

Исследование износостойкости сталей ВКС-7 и ВКС-10 после вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации

05, май 2013

DOI: 10.7463/0513.0568124

Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С.,
Смирнов А.Е., Громов В.И., Ступников В.В.

УДК 621.785.53:620.178.16:620.186

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН)

lkuc@mail.ru

gerasimov_s@list.ru

vglapteva@mail.ru

ravel@bmstu.ru

smirnoff@bmstu.ru

gri1965@mail.ru

vadim.stupnikov@gmail.com

Введение

При контактном взаимодействии деталей машин их надежность и долговечность во многом определяются свойствами поверхностного слоя, в котором локализуются основные деформационные и физико-химические процессы. Получение в поверхностном слое деталей износостойкого состояния качественно упрочненного диффузионного слоя обеспечивает существенное повышение эксплуатационных свойств изделий [1]. Одним из путей решения этой задачи является совмещение процессов формирования структуры в ультрамелкодисперсном или наноструктурном состоянии с технологией химико-термической обработки, приводящими к высокопрочному состоянию сталей при высоком запасе пластичности и вязкости, что крайне необходимо для обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин. Использование уникальных свойств таких структур открывает перспективы создания новых технологий производства деталей из конструкционных материалов, которые обладают высокой усталостной прочностью и износостойкостью.

Одним из способов создания в металлических материалах ультрамелкодисперсного или наноструктурного износостойкого состояния поверхностного слоя является

предварительное интенсивное силовое и тепловое воздействие и последующие высокоэффективные процессы вакуумной химико-термической обработки. В результате предварительной обработки создаются условия для существенного повышения скоростей диффузионного насыщения поверхности углеродом, азотом, и другими элементами.

Целью данной работы является определение влияния нового вида технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения (вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации), на микротвердость и износостойкость сталей, широко применяемых для изготовления ответственных деталей турбо- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, других деталей сложной конфигурации.

Исследуемые материалы и обработка

Исследуемые образцы изготавливали из сталей ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш по ТУ 14-1-4483-88) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш по ТУ 14-1-4999-91), их состав приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей (масс. %)

ВКС-7	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
	0,14 - 0,18	1,80 - 2,20	2,70 - 3,00	0,40- 0,60	0,30- 0,60	0,20- 0,30	0,17- 0,37	0,10- 0,20	0,10 - 0,20	0,02- 0,07	Не более 0,015	Не более 0,025
ВКС-10	0,10 - 0,15	3,00 - 3,40	2,70 - 3,00	1,90- 2,30	0,30- 0,60	0,20- 0,50	0,17- 0,37	0,05- 0,15	0,05 - 0,15	Не более 0,04	Не более 0,015	Не более 0,015

Образцы сталей при подготовке к вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации подвергались предварительной термической обработке, состоящей из нормализации и высокого отпуска по режимам: для стали ВКС-7 - нормализация при температуре $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$, время 2,5 ч, высокий отпуск при температуре $(640 \pm 10)^\circ\text{C}$, время 6 ч; для стали ВКС-10 - нормализация при температуре $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$, время 2,5 ч, высокий отпуск при температуре $(670 \pm 10)^\circ\text{C}$, время 6 ч. После термической обработки для создания мелкозернистого состояния слоя образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали интенсивной пластической деформации – осадке при температуре 700°C и степени деформации 80%.

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке по циклическому режиму при температуре 940 °С. Выход на температурный режим вакуумной цементации проводили при нагреве образцов последовательно до 800 °С, 900 °С и 940 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации – 6 ч. После цементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре (650±10) °С в течение 5 ч и закалке. Режим закалки образцов из стали ВКС-7: нагрев до температуры 880 °С, охлаждение в масле, обработка холодом при температуре минус 70 °С, отпуск при температуре 200 °С. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по следующему режиму: температура закалки 1010 °С, охлаждение в масле, двукратный отпуск при температуре 510 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при температуре минус 70 °С, выдержка 2 ч, отпуск при температуре 510 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе.

Вакуумную нитроцементацию сталей ВКС-7 и ВКС-10 осуществляли на опытной установке вакуумной цементации и нитроцементации при температуре 880 °С с выходом на температурный режим по схеме: нагрев при температуре 820 °С, далее 840 °С, далее 880 °С. В качестве рабочей среды использовали ацетилен и аммиак в равном соотношении. Суммарный расход газовой среды 12 дм³/ч, рабочее давление в камере 8 гПа. Аммиак подавали постоянно, ацетилен циклически. Общее время вакуумной нитроцементации – 5 ч. После нитроцементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре 650 °С в течение 5 ч и закалке. Закалка образцов из стали ВКС-7 осуществлялась при нагреве до 880 °С и охлаждении в масле, далее следуют обработка холодом при температуре -70 °С и отпуск при температуре 200 °С. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: температура 1010 °С, охлаждение в масле, двукратный отпуск при температуре 510 °С с выдержкой 1 ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при температуре минус 70 °С выдержка 2 ч, отпуск при температуре 510 °С выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Для предохранения от обезуглероживания нитроцементированной поверхности нагрев под закалку проводили в вакууме.

Методика проведения испытаний

Для оценки распределения микротвердости по толщине обработанного слоя изготавливали поперечный шлиф на оборудовании фирмы «STRUERS». Вырезку образца для шлифа размером Ø25x10 мм проводили на отрезном станке «Discotom-6» с охлаждением в воде, чтобы не допустить перегрева. Для предотвращения заваливания края шлифа образцы запрессовывались в смолу «DuroFast». Шлифование и полирование запрессованных образцов проводили на автоматизированной установке «Telegramin-25». Для травления шлифов применяли спиртовой раствор азотной кислоты

<http://technomag.bmstu.ru/doc/568124.html>

($C_2H_5OH + 5\% HNO_3$). Качество полирования и травления контролировали с помощью металлографического микроскопа «OLYMPUS GX-51» при максимальном увеличении 1000 крат. Измерение распределения микротвердости по Виккерсу по толщине диффузионного слоя проводили в автоматическом режиме на микротвердомере «DuraScan-70» при нагрузке 100 г. Микротвердомер управлялся с использованием персонального компьютера, оснащенного программным обеспечением «ecos Workflow».

Испытания образцов на износостойкость проводили на восьмипозиционном стенде с возвратно-поступательным движением в среде пластичного смазочного материала сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения [2]. Выбор условий испытаний был вызван следующими обстоятельствами: широким распространением в разнообразных областях техники пар трения, рабочие поверхности которых испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций, наиболее тяжелыми условиями состояния материала, характерными для пар цилиндро-поршневой группы двигателей, пар плунжерных и золотниковых механизмов, направляющих скольжения, зубчатых зацеплений и многих других.

В испытании участвуют два образца. Исследуемый образец 1 из сталей ВКС-7 или ВКС-10 с меньшей поверхностью трения после химико-термической обработки. Этот образец неподвижный, и к нему прикладывается нагрузка. В качестве контрообразца (образец 2 с большей поверхностью трения) применяли образцы из стали 20 после цементации и закалки до твердости 59-60 HRC. Контрообразец совершает возвратно-поступательное движение относительно исследуемого неподвижного образца со средней скоростью скольжения 0,19 м/с. Ход подвижного образца $H = 0,04$ м. Смазочным материалом служила пластичная смазка Литол-24 (ТУ0254-116-04001396-05), предназначенная для смазывания всех типов подшипников качения и скольжения, шарниров зубчатых и иных передач, промышленных механизмов и электромашин.

Перед испытаниями на износостойкость пары трения подвергали приработке, при которой формируется площадь контактного взаимодействия. Приработка осуществлялась также в смазке Литол-24 при ступенчатом повышении нагрузки через каждые 0,5 ч работы на 49 Н до полного прилегания поверхностей трения и достижения величины нагрузки, равной 705,6 Н. Время приработки составляло не менее 7 ч.

Для оценки начальной массы образцов после приработки пары трения их промывали в универсальном уайт-спирите, высушивали в печи при температуре плюс 40 °С в течение от 5 до 7 мин и взвешивали на аналитических весах с точностью $\pm 0,05$ мг. Перед началом испытаний подвижный образец смазывали Литолом-24, прикрепляли специальную губку, которая постоянно подмазывает трущиеся поверхности.

Износ упрочненного слоя определяли по потере массы исследуемых образцов в результате работы на стенде в течение 15 ч при $p=10$ МПа (705,6 Н). Величины линейного износа и интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 определяли расчетом. По значениям линейных износов интенсивности изнашивания каждого из образцов пары и суммарный износ рассчитывали для пары [2]. Средние значения интенсивностей изнашивания определялись как среднее арифметическое испытаний пяти аналогичных пар.

Результаты испытаний

В изучаемых процессах вакуумных цементации (ВЦ) и нитроцементации (ВНЦ) реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного ультрамелкодисперсного состояния материала детали на первом этапе и использование такого состояния для ускоренного и качественного насыщения поверхностного слоя углеродом при ВЦ и углеродом и азотом при ВНЦ на втором этапе.

На первом этапе ультрамелкодисперсное состояние в слое формируется за счет интенсивной пластической деформации и динамической полигонизации. Пластическая деформация выполнялась в режиме теплой осадки с обжатием 80% для создания условий многократной динамической полигонизации – факторов интенсивного измельчения зеренной и формирования термически стабильной субзеренной структуры.

Процессы ВЦ и ВНЦ наследуют ультрамелкодисперсное состояние поверхностного слоя, полученного при теплой осадке, которое создает благоприятные условия для проведения этих процессов упрочнения. Вследствие развитой субструктуры, высокой плотности дислокаций существенно сокращается продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения процессов диффузии элементов, образуются высокодисперсные частицы упрочняющей фазы, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия и высокий уровень твердости поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя.

При ВНЦ параллельно с процессами диффузии углерода происходит формирование наноструктурного состояния нитридного слоя. За счет изменения по ходу процесса азотного потенциала газовой среды наблюдается многократная фазовая перекристаллизация азотированного слоя. Механизм перекристаллизации вызывает образование зародышей кристаллов новой фазы внутри имеющейся (старой) фазы. В результате дополнительно к высокодисперсным частицам карбидов на поверхности детали после ВНЦ формируется наноструктурный нитридный слой. Наличие

нитридного слоя является главным структурным отличием обработки ВНЦ от ВЦ, что приводит к важным различиям в достигаемых характеристиках свойств обрабатываемых материалов.

На рис. 1 приведены результаты измерения микротвердости по толщине цементованного (кривая 1) и нитроцементованного (кривая 2) слоев стали ВКС-10. Для ВЦ эффективная толщина обработанного слоя несколько больше (до 2 мм), чем для ВНЦ (до 1,5 мм), причем микротвердость цементованного слоя, непосредственно прилегающего к поверхности, выше, чем микротвердость нитроцементованного слоя. В слоях на расстоянии до 0,25 мм от поверхности микротвердость цементованных деталей равна ~760HV, а нитроцементованных ~700 HV. В слоях до 0,75 мм значения микротвердости образцов практически одинаковы, в более глубоких слоях нитроцементация создает несколько меньшую твердость диффузионного слоя, чем цементация.

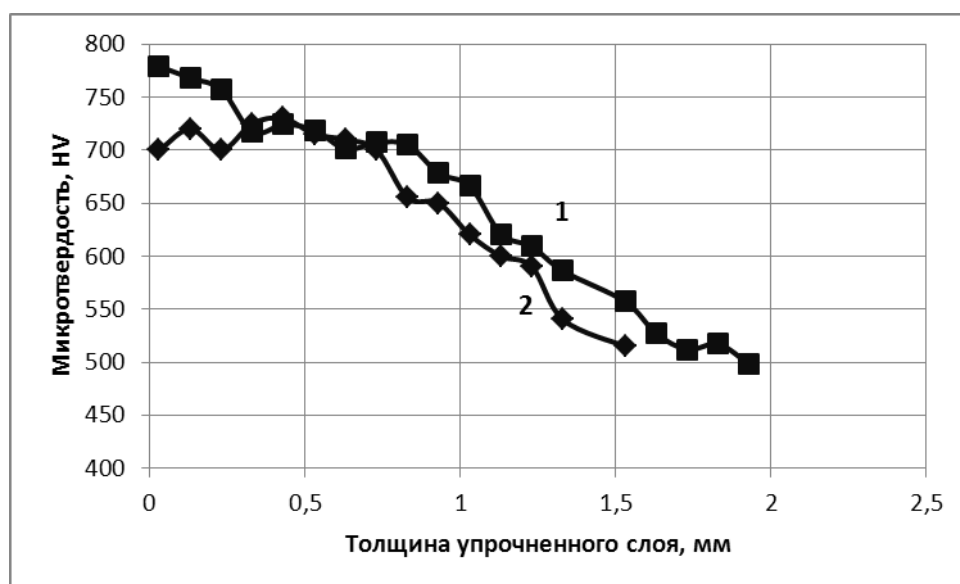


Рис. 1. Распределение микротвердости HV по толщине упрочненного слоя стали ВКС-10:
1- вакуумная цементация, 2 – вакуумная нитроцементация

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших ВЦ и ВНЦ, после предварительной теплой пластической деформации (I_1), и пары трения в целом (I_2) приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Из данных табл. 2 видно, что после вакуумной цементации с предварительной пластической деформацией образцов средние интенсивности изнашивания поверхностных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины $1 \cdot 10^{-10}$, что является показателем

их высокой износостойкости. Средние значения интенсивности изнашивания стали ВКС-7 в 1,9 раза меньше, чем стали ВКС-10. Сопряженные контробразцы (рис. 2) изнашиваются практически одинаково при работе, как со сталью ВКС-7, так и со сталью ВКС-10, при этом на поверхности контактного взаимодействия не формируются повреждения в виде задиров.

Средние значения интенсивности изнашивания (I_1) поверхностных нитроцементованных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 (табл. 2) не превышают величины $0,3 \cdot 10^{-10}$, практически одинаковы для обеих марок сталей и в 3-4 раза меньше, чем интенсивности изнашивания при вакуумной цементации. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 после ВНЦ (рис. 2) изнашиваются в 1,6 раза меньше, чем в паре со сталью ВКС-7 после ВНЦ и в 1,9 раза меньше, чем с цементованными сталями. Как показывают кинетика изнашивания и состояние поверхности после окончания испытаний, исследуемые поверхностные слои после ВНЦ в экспериментах на стенде, характеризуемых тяжелыми условиями длительного реверсивного трения, не склонны к задирам.

Таблица 2

Интенсивность изнашивания сталей (I_1) и суммарная интенсивность изнашивания материалов (I_Σ) пары трения (Литол-24, $p=10$ МПа, $\tau=15$ часов)

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали контробразца	$I_1 \cdot 10^{10}$ (износ образца стали)	$I_\Sigma \cdot 10^{10}$ (износ пары трения)
ВКС-7	Вакуумная цементация	Сталь 20, цементация, закалка	0,48	0,61
ВКС-10			0,89	1,02
ВКС-7	Вакуумная нитроцементация		0,17	0,28
ВКС-10			0,24	0,31

* I_1 и I_Σ – средние значения по испытаниям 5 пар трения.

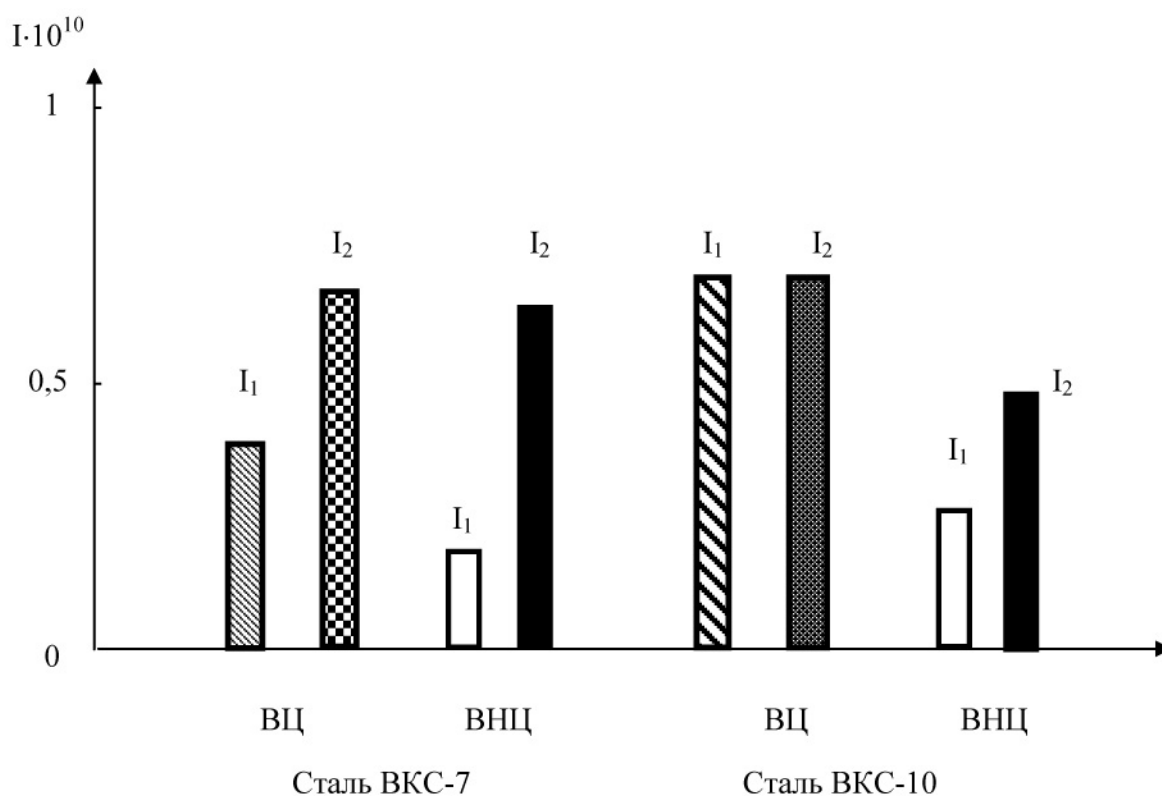


Рис. 2. Средние значения интенсивности изнашивания (I_1) сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную цементацию (ВЦ) или вакуумную нитроцементацию (ВНЦ) и сопряженной детали (I_2) из цементованной стали 20 при работе в смазке Литол-24 ($p=10$ МПа)

Анализ изменения интенсивностей изнашивания в зависимости от вида ХТО дает основание заключить, что при ВНЦ сталей ВКС-7 и ВКС-10 имеют место те же закономерности структурного состояния поверхностного слоя, что и при упрочнении ионно-плазменным азотированием. Есть основание полагать, что особенности механизма влияния наноструктурного состояния поверхностного азотированного слоя [1] проявляются и на стали после ВНЦ. Особенностью нанокристаллического состояния, в котором находится $\epsilon\text{-Fe}_{2,3}\text{N}$, является существенное увеличение свободной поверхности. Объем зерна нанокристалла соизмерим с объемом границ зерен. Энергия границ зерен возрастает, что приводит к появлению напряжений сжатия в нанокристаллических частицах, а это, в свою очередь, может быть также одной из причин возрастания износостойкости нанокристаллического поверхностного слоя нитроцементованной стали.

Результаты изнашивания сталей после ВЦ и ВНЦ подтверждают данные, полученные ранее [1, 3, 4], о том, что износостойкость материалов не всегда тем выше, чем больше их твердость. Сравнивая результаты испытаний на износостойкость ($\varepsilon=1/I_1$) стали ВКС-10, прошедшей упрочнение ВЦ и ВНЦ (табл. 3), можно видеть, что после ВНЦ износостойкость стали выше, чем после ВЦ, в то время как твердость поверхностного слоя выше для стали после ВЦ.

Таблица 3

Микротвердость (HV) и износостойкость (ε) стали ВКС-10

Марка стали	Микротвердость слоя 0,3 мм, HV		Износостойкость $\varepsilon \cdot 10^{-10}$		Средние значения микротвердости по толщине, HV	
	ВЦ	ВНЦ	ВЦ	ВНЦ	ВЦ	ВНЦ
ВКС-10	760	700	1,1	4,2	650	650

Следовательно, твердость как характеристика механических свойств конструкционного материала после химико-термической обработки, не всегда может служить критерием износостойкости при трении скольжения в среде смазочного материала [1].

Выводы

- Сталь марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие вакуумную цементацию и вакуумную нитроцементацию с предварительной пластической деформацией методом теплой осадки, при испытаниях в условиях реверсивного трения скольжения при $p=10$ МПа в среде пластичной смазки обладают высокой износостойкостью (интенсивность изнашивания $I < 1 \cdot 10^{-10}$).

- После вакуумной цементации работоспособность пар трения со сталью ВКС-7 выше, средняя суммарная интенсивность изнашивания составляет $0,61 \cdot 10^{-10}$, что в 1,7 раза меньше, чем для пар со сталью ВКС-10.

- После вакуумной нитроцементации для обеих исследованных марок сталей средние суммарные значения интенсивности изнашивания образцов пары трения практически одинаковые и составляют $\sim 0,30 \cdot 10^{-10}$, что в 2-3 раза меньше, чем после вакуумной цементации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта № 16.523.11.3010.

Список литературы

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 518 с.
2. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. М.: Интермет инжиниринг, 2001. 152 с.
3. Березина Е.В. Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
4. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Мичугина М.С., Березина Е.В. Структура поверхностных слоев сталей и износостойкость после разных условий азотирования // Методы упрочнения поверхностей деталей машин : сборник. М.: Красанд, 2008. С. 303-341.

Investigation of durability of VKS-7 and VKS-10 steels after vacuum carbonization and vacuum carbonitriding

05, May 2013

DOI: 10.7463/0513.0568124

Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fahurtdinov R.S., Smirnov A.E., Gromov V.I., Stupnikov V.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
Federal budget - funded research Institute of Machines Science
named after A.A.Blagonravov of the Russian Academy of Sciences

lkukc@mail.ru

gerasimov_s@list.ru

vglapteva@mail.ru

ravel@bmstu.ru

smirnoff@bmstu.ru

gri1965@mail.ru

vadim.stupnikov@gmail.com

Development of new technologies of thermal and thermochemical treatment, based on the activation of cementation processes and which could provide volume and surface finely-divided or nanostructured state of constructional materials appeared to be a very powerful method to increase the durability of critical machine elements. Results of estimating the durability and micro-hardness of VKS -7 and VKS-10 steels were presented in this article after complex processing which consisted of two stages: 1 – preliminary plastic deformation by means of warm shortening and 2- plasma nitration or vacuum carbonization. Analysis of the relation between hardness and durability was carried out.

Publications with keywords: [vacuum nitrocarburizing](#), [wear resistance](#), [microhardness](#), [vacuum carburizing](#)

Publications with words: [vacuum nitrocarburizing](#), [wear resistance](#), [microhardness](#), [vacuum carburizing](#)

References

1. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. *Struktura i iznosostoikost' azotirovannykh stalei i splavov* [Structure and wear resistance of the nitrided steels and alloys]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 518 p.
2. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Metody ispytaniia na trenie i iznos* [Methods of testing the friction and wear]. Moscow, Internet inzhiniring, 2001. 152 p.
3. Berezina E.V. *Razrabotka tekhnologii formirovaniia nanostrukturirovannogo azotirovannogo sloia konstruktsionnykh stalei dlia povysheniia ikh iznosostoikosti. Avtoreferat kand. diss.* [Development of technology for the formation of nanostructured nitrided layer of structural steels to increase their wear resistance. Abstract of cand. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2007.
4. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Michugina M.S., Berezina E.V. *Struktura poverkhnostnykh sloev stalei i iznosostoikost' posle raznykh uslovii azotirovaniia* [Structure of surface layers of steels and wear-resistance after various conditions of nitriding]. *Metody uprochneniia poverkhnostei detalei mashin : sbornik* [Methods of hardening of surfaces of machine parts : a collection of papers]. Moscow, Krasand, 2008, pp. 303-341.