

УДК 621.785.53:620.178.16:620.186

## ВЛИЯНИЕ АКТИВИЗАЦИИ ПРОЦЕССА АЗОТИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Герасимов С.А.<sup>1</sup>, Куксенова Л.И.<sup>2</sup>, Лаптева В.Г.<sup>2</sup>, Алексеева М.С.<sup>2</sup>,Фахуртдинов Р.С.<sup>1</sup>, Щербаков В.П.<sup>1</sup><sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия[lkukc@mail.ru](mailto:lkukc@mail.ru)

Экспериментально исследованы механические свойства: микротвердость, износостойкость и контактная выносливость – теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 при применении новой комплексной технологии термической и химико-термической обработки. Технология обработки основана на создании мелкодисперсной структуры при тепловой деформации и на активизации процесса диффузионного насыщения при ионно-плазменном азотировании.

Существующие традиционные технологии изготовления и упрочнения поверхностных слоев высоконагруженных деталей из теплостойких сталей, в частности ответственных деталей турбо- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, различных деталей сложной конфигурации, нуждаются в совершенствовании, которое может быть достигнуто в результате разработки новых технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения и обеспечивающих объемное и поверхностное мелкодисперсное состояние конструкционных материалов, достигаемое методами предварительного интенсивного силового и теплового воздействия и последующих процессов химико-термической обработки.

Целью данной работы является обеспечение требований повышенной твердости, износостойкости и контактной выносливости теплостойких сталей путем применения новой технологии термической и химико-термической обработки, основанной на активизации процесса диффузионного насыщения при ионно-плазменном азотировании.

### Исследуемые материалы и обработка

Испытываемые 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).

Образцы сталей при подготовке к ионно-плазменному азотированию подвергались предварительной термической обработке, состоящей из нормализации и высокого отпуска по режимам: нормализация при температуре 950°C, высокий отпуск при температуре 640-670°C, время обработки – 6 ч. Для создания мелкодисперсного состояния поверхностного слоя образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации (ИПД) – осадке при температуре 700°C и степени деформации 80% в условиях мультиосевой деформации. После осадки в осевом направлении заготовка подвергалась кратковременному подогреву и затем протяжке в поперечном направлении. При этом изменялось направление оси прилагаемого деформирующего усилия и, соответственно, деформации, что обеспечивало формирование однородной мелкодисперсной структуры [1]. Ионно-плазменное азотирование проводили на опытной установке 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.

### Методики испытаний

*Оценка микротвердости.* Распределение микротвердости по толщине обработанного слоя оценивали на поперечном шлифе, полученном на образцах, вырезанных на станке Duscotom-6 с охлаждением в воде. Шлифование и полирование запрессованных в специальную смолу образцов проводили на автоматизированной установке Tegamin-25. Для

травления шлифов применяли 5%-ый спиртовой раствор азотной кислоты ( $C_2H_5OH+5\%HNO_3$ ). Оценку микротвердости проводили на микротвердомере Durascan-70 при нагрузке 100 г.

*Испытания на износостойкость.* Испытания образцов на износостойкость проводили по двум схемам:

1. На восьмипозиционном стенде с возвратно-поступательным движением сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения. Испытываемый азотированный образец 1 с меньшей поверхностью трения является неподвижным, 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. Он совершает возвратно-поступательное движение относительно неподвижного образца со средней скоростью скольжения 0,19 м/с. Ход подвижного образца  $H=0,04$  м. Смазочным материалом служила пластичная смазка Литол-24 (ТУ 0254-116-04001396-05), предназначенная для смазывания всех типов подшипников качения и скольжения, шарниров зубчатых передач, промышленных механизмов и электромашин. Износ упрочненного слоя определяли после работы на стенде в течение 15 ч при  $p=10$  МПа ( $N=705,6$  Н). Величину линейного износа и интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 оценивали по потере массы образцов пяти аналогичных пар трения.

2. На стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием, характерных для работы зубчатых передач. В испытании участвуют два ролика: ролик 1 из испытываемой стали и сопряженный ролик 2 из стали 18ХГТ (60 HRC). Приработку осуществляли при капельной смазке маслом промышленным И-20А (ГОСТ 20799-88) со скоростью 30 капель/мин в условиях ступенчатого повышения нагрузки через каждые 10 мин работы. Ступени нагружения при приработке: 200, 300, 400 и 500 Н до полного прилегания поверхностей трения. Износ упрочненного слоя определяли после работы на стенде в течение 1 ч при  $N=500$ Н ( $p=348$  МПа) и  $V=0,96$  м/с, проскальзывании – 4,8% в масле И-20А. По окончании испытаний фиксировали величину потери массы, а величину интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 определяли расчетом по потере массы.

*Испытания на контактную усталость.* Испытания на контактную усталость проводили на двухпозиционном стенде Ш-17, моделирующем качение с проскальзыванием: опытный образец диаметром  $d=30,2$  мм сжимается с двух сторон в радиальном направлении нажимными контртелами диаметром  $D=121$  мм. Опытный образец приводится во вращение с помощью повышающей зубчатой передачи; контртела приводятся во вращение с помощью понижающих зубчатых передач, связывающих валы образца и контртела. Суммарная скорость качения – 25,47 м/с; скорость скольжения на отстающей поверхности образца – 0,75 м/с (удельное скольжение на этой поверхности 6,1%). Нагружение опытных образцов осуществлялось с помощью пружин сжатия. В качестве смазочного материала использовали масло И-20А.

### **Результаты испытаний и их обсуждение**

На рис. 1 приведены кривые распределения микротвердости по толщине азотированного слоя. Видно, что толщина диффузионного слоя составляет 0,3-0,5 мм и слабо зависит от условий азотирования. Однако условия азотирования существенно влияют на достигаемый уровень микротвердости в слоях, непосредственно прилегающих к поверхности. Например, для стали ВКС-7 максимальная твердость после традиционного газового азотирования достигает величины 8200 HV, а после ионно-плазменного с предварительным деформационным и тепловым воздействием – 9500 HV, для стали ВКС-10 твердость достигает величины 1050 HV. Таким образом, исследуемые теплостойкие стали после комплексной обработки, включающей предварительную пластическую деформацию методом теплой осадки и ионно-плазменное азотирование отвечают требованиям повышенной твердости поверхностного слоя. При этом следует отметить, что для исследованных марок сталей значения микротвердости несколько отличаются: наибольшее значение соответствует стали ВКС-10, но при этом для стали ВКС-10 убывание

микротвердости по толщине слоя происходит быстрее (рис. 1, кривая 2), чем для стали ВКС-7 (рис. 1, кривая 1).

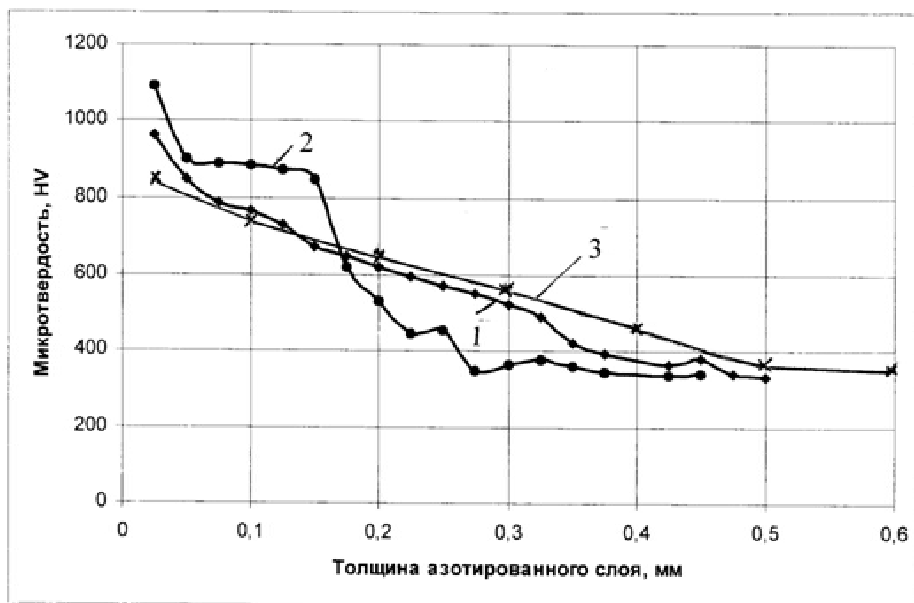


Рис.1. Распределение микротвердости HV по толщине азотированного слоя: 1 – сталь ВКС-7; 2 – ВКС-10; 3 – ВКС-7 после газового азотирования.

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10 при испытаниях по схемам реверсивного скольжения и качения с проскальзыванием приведены в табл.1.

Таблица 1

Интенсивности изнашивания сталей

Схема испытаний	Материал контрольного образца	Исследуемая сталь	Интенсивность изнашивания образца 1 $I_1$	Интенсивность изнашивания образца 2 $I_2$	Суммарная интенсивность изнашивания $I_{\Sigma}$
Реверсивное трение скольжения	Сталь 20, цементация, закалка	ВКС-7	$0,36 \cdot 10^{-10}$	$0,69 \cdot 10^{-10}$	$0,49 \cdot 10^{-10}$
		ВКС-10	$0,27 \cdot 10^{-10}$	$0,26 \cdot 10^{-10}$	$0,31 \cdot 10^{-10}$
Качение с проскальзыванием	Сталь 18ХГТ, цементация, закалка	ВКС-7	$0,77 \cdot 10^{-9}$	$1,034 \cdot 10^{-9}$	$1,80 \cdot 10^{-9}$
		ВКС-10	$1,47 \cdot 10^{-9}$	$1,316 \cdot 10^{-9}$	$2,79 \cdot 10^{-9}$

Из табл.1 видно, что средние значения интенсивности изнашивания ( $I_1$ ) поверхностных азотированных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 в условиях поверхностного

скольжения не превышают величины  $0,5 \cdot 10^{-10}$ , что является показателем их достаточно высокой износостойкости. При этом средние значения интенсивности изнашивания стали ВКС-10 в 1,3 раза меньше, чем стали ВКС-7. Сопряженные контробразцы ( $I_2$ ) в паре со сталью ВКС-10 изнашиваются в 2,4 раза меньше, чем при работе со сталью ВКС-7. Таким образом, в условиях трения скольжения работоспособность стали ВКС-10 выше.

Как показали результаты испытаний пары трения в условиях качения с проскальзыванием, средние интенсивности изнашивания ( $I_1$ ) поверхностных азотированных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины  $1,5 \cdot 10^{-9}$ , что так же, как при реверсивном трении скольжения, является показателем их высокой работоспособности для тяжелых условий эксплуатации. Но в отличие от чистого скольжения, средние интенсивности изнашивания стали ВКС-7 в 1,9 раза меньше, чем стали ВКС-10. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 изнашиваются в 1,3 раза больше, чем при работе со сталью ВКС-7. Следовательно, в условиях трения качения с проскальзыванием более высокой работоспособностью обладает сталь ВКС-7.

Следует особенно подчеркнуть, что исследуемые поверхностные слои не склонны к задирам при испытаниях, которые относятся к тяжелым: пары трения испытывали возвратно-поступательное (реверсивное) движение, а сами испытания были достаточно длинными, а также качение с проскальзыванием при высоких контактных давлениях.

Для более полной характеристики эксплуатационных свойств исследуемых теплостойких сталей проводилась оценка предела контактной выносливости в связи с тем, что для большого числа деталей машин контактная усталость определяется свойствами тонких поверхностных слоев, упрочненных разными видами химико-термической обработки.

Предел контактной выносливости по разным источникам для азотированных поверхностей может изменяться в диапазоне 1100-1400 МПа [3,4]. Проведенные нами исследования показали, что при базовом числе циклов  $(1-2) \cdot 10^7$  значения предела контактной выносливости сталей ВКС-7 и ВКС-10, обработанных по описанной выше технологии, близки и составляют 1580 МПа. Следовательно, использование предварительной тепловой пластической деформации и последующего ионно-плазменного азотирования является средством повышения контактной выносливости теплостойких сталей. Более того, в [5] подчеркивается, что совокупность предварительной обработки и последующего азотирования является средством регулирования триботехнических характеристик сталей в широком интервале значений.

Таким образом, представленные выше результаты оценки влияния режимов деформационной, термической и химико-термической обработки на триботехнические характеристики сталей ВКС-7 и ВКС-10 подтвердили реальность существования дополнительных и значительных ресурсов повышения комплекса эксплуатационных свойств ответственных деталей машин, которые могут быть реализованы путем разработки новых технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения поверхностных слоев.

В изучаемом процессе ионно-плазменного азотирования реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного мелкодисперсного состояния поверхностного слоя на первом этапе и использование такого состояния для многократного и качественного насыщения азотом на втором. При этом мелкодисперсное состояние в слое формируется за счет интенсивной пластической деформации и динамической полигонизации (пластическая деформация выполнялась в режиме тепловой осадки и протяжки для создания условий многократной динамической полигонизации – факторов интенсивного измельчения зеренной и формирования термически стабильной субзеренной структуры) [1,2].

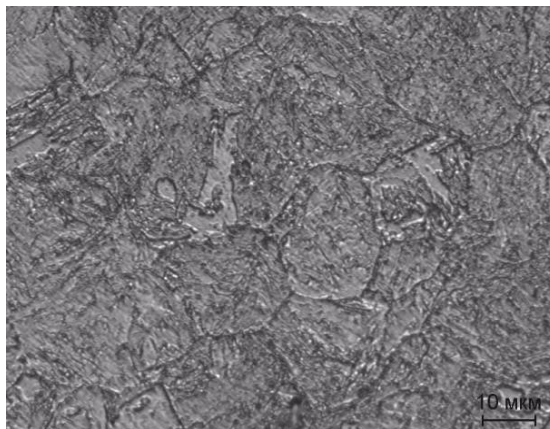
Проведенные металлографические исследования указывают на сильное (до 16 раз) измельчение исходной крупнозернистой структуры сорбита (рис.2). Кристаллы феррита, сохранившие кристаллографическую ориентировку бывших реек мартенсита, дробятся на



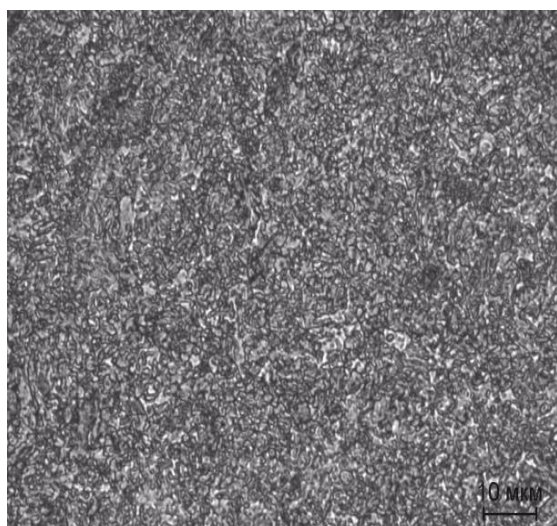
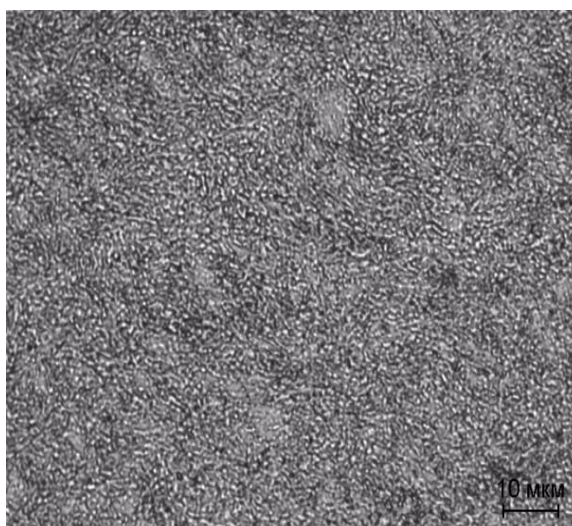
мелкие фрагменты, приобретая форму новых достаточно равноосных зерен размером до 0,8 мкм. Кроме того, результаты электронно-микроскопических исследований на просвет тонких фольг свидетельствуют об образовании в ферритных зернах развитой дислокационной субструктуры, состоящей из наноразмерных ячеек, разделенных дислокационными сетками в виде сплетенных дислокационных линий, и расположенных внутри ячеек субзерен (полигонов, блоков) с малоугловыми границами. Элементы субструктуры – ячейки и субзерна характерны для тонкой структуры обеих деформированных сталей, рис.3\*.

На втором этапе ионно-плазменное азотирование сопровождается изменением азотного потенциала газовой среды, приводящим к фазовой перекристаллизации азотированного слоя. В условиях циклического изменения значения азотного

#### Исходная микроструктура

*a**б*

#### микроструктура после теплой осадки

*в**г*

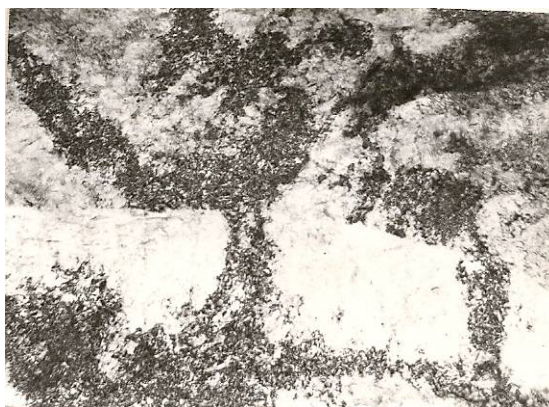
*a* и *в* – сталь ВКС-7; *б* и *г* – сталь ВКС-10;  
*a* и *б* - перед деформацией; *в* и *г* - после ИПД

**Рис.2.** Микроструктура образцов сталей ВКС-7 (а,в) и ВКС-10 (б,г) перед проведением ИПД (а,б) и после ИПД (в,г)осадке со степенью деформации 80 % при температуре 700 оС; × 1000.

потенциала и многократной фазовой перекристаллизации на поверхности образцов формируется слой нитридов железа ( $\epsilon$ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ ) с размером кристаллов от 20 до 50 нм. Важно, что нанокристаллическое состояние формируется непосредственно на поверхности упрочняемой детали по ходу процесса азотирования. В этом проявляется заметное преимущество фазовой перекристаллизации в качестве способа интенсивного измельчения зерна, что является существенной новизной в разработанной технологии.



а



б

а– сталь ВКС-7 увеличение 20 000;  
б– сталь ВКС-10 увеличение 37 000;

**Рис.3.** Субструктура сталей ВКС-7 (а) и ВКС-10 (б) после ИПД.  
а –  $\times 20.000$ ; б –  $\times 37.000$ .

Анализ закономерностей изменения зависимости интенсивностей изнашивания от пути трения в условиях трения скольжения и полученные ранее данные [6] дают основание заключить, что результаты испытаний сталей ВКС-7 и ВКС-10, упрочненных ионно-плазменным азотированием, подтверждают представления о механизме влияния на эксплуатационные свойства азотируемой стали наноструктурного состояния поверхностного слоя нитридов железа, формирующегося в процессе обработки. Особенностью нанокристаллического состояния, в котором находится  $\epsilon$ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ , является существенное увеличение свободной поверхности.

\*Электронно-микроскопические исследования проведены к.т.н. Лисоцким И.В.

Объем зерна нанокристалла соизмерим с объемом границ зерен. Энергия границ зерен возрастает, что приводит к появлению напряжений сжатия в нанокристаллических частицах [7], а это, в свою очередь, может быть также одной из причин существенного возрастания износостойкости поверхностного слоя азотированной стали и, следовательно, долговечности изделий.

Кроме того, результаты проведенных триботехнических испытаний подтверждают разработанные ранее положения о структуре азотированного слоя, выполнение которых обеспечивает существенный положительный эффект для пар реверсивного трения скольжения [5,6,8]. Для достижения триботехнического эффекта в эксплуатации пар трения скольжения в процессе азотирования необходимо формирование над диффузионной зоной поверхностного слоя, преимущественно состоящего из  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N в нанокристаллическом состоянии, который необходимо сохранить. Поэтому для тех деталей, где шлифование после азотирования не является обязательным, оно должно быть исключено.

#### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что новая технология ионного азотирования, основанная на активизации процесса диффузионного насыщения за счет предварительного формирования мелкодисперсного состояния сталей, обеспечивает существенное повышение эксплуатационных свойств теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10: твердости, износостойкости и контактной выносливости.

#### **Список литературы**

1. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИМиС. 2005, 432с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Логос, 2000, 272с.
3. Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1970, 64 с.
4. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-технической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 303с.
5. 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.
6. Березина Е.В. Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости. Автореферат диссертации на соискание уч. степени к.т.н. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
7. 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 38Х2МЮА. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии», посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 16-17 декабря 2008 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с.216-218.
8. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Мичугина М.С., Березина Е.В. Структура поверхностных слоев сталей и износостойкость после разных условий азотирования. Сб. Методы упрочнения поверхностей деталей машин. М.: Красанд, 2008, с.303-341.