

СЕВАЛЬНЁВ ГЕРМАН СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ И
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ
КАЧЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ МАРТЕНСИТНОГО
КЛАССА ПУТЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

Специальность: 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет)

Научный руководитель:

Смирнов Андрей Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
материаловедения МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Петрова Лариса Георгиевна
Заведующая кафедрой технологии
конструкционных материалов Московского
автомобильно-дорожного государственного
технического университета (МАДИ)

кандидат технических наук
Белоусов Георгий Станиславович,
ведущий научный сотрудник
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Ведущая организация:

ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Плохих Андрей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На современном этапе развития техники одной из важнейших задач прикладной науки является разработка новых материалов для перспективных изделий и технологий их упрочнения.

Одним из актуальных направлений в машиностроении является повышение ресурса работы тонкостенных прецизионных изделий и в частности – высокоточных подшипников качения, применяющихся в большинстве высоконагруженных узлов агрегатов современной аэрокосмической техники. При эксплуатации подшипники воспринимают циклические контактные нагрузки в совокупности с интенсивным изнашиванием, поэтому к сталям, из которых они изготавливаются, предъявляют высокие требования по твердости, контактной выносливости, износостойкости, коэффициенту трения и размерной стабильности. Из-за экстремальных нагрузок, работа тонкостенных подшипников качения может сопровождаться условиями «смазочного голодания», что обуславливает высокие требования к материалу по износостойкости.

В связи с возросшими эксплуатационными требованиями возникла потребность в дополнительном упрочнении подшипниковых сталей. На сегодняшний день для изготовления тонкостенных прецизионных, в частности приборных, подшипников, работающих в условиях малоударных или практически безударных нагрузок, используют высокоуглеродистые высокохромистые стали, обеспечивающие не только высокий уровень твердости и износостойкости, но и способные работать в условиях агрессивных сред. Однако для обеспечения требуемого уровня контактной выносливости и износостойкости необходимо дополнительное упрочнение поверхности. Приоритетной задачей прикладной науки является разработка новых технологий поверхностного упрочнения деталей для повышения ресурса их работы.

Анализ различных способов упрочняющей обработки показал, что наиболее эффективным способом поверхностного упрочнения тонкостенных деталей прецизионных изделий является применение химико-термической обработки (ХТО). После насыщения поверхности стали в углерод- и азотсодержащих атмосферах формируется структура, способствующая повышению поверхностной твердости, контактной выносливости и износостойкости. При этом возникающие сжимающие напряжения дополнительно повышают ресурс работы изделий.

Обработка в атмосферах низкого давления зарекомендовала себя в качестве эффективного метода упрочнения высоконагруженных деталей из легированных сталей. В связи с управляемостью технологического процесса и повторяемостью результатов, а также отсутствием окисления при термической и химико-термической обработке в разреженных атмосферах, применение такой обработки позволяет получать требуемые параметры диффузионных слоев для обеспечения заданной износостойкости и контактной выносливости изделий.

В настоящее время наибольший интерес представляет сочетание различных видов химико-термической обработки, включающее последовательные процессы азотирования и цементации, для повышения эксплуатационных характеристик. Проведение предварительного кратковременного азотирования перед цементацией способствует ускорению процесса диффузионного насыщения поверхности

углеродом, а также приводит к измельчению зерна. Исследования в области химико-термической обработки показывают, что после предварительного азотирования железного порошка повысилась интенсивность его насыщения углеродом. Также было выявлено, что насыщение сталей углеродом в присутствии аммиака повышает скорость диффузии углерода в поверхности стали вследствие образования сильного карбюризатора – синильной кислоты. Однако, необходимо отметить, что при чрезмерном насыщении стали азотом образуется корка, состоящая из карбонитридных фаз, снижающая скорость диффузии углерода и, как следствие, скорость роста толщины слоя.

Таким образом, для повышения эксплуатационных характеристик прецизионных тонкостенных подшипников качения наилучшим способом изменения поверхностных свойств, не приводящим к значительному короблению изделий, является упрочняющая обработка в атмосферах низкого давления, сочетающая процессы химико-термической и термической обработки, что является основанием для разработки технологических режимов упрочнения поверхности изделий из высокоуглеродистых высокохромистых сталей.

Целью диссертационной работы является повышение несущей способности тяжело нагруженных тонкостенных деталей подшипников качения из высокоуглеродистых высокохромистых сталей путем последовательного насыщения в разреженных азот- и углеродсодержащих атмосферах.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы решены **следующие задачи:**

- анализ закономерностей формирования структуры и свойств диффузионных слоев в процессе традиционной химико-термической обработки (вакуумная цементация или нитроцементация) и комбинированной химико-термической обработки (предварительное вакуумное азотирование, последующая вакуумная цементация или нитроцементация);
- исследование условий насыщения высокоуглеродистых высокохромистых сталей азотом в разреженных атмосферах;
- разработка технологических режимов химико-термической и термической обработки для повышения эксплуатационных характеристик;
- исследование влияния разработанных режимов химико-термической обработки и последующей термической обработки на эксплуатационные свойства (износостойкость и контактную выносливость) высокоуглеродистых высокохромистых подшипниковых сталей;
- анализ влияния термической обработки в инертном газе высокого давления на изменение размеров колец, а также контактных напряжений, возникающих во время эксплуатации, на размерную стабильность;
- исследование влияния дополнительного насыщения углеродом и азотом на коррозионную стойкость применяемых в рассматриваемых подшипниках сталей.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов и выводов в диссертационной работе обеспечена использованием современного оборудования, применением установленных методов исследований и испытаний в соответствии с

требованиями ГОСТ и международных стандартов, а также апробацией результатов работы с получением положительных результатов.

Научная новизна исследования

В результате выполненных экспериментальных исследований в рамках настоящей работы получены следующие новые результаты.

1. Установлены закономерности формирования диффузионных слоев при насыщении высокоуглеродистых высокохромистых сталей азотом в атмосферах низкого давления, состоящие в том, что при кратковременном перегреве до 880 °С в аммиаке происходит диссоциация тонкой оксидной пленки на основе Cr_2O_3 , препятствующей массопереносу азота; возможный рост зерна устраняется перекристаллизацией при последующем охлаждении до температуры азотирования (540 °С). Депассивация при реализации разработанного температурного режима дает возможность проводить насыщение коррозионностойких сталей азотом в атмосферах низкого давления.

2. Выявлены закономерности массопереноса азота и углерода при последовательном насыщении этими элементами, состоящие в том, что предварительное азотирование ускоряет массоперенос углерода, при этом такой эффект имеет существенное значение при длительности последующего насыщения углеродом, не превышающей 2-х часов. При бóльшем времени насыщения, благодаря перераспределению концентрации азота вглубь диффузионного слоя, его влияние на массоперенос углерода становится менее заметным.

3. Установлено закономерное влияние предварительного насыщения азотом в атмосферах низкого давления на фазовый состав диффузионных слоев в высокоуглеродистых высокохромистых сталях. Показано, что предварительное вакуумное азотирование приводит к формированию в приповерхностных слоях дисперсных частиц нитридов типа MeN , Me_2N при сохранении в структуре карбидов Me_3C , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 .

4. Выявлены закономерности формирования окончательной структуры диффузионных слоев в исследуемых сталях при упрочняющей термической обработке: исключение из технологического цикла обработки холодом способствует сохранению повышенного количества азотистого аустенита (11-15 %), который благодаря повышенной твердости и устойчивости, наряду с большим количеством дисперсных избыточных фаз в структуре диффузионного слоя, обеспечивает не только исключение трещинообразования в поверхностных слоях, но и высокое сопротивление контактными нагрузкам при размерной стабильности изделий в условиях эксплуатации.

5. Выявленные закономерности формирования структуры диффузионных слоев при обработке по разработанным режимам комбинированной химико-термической обработки тонкостенных прецизионных изделий способствует повышению эксплуатационных свойств по сравнению с вакуумной нитроцементацией и термической обработкой по традиционному режиму:

- удельная интенсивность изнашивания в условиях сухого трения стали 95X18-Ш уменьшается с $1,11 \times 10^{-4}$ до $1,29 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, стали 110X18М-ШД – с $1,88 \times 10^{-5}$ до $1,05 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м;

- контактная долговечность при напряжении в зоне контакта 5150 МПа увеличивается для стали 95X18-Ш с $1,38 \times 10^7$ до $3,68 \times 10^7$ циклов до появления питтинга, а предел контактной выносливости с 4650 МПа до 4900 МПа.

Практическая значимость работы:

1. Обоснованы на основе установленных закономерностей технологические рекомендации по выбору режимов комбинированной химико-термической обработки в атмосферах низкого давления высокоуглеродистых высокохромистых сталей, сочетающие предварительное вакуумное азотирование и последующее совместное насыщение углеродом и азотом с окончательной упрочняющей термической обработкой по модифицированному режиму с исключением обработки холодом. Сохранение в структуре 11-15 % азотистого аустенита способствует снижению уровня остаточных напряжений, возникающих из-за различных коэффициентов термического расширения избыточных фаз (в особенности нитридов) и матрицы, что предотвращает возможное коробление и трещинообразование в поверхностных слоях тонкостенных изделий после ХТО и ТО без уменьшения твердости сердцевины.

2. Применение разработанного процесса азотирования в атмосферах низкого давления со ступенчатым выходом на температурный режим в аммиаке взамен азотирования в тлеющем разряде способствует упрощению технологии обработки деталей из высокоуглеродистых высокохромистых сталей без ограничений по геометрии, в том числе внутренних отверстий колец шарикоподшипников малого диаметра.

3. Модифицированный режим упрочняющей термической обработки высокоуглеродистых высокохромистых сталей после ХТО с исключением обработки холодом из технологического процесса позволяет снизить трудоемкость при изготовлении тонкостенных прецизионных изделий.

4. Разработанные режимы КХТО приняты ОАО «ОК-Лоза» для промышленного опробования, что подтверждается соответствующим актом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости параметров диффузионных слоев от управляющих факторов вакуумной нитроцементации, позволяющие определить оптимальное время насыщения для формирования диффузионных слоев в соответствии с техническими требованиями для тонкостенных прецизионных изделий различных типоразмеров.

2. Режим депассивации поверхности высокохромистых сталей 40X13-Ш, 60X13С-ШД, 95X18-Ш, 110X18М-ШД, обеспечивающий диффузионного насыщение поверхности азотом в атмосферах низкого давления.

3. Модифицированный режим термической обработки после насыщения при вакуумном азотировании и вакуумной нитроцементации, состоящий в исключении обработки холодом из технологического цикла, способствующий сохранению азотистого аустенита в структуре диффузионных слоев.

4. Режим комбинированной химико-термической обработки, состоящий из предварительного вакуумного азотирования, вакуумной нитроцементации, закалки в потоке инертного газа высокого давления и низкого отпуска, обеспечивающий повышение эксплуатационных характеристик высокоуглеродистых высокохромистых сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД.

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертационной работе результаты являются оригинальными и получены автором лично или при его непосредственном участии. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке цели и задач исследования. Диссертантом лично выполнено обоснование направления исследования по материалам анализа научно-технической литературы и патентов, проведено диффузионное насыщение образцов на установках для химико-термической обработки, проведены исследования структуры диффузионных слоев, триботехнических характеристик и контактной усталости.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

IX и X Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Москва, 2016 - 2017;

VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова). Москва, 2017;

XI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Москва, 2018;

Научно-технической конференции «Климовские чтения – 2018. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (СПб, 2018);

Всероссийской научно-технической конференции «Высокопрочные стали для аэрокосмической техники и технологии их производства» (ФГУП «ВИАМ»). Москва, 2019.

Основные публикации по теме диссертационной работы. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ. В том числе, 4 научные статьи опубликованы в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, из них 3 научные работы – в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка принятых сокращений и списка литературы из 135 наименований, содержит 142 машинописных листа текста, включая 75 рисунков, 3 таблицы и 13 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы.

В Главе 1 на основании обзора отечественной и иностранной научно-технической литературы проведен анализ современных представлений, касающихся применения сталей для изготовления подшипников качения и методов их упрочнения. Особое внимание уделяется влиянию системы

легирования на формирование структурных составляющих в процессе термической обработки и влияние их на свойства.

Исходя из данных, полученных из обзора литературных источников, определены свойства сталей, влияющие на долговечность работы прецизионных подшипников качения в условиях малоударных или практических безударных нагрузок: твердость, износостойкость, контактная выносливость. С целью повышения уровня долговечности работы тонкостенного прецизионного изделия необходимо применять поверхностное упрочнение, не снижающее точность и чистоту рабочих поверхностей. Рассмотрены механические виды упрочнения поверхностного слоя, применение покрытий, поверхностных термических обработок и химико-термической обработки. Наилучшим комплексом свойств без потери требуемой точности и чистоты поверхности обладает химико-термическая обработка.

Технологический процесс, включающий газовую нитроцементацию и последующую термическую обработку, позволяет получить диффузионный слой требуемой протяженности с высокой твердостью поверхности и развитой карбонитридной зоной. Однако при одновременном насыщении углеродом, азотом и кислородом реализуется ряд нежелательных процессов, связанных с образованием частиц избыточных фаз, их последующей диссоциацией, окислением и графитизацией. В результате образуется «темная составляющая», которая является местом выкрашивания оксидов легирующих элементов и графита (Рис. 1) и приводит к падению поверхностной твердости.

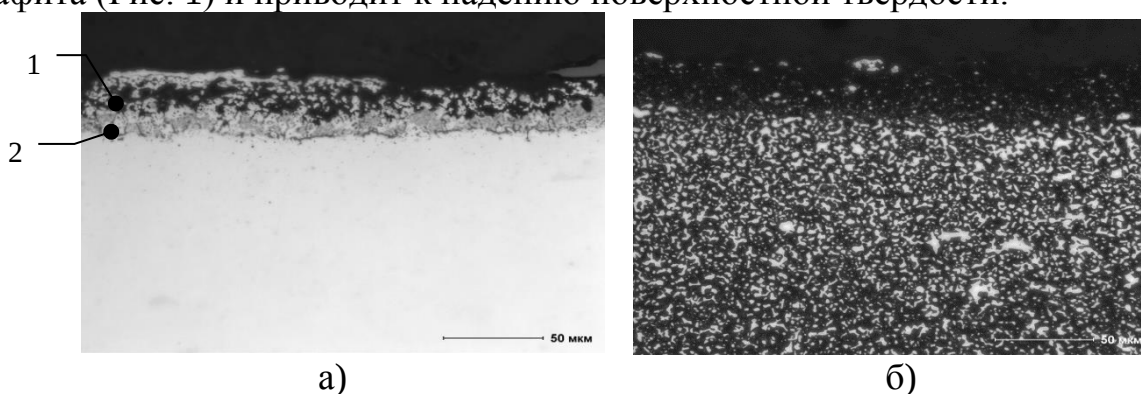


Рис. 1. «Темная составляющая» (1) и зона внутреннего окисления (2) в приповерхностной области диффузионных слоев на стали 8X4B9Ф2-III после газовой нитроцементации: а) – после полировки; б) – после металлографического травления, $\times 500$

Современные методы химико-термической и термической обработки в атмосферах низкого давления лишены указанных недостатков и позволяют получать высокую чистоту поверхностного слоя без окисления. Благодаря конструкции и, соответственно, возможностям вакуумной печи при проведении химико-термической и термической обработки деталей в условиях быстрого и равномерного охлаждения в среде инертного газа высокого давления, можно выделить следующие преимущества обработки:

- уменьшение коробления и изменения размеров изделий;
- повторяемость результатов и стабильное качество обработки;

- контроль и предсказуемость результатов, а также однородность свойств по сечению детали;
- получение чистой неокисленной поверхности деталей, что дает возможность отказаться от последующей операции очистки, а в ряде случаев не проводить окончательную механическую обработку.

Названные преимущества хорошо себя зарекомендовали при обработке тонкостенных прецизионных деталей.

На основании вышеизложенного в качестве технологического процесса для повышения ресурса работы тонкостенных прецизионных подшипников качения из высокоуглеродистых сталей мартенситного класса выбрана химико-термическая обработка в атмосферах низкого давления и последующая термическая обработка в вакууме с закалкой в газе высокого давления.

В Главе 2 приводится описание используемых в работе материалов, технологических процессов, оборудования, программных комплексов и методик экспериментальных исследований. Объектами исследований в данной работе являются высокохромистые стали 40X13-Ш, 60X13С-ШД, 95X18-Ш, 110X18М-ШД.

Для определения параметров диффузионных слоев сталей марок 40X13-Ш, 60X13С-ШД, 95X18-Ш, 110X18М-ШД подвергали вакуумному азотированию, вакуумной нитроцементации. Металлографические, дюрOMETрические исследования проводили по известным методикам. Фазовый состав диффузионных слоев определяли методами рентгеноструктурного и рентгеноспектрального микроанализа. Опытные образцы подвергали вакуумному азотированию, вакуумной нитроцементации и последующей термической обработке (Рис. 2).

Для определения изменения размеров тонкостенных прецизионных колец после термической обработки в атмосферах низкого давления измеряли размеры (внутренний и внешний диаметр) тонкостенных колец подшипников качения с помощью координатно-измерительной машины. Оценку эффективности разработанной технологии проводили с помощью исследования эксплуатационных характеристик сталей 95X18-Ш, 110X18М-ШД: коррозионной стойкости, износостойкости и контактной выносливости.

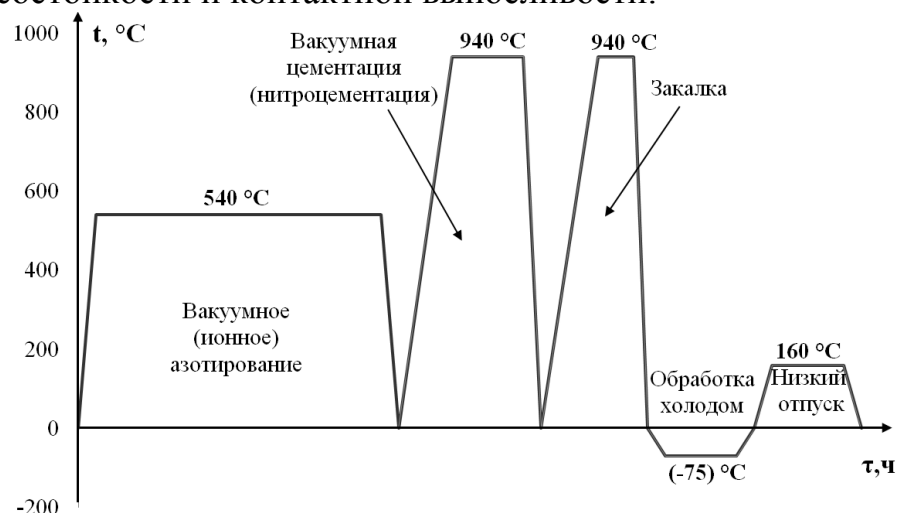


Рис. 2. Обобщенная схема полного цикла обработки сталей 40X13-Ш, 60X13С-ШД, 95X18-Ш, 110X18М-ШД

В Главе 3 описаны экспериментальные исследования режимов химико-термической обработки, их влияние на структуру и параметры диффузионных слоев высокоуглеродистых высокохромистых сталей. По результатам исследований определены зависимости формирования диффузионных слоев при вакуумной нитроцементации, позволяющие оптимизировать время процесса для получения требуемых толщин диффузионных слоев (Рис. 3).

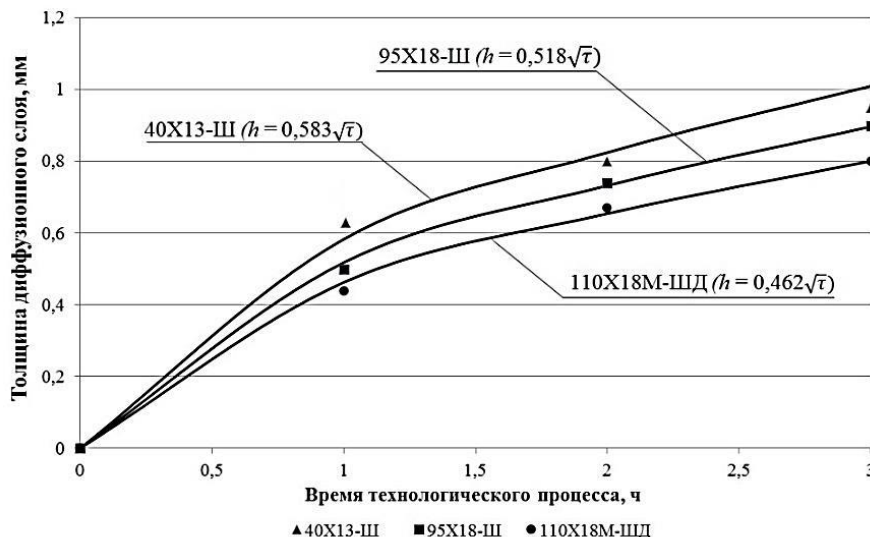
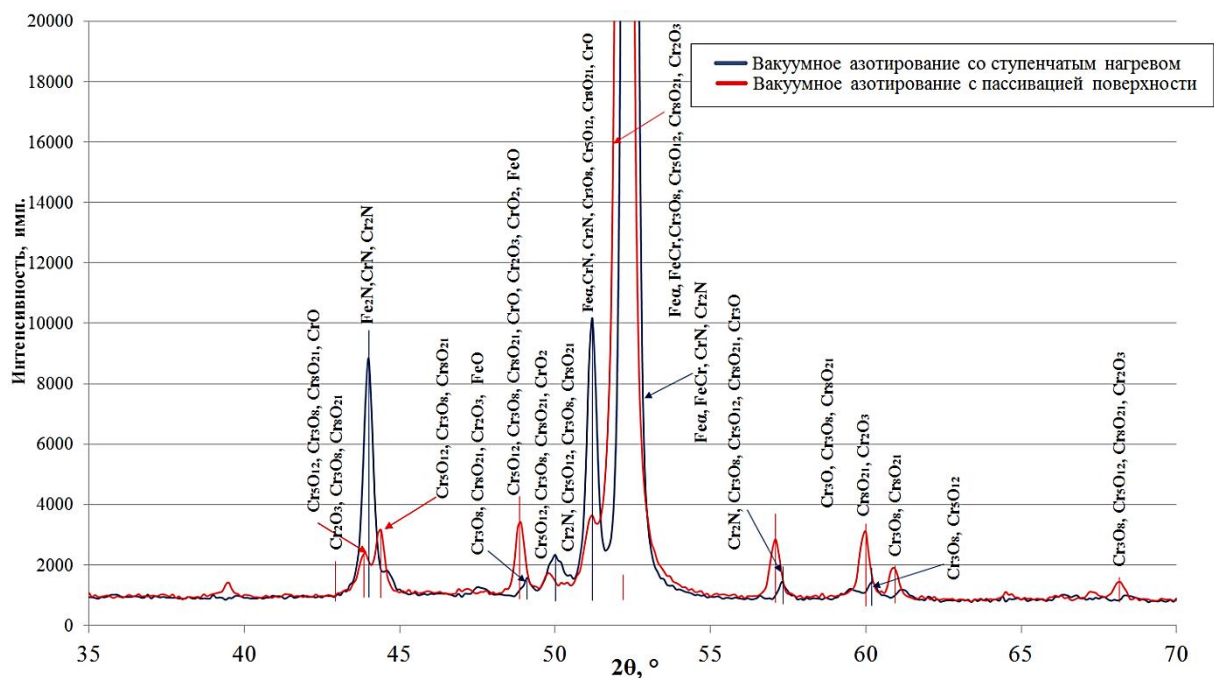


Рис. 3. Зависимость толщины диффузионного слоя h от общего времени насыщения $\tau_{\text{общ}}$ при вакуумной нитроцементации ($t = 940^\circ\text{C}$) для сталей 40X13-Ш, 95X18-Ш и 110X18М-ШД

Для решения проблемы депассивации при вакуумном азотировании высокохромистых сталей разработан режим ступенчатого нагрева в аммиаке, в процессе которого вакуумная установка кратковременно выводится на более высокую температуру. Можно предположить, что при температурах около $800-900^\circ\text{C}$ возможно как термическое разложение оксида на основе хрома Cr_2O_3 при пониженном давлении, так и взаимодействие его с аммиаком. При высоких температурах сродство хрома к кислороду становится меньше, чем к азоту, образуется тонкий поверхностный слой на основе нитрида хрома CrN . При уменьшении температуры до 540°C , повторная пассивация поверхности не наблюдается из-за наличия на ней слоя CrN . Такой слой не препятствует адсорбции и разложению аммиака и, тем самым, насыщению азотом, который при этом диффундирует через трещины и поры в поверхностном слое. Такой же эффект наблюдается на сплавах системы Ni-Cr-Al-Ti , в которых при азотировании в газовых атмосферах образуются тонкие поверхностные слои оксинитридов легирующих элементов, не препятствующие внутреннему азотированию. Стоит отметить, что при вакуумном азотировании со ступенчатым повышается интенсивность линий нитридной фазы и практически отсутствуют линии оксидной фазы, что свидетельствует об успешной депассивации поверхности и протекании диффузионного насыщения поверхности азотом (Рис. 4).

По результатам дюрOMETрического анализа было получено, что после вакуумного азотирования в течение 8 ч были сформированы диффузионные слои на сталях 40X13-Ш, 60X13С-ШД, 95X18-Ш и 110X18М-ШД около 0,1 мм.



Дополнительное насыщение диффузионного слоя азотом увеличивает объемную долю избыточной фазы (Рис. 6, а), при этом с ростом времени цементации/нитроцементации закономерно увеличивается не только объемная доля избыточной фазы, но и поверхностная концентрация углерода (Рис. 6, б).

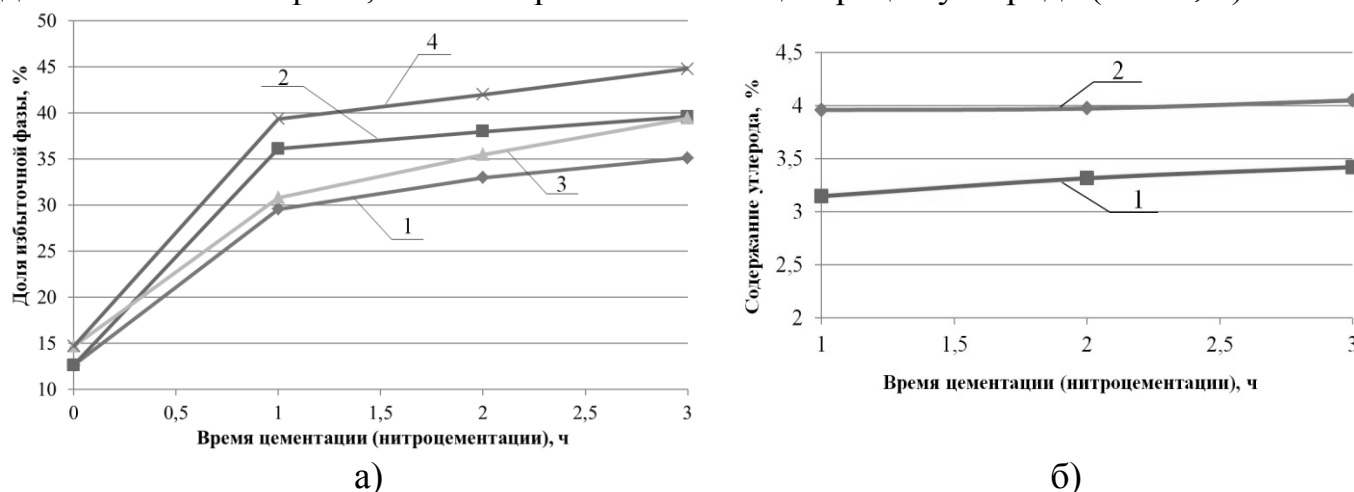


Рис. 6. Зависимость объемной доли избыточной фазы (а) и концентрации углерода на поверхности (б) от времени цементации (нитроцементации) сталей 95X18-Ш (1, 2) и 110X18М-ШД (3, 4) после вакуумной цементации и упрочняющей ТО (1, 3) и после комбинированной обработки, включающей вакуумное азотирование, вакуумную нитроцементацию и ТО (2, 4)

Применение предварительного вакуумного азотирования для высокоуглеродистых подшипниковых сталей позволяет получить более протяженные диффузионные слои с увеличенным количеством дисперсной избыточной фазы по сравнению с вакуумной цементацией.

В Главе 4 в программном комплексе ANSYS разработана математическая модель и проведен расчет изменения размеров колец подшипников после закалки в потоке инертного газа высокого давления.

Термическую обработку колец проводили в вакуумной печи модели 10.0VPT 1020/24N производства фирмы «SECO/WARWICK S.A.» в потоке азота при давлении 6 атм. (0,6 МПа). После закалки проводили низкий отпуск для снятия остаточных напряжений с целью исключения дополнительного изменения размеров из-за образования трещин. Обработанные кольца измеряли по внутреннему и наружному диаметру на координатно-измерительной машине. На каждом кольце проводили по 5 измерений на диаметр, за результат брали среднее значение пяти измерений. Результаты измерений представлены на Рис. 7.

В результате проведенных расчетов в программном комплексе были определены интервалы изменения размеров кольца подшипника после термической обработки (Рис. 8):

- для внутреннего диаметра – от 12 до 24 мкм (Рис. 8, а);
- для внешнего диаметра – от 27 до 39 мкм (Рис. 8, б).

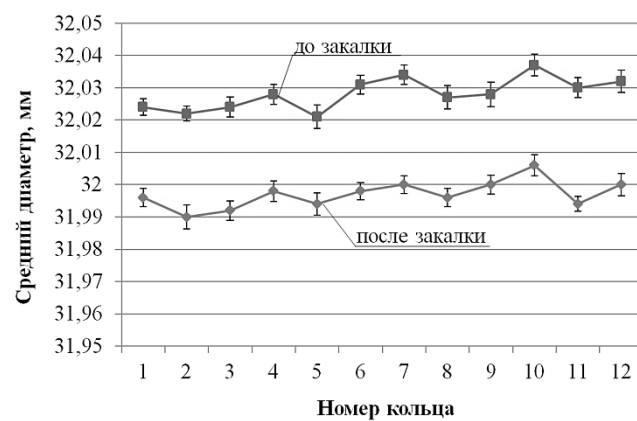
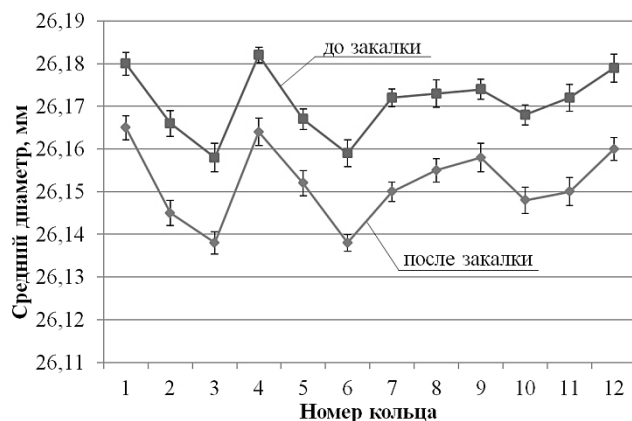


Рис. 7. Изменение внутреннего (а) и внешнего (б) размера колец после закалки в потоке азота высокого давления

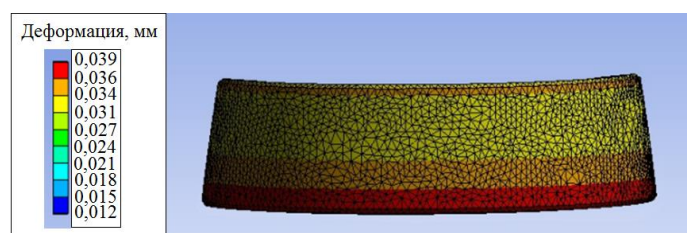
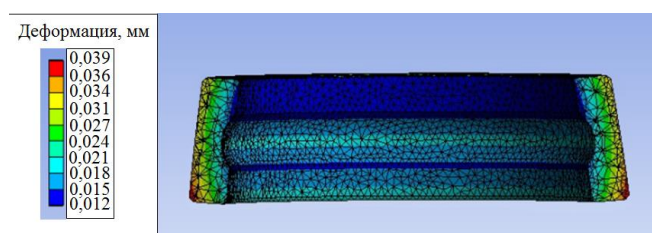


Рис. 8. Результаты расчета изменений размеров кольца подшипника в программном комплексе ANSYS: а) для внутреннего диаметра; б) для внешнего диаметра

Получено, что рассчитанный интервал совпадает с результатами измерений, что позволяет использовать разработанную модель для прогнозирования изменения размеров тонкостенных прецизионных колец при термической обработке с закалкой в потоке азота высокого давления.

В Главе 5 исследованы эксплуатационные свойства сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД после химико-термической и последующей термической обработки: коррозионная стойкость, износостойкость и контактная выносливость.

Для количественной оценки изменения коррозионной стойкости образцы размещали в камере соляного тумана (КСТ). Испытания проводили по ГОСТ 9.308. Экспозиция в течение 30 часов подтвердила меньшую коррозионную стойкость образцов после химико-термической и термической обработки по сравнению с термически обработанными образцами.

Расчет скорости коррозии показал незначительное влияние химического состава материала на коррозионные процессы, при этом применение химико-термической обработки приводит к уменьшению коррозионной стойкости: при использовании базовой технологии ХТО (ВНЦ с упрочняющей ТО) по сравнению с ТО скорость коррозии увеличивается примерно в 2 раза – с 0,56 до 1,11 г/(м²·сут); переход на новую технологию КХТО увеличивает скорость коррозии по сравнению с базовой технологией ХТО в 1,2 раза – с 1,11 до 1,30 г/(м²·сут). Условия эксплуатации прецизионных подшипников качения предусматривают работу в среде смазочного материала, что в значительной

степени снижает вероятность возникновения коррозионных повреждений в процессе работы. Высокое содержание хрома в твердом растворе (18 масс. %) позволяет эксплуатировать подшипники из сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД после химико-термической и термической обработки в условиях влажной среды.

Известно, что износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой, поэтому достижение высокой твердости не всегда гарантирует высокую износостойкость. Предварительное азотирование повысило поверхностную твердость образцов, однако результаты испытаний показали, что удельная интенсивность изнашивания в условиях сухого трения увеличивается в несколько раз после комбинированной обработки по сравнению с нитроцементацией (Рис. 9). Результаты испытания в условиях граничного трения с использованием смазочного материала также показали, что использование вакуумной нитроцементации без предварительного азотирования обеспечивает меньшую удельную интенсивность изнашивания.

Такое изменение удельной интенсивности изнашивания предположительно можно объяснить изменением характера и уровня остаточных напряжений, которые могут усиливать интенсивность износа поверхности.

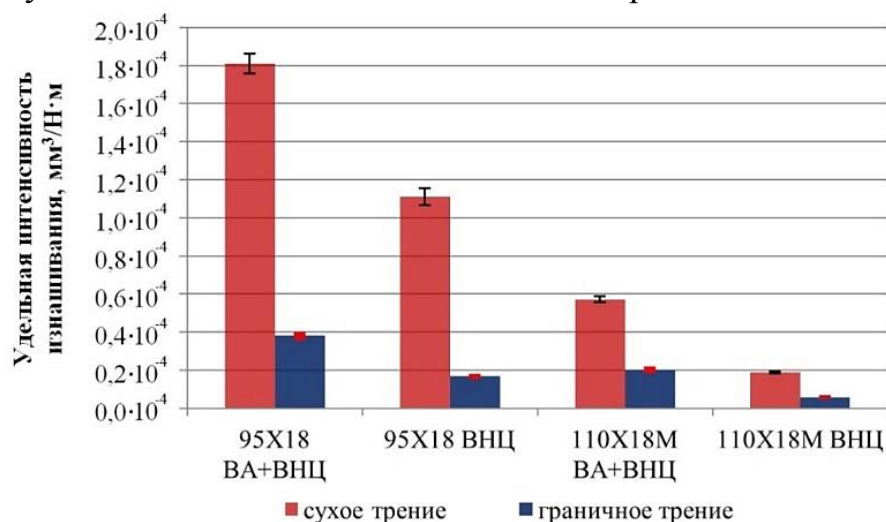


Рис. 9. Зависимость удельной интенсивности изнашивания образцов из сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД от режима упрочняющей обработки

Анализ результатов дал возможность предположить, что для уменьшения уровня остаточных напряжений следует сохранить в структуре некоторое количество остаточного аустенита, который, как известно, способствует их релаксации. По этой причине изменен режим упрочняющей термической обработки, из которого исключена обработка холодом.

Методом рентгеноструктурного анализа определено количество остаточного аустенита после модифицированного полного цикла обработки (комбинированной химико-термической обработки). Анализ рентгенограммы показал, что исключение обработки холодом увеличивает количество остаточного аустенита с 5-7 % до 11-15 %.

По результатам трибологических исследований в условиях сухого трения было получено, что исключение обработки холодом из технологического цикла

обработки привело к значительному снижению интенсивности изнашивания образцов после вакуумного азотирования, вакуумной нитроцементации и последующей термической обработки (Рис. 10).

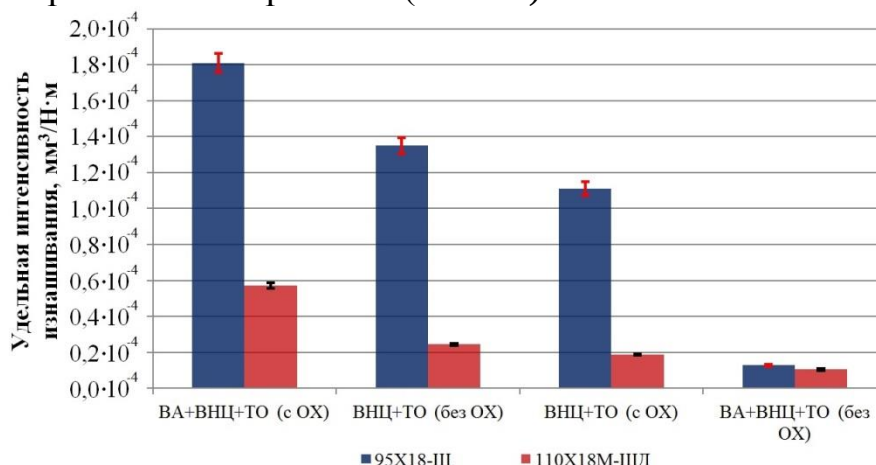


Рис. 10. Зависимость удельной интенсивности изнашивания образцов из сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД от режима упрочняющей обработки

Испытания на контактную усталость на предельных режимах работы машины МКВ-К (нагрузка 85 кг, напряжение в зоне контакта $\sigma_{Zmax} = 5150$ МПа) показали следующие значения долговечности: образцы после комбинированной химико-термической обработки – $3,68 \times 10^7$ циклов, после вакуумной нитроцементации – $1,38 \times 10^7$ циклов, после вакуумного азотирования, вакуумной нитроцементации и термической обработки, содержащей обработку холодом – $2,54 \times 10^6$ циклов, а образцы после термической обработки – $1,53 \times 10^5$ циклов (Рис. 11). Предел контактной выносливости (10^8 циклов) для стали 95X18-Ш после КХТО составил 4900 МПа.

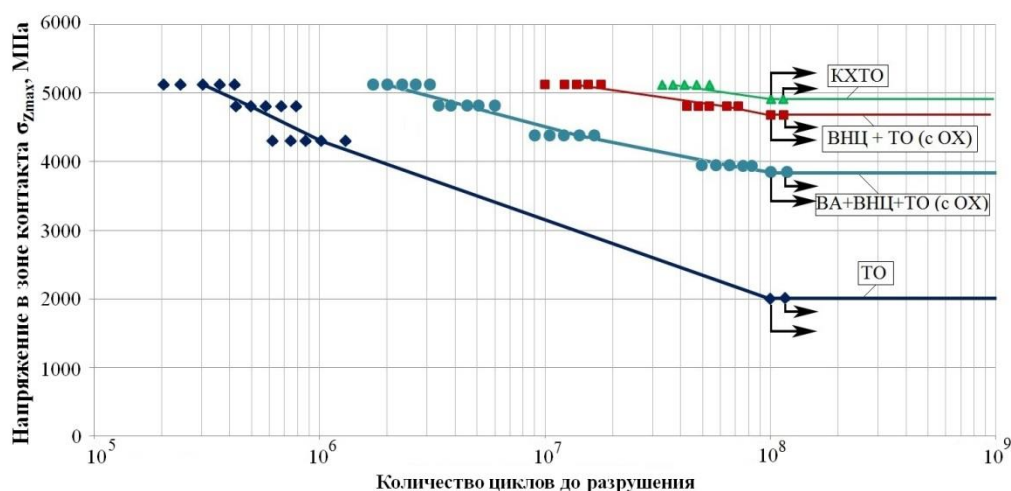


Рис. 11. Кривые усталости стали 95X18-Ш после различных видов обработки

В условиях эксплуатации остаточный аустенит способен превращаться в мартенсит деформации, что приводит к изменению размеров. Испытания образцов на контактную выносливость приближены к условиям эксплуатации подшипников качения, что дает возможность измерить диаметр цилиндрического образца после

испытаний и трактовать изменение размеров дорожки качения в области испытаний как стабильность размеров кольца тонкостенного подшипника качения при работе под нагрузкой. Результаты измерений дорожек качения образцов после испытаний на контактную выносливость показали наибольшую стабильность размеров после комбинированной химико-термической обработки (Рис. 12).

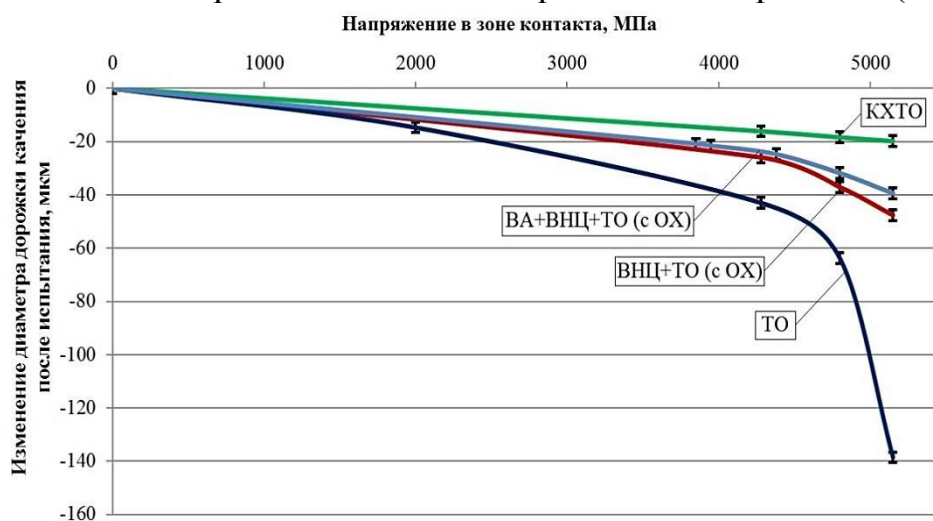


Рис. 12. Зависимость изменения размера дорожки качения от напряжения в зоне контакта после испытаний на контактную выносливость

Образцы после комбинированной химико-термической обработки при высоких напряжениях в зоне контакта (4800 и 5150 МПа) практически не подвергаются пластической деформации. Средний размер образцов после испытаний при напряжениях 4800 и 5150 МПа по дорожке качения уменьшился на 18 ± 2 и 20 ± 2 мкм соответственно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для повышения эксплуатационных характеристик (износостойкость и контактная выносливость), влияющих на ресурс работы в условиях малоударных или практически безударных нагрузок тонкостенных прецизионных подшипников из высокоуглеродистых сталей, разработана и реализована комбинированная химико-термическая обработка. Данная обработка включает в себя предварительное вакуумное азотирование, вакуумную нитроцементацию, закалку в потоке инертного газа высокого давления и низкий отпуск. Из технологического цикла исключена обработка холодом, что дает возможность получать высокий уровень механических характеристик высокоуглеродистых сталей 95X18-Ш и 110X18М-ШД. Таким образом, выполнены новые научно-обоснованные технологические разработки для повышения долговечности тонкостенных прецизионных изделий в процессе эксплуатации.

1. Разработан и обоснован процесс насыщения поверхности высокоуглеродистых высокохромистых сталей азотом в атмосферах низкого давления с применением ступенчатого режима нагрева в аммиаке. Депассивация при реализации разработанного температурного режима способствует удалению с поверхности оксидной пленки на основе Cr_2O_3 , что дает возможность проводить насыщение высокохромистых сталей азотом в атмосферах низкого давления.

2. Экспериментально показана эффективность использования вакуумного азотирования вместо насыщения в тлеющем разряде как самостоятельной обработки, а так же в качестве первой стадии комбинированной химико-термической обработки высокоуглеродистых высокохромистых сталей. Благодаря такой замене становится возможным процесс обработки внутренних отверстий колец шарикоподшипников малого диаметра, а также упрощается насыщение деталей различной геометрии из названных сталей.

3. Выполнен анализ закономерностей формирования диффузионных слоев при различных видах химико-термической обработки. Установлено, что предварительное насыщение диффузионного слоя азотом увеличивает объемную долю избыточной фазы, при этом с ростом времени цементации/нитроцементации закономерно увеличивается объемная доля избыточной фазы и поверхностная концентрация углерода. Увеличение времени нитроцементации при комбинированной обработке уменьшает влияние предварительного азотирования вследствие перераспределения азота в диффузионном слое.

4. Для прогнозирования коробления тонкостенных прецизионных изделий в программном комплексе ANSYS разработана математическая модель и проведен расчет изменения размеров колец подшипников после закалки в потоке инертного газа высокого давления. Получено, что рассчитанные значения совпадает с результатами измерений, что позволяет использовать разработанную модель для прогнозирования изменения размеров тонкостенных прецизионных колец при термической обработке с закалкой в потоке азота высокого давления.

5. Исследования коррозионной стойкости в условиях агрессивной среды (в камере солевого тумана) сталей марок 95X18-Ш и 110X18М-ШД показали увеличение скорости коррозии примерно в 2 раза – с 0,56 до 1,11 г/(м²·сут) для базовой технологии ХТО (ВНЦ и последующей ТО) по сравнению с ТО; при переходе на новую технологию КХТО скорость коррозии увеличивается в 1,2 раза – с 1,11 до 1,30 г/(м²·сут) по сравнению с базовой технологией ХТО. Такое уменьшение коррозионной стойкости не является критичным для прецизионных подшипников качения, поскольку изделия работают в среде смазочного материала.

6. Экспериментально установлено, что режим обработки, включающий вакуумное азотирование, вакуумную нитроцементацию и термическую обработку, в состав которой входит обработка холодом, приводит к увеличению интенсивности изнашивания в условиях сухого и граничного трения. Такой результат можно объяснить влиянием уровня остаточных напряжений из-за большой объемной доли карбидов и нитридов в диффузионном слое и различных коэффициентов термического расширения матрицы и избыточных фаз. Подтверждением такого предположения могут служить трещины, обнаруженные на части образцов после названного режима обработки.

7. На основании анализа полученных результатов предложено модифицировать режим упрочняющей обработки путем исключения обработки холодом. Сохранение в структуре от 11 до 15 % азотистого аустенита способствует релаксации остаточных напряжений, возникающих из-за различных коэффициентов термического расширения избыточных фаз (в особенности

нитридов) и матрицы, что приводит к снижению удельной интенсивности изнашивания в условиях сухого трения стали 95X18-Ш с $1,11 \times 10^{-4}$ до $1,29 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, стали 110X18М-ШД – с $1,88 \times 10^{-5}$ до $1,05 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м после КХТО по сравнению с ВНЦ и ТО по традиционному режиму.

8. Установлено, что после КХТО стали 95X18-Ш без обработки холодом предел контактной усталости равен 4900 МПа, что на 250 МПа превосходит предел контактной выносливости, достигаемой после вакуумной нитроцементации и обработки холодом, и на 1000 МПа больше предела контактной усталости после КХТО с обработкой холодом. Данный эффект обусловлен повышением дисперсности нитридов, образовавшихся при предварительном азотировании, температура которого существенно ниже по сравнению с нитроцементацией. Необходимым условием достижения максимальной контактной выносливости также является отсутствие охрупчивания, вызванного обработкой холодом в процессе КХТО.

9. Проведена оценка влияния повышенного количества азотистого аустенита на размерную стабильность образцов из стали 95X18-Ш в процессе испытаний на контактную выносливость. Применение КХТО обеспечивает сопротивление пластической деформации в зоне контакта вплоть до напряжения 5150 МПа; диаметр дорожки качения при этом уменьшается на 20 ± 2 мкм, что в 2,4 раза меньше по сравнению с традиционной обработкой (ВНЦ и ТО), после которой такое изменение составляет 47 ± 2 мкм. Высокая стабильность размеров может обеспечиваться комплексным влиянием дисперсных избыточных фаз в поверхностном слое, оказывающих высокое сопротивление пластической деформации в процессе нагружения.

10. На основании проведенных исследований проведена обработка тестовой партии колец тонкостенных прецизионных подшипников качения по новой технологии комбинированной химико-термической обработки. После обработки тестовая партия колец передана в ОАО «ОК-Лоза» для промышленного опробования, что подтверждается соответствующим актом.

Результаты данной работы могут быть использованы для повышения эксплуатационных характеристик тяжелонагруженных тонкостенных прецизионных изделий различного назначения, а также для диффузионного насыщения в атмосферах низкого давления изделий из высокоуглеродистых высокохромистых сталей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Special Features of the Carbonitriding of Parts of Instrument Bearings Designed for Extreme Service Conditions / G.S. Seval'nev [et. al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2016. V. 58, №. 5-6. P. 287-292. (0,37 п.л./0,12 п.л.).
2. Thermochemical Treatment for Reinforcing High-Strength Precipitation-Hardening Heat-Resistant Steel Microalloyed with REM / G.S. Seval'nev [et. al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2018. V. 60, №. 7-8. P. 450-453 (0,25 п.л./0,06 п.л.).

3. Use of combined methods of successive carburizing and nitriding of martensitic steels in low-pressure atmospheres / G.S. Seval'nev [et. al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2020. V. 62, №. 1-2. P. 127-132 (0,31 п.л./0,12 п.л.).
4. Оптимизация режимов комбинированной химико-термической обработки высоконагруженных зубчатых колес из дисперсионно-твердеющей теплостойкой стали / Г.С. Севальнёв [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14., № 11. С. 519-522 (0,25 п.л./0,06 п.л.).
5. Севальнёв Г.С., Макушина М.А., Смирнов А.Е. Влияние упрочняющей обработки в вакууме с заключительным ионно-плазменным азотированием на характеристики тонкостенных деталей прецизионных шарикоподшипников из высокоуглеродистых сталей // Будущее машиностроения России (г. Москва, 05–08 октября 2016 г.). М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 203-205 (0,19 п.л./0,12 п.л.).
6. Севальнёв Г.С., Смирнов А.Е. Влияние термической обработки на контактную выносливость легированных высокоуглеродистых сталей // Будущее машиностроения России (г. Москва, 25–28 сентября 2017 г.). М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 135-138 (0,25 п.л./0,12 п.л.).
7. Севальнёв Г.С. Применение процессов химико-термической и термической обработки в вакууме для обеспечения эксплуатационных свойств прецизионных подшипников качения из легированных высокоуглеродистых сталей // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (г. Москва, 07–10 ноября 2017 г.). М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 760-762 (0,19 п.л.).
8. Музафарова С.Р., Иванова Т.О., Севальнев Г.С. Исследование возможных факторов, влияющих на эксплуатационную стойкость подшипников качения в авиационных газотурбинных двигателях // Климовские чтения - 2018. Перспективные направления развития авиадвигателестроения (Санкт-Петербург, 19 октября 2018 г.). СПб.: Скифия-принт, 2018. С. 393-398 (0,25 п.л./0,12 п.л.).