

УДК 621.785.5

Л.И. Куksenova<sup>1,2</sup>, С.А. Герасимов<sup>2</sup>, М.С. Алексеева<sup>3</sup>, В.И. Громов<sup>3</sup>**ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ ВКС-7 И ВКС-10**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8

*Представлены результаты влияния комплексной технологии на микротвердость и износостойкость теплоустойчивых комплексно-легированных сталей мартенситного класса ВКС-7 и ВКС-10. Применение комплексной технологии основано на создании мелкодисперсной структуры при тепловой деформации и на активации процессов диффузионного насыщения при ионно-плазменном азотировании и вакуумной цементации.*

**Ключевые слова:** ионно-плазменное азотирование, вакуумная цементация, микротвердость, износостойкость.

L.I. Kuksenova<sup>1,2</sup>, S.A. Gerasimov<sup>2</sup>, M.S. Alekseeva<sup>3</sup>, V.I. Gromov<sup>3</sup>**INFLUENCE OF VACUUM CHEMICAL AND THERMAL PROCESSING ON WEAR RESISTANCE OF VKS-7 AND VKS-10 STEELS**

*Results of influence of complex technology on microhardness and wear resistance heat resistant complex alloyed martensitic steels VKS-7 and VKS-10 are provided. Application of complex technology is based on creation of finely dispersed structure under warm deformation and on processes activation of diffusion saturation during ion plasma nitriding and vacuum cementation.*

**Keywords:** ion plasma nitriding, vacuum cementation, microhardness, wear resistance.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук [Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences]; e-mail: info@imash.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Современные традиционные технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей, в частности зубчатых колес редукторов различного назначения, практически исчерпали свои потенциальные возможности. Дополнительные и значительные ресурсы повышения комплекса эксплуатационных свойств ответственных деталей машин заключены в разработке новых технологий термической и химико-термической обработок (ХТО), основанных на активизации процессов диффузионного насыщения, что позволяет обеспечивать работоспособность ответственных деталей машин [1–7].

Формирование износостойкой структуры в теплоустойчивых комплексно-легированных дисперсионно-твердеющих сталях мартенситного класса приводит к высокопрочному состоянию при высоком запасе пластичности и вязкости, что крайне необходимо при обеспечении эксплуатационной надежности деталей машин. Использование уникальных свойств таких структур открывает перспективы создания

инновационных технологий производства деталей, обладающих высокой долговечностью и износостойкостью [8–10].

Создание в деталях машин износостойкого структурного состояния поверхностного слоя достигается с использованием методов интенсивного пластического деформирования и высокоэффективных процессов вакуумной и ионно-вакуумной ХТО. В результате применения комплексной обработки наблюдается существенное повышение скоростей диффузионного насыщения поверхности азотом, углеродом и другими элементами.

Главное достоинство вакуумных процессов ионно-плазменного азотирования и вакуумной цементации состоит в том, что они формируют диффузионные слои высокой несущей способности. Вместе с тем потенциальные возможности этих процессов не установлены, не определены границы их рационального применения по нагрузочной способности. В настоящее время не существует обоснованных

рекомендаций, дающих возможность определить области применения вакуумной ХТО. Это создает значительные трудности при промышленном использовании прогрессивных технологических процессов, сдерживает реализацию возможностей для повышения качества зубчатых колес и повышения эффективности производства.

Целью данной работы является оценка влияния вакуумной ХТО (ионно-плазменного азотирования и вакуумной цементации) на микротвердость и износостойкость сталей, широко применяемых для изготовления ответственных деталей турбино- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, различных деталей сложной конфигурации.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.3. «Высокопрочные наноструктурированные конструкционные стали и диффузионные покрытия, получаемые методами химико-термической обработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

### **Материалы и методы**

#### ***Исследуемые материалы и обработка***

Для исследований выбраны специально созданные азотируемые и цементуемые стали. Составы исследуемых сталей приведены в работе [8].

При подготовке к ионно-плазменному азотированию и вакуумной цементации проводили закалку образцов из стали ВКС-7 при температуре 880°C (закалочная среда – масло) и высокий отпуск при температуре 570°C, время обработки составляло 3 ч. Образцы из стали ВКС-10 подвергали закалке при температуре 1010°C и высокому отпуску при температуре 570°C, время обработки составляло 3 ч. Для формирования специального структурного состояния поверхностного диффузионного слоя образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации – осадке при температуре 700°C и степени деформации 80%. Ионно-плазменное азотирование проводили на опытной установке для ионно-плазменного азотирования в среде азотно-водородной газовой смеси состава 95%N<sub>2</sub>+5%H<sub>2</sub> при температуре 500°C в течение 20 ч [9].

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке для вакуумной цементации и нитроцементации при температуре 940°C. Вакуумную цементацию проводили при нагреве образцов последовательно до температур 800, 900 и 940°C. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации составляло 6 ч с соблюдением соотношений времени насыщения и времени диффузии.

После цементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре (650±10)°C в

течение 5 ч и закалке. Закалку опытных образцов из стали ВКС-7 проводили по режиму: нагрев до температуры 880°C, охлаждение в масле, обработка холодом при температуре -70°C, отпуск при температуре 200°C.

Закалку опытных образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: нагрев до температуры 1010°C, охлаждение в масле, отпуск при температуре 510°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при температуре -70°C, выдержка 2 ч, отпуск при температуре 510°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе [10].

После ионно-плазменного азотирования образцы не подвергались механической обработке, после вакуумной цементации – подвергались шлифованию.

#### ***Методика проведения испытаний***

Оценку и распределение микротвердости по глубине диффузионного слоя проводили на поперечных шлифах на микротвердомере Durascan-70 при нагрузке 100 г.

Испытания образцов на износостойкость проводили на восьмипозиционном стенде с возвратно-поступательным движением в среде пластичного смазочного материала для сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения [12]. Выбор условий испытаний был вызван следующими обстоятельствами: широким распространением в разных областях техники пар трения, рабочие поверхности которых испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций (при этом знакопеременность деформаций поверхностных слоев наблюдается не только при реверсивном трении, но и в тех случаях, когда сила трения постоянна по направлению, но рабочие поверхности неравновелики); наиболее тяжелыми условиями состояния материала – повышенной концентрацией дефектов структуры, существенным увеличением свободной поверхностной энергии, интенсификацией механо-физико-химических процессов на поверхностях реверсивного трения, что характерно для тяжело нагруженных узлов трения, таких как пары цилиндропоршневой группы двигателей, пары плунжерных и золотниковых механизмов, направляющих скольжения, зубчатых зацеплений и многих других.

Испытания проводили на двух образцах. Испытываемый образец 1 с меньшей поверхностью трения из азотированной или цементованной стали. Этот образец неподвижный, и к нему прикладывается нагрузка. В качестве контробразца (образец 2 с большей поверхностью трения) использовали сталь 20 в состоянии после цементации и закалки до твердости 59–60 HRC. Образец 2 совершает возвратно-поступательное движение относительно неподвижного образца 1 со средней

скоростью скольжения 0,19 м/с. Перемещение подвижного образца составляло  $H=0,04$  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 началом испытаний пары трения подвергали макроприработке, при которой достигается равномерное распределение следов износа по всей рабочей поверхности образцов. Приработку осуществляли 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.

Далее образцы промывали в уайт-спирите, высушивали и взвешивали. Сушку образцов осуществляли в печи при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  в течение 5–7 мин, охлаждение проводили на воздухе – до комнатной температуры. Взвешивание осуществляли на аналитических весах с точностью  $\pm 0,05$  мг. Перед испытанием на подвижный образец наносили смазку Литол-24.

Износ упрочненного слоя определяют по результату работы на стенде в течение 15 ч при нагрузке 10 МПа (705,6 Н) и средней скорости скольжения 0,19 м/с. По окончании испытаний фиксировали величину потери массы образцов за 15 ч работы.

Величины линейного износа и интенсивности изнашивания определяют по ГОСТ 27674–88 с расчетом по потере массы. По значениям линейных износов рассчитывали интенсивность изнашивания каждого из образцов пары и суммарный износ для пары. Для образца 1 за период испытаний с числом циклов  $n$  интенсивность изнашивания ( $I_1$ ) определяют по формуле

$$I_1 = \nabla q_1 / 2\gamma_1 n H A, \quad (1)$$

где  $\nabla q_1$  – потеря массы образца 1 за  $n$  циклов;  $A=l \cdot b$  – номинальная площадь контакта пары (площадь поверхности трения образца 1);  $l$  – размер образца 1 в направлении относительного перемещения;  $b$  – размер образца 1 в направлении, перпендикулярном относительному перемещению;  $\gamma_1$  – плотность материала образца 1.

Для образца 2 за период испытаний с числом циклов  $n$  интенсивность изнашивания ( $I_2$ ) определяют по соотношению

$$I_2 = \nabla q_2 / 2\gamma_2 n H A, \quad (2)$$

где  $\nabla q_2$  – потеря массы образца 2 за  $n$  циклов;  $\gamma_2$  – плотность материала образца 2.

Суммарную интенсивность изнашивания пары определяют по формуле

$$I_2 = I_1 + (l/H)I_2. \quad (3)$$

Средние значения интенсивностей изнашивания определяют как среднее арифметическое испытаний пяти аналогичных пар.

### Результаты и обсуждение

В изучаемых процессах ионно-плазменного азотирования (ИПА) и вакуумной цементации (ВЦ) реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного структурного состояния поверхностного слоя детали на первом этапе и использование такого состояния для многократно ускоренного и качественного насыщения азотом (ИПА) или углеродом при ВЦ на втором этапе. На первом этапе субмикроскопическое структурное состояние в слое формируется вследствие интенсивной пластической деформации и динамической полигонизации. Пластическую деформацию осуществляли в режиме тепловой осадки с обжатием 80% для создания условий многократной динамической полигонизации – интенсивного измельчения зеренной и формирования термически стабильной субзеренной структуры [9, 10].

Формирование износостойкого структурного состояния нитридного слоя происходит в ходе процесса ИПА за счет изменения азотного потенциала газовой среды, что приводит к многократной фазовой перекристаллизации азотированного слоя. Механизм перекристаллизации вызывает образование зародышей кристаллов новой фазы внутри имеющейся (старой) фазы. В условиях циклического изменения значения азотного потенциала и многократной фазовой перекристаллизации на поверхности детали формируется наноструктурный нитридный слой с размером кристаллов от 20 до 50 нм. Важно, что нанокристаллический слой формируется непосредственно на поверхности упрочняемой детали по ходу процесса азотирования. В этом проявляется заметное преимущество фазовой перекристаллизации в качестве способа интенсивного измельчения зерна. До последнего времени такой способ формирования износостойкого структурного состояния поверхностного слоя не использовали [13–18].

Процесс вакуумной цементации наследует субмикроскопическое структурное состояние поверхностного слоя, полученного при тепловой осадке. Формирование такого структурного состояния поверхностного слоя создает благоприятные условия для проведения процесса цементации. Вследствие развитой субструктуры, высокой плотности дислокаций существенно сокращается продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения

процессов диффузии углерода, образуются высокодисперсные частицы карбидов, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, возникают остаточные напряжения сжатия и повышается твердость поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя [10].

Несмотря на определенное сходство между двумя способами химико-термической обработки,

имеются и важные различия. В табл. 1 и 2 показаны результаты измерения микротвердости соответственно по толщине азотированного и цементованного слоев. Для азотирования характерна небольшая (0,3–0,5 мм) эффективная толщина слоя (табл. 1). Для цементации эффективная толщина слоя значительно больше – до 2 мм (табл. 2). В то же время азотированный слой обеспечивает более высокую твердость поверхности.

Таблица 1

Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя

Расстояние от края образца, мм	Микротвердость HV для стали марки			
	ВКС-7		ВКС-10	
	для условного номера образца			
	7.1	7.2	0.1	0.2
0,025	965	960	1100	1078
0,050	850	845	898	898
0,075	789	784	885	894
0,100	768	763	890	875
0,125	734	729	871	868
0,150	675	670	856	842
0,175	650	645	646	605
0,200	625	620	548	515
0,225	600	595	467	425
0,250	575	570	475	435
0,275	555	550	360	335
0,300	525	520	389	343
0,325	495	490	380	352
0,350	425	420	379	341
0,375	400	389	357	332
0,425	365	361	367	339
0,450	385	380	345	340
0,475	345	340	–	–
0,500	335	331	–	–

Таблица 2

Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя

Расстояние от края образца, мм	Микротвердость HV для стали марки			
	ВКС-7		ВКС-10	
	для условного номера образца			
	7.11	7.12	0.11	0.12
0,03	796	787	776	782
0,13	783	774	763	773
0,23	763	752	751	742
0,33	796	778	721	712
0,43	763	750	733	720
0,53	744	732	727	711
0,63	745	729	703	699
0,73	715	702	721	692
0,83	704	700	720	689
0,93	692	681	681	675
1,03	681	675	676	656
1,13	661	656	626	614
1,23	636	626	617	601
1,33	626	626	590	581
1,43	573	563	561	552
1,53	557	553	534	520
1,63	553	542	516	507
1,83	527	517	530	503
1,93	523	505	512	483

Из данных табл. 1 и 2 видно, что для разных марок сталей значения микротвердости отличаются. Так, при азотировании наибольшая микротвердость наблюдается у стали ВКС-10, но при этом для этой стали убывание микротвердости по толщине слоя происходит быстрее, чем для стали ВКС-7 (табл. 1). Микротвердость цементованных слоев мало отличается для двух исследованных сталей, но для стали ВКС-10 значения микротвердости по толщине слоя стабильно на 1–1,5% меньше, чем для стали ВКС-7 (табл. 2).

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших ионно-плазменное азотирование или вакуумную цементацию после предварительной пластической деформации, приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что средние значения интенсивности изнашивания ( $I_{cp}$ ) поверхностных азотированных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины  $0,5 \cdot 10^{-10}$ , что является показателем их высокой износостойкости. Средние значения интенсивности изнашивания стали ВКС-10 в 1,4 раза меньше, чем у стали ВКС-7. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 изнашиваются в 2,4 раза меньше, чем при работе со сталью ВКС-7. Следует особенно подчеркнуть, что исследуемые поверхностные слои не склонны к задирам при испытаниях, которые характеризуются тяжелыми условиями: пара трения испытывала возвратно-поступательное (реверсивное) движение, а сами испытания были достаточно длительными.

Результаты испытаний сталей ВКС-7 и ВКС-10, упрочненных ионно-плазменным азотированием, подтверждают представления о механизме влияния наноструктурного состояния поверхностного слоя на свойства азотируемой стали [16]. Особенностью нанокристаллического состояния, в котором находится  $\epsilon$ -фаза, 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 существенного возрастания износостойкости. Следует отметить, что проведенные триботехнические испытания и

их результаты дают основание заключить, что подтверждаются разработанные ранее положения о структуре азотированного нанокристаллического поверхностного слоя азотированной стали, выполнение которых обеспечивает существенный положительный эффект для пар реверсивного трения скольжения [16, 17]. В процессе азотирования необходимо формирование над диффузионной зоной поверхностного слоя, преимущественно состоящего из  $\epsilon$ -фазы в нанокристаллическом состоянии. Для тех деталей, для которых шлифование после азотирования не является обязательным, оно должно быть исключено.

При вакуумной цементации с предварительной тепловой прокаткой средние значения интенсивности изнашивания ( $I_{cp}$ ) поверхностных цементованных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины  $1,02 \cdot 10^{-10}$ , что также является показателем их высокой износостойкости. В этом случае средние значения интенсивности изнашивания стали ВКС-7 в 1,8 раза меньше, чем у стали ВКС-10. Сопряженные контробразцы изнашиваются практически одинаково при работе как со сталью ВКС-7, так и со сталью ВКС-10. Важное эксплуатационное свойство проявляется в том, что модифицированные поверхностные слои не склонны к задирам.

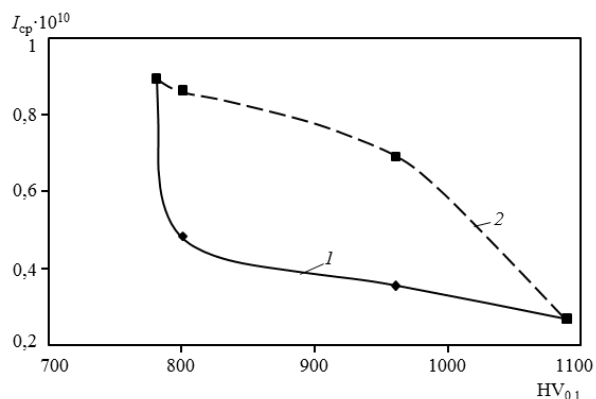
Сравнивая результаты испытаний на износостойкость сталей марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедших упрочнение ионно-плазменным азотированием и вакуумной цементацией (табл. 3), видно, что при азотировании износостойкость обеих марок сталей выше, чем при их вакуумной цементации. Интенсивность изнашивания стали ВКС-7 при ионно-плазменном азотировании в 1,3 раза меньше, чем при вакуумной цементации. Интенсивность изнашивания стали ВКС-10 при ионно-плазменном азотировании в 3,3 раза меньше, чем при вакуумной цементации.

На рисунке представлены графики зависимости средних значений интенсивностей изнашивания обоих образцов испытанных пар трения от микротвердости поверхностных слоев. Для исследованных режимов упрочнения имеется явная зависимость интенсивности изнашивания от микротвердости – чем выше микротвердость, тем ниже интенсивность изнашивания.

Таблица 3

Средние значения интенсивности изнашивания при работе пар трения в смазке Литол-24 при нагрузке 10 МПа в течение 15 ч

Сталь неподвижного образца	Вид упрочнения	Сталь контробразца	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^{10}$ для образца		
			1	2	$\Sigma_{cp}$
ВКС-7	Ионно-плазменное азотирование	Сталь 20 (цементация + закалка)	0,36	0,69	0,49
ВКС-10			0,27	0,26	0,31
ВКС-7	Вакуумная цементация		0,48	0,86	0,61
ВКС-10			0,89	0,88	1,02



Зависимость средних значений интенсивностей изнашивания обоих образцов испытанных пар трения от микротвердости поверхностных слоев после комплексной обработки при азотировании (1) и цементации (2)

### Заключения

Стали марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие ионно-плазменное азотирование и вакуумную цементацию с предварительной тепловой осадкой, при испытаниях в условиях реверсивного трения скольжения при нагрузке 10 МПа с применением пластичного смазочного материала обладают высокой износостойкостью; в процессе испытаний они не склонны к схватыванию.

При ионно-плазменном азотировании лучшие результаты получены для пар трения со сталью ВКС-10; средняя суммарная интенсивность изнашивания составляет  $0,31 \cdot 10^{-10}$ , что в 1,6 раза меньше, чем для пары со сталью ВКС-7.

При вакуумной цементации лучшие результаты получены для пар трения со сталью ВКС-7; средняя суммарная интенсивность изнашивания составляет  $0,61 \cdot 10^{-10}$ , что в 1,7 раза меньше, чем для пары со сталью ВКС-10.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // *Крылья Родины*. 2010. №4. С. 31–33.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. Спец. вып.: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 13–19.
4. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2017).
5. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиационной промышленности // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб.* М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 180–191.
6. Громов В.И., Кротов В.Н., Курпякова Н.А., Седов О.В., Дорошенко А.В. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства диффузионного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации // *Авиационные материалы и технологии* 2016. №4 (45). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-3-8.
7. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 81–84.
8. 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.
9. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И. Повышение характеристик механических свойств теплостойких сталей методом активизации процесса азотирования // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. №2. С. 90–96.
10. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Данилов В.Д., Щербakov Ю.И., Алексеева М.С., Смирнов А.Е., Громов В.И. Механические свойства теплостойких сталей после активизации процесса цементации // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. №4. С. 113–119.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
12. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. М.: Интернет инжиниринг, 2001. С. 152.
13. Kuksenova L.I., Lapteva W.G., Senatorski J., Kubaj E.N., Berezina E.W., Gerasimov S.A. Effect of tempering temperature on structure and wear resistance of nitride 38HMJA steel // *Surface Engineering*. 2001. No. 3. P. 16–20.
14. Kuksenova L.I., Rybakova L.M., Lapteva W.G. Structure of the modified metal surface and friction wear in different lubricating conditions // *Surface Engineering*. 2002. No. 1. P. 38–44.
15. Kuksenova L.I., Lapteva W.G., Berezina E.W., Gerasimov S.A., Senatorski J. Tribological properties of toughened and nitride 38H2MJA steel // *Surface Engineering*. 2004. No. 4. P. 45–50.
16. 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. 20 с.
17. 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*. М.: Красанд, 2008. С. 341.
18. Герасимов С.А., Крапошин В.С., Лисоцкий И.В., Березина Е.В., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Влияние нанокристаллической фазы нитридов железа на износостойкость азотированной стали 38X2MЮА // *Тр. Всерос. науч.-технич. конф. «Машиностроительные технологии»*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 216–218.