

УДК 621.785.53:620.178.16:620.186

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ
ПОСЛЕ АКТИВИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ¹****© Герасимов С.А.¹, Куксенова Л.И.², Лаптева В.Г.², Фахуртдинов Р.С.¹,
Данилов В.Д.², Смирнов А.Е.¹, Громов В.И.³, Алексеева М.С.²,
Щербаков Ю.И.², Хренникова И.А.²**¹*МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия*²*Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия*³*ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия*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 теплой деформации и на активизации процесса диффузионного насыщения при ионно-плазменной нитроцементации

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. Одним из путей решения этой задачи является совмещение процессов формирования структуры в ультрамелкодисперсном или наноструктурном состоянии с технологией химико-термической обработки (ХТО), приводящее к высокопрочному состоянию сталей при высоком запасе пластичности и вязкости [1-2]. В результате предварительной обработки создаются условия для значительного повышения скоростей диффузионного насыщения поверхности углеродом, азотом и другими элементами в процессе ХТО. В свою очередь использование уникальных свойств таких структур открывает перспективы создания новых технологий производства деталей из конструкционных материалов, которые обладают высокой твердостью, усталостной прочностью и износостойкостью.

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 вакуумной нитроцементации.

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). Состав исследуемых сталей приведен в табл. 1. Стали, выбранные для исследования, предназначены для деталей, подвергаемых поверхностному упрочнению: цементации, нитроцементации и азотированию.

При подготовке к вакуумной нитроцементации образцы сталей проходили нормализацию и высокий отпуск. Нормализацию образцов стали ВКС-7 и стали ВКС-10 проводили при температуре 950°, время 2,5 ч; высокий отпуск стали ВКС-7 - при температуре 640° и стали ВКС-10 - при температуре 670°, время выдержки для каждой стали – 6 ч.

Для создания мелкодисперсного состояния образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации (ИПД) – осадке при температуре 700° и степени деформации 80%.

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	2,70-3,0	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	2,7 - 3,0	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

Вакуумную нитроцементацию сталей ВКС-7 и ВКС-10 осуществляли на промышленной установке вакуумной цементации и нитроцементации при температуре 880° с выходом на температурный режим по схеме: нагрев при температурах 820°, 840°, 880°.

В качестве рабочей среды при вакуумной нитроцементации использовали ацетилен и аммиак в равном соотношении. Суммарный расход газовой среды 12 дм³/ч, рабочее давление в камере 5,3 ГПа. Аммиак подавался постоянно, ацетилен циклически. Общее время выдержки для формирования диффузионного слоя, толщиной не менее 0,7 мм составляет 10 ч с соблюдением соотношений времени насыщения и времени диффузии.

После нитроцементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре 650° в течение 5 ч и закалке. Закалка образцов из стали ВКС-7 осуществлялась при нагреве до температуры 880° и охлаждении в масле, далее следовала обработка холодом при температуре -70° и отпуск при температуре 200°. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: температура закалки 1010°, охлаждение в масле, двукратный отпуск при температуре 510° выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при температуре -70°, выдержка 2 ч, отпуск при температуре 510° выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Для предохранения от обезуглероживания нитроцементированной поверхности нагрев под закалку проводили в вакууме

Методики проведения испытаний

Оценка микротвердости. Распределение микротвердости по толщине диффузионного 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. 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 [3]. Испытываемый образец 1 после активизированной вакуумной нитроцементации с меньшей поверхностью трения является неподвижным, и к нему прикладывается нагрузка. В качестве контрообразца (подвижный образец 2 с большей поверхностью трения) использовали сталь 20 в состоянии после цементации в твердом карбюризаторе 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 пла-

стичная 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 как среднее значение для пяти аналогичных пар трения.

2) На стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием, характерных для работы зубчатых передач [4]. В испытании участвуют два ролика: ролик 1 из испытываемой стали и сопряженный ролик 2 из стали 18ХГТ (60 HRC), прошедшей цементацию в твердом карбюризаторе. 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 по ГОСТ 25.501-79 на двухпозиционном стенде Ш-17 [5], моделирующем качение с проскальзыванием. Опытный образец диаметром $d=30,2$ мм сжимается с двух сторон в радиальном направлении нажимными контртелами диаметром $D=121$ мм и 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.

Методикой проведения испытаний на контактную усталость предусматривался этап проверки качества прилегания образцов и нажимных контртел по ширине дорожки контакта под нагрузкой 50 и 150 кгс на пружинах сжатия узла нагружения. Смещение полосок контакта на образце от двух контртел не должно превосходить 0,1 мм, а прилегание контактных поверхностей необходимо добиваться по всей ширине дорожки контртела.

Далее следует этап 30-ти минутной приработки образцов и контртел при каждой нагрузке на пружине сжатия, равной 50, 100 и 150 кгс. После каждой нагрузочной ступени следует контроль качества прилегания и состояния контактных поверхностей. Необходимо осуществлять нагружение контакта после запуска привода вращения, а остановку последнего – после разгрузки контакта.

После приработки на последней нагрузочной ступени, не останавливая привод вращения, устанавливаются рабочие нагрузки на пружинах сжатия, соответствующие диапазону максимального нормального напряжения 2160 - 1690 МПа. На каждой рабочей нагрузке испытания велись до питтинга контактной поверхности образцов с регистрацией соответствующих чисел циклов нагружения, либо до получения базового числа циклов нагружения, равного $1,8 \times 10^7$. Пределом контактной выносливости принято напряжение, при котором испытано не менее пяти образцов, причем не менее трех из них не разрушились до базового числа циклов.

Результаты испытаний и их обсуждение

В изучаемом процессе вакуумной нитроцементации реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного мелкодисперсного состояния поверхностного слоя детали на первом этапе и использование такого состояния для многократно ускоренного и качественного насыщения азотом и углеродом на втором этапе. На первом этапе мелкодисперсное состояние в слое формируется за счет интенсивной пластиче-

ской 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.

Металлографические исследования после первого этапа обработки указывают на сильное (до 16 раз) измельчение исходной крупнозернистой структуры сорбита [1]. Кристаллы феррита, сохранявшие кристаллографическую ориентировку бывших реек мартенсита, дробятся на мелкие фрагменты, приобретая форму новых достаточно равноосных зерен размером до 0,8 мкм.

Процесс вакуумной нитроцементации наследует структурное состояние поверхностного слоя, полученного при теплой осадке. Формирование мелкодисперсного состояния поверхностного слоя создает благоприятные условия для проведения процесса нитроцементации. Вследствие развитой субструктуры и высокой плотности дислокаций существенно сокращается продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения процессов диффузии азота и углерода, образуются высокодисперсные частицы карбидов, карбонитридов, нитридов, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия и высокий уровень твердости поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя [1,2].

Микроструктура нитроцементованного слоя упрочненных образцов, представлена на рис. 1. Анализ микроструктуры диффузионного слоя образцов показывает следующее:

- толщина карбонитридной зоны составляет примерно 0,4 мм при эффективной толщине нитроцементованного слоя – 0,8 мм;
- строение нитроцементованных слоев образцов сталей ВКС-7 и ВКС-10 практически одинаково;
- приповерхностная часть слоя каждой стали состоит из мартенсита и расположенной в нем карбонитридной зоны;
- карбонитридная сетка отсутствует, частицы карбонитридов расположены дискретно и имеют благоприятную форму, близкую к глобулярной.

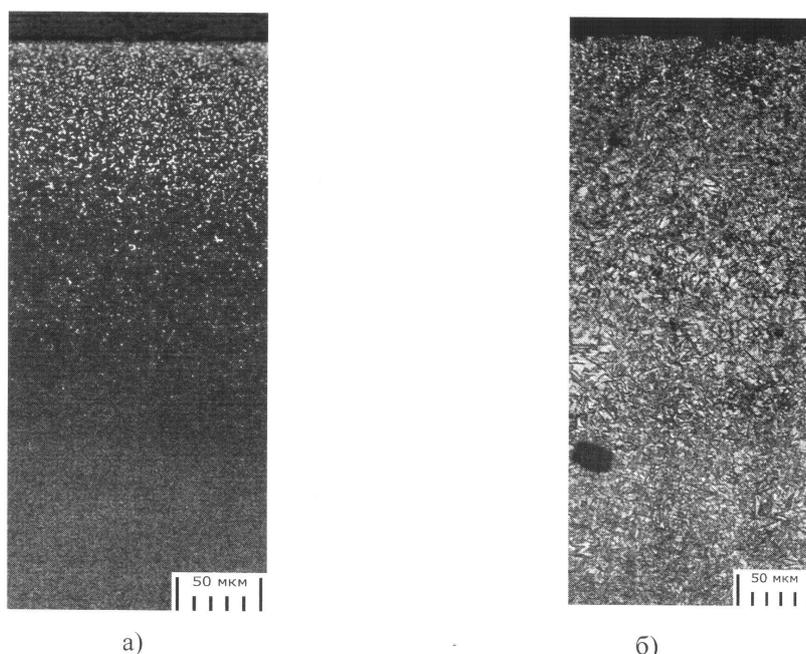


Рис. 1 – Микроструктура нитроцементованного слоя после полной термической обработки в образцах стали ВКС-7 (а) и ВКС-10 (б).

Такая особенность строения объясняется тем, что в присутствии в сталях хрома в количестве около 3% наиболее термодинамически вероятно образование зародышей карбонитридов и нитридов на флуктуациях концентрации углерода и азота внутри зерен, и в еще большей степени на дислокационных скоплениях, плотность которых в субзернах после ИПД достаточно высока.

Глубокая карбонитридная зона и плотное расположение в ней частиц карбонитридов на базе легированного хромом цементита $(Fe, Cr)_3(CN)$ и специальных карбидов типа $M_7(CN)_3$ и $M(CN)$, а также нитридов хрома типа CrN , Cr_2N , обеспечивает в образцах повышенную твердость приповерхностной части слоя и плавное ее распределение по толщине слоя (рис. 2). Для нитроцементации эффективная толщина слоя достигает 0,8 мм. Характер распределения микротвердости нитроцементованных слоев мало отличается для двух исследованных сталей, но для стали ВКС-10 значения микротвердости по толщине слоя стабильно на 3-4,5 % меньше, чем для стали ВКС-7.

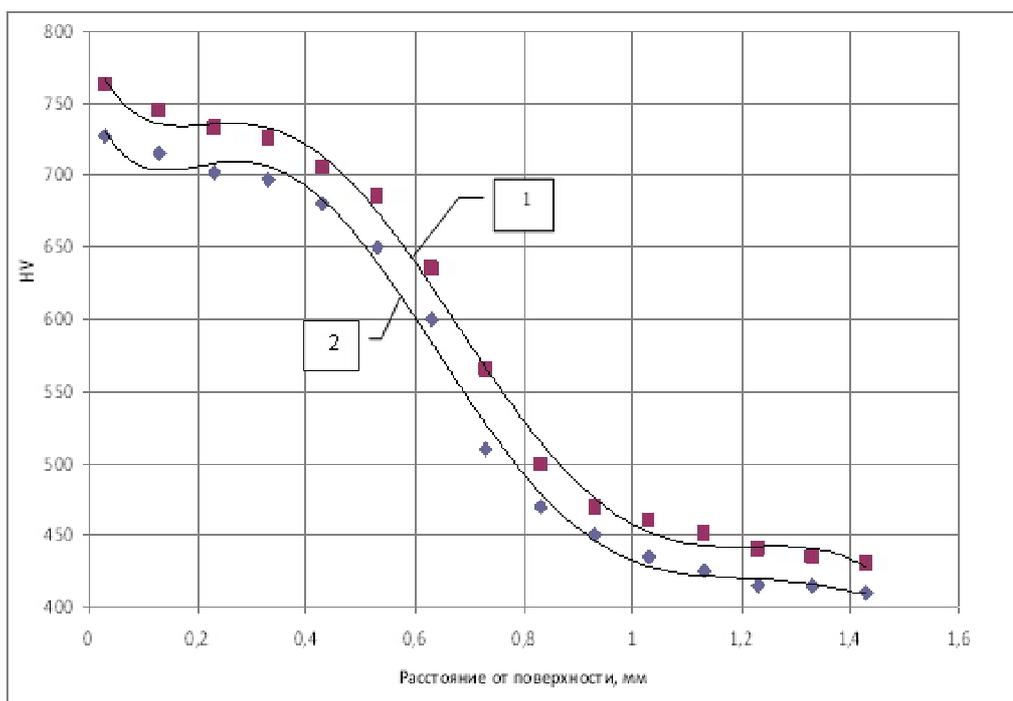


Рис. 2. Распределение микротвердости HV по толщине нитроцементованного слоя: 1 – сталь ВКС-7; 2 – сталь ВКС-10.

Результаты оценки интенсивности изнашивания реверсивной пары трения с образцами из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную нитроцементацию после предварительной пластической деформации, приведены в табл. 2.

При вакуумной нитроцементации с предварительной теплой осадкой средние интенсивности изнашивания (I_1) поверхностных нитроцементованных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины $0,3 \cdot 10^{-10}$, что является показателем их высокой износостойкости.

Средние интенсивности изнашивания стали ВКС-7 в 1,3 раза меньше, чем стали ВКС-10. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 изнашиваются в 1,6 раза меньше, чем при работе со сталью ВКС-7. Исследуемые поверхностные слои не склонны к задирам.

Сравнивая результаты испытаний на износостойкость сталей марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедших упрочнение предварительной теплой осадкой и вакуумной нитроцементацией с износостойкостью стали ВКС-7, прошедшей газовую нитроцементацию [5] видим, что активизация процесса нитроцементации (введение теплой осадки, переход к вакуумной нитроце-

ментации) приводит к десятикратному повышению износостойкости реверсивных пар трения.

Результаты оценки интенсивности изнашивания при испытаниях роликов из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную нитроцементацию после предварительной пластической деформации приведены в табл. 3.

Видно, что средняя интенсивность изнашивания (I_1) поверхностных слоев стали ВКС-7 после вакуумной нитроцементации равна $0,49 \cdot 10^{-9}$, что также свидетельствует об их высокой износостойкости. Средняя интенсивность изнашивания стали ВКС-10 равна $0,28 \cdot 10^{-9}$, что в 1,75 раза меньше интенсивности изнашивания стали ВКС-7. Сопряженные контрообразцы в паре со сталью ВКС-7 изнашиваются в 1,3 раза меньше, чем со сталью ВКС-10. Исследуемые поверхностные слои не склонны к задирам. Судя по суммарным величинам износа, можно сказать, что по работоспособности эти пары трения близки.

Таблица 2

Средние значения интенсивности изнашивания при работе пар трения в смазке Литол-24 при $p=10$ МПа в течение 15 часов

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали и вид упрочнения контрообразца	$I_1 \cdot 10^{10}$	$I_2 \cdot 10^{10}$	$I_{\Sigma} \cdot 10^{10}$
ВКС-7	ИПД и вакуумная нитроцементация	Сталь 20, цементация в твердом карбюризаторе, закалка	0,17	0,72	0,28
ВКС-10			0,24	0,45	0,31

Таблица 3

Средние значения интенсивности изнашивания при работе пар трения по схеме качения с проскальзыванием при $p=348$ МПа в масле И-20А

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали и вид упрочнения контрообразца	$I_1 \cdot 10^9$	$I_2 \cdot 10^9$	$I_{\Sigma} \cdot 10^9$
ВКС-7	ИПД и вакуумная нитроцементация	Сталь 18ХГТ, цементация в твердом карбюризаторе, закалка	0,49	0,33	0,82
ВКС-10			0,28	0,42	0,70

Предел контактной выносливости по разным источникам для нитроцементованных поверхностей может изменяться в диапазоне 1200-1600 МПа [6, 7]. Проведенные нами исследования показали, что при базовом числе циклов $1,8 \cdot 10^7$ значения предела контактной выносливости стали ВКС-7, обработанной по описанной выше технологии, близки и составляют 1736 - 1768 МПа. Следовательно, использование предварительной теплой пластической деформации и последующей вакуумной нитроцементации является средством повышения контактной выносливости теплостойких сталей.

Таким образом, представленные выше результаты оценки влияния режимов деформационной, термической и химико-термической обработки на механические 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. Комплекс экспериментальных исследований [5,8] на перспективное применение разработанного метода активизации процесса нитроцементации для сталей и сплавов разных составов.

Выводы

- Стали марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие вакуумную нитроцементацию с предварительной теплой осадкой, при испытаниях в условиях реверсивного трения при $p=10$ МПа и пластичной смазке обладают высокой износостойкостью, до 10 раз большей износостойкости сталей прошедших газовую нитроцементацию.

- После вакуумной нитроцементации работоспособность исследованных сталей в условиях разных схем триботехнических испытаний практически одинакова. Средние суммарные интенсивности изнашивания отличаются не более чем на 11%.

- Предел контактной выносливости образцов из стали ВКС-7, в результате вакуумной нитроцементации, увеличен до 1736 – 1768 МПа (в среднем на 25%) при достижении базового числа циклов нагружения.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.523.11.3010.

Список литературы

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.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
2. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И., Алексеева М.С., Щербаков Ю.И. Механические свойства теплостойких сталей после активизации процесса цементации//Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014, № , с.
3. Методы испытаний на трение и износ/Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
4. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок. Методические указания. Госстандарт СССР, М. 1980.
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. Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1970, 63с.
7. Зинченко В.И. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001, 303 с.
8. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алексеева М.С., Герасимов С.А. Влияние состава и структуры азотированных сплавов железа на износостойкость в условиях трения скольжения. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2011, №1, с.55-62.