных и пассивных стадий цикла за все время

насыщения составляло от 5 до 16 мин и от 55 до 164 мин соответственно. Таким образом соотношение суммарных времен активных и пассивных стадий циклической подачи среды варьировали от 0,06 до 0,12.

После ВЦ проводили упрочняющую термическую обработку, которая включала высокий отпуск (660 °С, 6 ч, в карбюризаторе), закалку (1010 °С, 1 ч, азот высокого давления), двукратный отпуск (510 °С, 1,5 ч, воздух), обработку холодом (-70 °С, 2 ч) и заключительный отпуск для снятия внутренних напряжений (510 °С, 1,5 ч, воздух). (рис. 1).

После упрочняющей ТО проводили шлифование с припуском 0,2 мм.

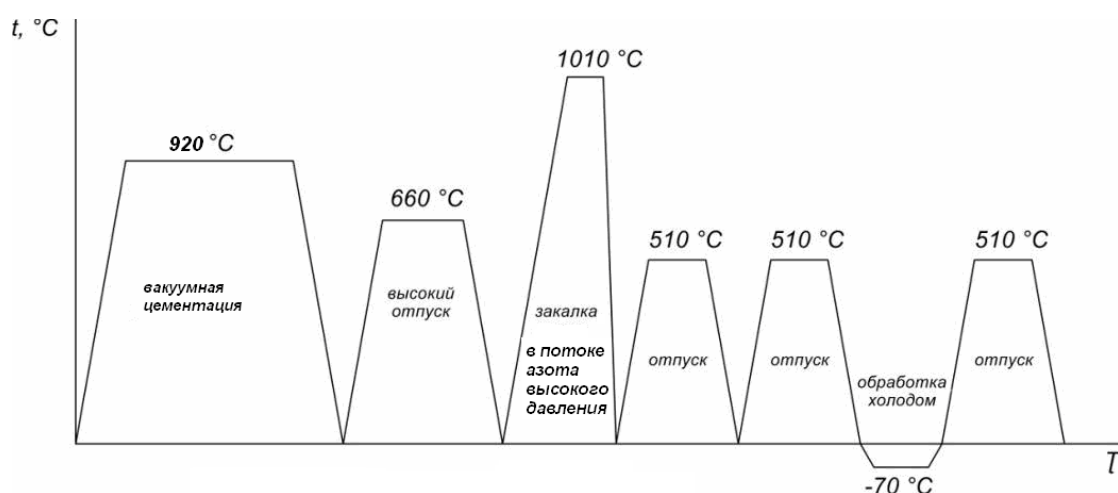


Рис.1. Схема химико-термической и полной термической обработки стали ВКС-10

На заключительной стадии обработки проводили ионно-плазменное азотирование. Процесс осуществляли при температуре 500 °С в атмосфере 95 % N₂ + 5 % H₂. Длительность ИА составляла 10 ч при давлении 2 мм рт.ст. и напряжении на катоде 400 В.

Исследовали образцы сталей как после вакуумной цементации и упрочняющей ТО, так и после вакуумной цементации, упрочняющей ТО и ионно-плазменного азотирования.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$. Микрошлифы изготавливали по традиционной методике.

ДюрOMETрические исследования состояли в измерении твердости поверхности образцов по методу Роквелла на приборе TP5006-02 при нагрузке 150 кг и измерение микротвердости на приборе DuraScan при нагрузке 0,1 кг.

Эффективную толщину слоя определяли по результатам дюрOMETрического анализа на образцах, прошедших полный цикл упрочняющей термообработки. За эффективную толщину принимали расстояние от поверхности до точки с микротвердостью 500 HV.

Для выявления микроструктуры образца использовали стандартный для сталей травитель – 3-4 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Образцы протравливали наполовину (на протравленной половине проводили металлографические исследования, а на оставшейся – измеряли микротвердость).

Испытания на износостойкость проводили на трибометре NANOVEA при нормальной нагрузке 30 Н и скорости вращения образца 300 об/мин. В качестве контртела использова-

ли шарик диаметром 6 мм из стали AISI 52100 с твердостью HRC 63-64. время испытания составляло 60 мин, при этом путь трения составил 296,74 м. Объектами испытаний являлись камертоны после вакуумной цементации с последующей упрочняющей ТО, а также после комбинированной ХТО, состоящей из ВЦ, ТО и ИА.

Результаты исследований

Анализ результатов ВЦ, проведенный после упрочняющей ТО, показал, что при увеличении общего времени насыщения увеличивается не только эффективная толщина диффузионного слоя (рис. 2, а), но и твердость поверхности (рис. 2, в); при этом подтверждены литературные данные [2, 3] о параболической зависимости эффективной толщины слоя от общего времени насыщения.

В отличие от общего времени насыщения, соотношения времени активных и пассивных стадий цикла оказывает влияние в основном на приповерхностную часть диффузионного слоя, изменяя при этом твердость поверхности (рис. 2, г); эффективная толщина слоя при этом остается практически неизменной (рис. 2, б).

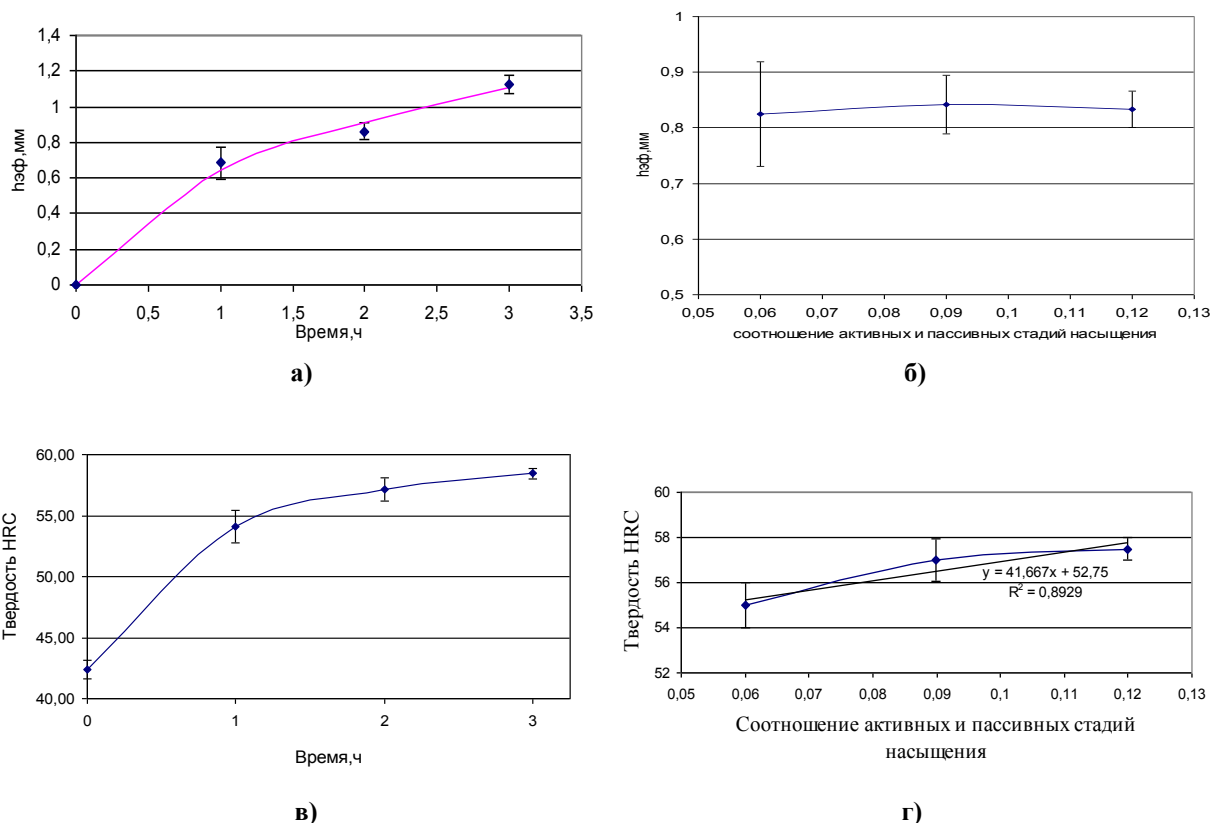


Рис. 2. Влияние времени насыщения (а, в) и соотношения времени активных и пассивных стадий цикла (б, г) на эффективную толщину слоя (а, б) и твердость поверхности (в, г) стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920°C) и упрочняющей термообработки

Микроструктура стали после ВЦ, последующей упрочняющей ТО и шлифования (избыточные карбиды цементитного типа, мартенсит и дисперсные частицы специальных карбидов [4]) представлена на рис.3.

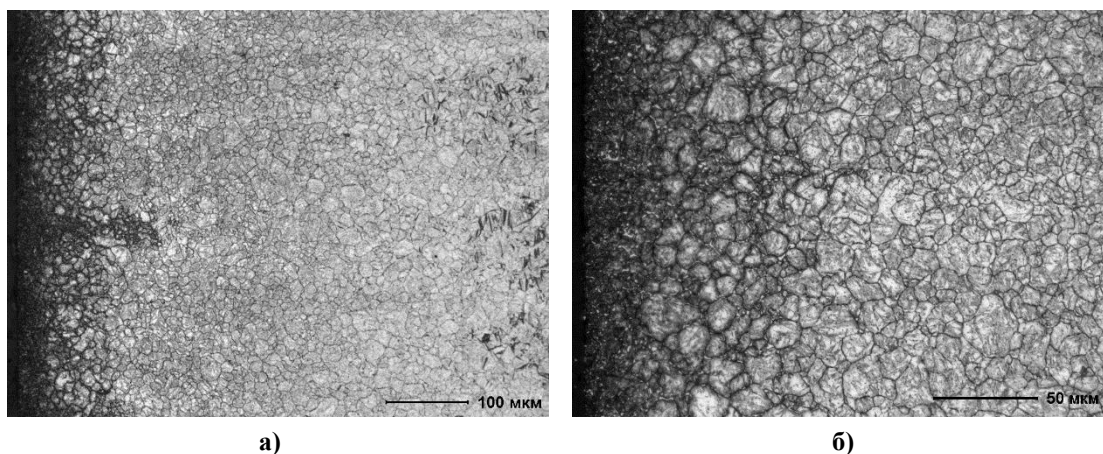


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, 2 часа, упрочняющей ТО и шлифования: а) - $\times 200$; б) - $\times 500$

При такой обработке формируется протяженный диффузионный слой (см. рис. 2, а, б), что способствует высокой контактной выносливости; при этом твердость поверхности имеет относительно невысокое значение (см. рис. 2, в, г).

Для дополнительного модифицирования поверхностного слоя применяли ионно-плазменное азотирование.

Здесь важно отметить, что температура ИА не превышает температуру последнего отпуска для стали ВКС-10 (см. рис. 1), что гарантирует отсутствие разупрочнения цементованного слоя и сердцевины при заключительном азотировании.

В процессе ионного азотирования происходит ряд процессов, связанных с насыщением поверхностного слоя азотом. Кроме насыщения твердого раствора азотом и образования нитридов легирующих элементов, происходит преобразование карбидов, сформировавшихся на этапе вакуумной цементации, в нитридные и карбонитридные фазы [5].

Микроструктура диффузионного слоя после ионно-плазменного азотирования представлена на рис. 4. Следует отметить, что при выбранном режиме азотирования на поверхности образца практически не образуется сплошной нитридный слой; названная структура обнаружена в виде отдельных фрагментов в периферийной части образца (рис. 5).

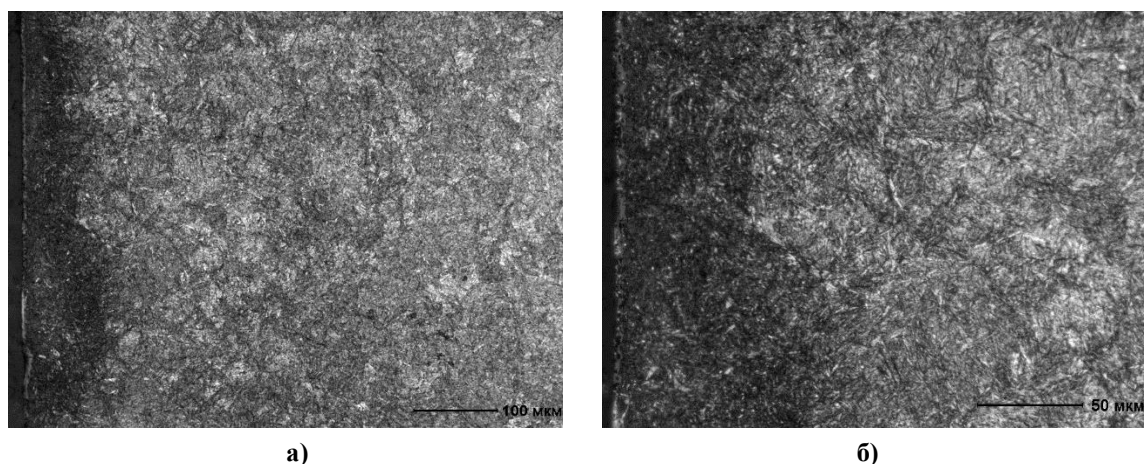


Рис.4. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, последующей упрочняющей ТО, шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500 °С: а - $\times 200$; б - $\times 500$

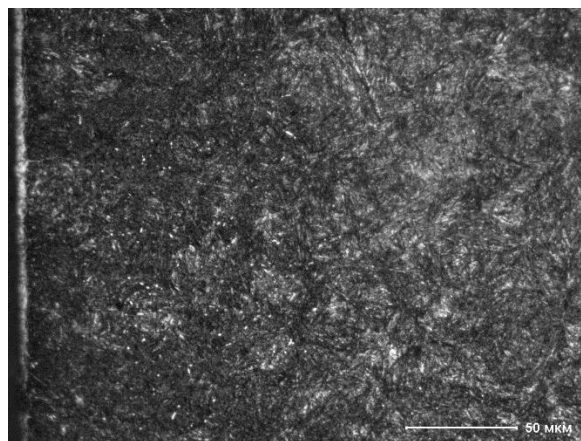


Рис.5. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920°C, последующей упрочняющей ТО, шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500°C; периферийная часть образца: ×500

Мартенсит, насыщенный не только углеродом, но и азотом, нитридные и карбонитридные фазы легирующих элементов, определяют повышенную твердость тонкого приповерхностного участка диффузионного слоя, полученного ВЦ. При этом не зафиксировано разупрочнение насыщенного углеродом слоя и сердцевины стали (рис. 6).

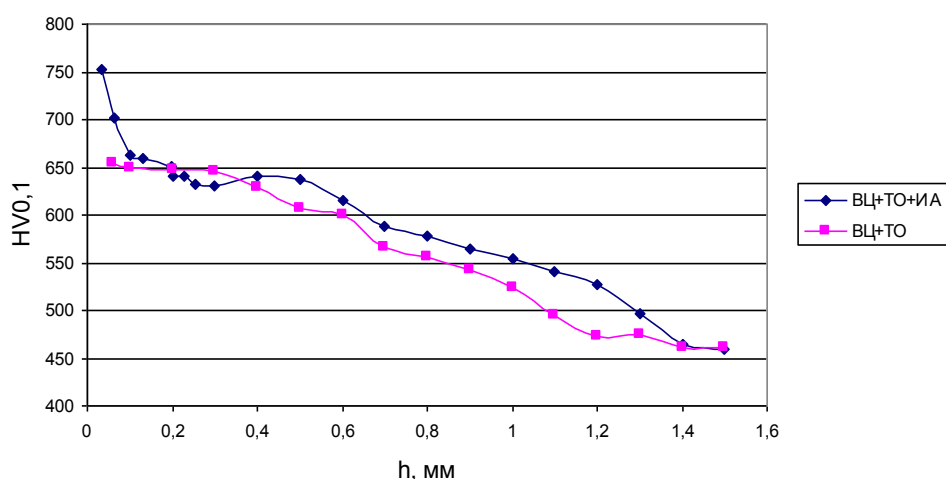


Рис.6. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920°C, 2 ч) и упрочняющей термообработки (1) и вакуумной цементации (920°C, 2 ч), упрочняющей термообработки и ионно-плазменного азотирования (500°C, 10 ч) (2)

Коэффициенты трения получены в процессе испытаний на трибометре Nanovea. Расчет скоростей изнашивания проводили по формуле:

$$I_h = \frac{V}{l \cdot F}, \text{ где } V - \text{объем износа, мм}^3; l - \text{длина пробега, м; } F - \text{величина нормальной}$$

нагрузки, Н.

$V = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot S$, где r – радиус дорожки, мм; S – площадь поперечного сечения дорожки, образовавшейся в ходе испытаний, мм²)

Камертон после испытания на трибометре изображен на рис. 7.



Рис.7. Камертон после испытания

Исходные параметры и результат по скоростям изнашивания представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Данные образца после ВЦ и упрочняющей ТО

Данные:	
Радиус шарика, мм	3
Радиус дорожки, мм	3,5
Нагрузка, Н	20
Путь, м	296,74
Результат:	
Площадь сегмента, мм ²	0,017264
Объем износа, мм ³	0,379656
Скорость изнашивания, мм ³ /Н*м	6,4*10 ⁻⁵

Таблица 3. Данные образца после ИА

Данные:	
Радиус шарика, мм	3
Радиус дорожки, мм	3,5
Нагрузка, Н	20
Путь, м	297
Результат:	
Площадь сегмента, мм ²	0,007291
Объем износа, мм ³	0,160327
Скорость изнашивания, мм ³ /Н*м	2,7*10 ⁻⁵

По результатам триботехнических испытаний можем судить о том, что образец после ИА изнашивается в 3 раза медленнее. У образца после комбинированной обработки коэффициент трения будет ниже, как показывают результаты испытаний образцов на трибометре, в два раза.

Коэффициент трения после комбинированной ХТО:

$$f_{\text{тр}} = 0,3-0,4$$

Коэффициент трения после ВЦ и упрочняющей ТО:

$$f_{\text{тр}} = 0,7-0,8$$

Заключение

- Подтверждена параболическая зависимость параметров диффузионных слоев от общего времени насыщения
- Параметры циклической подачи ацетилена практически не влияют на характеристики диффузионных слоев
- Вакуумная цементация в сочетании с последующей упрочняющей ТО дают возможность получения протяженных диффузионных слоев с высокой несущей способностью, что способствует обеспечению высокой контактной выносливости
- Ионно-плазменное азотирование не вызывает разупрочнения цементованного слоя и сердцевины, что свидетельствует о высокой теплостойкости стали ВКС-10
- Проведение на заключительном этапе (после шлифования) ионно-плазменного азотирования формирует на поверхности протяженного цементованного слоя относительно тонкий слой с повышенной твердостью
- Ионно-плазменное азотирование способствует уменьшению коэффициента трения с 0,7-0,8 до 0,3-0,4, что приводит к повышению сопротивления схватыванию, а также уменьшению скорости изнашивания с $6,4 \cdot 10^{-5}$ до $2,7 \cdot 10^{-5}$.

Список литературы

- [1]. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П., Новиков В.С., Рыжов Н.М. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа. 2001. 493 с.
- [2]. Рыжов Н.М. Смирнов А.Е. Фахуртдинов Р.С. Мулякаев Л.М. Громов В.И. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацетилене. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 6. С. 10-15.
- [3]. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 8. С. 22-27.
- [4]. Лашнев М.М., Смирнов А.Е., Семенов М.Ю. Применение вакуумной нитроцементации для повышения сопротивления схватыванию зубчатых колес из стали ВКС-10 // Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Фолиум. 2013. № 1. С. 29-33.
- [5]. Герасимов С.А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин: дисс. ... докт. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1997. 553 с.