На правах рукописи

ЛАШНЕВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ 13Х3П3М2ВФБ-Ш СПОСОБОМ ВАКУУМНОЙ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Лашнев

Москва - 2018

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: Терентьев Владимир Федорович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова» РАН

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
2173756
Лашнев М.М. Повышение несу

У2173756
Лашнев М.М.
Повышение несущей способности высоконагруженных зубчатых колес из стали 13Х3Н3М2В...
1,00
2018

афедры
иалов»

Ведущая организация:

Защита состоится «19»
диссертационного совет
105005, г. Москва, 2-я Б

Ваш отзыв на авторефе
по указанному адресу.

С диссертацией можно
www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8

Автореферат разослан «

Ученый секретарь
диссертационного совет
кандидат технических н
доцент

У2173756

Возвратите книгу не позже обозначенного здесь срока

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Разработка инновационных материалов и методов их упрочнения – важнейшая задача современной прикладной науки. Одним из самых передовых участков технического прогресса является авиационная техника, особенно двигатели. Как показывает практика, надежную работу редукторов авиационных моторов обеспечивают в первую очередь зубчатые передачи, способные работать в условиях повышенных скоростей, силовых и термических нагрузок.

В настоящее время основными материалами, применяемым в зубчатых передачах авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), являются комплексно-легированные теплостойкие стали, в том числе 20Х3МВФ-Ш и 16Х3НВФМБ-Ш, подвергаемые поверхностному упрочнению путем цементации. Особенностью диффузионных слоев для данного класса материалов является образование в результате цементации карбидной составляющей сложного состава, включающей в себя легированный карбид цементитного типа и дисперсные частицы карбидов тугоплавких легирующих элементов. Такая структура обеспечивает требуемую несущую способность диффузионных слоев, в том числе сопротивление поверхности изнашиванию и заеданию. Для обеспечения заданной насыщенности диффузионных слоев теплостойких сталей (до 1,0-1,2 % углерода по массе) возникла необходимость применения современных способов цементации, обеспечивающих высокий углеродный потенциал и предотвращающих развитие внутреннего и внешнего окисления—вакуумных и ионно-вакуумных.

Вместе с тем, зубчатые колеса ГТД нового поколения будут работать в еще более тяжелых условиях по нагрузкам, скоростям и температурам, чем применяемые в настоящее время. Так, предполагается, что удельные нагрузки во вновь проектируемых зубчатых передачах достигнут 700 Н/мм, частота вращения шестерен—20 000 об/мин, скорость скольжения—100 м/с; при этом рабочая температура поверхностей зубчатых колес превысит 200 °С, а температура мгновенных вспышек—500 °С. Названные параметры диктуют необходимость применения более совершенных материалов и технологий их поверхностного упрочнения, превосходящих существующие.

В этой связи обосновано применение дисперсионно-твердеющей особо теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш (ВКС-10), обеспечивающей сохранение высоких эксплуатационных свойств упрочненного слоя при температуре до 500 °С. Целесообразность стабилизации остаточного аустенита при закалке дисперсионно-твердеющей стали ВКС-10, а также более высокие прочностные свойства нитроцементованных слоев обуславливают применение для этой стали нитроцементации вместо цементации.

Проведение технологического процесса в атмосферах низкого давления (вакуумных атмосферах) исключает негативные последствия внешнего и внутреннего окисления, практически исключает обезуглероживание слоев, а также повышает экологическую безопасность, культуру производства и снижает затраты на энергию и технологические газы. Вакуумная нитроцементация (ВНЦ) впервые была теоретически обоснована в 1970-х годах, однако по ряду причин данный процесс не нашел практической реализации.

В то же время, значимые теоретические и практические результаты в области ионной нитроцементации (ИНЦ) были достигнуты в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Полученные при исследовании ИНЦ результаты являются научным базисом для изучения ВНЦ как в теоретическом, так и практическом аспекте.

Так, в частности, установлено, что на расстоянии 0,2 мм от поверхности требуется содержание азота не менее 0,2 масс. %. При этом необходимо формирование плавных концентрационных кривых углерода. Общая протяженность слоя определяется геометрией зубчатых колес (преимущественно их модулем), что обеспечивает требуемую контактную и изгибную выносливость. Формирование карбонитридной составляющей глобулярной морфологии с размерами частиц, как правило, не превышающими 1,0 мкм, обеспечивает высокую износостойкость слоя без снижения других эксплуатационных свойств. Учитывая изложенное, суммарная концентрация насыщающих элементов не должна превосходить 1,0-1,2 масс. %.

Вместе с тем, в настоящее время ИНЦ (как и ионная цементация) практически не применяется из-за зависимости результатов насыщения от площади обрабатываемой поверхности. Кроме того, необходимо использование дополнительного дорогостоящего оборудования генерации тлеющего разряда. По этим причинам вакуумная цементация в настоящее время практически полностью вытеснила ионную.

Для выполнения изложенных требований к характеристикам диффузионных слоев необходимо обеспечивать в ходе вакуумной нитроцементации совместное насыщение углеродом и азотом, которое до настоящего времени не реализовано. Не установлены оптимальные технологические режимы совместного насыщения углеродом и азотом в атмосферах низкого давления, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств. Устранению указанных проблем посвящена настоящая работа, что обуславливает ее актуальность.

Цель исследования. Увеличение износостойкости и циклической выносливости высоконагруженных зубчатых колес в результате совместного насыщения углеродом и азотом в атмосферах низкого давления.

Для достижения указанной цели определены ***задачи исследования.***

1. Установление условий совместного насыщения стали углеродом и азотом в атмосферах низкого давления.
2. Практическая реализация технологии вакуумной нитроцементации.
3. Разработка режимов ВНЦ, целесообразных для практического использования.
4. Разработка выражений граничных условий математической модели ВНЦ комплексно-легированных стали.
5. Теоретическое прогнозирование и экспериментальное определение прочностных свойств нитроцементованных слоев комплексно-легированной стали.
6. Разработка рекомендаций для промышленного внедрения ВНЦ и получения заданных эксплуатационных свойств зубчатых колес из теплостойкой стали.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных в работе результатов обусловлена использованием современного сертифицированного оборудования; применением известных методов измерений, исследований и испытаний. Адекватность теоретических расчетов и выводов подтверждена экспериментальными данными, как полученными в рамках настоящей работы, так и представленными в научной литературе.

Научная новизна исследования:

1. Впервые для атмосфер низкого давления экспериментально обоснованы условия совместного насыщения углеродом и азотом комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш. Показано, что рациональным температурным интервалом, обеспечивающим заданное значение азотного потенциала (не менее 0,25-0,4 %) и, как следствие, требуемую насыщенность азотом на том же уровне при обеспечении активного науглероживания, является область температур 860-900 °С.

2. Установлены закономерности изменения структуры диффузионного слоя стали при различных режимах подачи насыщающих газов (ацетилена и аммиака), состоящие в том, что при циклической подаче ацетилена и времени активного насыщения 2-3 минут и более происходит пересыщение поверхности и образование на ней избытка карбидов (карбонитридов), при увеличенном до 50-60 минут времени диффузионной стадии цикла поверхность практически полностью очищается от избытка карбидной (карбонитридной) фазы; при постоянной подаче аммиака обеспечивается заданная насыщенность диффузионного слоя азотом (не менее 0,25-0,4 %).

3. Обосновано увеличение упрочняющего эффекта при ВНЦ по сравнению с ВЦ: дополнительное насыщение азотом до заданной концентрации способствует получению азотистого аустенита, который обеспечивает гомогенное распределение выделяющихся при его распаде в процессе термической обработки мелкодисперсных частиц карбонитридов, кроме того остаточный азотистый аустенит обладает повышенной прочностью.

4. Установлены расчетным путем и подтверждены экспериментально закономерности влияния технологических факторов ВНЦ на параметры диффузионных слоев в комплексно-легированной стали, что обеспечивает возможность получения заданных повышенных характеристик зубчатых колес: абразивной и адгезионной износостойкости при уменьшении опасности схватывания, изгибной и контактной выносливости.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Показаны технологические возможности процесса ВНЦ по получению диффузионных слоев с заданными параметрами и, как следствие, по обеспечению требуемых значений эксплуатационных свойств высоконагруженных зубчатых колес из комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш.

2. Разработана рациональная схема подачи азотсодержащего газа, обеспечивающая требуемую концентрацию азота в слое, а также схема циклов подачи ацетилена, способствующая формированию дисперсных частиц карбонитридов и заданной насыщенности слоя углеродом при плавных концентрационных кривых.

3. Разработаны практические рекомендации по проектированию технологических режимов ВНЦ, обеспечивающих получение заданного уровня эксплуатационных свойств высоконагруженных зубчатых колес.

4. Разработаны новые выражения граничных условий математической модели ВНЦ и выполнена проверка ее адекватности; математическая модель с оригинальными выражениями граничных условий реализована в прикладной программе для ЭВМ, зарегистрированной в установленном порядке.

5. Разработаны режимы технологического процесса ВНЦ зубчатых колес ГТД нового поколения из комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш, которые переданы ВИАМ для промышленного освоения предприятиями отрасли.

Положения, выносимые на защиту:

1. Режимы вакуумной нитроцементации комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш, обеспечивающие требуемую насыщенность диффузионного слоя углеродом и азотом.

2. Новые выражения граничных условий математической модели ВНЦ, состоящие в экспериментально установленных зависимостях значений азотного и углеродного потенциала, а также коэффициентов массопереноса углерода и азота от технологических факторов процесса ВНЦ.

3. Зависимости характеристик диффузионных слоев от управляющих факторов процесса ВНЦ, установленные в результате экспериментального анализа, а также применения математической модели.

4. Рекомендации по определению совокупности технологических факторов процесса ВНЦ обеспечивающие заданные эксплуатационные характеристики зубчатых колес из комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш.

5. Результаты теоретического расчета прочностных характеристик нитроцементованного слоя комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш.

Личный вклад автора:

– экспериментальные исследования процессов вакуумной нитроцементации, включая измерения насыщенности диффузионных слоев углеродом и азотом, а также твердости;

– расчеты прочностных свойств диффузионных слоев известными методами;

– разработка выражений граничных условий математической модели ВНЦ и проведение проверки их адекватности экспериментальным путем;

– оптимизация технологических режимов вакуумной нитроцементации и разработка рекомендаций по промышленному внедрению ВНЦ.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на 2-й Международной научной конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (Орск, 2011 г.), на 4-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2011 г.), на научно-технической конференции «Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД» (Москва, 2016 г.), на научных семинарах и заседаниях кафедры "Материаловедение" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013-2018 г.г.

Основные публикации по теме диссертационной работы. Результаты исследования опубликованы в 11 печатных трудах. В том числе: в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 7 статей; получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и результатов, библиографического списка из 136 наименований, приложения. Общий объем работы составляет 161 страницу; диссертация содержит 42 иллюстрации и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ научной литературы по теме исследования, на основании которого определены задачи, решаемые в рамках настоящей работы.

Показаны преимущества нитроцементованных диффузионных слоев перед цементованными. Так, нитроцементация (на толщину слоя 0,4-0,8 мм) с последующей закалкой и низким отпуском повышает, по сравнению с деталями из экономно-легированных сталей, подвергнутых газовой цементации, предел выносливости на 50-80 %; предел контактной выносливости на 60-100 %; износостойкость в 3-10 раз и сопротивление фреттинг-коррозии в 2-5 раз. Твердость сердцевины при этом составляет 28-40 HRC, а поверхности—58-62 HRC. Еще большие возможности предоставляют комплексно-легированные теплостойкие стали, применяемые в зубчатых передачах авиационных двигателей.

Структура нитроцементованного слоя теплостойкой стали (Рис. 1) состоит из трех зон: активной карбонитридной зоны (а), в которой наряду с мартенситной матрицей и дисперсными частицами карбонитридов вольфрама, молибдена, ванадия и т.д., диаметр которых составляет 0,3-0,7 мкм, присутствуют относительно крупные частицы (размером более 1,0 мкм) легированного цементита; зоны высокопрочных карбонитридных частиц тугоплавких легирующих элементов (б), в которой частицы цементита отсутствуют; твердорастворной мартенситной зоны (в).

Влияние карбонитридной фазы в стали на ее эксплуатационные свойства неоднозначно. С одной стороны, положительное влияние мелкодисперсных карбонитридных частиц проявляется в повышении сопротивления контактной усталости, т.к. распространение усталостной трещины может быть прервано некогерентными частицами карбонитридов W, Mo и др. В тоже время, образование сплошной или разорванной карбонитридной сетки на межзеренной границе снижает предел выносливости, пластичность и вязкость слоя.

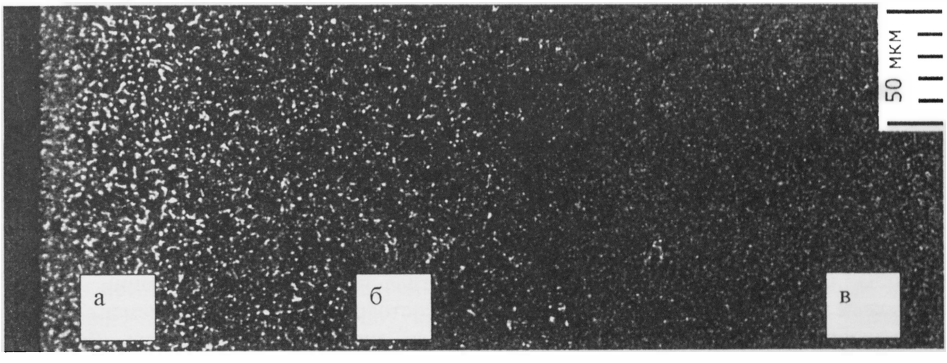


Рис. 1. Микроструктура поверхностной зоны нитроцементованного слоя стали 16Х3НВФМБ-Ш (обозначения в тексте)

Еще одной существенной особенностью нитроцементации является повышенное содержание остаточного аустенита, так как даже небольшое количество азота заметно стабилизирует γ-Fe.

Учитывая изложенное, оптимальное количество азота в приповерхностной части слоя составляет около 0,25-0,40 % (по массе) при общей концентрации насыщающих элементов 1,0-1,2 % (в зависимости от конкретной марки теплостойкой стали).

Показано, что использование контролируемых газовых атмосфер для нитроцементации комплексно-легированных теплостойких сталей, применяемых на авиационных предприятиях, имеет ограниченные возможности. При диффузионном насыщении таких сталей технологическая атмосфера должна обеспечивать высокие значения углеродного потенциала (более 1,5 %), что вынуждает увеличивать содержание метана в эндогазе свыше равновесного значения, что приводит к выделению сажи. Также в области высоких значений углеродного потенциала отсутствует воспроизводимость газовой химико-термической обработки (ХТО).

В качестве замены газовой нитроцементации в период 1980-1990 г.г. применяли ионную нитроцементацию в атмосферах низкого давления, активированных внешним электрическим полем (нитроцементация в плазме тлеющего разряда). К достоинствам данного способа поверхностного упрочнения, по сравнению с газовым, следует отнести высокий углеродный потенциал, обеспечивающий существенное ускорение технологического процесса, отсутствие внешнего и внутреннего окисления в диффузионном слое, высокую экологическую безопасность и культуру производства, а также экономию электроэнергии и рабочих газов. Недостатком данного способа является необходимость использования дорогостоящего оборудования генерации плазмы. Кроме того, при ионной нитроцементации так же, как и при цементации, параметры массопереноса насыщающих элементов зависят от площади поверхности обрабатываемой детали, что требует применения эмпирических соотношений при определении технологических факторов процесса ХТО для каждой садки обрабатываемых деталей.

Внедрение на передовых зарубежных предприятиях в конце 1990—начале 2000 г.г. вакуумной цементации, свободной от недостатков газовой и ионной цементации, обусловило поиск путей к разработке технологии вакуумной нитроцементации. Вместе с тем, данные процессы до настоящего времени в российской производственной практике не нашли применения. Основной причиной данного обстоятельства явилось относительно малое количество вакуумного оборудования ХТО и отсутствие разработанной технологии.

В настоящее время разработана технология подачи азотсодержащего газа на стадии нагрева перед вакуумной цементацией. Основной целью введения азота было ограничение роста зерна аустенита при науглероживании за счет предварительного введения в рабочую камеру аммиака на стадии нагрева. При этом введение активных носителей азота прекращали, когда садка достигала температуры цементации. Также предложен метод комбинированной обработки, состоящий из вакуумной цементации с последующим вакуумным азотированием после снижения температуры. Данный процесс обеспечивает ускоренное достижение заданных свойств, таких как твердость поверхности, эффективная толщина слоя, прочность и т.д. для низкосортной стали и стали, подвергнутой предварительному поверхностному упрочнению.

Указанные способы неизотермической термообработки трудно реализуемы в

заводской практике. Очевидно, что насыщенность диффузионного слоя азотом контролируется недостаточно точно. Кроме того, полученные польскими исследователями результаты не в полной мере гарантируют достаточную концентрацию азота в подповерхностной зоне. Данная схема является, по существу, комбинированной химико-термической обработкой. Поэтому проведение вакуумного азотирования либо не обеспечивает достаточной насыщенности слоя азотом, либо существенным образом увеличивает продолжительность процесса подобно обычному газовому азотированию.

Во второй главе изложены методики обработки и исследований.

Детали и опытные образцы из дисперсионно-твердеющей стали ВКС-10 подвергали вакуумной нитроцементации, высокому отпуску, закалке, кратному отпуску и обработке холодом (Рис. 2).

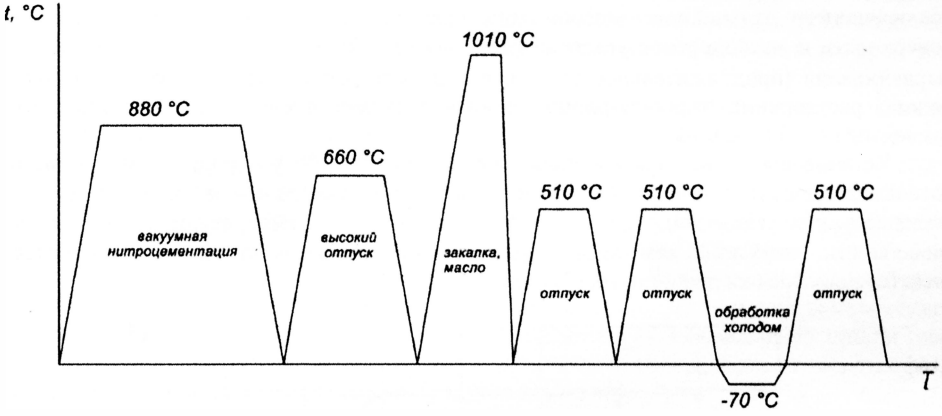


Рис. 2. Схема химико-термической и полной термической обработки образцов и зубчатых колес из стали ВКС-10

Насыщение проводили на вакуумной установке фирмы SECO/WARWICK S.A., дающей возможность проводить диффузионное насыщение и термическую обработку в бескислородных средах, исключающих образование дефектных структур. При этом процессы химико-термической и термической обработки проводили в одной камере; закалку проводили в потоке азота высокого давления. Оборудование обеспечивает точное регулирование технологических факторов процесса. В качестве углеродсодержащего газа использовали ацетилен, азотсодержащего—аммиак.

Металлографические и дюрометрические исследования выполняли известными методами. Насыщенность слоев углеродом и азотом определяли при послойном анализе методами сжигания и вакуум-плавления навесок стружки. Количество азота оценивали также косвенно—по количеству остаточного аустенита, которое определяли, используя микроструктурный и рентгеноструктурный анализ в фильтрованном кобальтовом излучении.

В третьей главе определены подходы к решению поставленной задачи реализации ВНЦ на основе впервые обоснованных закономерностей взаимодействия технологической атмосферы с металлической поверхностью, а также разработаны оптимальные режимы ВНЦ, рекомендованные для промышленного внедрения.

Технологический процесс вакуумной нитроцементации характеризуется совокупностью условно-постоянных (давление и температура процесса, режим подачи аммиака) и управляющих факторов, к которым относится временные режимы подачи ацетилена.

Как и вакуумная цементация, вакуумная нитроцементация проводится при циклической подаче ацетилена, обеспечивающей саморегулирование процесса. Циклическая подача предполагает чередование стадий активного насыщения (продолжительностью τ_a), в ходе которой происходит насыщение поверхности углеродом вплоть до образования практически сплошного карбонитридного слоя, исключающего дальнейшие диссоциацию ацетилена и аммиака на металлической поверхности и массоперенос углерода (и азота) из рабочей среды, и диффузионного выравнивания (продолжительностью $\tau_п$), в ходе которой происходит частичное или полное растворение карбонитридной корки с перераспределением насыщающих элементов вглубь металла.

Установлено, что при температуре около 880 °С углеродный и азотный потенциалы достаточно велики и обеспечивают эффективное совместное насыщение стали азотом и углеродом. При дальнейшем увеличении температуры азотирующая способность вакуумной атмосферы существенно снижается, а науглероживающая остается практически неизменной (Рис. 3).

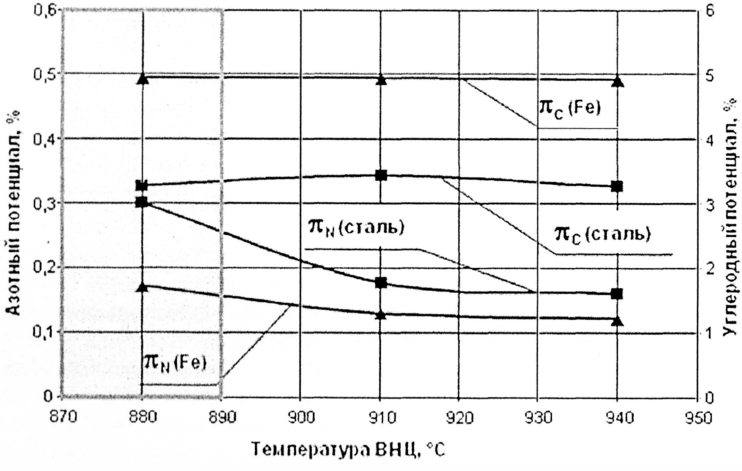


Рис. 3. Влияние температуры вакуумной нитроцементации на углеродный π_C и азотный π_N потенциалы, измеренные методом фольговой пробы

Таким образом, при проведении процесса вакуумной нитроцементации при температурах около 860-890 °С, когда уже обеспечивается стабильное насыщение стали углеродом, одновременно будет существовать достаточно активный массоперенос азота к обрабатываемой поверхности.

Аммиак может подаваться по двум схемам: циклической, подразумевающей чередование стадий насыщения и диффузионного выравнивания, и постоянной, при которой расход аммиака поддерживается на одном уровне.

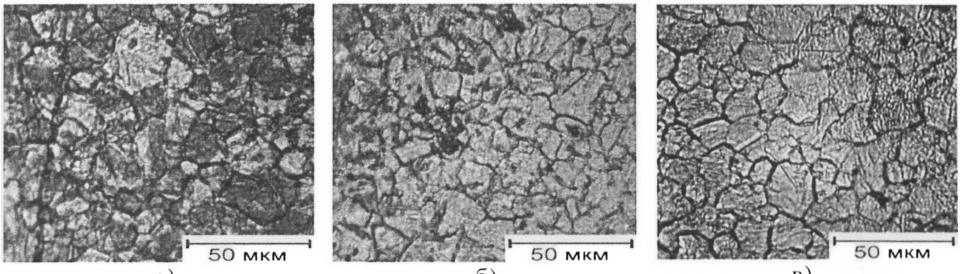
Поскольку азотирующая способность аммиака при температурах нитроцементации (см. Рис. 3) существенно меньше науглероживающей способности ацетилена, то очевидно, что подача аммиака должна осуществляться в течение более продолжительного времени, чем ацетилена.

Наиболее простым способом, обеспечивающим при прочих равных условиях повышенную насыщенность слоя азотом, является постоянная схема подачи аммиака, при которой его расход поддерживают на одном, неизменном в течение всего времени насыщения уровне.

Известно, что углерод выделяется на насыщаемой поверхности только в виде твердых фаз (аморфный углерод, пироуглерод, карбиды). В отличие от углерода, выделившийся при разложении аммиака азот может образовывать не только твердые фазы, но и молекулярную газообразную составляющую, десорбирующуюся с насыщаемой поверхности. Это обстоятельство определяет большую эффективность насыщения стали углеродом, чем азотом, при прочих равных условиях.

Для создания условий насыщения поверхности сталей азотом необходима такая организация циклической подачи технологических газов, при которой существенно сокращено время цикла подачи ацетилена и увеличено время пассивной стадии для диффузионной очистки значительной части насыщаемой поверхности от твердых фаз, преимущественно карбонитридов цементитного типа (Рис. 4).

Таким образом, при нитроцементации аммиак предлагается подавать постоянно, ацетилен—циклически с τ_a равной 2-м или 3-м минутам, а время диффузионной стадии $\tau_п$ принимать увеличенной до 50-60 мин.



а) б) в)

Рис. 4. Состояние поверхности образца стали ВКС-10 после подачи ацетилена и диффузионного выравнивания: а) стадия насыщения 2 мин; б) стадия насыщения 2 мин + диффузионная стадия 20 мин; в) стадия насыщения 2 мин + диффузионная стадия 60 мин; ×500

В ходе экспериментального выбора режимов для промышленного внедрения установлено следующее.

Толщина нитроцементованного слоя определяется общим временем диффузионного насыщения $\tau_{общ}$ и практически не зависит от схемы циклической подачи насыщающих газов. Режим циклирования оказывает влияние на строение заэвтектоидной зоны диффузионного слоя—толщину карбонитридной зоны, насыщенность ее углеродом и азотом, уровень и распределение твердости в ней.

При принятом значении общего времени насыщения $\tau_{общ}$ основным управляющим фактором становится временной режим подачи ацетилена и аммиака. Решающее значение имеют два фактора—время стадий цикла $\tau_а$ и $\tau_п$.

По результатам проведенных исследований разработаны режимы ВНЦ, обеспечивающие заданные параметры диффузионных слоев: $h_{кн}$—протяженность активной карбонитридной зоны; $h_{эфф}$—эффективная толщина диффузионного слоя, соответствующая суммарной концентрации насыщающих элементов, соответствующей 0,4 % масс.; концентрация углерода $C_{0,2}$ и азота $N_{0,2}$ на поверхности после удаления припуска (0,2 мм) на шлифование (Таблица 1). Режимы разработаны для двух типоразмеров зубчатых колес: а) при модуле зацепления 3,5 мм задана эффективная толщина диффузионного слоя, равная 0,9-1,2 мм; б) при модуле зацепления 2,0 мм задана эффективная толщина диффузионного слоя, составляющая 0,4-0,7 мм.

В Таблице 1 применена следующая система обозначений схемы циклирования при подаче ацетилена. Например, для режима № 1 4*(2/38)+3*(3/57) использовали две группы циклов. В первой группе из 4-х циклов использовали время подачи ацетилена $\tau_а$ равное 2 мин и время диффузионной стадии 38 мин; во второй группе из 3-х циклов время подачи ацетилена $\tau_а$ составляло 3 мин при времени диффузионной стадии 57 мин.

Таблица 1.

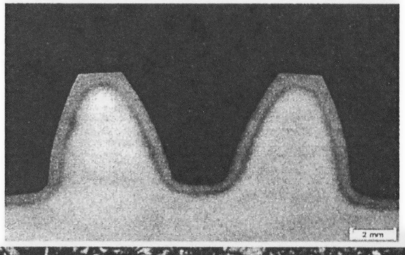
Параметры диффузионного слоя образцов-свидетелей, обработанных при температуре 880 °С в печи SECO/WARWICK S.A.

№ режима	Требуемая толщина слоя $h_{эфф}$, мм	Факторы режима обработки		Параметры диффузионного слоя образцов-свидетелей			
		$\tau_{общ}$, мин	Схема циклирования при подаче ацетилена	$h_{эфф}$, мм	$h_{кн}$, мм	$C_{0,2}$, %	$N_{0,2}$, %
1	0,4-0,7	300	4*(2/28)+3*(3/57) $\sum\tau_а$=17 минут	0,65	0,15	1,15	0,27
2	0,9-1,2	600	6*(2/28)+7*(3/57) $\sum\tau_а$=33 минуты	1,15	0,3	1,52	0,34

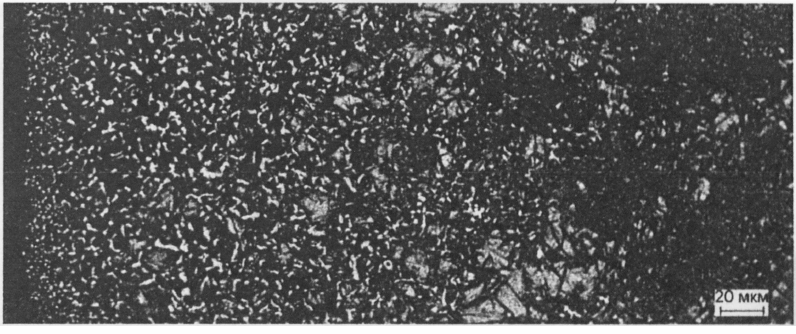
Разработанные режимы обеспечивают заданные значения эффективной толщины диффузионных слоев и протяженную карбонитридную зону в них. Кроме того, они обеспечивают получение концентрационных кривых насыщающих элементов, которые соответствуют предъявляемым требованиям по распределению углерода и азота (Рис. 5). Так концентрация азота превышает 0,15 % на расстоянии 0,2 мм от поверхности.

Рис. 5. Концентрационные кривые углерода и азота для нитроцементованного слоя стали ВКС-10 после насыщения по режиму № 2 (Таблица 1)

Толщина слоя по высоте зубьев (за исключением впадин и мест перекрестной диффузии на вершинах) равномерная. Это подтверждает возможность обеспечения высокого качества обработки при вакуумных процессах ХТО. Высокое качество обработки подтверждают результаты анализа структуры нитроцементованного слоя зубьев колес (Рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Макроструктура (а) и микроструктура (×500) поверхностной части нитроцементованного слоя (б) зубьев колес из стали ВКС-10 после обработки по режиму № 2 (Таблица 1) и высокого отпуска

В четвертой главе представлена математическая модель ВНЦ, компонентами которой являются:

– система дифференциальных уравнений, описывающих диффузионное перераспределение углерода, азота и хрома, как следствие II закона Фика:

$$\frac{\partial C_C}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_C^C \frac{\partial C_C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_N^C \frac{\partial C_N}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{Cr}^C \frac{\partial C_{Cr}}{\partial x}\right) - \frac{\partial C_C^K}{\partial \tau};$$

$$\frac{\partial C_N}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_N^N \frac{\partial C_N}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_C^N \frac{\partial C_C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{Cr}^N \frac{\partial C_{Cr}}{\partial x}\right);$$

$$\frac{\partial C_{Cr}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{Cr}^{Cr} \frac{\partial C_{Cr}}{\partial x}\right) - \frac{\partial C_{Cr}^K}{\partial \tau},$$

где τ—время процесса, x—расстояние от поверхности; C_C и C_{Cr}—концентрации углерода и хрома в твердом растворе, соответственно; C^K_C и C^K_{Cr}—концентрации углерода и хрома в карбидах; D^C_C, D^N_N и D^{Cr}_{Cr}—коэффициенты диффузии в аустените углерода, азота и хрома, зависящие от температуры процесса, концентрации насыщающих и легирующих элементов; $D^C_N = D^N_C$, D^N_{Cr} и D^C_{Cr}—коэффициенты диффузии, характеризующие взаимное влияние концентраций углерода и азота, азота и хрома, а также углерода и хрома, соответственно;

– начальные условия—при τ=0: $C_C=C^0_C$, C_N=0;

– граничные условия:

а) на стадии диффузионного насыщения углеродом (активной стадии)—

$$D_C^C \frac{\partial C_C(x=0)}{\partial x} + D_C^{Cr} \frac{\partial C_{Cr}(x=0)}{\partial x} + (1-P_K)\beta_C(\pi_C - C_C(x=0)) = 0,$$

где π_C и β_C—углеродный потенциал и коэффициент массопереноса С, определенные как регрессионные зависимости от температуры, P_K—доля карбонитридов на поверхности, через которые массоперенос С не происходит;

б) на стадии диффузионного выравнивания (пассивной стадии)—

$$\int_0^\infty (C_C + C_C^K)dx = const;$$

в) в течение всего времени процесса—при $x=\infty$: $C_C=C^0_C$; при x=0: $C_N=\pi_N$.

Коэффициенты диффузии углерода и азота для систем γ-железо—углерод и γ-железо—азот известны из литературных данных.

Коэффициент диффузии, характеризующий взаимное влияние азота и углерода рассчитывали по формуле:

$$D_C^N = D_N^C = D_C^C X_C + D_N^N X_N,$$

где X_C, X_N—атомные концентрации углерода и азота в стали.

Сравнение экспериментальных и расчетных концентрационных кривых подтверждает удовлетворительную адекватность модели (Рис. 7).

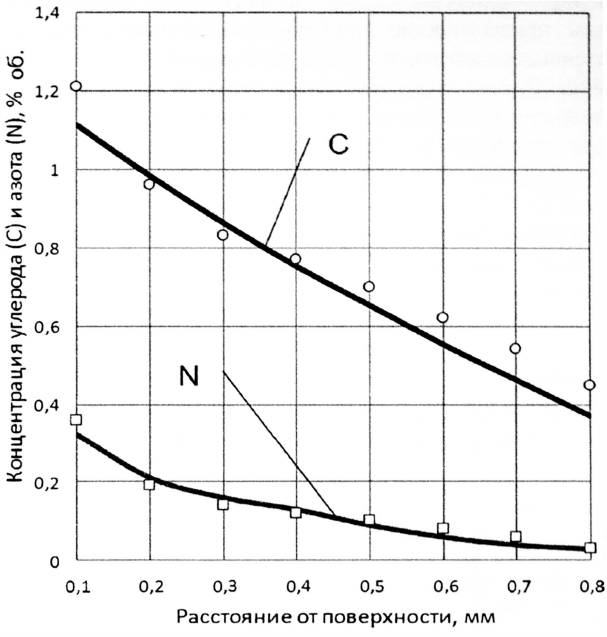


Рис. 7. Экспериментальные точки и расчетные концентрационные кривые углерода (C) и азота (N), соответствующие технологическому режиму ВНЦ № 2 (см. Таблицу 1)

По результатам проведенного при помощи модели анализа режимов ВНЦ установлено:

- увеличение соотношения стадий подачи в рабочую камеру ацетилена и стадий диффузионного выравнивания приводит к росту концентрации углерода на поверхности и менее значительному увеличению эффективной толщины слоя;
- увеличение частоты циклирования приводит к получению более плавной концентрационной кривой углерода при некотором снижении концентрации углерода в приповерхностной зоне при практически постоянной эффективной толщине диффузионного слоя;
- изменение временных факторов без изменения общей продолжительности процесса не оказывает заметного влияния на концентрацию азота в слое, но влияет на особенности строения карбонитридной фазы;
- при увеличении продолжительности процесса растет насыщенность слоя как углеродом, так и азотом по всей его протяженности, соответственно возрастает эффективная толщина слоя, которая увеличивается в зависимости от общей продолжительности процесса насыщения по закону, близкому к параболическому.

Учитывая изложенное, установлено, что наиболее оптимальным является вариант режима ВНЦ, предусматривающий две группы периодических циклов.

Сначала при увеличенных стадиях активного насыщения образуется большое число дисперсных частиц карбидов. Затем целесообразно увеличить как общую продолжительность цикла, так и диффузионных стадий, сократив, тем самым, соотношение длительности активной и пассивной стадий.

На основании изложенных закономерностей предложены рекомендации по оптимизации технологических факторов для приоритетных эксплуатационных свойств диффузионных слоев после ВНЦ (Таблица 2).

Таблица 2.

Рекомендации по оптимизации технологических факторов ВНЦ для приоритетных эксплуатационных свойств диффузионных слоев

Основные эксплуатационные свойства	Требования к характеристикам диффузионных слоев	Рекомендации по оптимизации технологических факторов ВНЦ
Сопротивление абразивному и адгезионному изнашиванию	Повышение объемной доли карбонитридной фазы на поверхности	Увеличение относительной продолжительности активной стадии цикла по сравнению с пассивной
Сопротивление циклическим нагрузкам при изгибе	Диффузионные слои с минимальной долей мелкодисперсной карбонитридной фазы; ограниченная протяженность диффузионного слоя	Увеличение относительной продолжительности пассивной стадии цикла по сравнению с активной
Контактная выносливость	Протяженные диффузионные слои с увеличенной площадкой высокой насыщенности и оптимальная объемная доля карбонитридной фазы в приповерхностной области	1-я группа циклов: с увеличенным числом циклов и $\tau_а/\tau_п$ 2-я группа циклов: с уменьшенным числом циклов и $\tau_а/\tau_п$

В пятой главе выполнена расчетная оценка эксплуатационных свойств теплостойкой стали, упрочненной ВНЦ, и допустимых нагрузок, предшествующих заеданию, в сравнении с цементованным состоянием.

По результатам расчетов по моделям Анселла-Ленеля, Келли и Келли-Николсона установлено, что теоретический предел текучести на сдвиг нитроцементованного слоя стали ВКС-10, благодаря присутствию высокодисперсных частиц нитридов размером 30-40 нм, превосходит предел текучести цементованного более чем на 35 % и превышает 2600 МПа, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

По критерию сопротивления заеданию диффузионные слои в стали ВКС-10, упрочненной ВНЦ, допускают более высокие нагрузки, чем цементованные слои в традиционной теплостойкой стали 20Х3МВФ-Ш, в 1,4 раза (при частоте вращения шестерен 5 000 об/мин) и в 2 раза (при 20 000 об/мин).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Впервые реализовано на практике совместное насыщение углеродом и азотом в атмосферах низкого давления (вакуумная нитроцементация) высоконагруженных зубчатых колес для газотурбинных двигателей, изготовленных из комплексно-легированной стали мартенситного класса, обеспечивающее требуемую концентрацию азота в приповерхностной области при задаваемой из условий контактной выносливости толщине протяженного насыщенного углеродом диффузионного слоя. Таким образом, выполнены новые научно обоснованные технологические разработки, имеющие существенное значение для развития газотурбостроения, а именно:

1. Впервые для атмосфер низкого давления обоснованы условия совместного насыщения углеродом и азотом высоконагруженных зубчатых колес из комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш и обеспечено по сравнению с вакуумной цементацией той же стали повышение абразивной и адгезионной износостойкости в три раза, изгибной выносливости на 30 %, контактной выносливости на 10 % и достигнуто уменьшение опасности схватывания.

2. Экспериментально установлен рациональный температурный интервал (860-900 °С) интенсивного совместного насыщения углеродом и азотом в атмосферах низкого давления, обеспечивающий заданную насыщенность азотом не менее 0,25-0,4 % при одновременной эффективной диссоциации ацетилена.

3. Установлено, что при повышении температуры процесса вакуумной нитроцементации свыше 900 °С азотный потенциал уменьшается, при этом углеродный потенциал существенно не изменяется, как следствие уменьшается насыщенность диффузионного слоя азотом (до 0,21 % и менее).

4. Разработаны и обоснованы режимы подачи технологических газов (ацетилена и аммиака): рекомендована циклическая подача ацетилена при времени активного насыщения не более 2-3 минут с целью исключения пересыщения и образования избытка карбидов (карбонитридов); время диффузионной стадии целесообразно увеличить до 50-60 минут для более полной очистки поверхности от карбидной (карбонитридной) фазы, при постоянной подаче аммиака для обеспечения насыщенности азотом не менее 0,25-0,4 %.

5. Установлено, что дополнительное насыщение азотом до заданной концентрации при вакуумной нитроцементации комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш способствует получению азотистого аустенита, чем обеспечивает при его распаде в процессе термической обработки получение дисперсных частиц карбонитридов, что приводит к повышению таких эксплуатационных характеристик материала, как изгибная и контактная выносливость.

6. Выполнен эмпирический анализ влияния факторов технологического процесса на диффузионный массоперенос углерода и азота, что дало возможность разработать новые выражения граничных условий математической модели процесса насыщения, в частности, экспериментально определены значения азотного и углеродного потенциала, а также коэффициенты массопереноса углерода и азота. Адекватность модели с оригинальными граничными условиями проверена экспериментально.

7. Установлено, что образование развитой карбонитридной зоны и мелкодисперсных нитридных частиц в диффузионном слое комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш, после вакуумной нитроцементации и закалки, согласно теоретическим расчетам по известным моделям упрочнения, обеспечивает

достижение значения предела текучести не менее 2600 МПа, а согласно экспериментальным данным, составляет 2650-2750 МПа, что обеспечивает требуемое сопротивление упрочненного слоя статическим ($\sigma_T \geq 2500$ МПа) и динамическим ($\sigma_R \geq 1100$ МПа) нагрузкам.

8. Вакуумная нитроцементация комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш обеспечивает повышение допустимых нагрузок без опасности заедания по сравнению с традиционной теплостойкой сталью 20Х3МВФ-Ш, подвергнутой цементации, на 35 % для зубчатых колес большого модуля (4 мм) и до 75 % – малого модуля (2,5 мм).

9. На основе экспериментальных данных и результатов расчета по математической модели процесса насыщения проведен анализ влияния совокупности временных факторов ВНЦ на характеристики диффузионных слоев. Показаны технологические возможности нового процесса ВНЦ по получению диффузионных слоев с заданными параметрами: установлено, что увеличение общего времени насыщения приводит к росту эффективной толщины слоя и толщины карбонитридной зоны по зависимости, близкой к параболической; увеличение соотношения времени стадии насыщения и диффузионной стадии, а также числа циклов способствует в основном повышению насыщенности приповерхностной части слоя при небольшом росте его эффективной толщины.

10. На основе анализа экспериментально установленных закономерностей формирования диффузионных слоев в зависимости от технологических факторов ВНЦ разработаны режимы вакуумной нитроцементации комплексно-легированной теплостойкой стали 13Х3Н3М2ВФБ-Ш, которые переданы ВИАМ для промышленного опробования на предприятиях отрасли при упрочнении зубчатых колес газотурбинных двигателей.

Продолжением данной работы является распространение дальнейших исследований на другие материалы, подвергаемые упрочняющей ХТО, а также детали иного назначения, работающие в схожих условиях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. М.М. Лашнев. Управление процессом вакуумной цементации (нитроцементации) теплостойких сталей //Металлургия машиностроения. 2011. № 4. С. 45-46 (0,125 п.л.).

2. М.М. Лашнев, М.Ю. Семенов, А.Е. Смирнов. Оптимизация технологических факторов вакуумной нитроцементации //Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/330997.html (дата обращения 05.02.2017).

3. Кинетика массопереноса углерода и азота в ионизированных атмосферах /М.М. Лашнев [и др.] //Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 9. DOI: 10.7463/0912.0452489 (дата обращения 05.02.2017).

4. Лашнев М.М., Смирнов А.Е., Семенов М.Ю. Применение вакуумной нитроцементации для повышения сопротивления схватыванию зубчатых колес из стали ВКС-10 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 1(691). С. 29-33 (0,3125 п.л./0,105 п.л.).

5. Оценка характеристик упрочнения теплостойкой стали, подвергнутой комбинированной химико-термической обработке /М.М. Лашнев [и др.] //Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 7(697). С. 3-9 (0,4375 п.л./0,09 п.л.).
6. Математическая модель вакуумной нитроцементации теплостойкой стали ВКС-10 /М.М. Лашнев [и др.] //Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. DOI: 10.7463/0813.0569132 (дата обращения 25.03.2015).
7. Применение нитроцементации для повышения износостойкости зубчатых колес из комплексно-легированных сталей мартенситного класса /М.М. Лашнев [и др.] //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 4. С. 53-58 (0,375 п.л./0,1 п.л.).
8. VNC_Sim_VKS10 Математическое моделирование процесса вакуумной нитроцементации стали ВКС-10: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015614473 РФ / М.Ю. Семенов, М.М. Лашнев; заявл. 18.02.2015; зарегистрировано 20.04.2015.
9. Лашнев М.М., Смирнов А.Е., Семенов М.Ю. Управление процессом вакуумной нитроцементации теплостойкой стали // Сб. докл. Международной научной конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов». М.:«Машиностроение». 2012. Т. 2. С. 123-132 (0,625 п.л./0,21 п.л.).
10. Поверхностное упрочнение высоконагруженных зубчатых колес ГТД из комплексно-легированных теплостойких сталей путем вакуумной нитроцементации /М.М. Лашнев [и др.] //Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД: материалы научно-технической конференции 28.09.2016. М.: ФГУП ВИАМ. 2016. 1 электрон. опт. диск (CD-R).
11. Лашнев М.М. Управление процессом вакуумной цементации (нитроцементации) теплостойких сталей // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. С. 142-144 (0,1875 п.л.).

Подписано к печати 26.04.18. Заказ № 265
Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5,стр.1
(499) 263-62-01