

ш 86734

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

КАРПУХИН СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ АЗОТИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА
КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДВАРИ-
ТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ 16Х2Н3М2БАО-Ш

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка
металлов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1992

РР

м.т.у

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном Техническом Университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор
АРЗАМАСОВ Б.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
ГЕРАСИМОВ С.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
СОРОКИН Г.М.

- кандидат технических наук, доцент
ГЯБЧЕНКО Е.В.

Ведущее предприятие - Калужский турбинный завод

Защита диссертации состоится 21 декабря 1992 года на заседании специализированного совета К 053.15.13 Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по адресу:

С диссе
Н.Э. Баумане

МГТУ им.

Автор

специе
кандид

ин И.Н.

Подписано к
Заказ № 57

Ю экз.
Баумана

И 86734

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время поверхностное упрочнение азотированием широко применяется для повышения твердости и износостойкости стальных деталей машин. Преимуществом азотированного слоя является высокая твердость и износостойкость, превосходящая износостойкость, например, цементованного слоя в 2-4 раза. Азотирование обеспечит минимальные деформации деталей и в связи с этим, как правило, является заключительной операцией всей технологической цепочки изготовления детали.

Вместе с тем азотированный слой слабо противостоит контактному разрушению и азотирование не используется для деталей, работающих при контактных напряжениях свыше 700-800 МПа, так как в соответствии с ГОСТ 21354-87 предел контактной выносливости азотированных сталей в $\sim 1,5$ раза ниже цементованных и не превышает 1050 МПа. Поэтому высоконапряженные высокоточные детали машин, такие как зубчатые колеса, изготавливаются с применением цементации и требуют последующего шлифования. Трудоемкость шлифования зубчатых колес составляет до 40% от всей трудоемкости их изготовления. Повышение предела контактной выносливости азотируемых сталей является актуальной задачей, так как позволит перевести часть нагруженных зубчатых колес на упрочнение азотированием, которое сохраняет точность размеров, формы и шероховатость поверхности, полученных в процессе высокоскоростного тонкого зубофрезерования, соответствующих 5-6 степени точности по ГОСТ 1643-81.

Однако вопрос контактной усталости азотированных сталей изучен недостаточно. В этой связи, с металловедческой точки зрения, особую актуальность приобретает изучение структурных аспектов контактной усталости азотированных сталей. Решающее влияние на структуру азотированного слоя и сердцевины ("композиционного материала азотированный слой - матрица") оказывает химический состав стали, технология предварительной термической и химико-термической обработок. В настоящем исследовании сделана попытка на каждой из этих операций и всех в комплексе создать структуру азотированной стали, наилучшим образом противостоящей контактной усталости, и рекомендовать сталь способную обеспечить заданную структуру.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось изучение влияния структуры азотированного слоя на контактно-усталостные характеристики и разработка технологических процессов предвари-

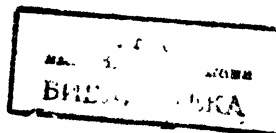
НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1086734

Карпунин С.Д. Исследования

1-



тельной термической обработки и ионного азотирования, обеспечивающих повышение контактной выносливости азотированных сталей.

В задачи исследования входило:

1. Выявление области силовых и геометрических параметров азотируемых зубчатых колес на основе анализа существующих представлений о механизме контактной усталости.

2. Обоснование выбора стали 16Х2Н3МФБАД-Ш (ВКС-7) для азотируемых деталей машин, работающих в условиях высоких контактных напряжений.

3. Исследование влияния размера аустенитного зерна на структуру и контактно-усталостные характеристики азотированного слоя и разработка технологии предварительной термической обработки стали ВКС-7 с целью получения мелкого зерна аустенита.

4. Исследование влияния технологических факторов ионного азотирования на структуру, фазовый состав и свойства азотированного слоя и разработка технологии ионного азотирования для обеспечения максимальной контактной выносливости стали ВКС-7.

В задачи работы входило также промышленное опробование технологических решений, направленных на повышение ресурса работы зубчатых колес и снижения трудоемкости их изготовления.

Автор защищает:

1. Научно обоснованный выбор стали для азотирования деталей машин, работающих в условиях высоких контактных напряжений, на основе установленных причин низкой контактной выносливости азотируемых сталей перлитного класса.

2. Результаты экспериментальных исследований по контактной усталости азотированной стали 16Х2Н3МФБАД-Ш:

- установленные закономерности контактной выносливости азотированной стали в зависимости от исходной структуры перед азотированием;

- установленные закономерности контактной выносливости азотированной стали в зависимости от структуры диффузионного слоя и технологических параметров ионного азотирования, формирующих эту структуру.

Научная новизна работы.

1. Научно обоснована низкая контактная выносливость широко используемых конструкционных улучшаемых сталей перлитного класса типа 38Х2М0А.

2. На основе электронномикроскопических исследований выявлено положительное влияния никеля в азотируемых сталях на рас-

пределение нитридных и карбидных фаз как в диффузионном слое, так и в сердцевине.

3. Установлено влияние размера аустенитного зерна на контактную выносливость азотированной стали.

4. Выявлена эффективность способов и режимов измельчения аустенитного зерна предварительной термической обработкой.

5. Установлена закономерность изменения контактной выносливости азотированных сталей в зависимости от плотности и размеров выделений нитридов, а также величины микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора.

Практическая ценность и реализация результатов работы в промышленности. Разработаны оригинальная технология предварительной термической обработки заготовок и технология ионного азотирования высоконапряженных азотированных зубчатых колес из рекомендованной стали ВКС-7, что позволило повысить предел контактной выносливости азотированных сталей в $\sim 1,5$ раза.

В соответствии с разработанной технологией упрочнения изготовлена партия зубчатых колес опытного судового планетарного редуктора в НПО "Машпроект" г. Николаева. Проведенные испытания редуктора по полной программе подтвердили эффективность предложенных подходов. Техническая новизна разработанных технологий подтверждена авторскими свидетельствами на изобретения.

В целом в работе впервые доказана практическая возможность использования поверхностного упрочнения азотированием для изготовления высоконапряженных зубчатых колес.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждены на Всесоюзных научно-технических конференциях "Новые технологии термической и химико-термической обработок деталей машин и инструмента" (Тольятти, 1986 г.), "Современные методы расчета и проектирования зубчатых передач" (Уфа, 1987 г.), "Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической и химико-термической обработок деталей машин и инструмента" (Махачкала 1990 г.), научных семинарах кафедры "Материаловедение и термическая обработка" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы, получены 2 авторских свидетельства и 2 положительных решения по заявкам на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 16 таблиц; состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 128

наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе теоретического анализа напряжений, возникающих при контактном сжатии двух тел, показано, что возможны два случая контактных разрушений: глубинное разрушение, когда трещина образуется под слоем или на определенной глубине от поверхности, как правило, на глубине действия максимальных приведенных касательных напряжений; поверхностное разрушение, берущее начало на поверхности упрочненного слоя.

Исходя из формул энергетической теории прочности и гипотезы максимальных приведенных касательных напряжений для случая первоначального контакта по линии, используя установленную Р.Р.Гальпером зависимость между глубинными контактными разрушениями и свойствами азотированного слоя, показано, что для большой группы высоконапряженных деталей машин, в том числе зубчатых колес диаметром до 500 мм, контактная выносливость определяется поверхностными контактными разрушениями, проблема повышения сопротивляемости которым и рассматривается в работе.

Анализ существующих гипотез возникновения и развития усталости в металлах и сплавах позволил выявить два принципиальных положения: во-первых, возникновение и развитие усталостной трещины связано с пластической деформацией материала (движением дислокаций) в микрообъемах; во-вторых, любая неоднородность структуры является концентратором напряжений и вероятным источником возникновения усталостной трещины.

Исходя из исследований О.Н.Романива, Л.А.Эрasmusа многоцикловой усталости высокопрочных сталей с мартенситной структурой с высоким уровнем напряжений, можно предположить, что усталостная выносливость азотированного слоя, имеющего высокую твердость, высокий уровень внутренних остаточных напряжений, должна определяться стадией зарождения трещины.

Для стадии инкубационного периода усталостного разрушения решающими являются дислокационные реакции - движение дислокаций, их взаимодействие между собой и с другими структурными несовершенствами, а также повышение плотности дислокаций до критических значений на препятствиях. Таким образом возникают области с высокой концентрацией напряжений, часто превышающих макроскопические значения прочности сплава. Релаксация возникающих пиковых напряжений возможна либо в результате прорыва барьеров и возник-

новения новых очагов микропластичности в смежных объемах, либо за счет образования зародышей хрупких трещин в результате ухода дислокаций в полость образовавшейся субмикротрещины. Период развития микротрещин до размеров макротрещин и их развитие до разрушения детали является заключительным этапом процесса.

Итак, накопление усталостной повреждаемости связано с локализацией деформации в микрообъемах, что требует создания структур способных сопротивляться движению дислокаций и возникновению остаточной микродеформации.

Согласно работам В.И.Саррака очагами микропластической деформации в высокопрочных сталях служат участки с повышенной концентрацией внутренних напряжений второго рода. Суммируясь с внешними напряжениями, микронапряжения способствуют локальному перенапряжению отдельных микрообъемов и ранней микротекучести.

Процесс азотирования позволяет создавать в слое барьеры для движения дислокаций с различным механизмом их торможения: от точечных препятствий в виде растворенных атомов азота в решетке α -железа, до зон Гинье-Престона и некогерентных нитридных частиц, которые одновременно формируют структурную неоднородность азотированной стали, порождая совокупность концентраторов напряжений различной "мощности". Следовательно, изменяя структуру азотированного слоя за счет подбора химического состава стали, разработки технологии предварительной термической и химико-термической обработки, представляется возможным воздействовать на контактно-усталостные характеристики азотированной стали.

Дальнейшие исследования связаны с изучением зависимости контактно-усталостных характеристик от структуры "композиционно-го материала азотированный слой - матрица".

Во второй главе приведено описание оборудования и методики исследований. Объектами исследования служили стали перлитного класса (38Х2МД) и мартенситного класса (16Х2Н3МФБАД, 38ХН3МФА, 10Х3ГНМФА), используемые в качестве азотируемых, и цементуемая сталь 16Х2Н4ВА. Наряду со сталями исследовались специально выплавленные сплавы на основе железа с 4 % хрома и никеля от 0 до 3 %. Азотирование проводилось в плазме тлеющего разряда на опытно-промышленной установке типа ИОН-30 в различных газовых средах и в шахтных печах в среде частично диссоциированного аммиака в заводских условиях.

В работе проводился качественный фазовый рентгеноструктурный анализ, а также определялась величина областей когерентного

рассеяния и микродеформаций кристаллической решетки α -твердого раствора. Съемка рентгенограмм осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3. Для определения величины блоков и микродеформации в работе использовался метод гармонического анализа формы линий рентгенограмм при разложении их профиля в ряды Фурье.

Электронномикроскопическое исследование азотированного слоя и матрицы методом тонких фольг и угольных экстракционных реплик на просвет проводилось на электронных микроскопах TESLA BS-540 и JEOL-200 CX. Использовались как метод монокристаллической микродифракции, так и методы светлопольного и темнопольного контраста.

Фрактографическое исследование изломов азотированных образцов проводилось методом сканирующей электронной микроскопии при формировании изображения вторичными электронами на растровом электронном микроскопе TESLA BS-340.

Испытания на контактную усталость проводились в соответствии с ГОСТ 25.501-78 на машинах МКВ-К с точечным контактом по схеме качения без проскальзывания для определения долговечности при напряжении $\sigma_{zmax} = 5000$ Н. Для построения кривой контактной усталости при линейном контакте использовались роликовые стэнды, работающие по схеме качения с проскальзыванием.

В третьей главе обоснован выбор стали для азотирования зубчатых колес, работающих с высокими контактными напряжениями.

Анализ литературных данных и экспериментальные результаты работы позволили установить влияние легирующих элементов на структуру и свойства азотированного слоя. Для получения азотированного слоя способного наилучшим образом противостоять контактному разрушению сталь должна содержать минимально возможное количество углерода для уменьшения вероятности образования хрупкого пористого слоя ϵ -фазы. Суммарное содержание нитридообразующих элементов достаточно в пределах 3-4% для получения высокого уровня твердости азотированного слоя. Дальнейшее повышение количества этих элементов не приводит к существенному росту твердости, но заметно снижает глубину азотированного слоя. Нежелательно легирование стали алюминием, который способствует расширению области гомогенности высокоазотистой ϵ -фазы.

В результате исследований тонкой структуры модельных сплавов Fe-4 %Cr и Fe-4 %Cr-3 %Ni, азотированных при температуре 520 °C в печи в течение 60 часов, установлено положительное влияние легирования никелем на однородность выделяющихся в процессе азотирования нитридов хрома. В сплаве без никеля наряду с равно-

мерно распределенными нитридами по телу зерна размером 3-5 нм, плотностью $\rho = (0,8-1,2) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, наблюдаются цепочки крупных нитридов, выделившихся на несовершенствах кристаллической решетки α -твердого раствора (границах зерен, блоков, дислокациях) размером 10-30 нм. В сплаве с 3% никеля наблюдается более однородное распределение частиц нитридной фазы размером 3-8 нм и плотностью $\rho = (2,0-2,2) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Более равномерное выделение нитридов хрома в модельном сплаве Fe-4 %Cr-3 %Ni по сравнению со сплавом Fe-4 %Cr, возможно, связано с замедлением никелем диффузионной подвижности атомов хрома, что приводит к появлению большего числа кластеров - зародышей нитридной фазы, образующихся по твердорастворному механизму, требующему диффузии как атомов азота, так и атомов нитридообразующих элементов.

Исследования широко применяемой при азотировании стали 38Х2М0А позволили объяснить ее низкую контактную выносливость двумя основными причинами: во-первых, чрезвычайно большой величиной микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора ($\epsilon_1 = 0,0040 \pm 2 \times 10^{-4}$), которая связана с образованием преимущественно когерентных матричных выделений и соизмерима с микродеформацией в закаленных цементованных сталях, и, во-вторых, выделением на границах исходных аустенитных зерен карбидных и нитридных фаз. Оказалось, что кроме γ' -фазы по границам зерен образуется цементитная сетка, как в азотированном слое, так и в сердцевине.

Выявленные особенности структуры приводят к ослаблению межатомных связей по границам исходных аустенитных зерен, возникновению дополнительных напряжений вследствие объемных и размерных изменений формы и объясняют пониженное сопротивление хрупкому разрушению стали. Фрактографические исследования изломов азотированного слоя подтвердили данный вывод: разрушение в слое происходит хрупко, трещина распространяется по границам бывших аустенитных зерен по механизму интеркристаллитного скола.

Изучение структуры азотированной стали 38ХН3МФА показало, что на границах исходных аустенитных зерен этой стали как в азотированном слое, так и в сердцевине отсутствует цементитная сетка, несмотря на такое же количество углерода как в стали 38Х2М0А. Предполагается, что повышение однородности структуры связано с выделением никеля на границах зерен.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что для повышения контактной выносливости азотированных деталей целесо-

образно применять малюглеродистые, теплостойкие стали мартенситного класса, повышенная дефектность структуры которых приводит к преимущественному образованию некогерентных выделений нитридных фаз и, соответственно, к меньшей величине микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора, легированных никелем, что способствует повышению однородности выделения карбидных и нитридных фаз как в азотированном слое, так и в сердцевине.

Анализ сталей, используемых в судостроительной промышленности, где предполагалось опробование результатов работы, с учетом требований как к азотированному слою, так и дополнительных требований к матрице - высокая теплостойкость, прочность, прокаливаемость, наследственная мелкозернистость, - позволил рекомендовать теплостойкую сталь мартенситного класса 16X2H3MФБАЮ-Ш (ВКС-7), разработанную в ВИАме в качестве цементуемой и наилучшим образом удовлетворяющую требуемому комплексу свойств "композиционного материала азотированный слой-матрица".

Электронномикроскопические исследования азотированной стали ВКС-7 подтвердили положительное влияние легирования никелем, которое приводит к более равномерному выделению нитридов легирующих элементов, образовавшихся по твердорастворной реакции в диффузионном слое и отсутствию выделений цементитной сетки по границам исходных аустенитных зерен.

Мартенситная структура матрицы приводит к уменьшению величины микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора ($\epsilon_1 = 0,0028 \pm 2 \times 10^{-4}$) в 2 раза по сравнению со сталью 38X2MMA при том же уровне упрочнения после азотирования.

Отсутствие выделений по границам хрупкой γ'_1 -фазы, уменьшение глубины проникновения развитой нитридной сетки из γ' -фазы по сравнению со сталью 38X2MMA и отсутствие цепочек крупных выделений цементита по границам зерен приводит, как показали фрактографические исследования изломов, к более вязкому, квазихрупкому транскристаллитному развитию трещины в азотированном слое.

При температуре азотирования 540 °С сталь ВКС-7 обеспечивает получение азотированного слоя глубиной до 0,7 мм, при этом твердость поверхности составляет 850 HV5, эффективная толщина слоя с твердостью до 500 HV5 составляет 0,35-0,4 мм.

Сталь ВКС-7 получают методом открытой выплавки с последующим электрошлаковым переплавом, что резко снижает количество неметаллических включений в стали и, как показали работы В.М.Нестерова, приводит к возрастанию ее контактной выносливости.

В четвертой главе исследовано влияние предварительной термической обработки на контактную выносливость стали ВКС-7.

В работах Р.Р.Гальпера установлена однозначная связь между прочностью сердцевины азотированной стали, формирующейся в процессе предварительной термической обработки, и контактной выносливостью. Однако технология изготовления азотированных деталей предусматривает большой объем механической обработки после предварительной термической обработки, что определяет, учитывая современные возможности металлообрабатывающего инструмента и оборудования, максимальную твердость сердцевины стали не более 39 HRC₉ ($\sigma_{\text{в}} \approx 1260$ МПа).

Рекомендованная сталь ВКС-7 предложена ВИАМОм в качестве цементуемой, поэтому в результате исследования влияния температуры заковки и отпуска на механические свойства стали разработана технология предварительной термической обработки, обеспечивающая получение требуемых механических свойств ($\sigma_{\text{в}} = 1283$ МПа, $\delta = 15,0$ %, $\psi = 63,2$ %, $a_{\text{ч}} = 89$ Дж/см²) - заковка 900 °С, масло, отпуск 600 °С в течение 2 часов.

В судостроительной промышленности большинство зубчатых колес получают из поковок, вследствие чего возможно образование крупного и неоднородного по размеру зерна аустенита по сечению поковки. Поэтому основное внимание было уделено изучению влияния размера исходного зерна аустенита на структуру и свойства стали ВКС-7 и разработке способов измельчения зерна.

Для изучения влияния размера исходного зерна аустенита необходимо было получить разную величину аустенитного зерна стали ВКС-7. С этой целью использовали различные температуры заковки и скорости нагрева под заковку.

Установлено, что при печном нагреве до температуры 1100 °С происходит восстановление исходного зерна аустенита (№ 7-9) при фазовом α - γ превращении, то есть проявляется явление структурной наследственности. Росту зерна препятствуют мелкодисперсные выделения карбидов (VC), карбонитридов (V(CN)), нитридов (VN, AlN), что подтверждается электронномикроскопическими исследованиями. Нагрев выше температуры 1100 °С вызывает коагуляцию и в дальнейшем растворение этих частиц, что приводит к росту аустенитного зерна до № 5-6 при температуре 1200 °С.

При увеличении скорости нагрева повышается температура фазовых превращений, но снижается температура рекристаллизации за счет фазового наклепа при α - γ фазовом переходе. При индукционном

нагреве под закалку токами высокой частоты получили зерно № 12-13 при температуре 900 °С.

Исследования азотированных слоев образцов стали ВКС-7 с размерами аустенитных зерен № 5-6 (60-40 мкм), № 8-9 (20-15 мкм), № 12-13 (5-3 мкм) показали аналогичные фазовый состав поверхности, распределение твердости по толщине диффузионного слоя. Твердость сердцевины образцов с ростом зерна увеличивается до 40 НРС, что связано с большей растворимостью карбонитридов легирующих элементов и переходе их в твердый раствор при повышении температуры закалки и, соответственно, с более сильным эффектом вторичного твердения при дальнейшем высоком отпуске.

Подтверждена теоретическая зависимость глубины проникновения прожилков γ' -фазы в азотированном слое от размера зерна: с увеличением размера зерна от № 12-13 до № 5-6 толщина замкнутой нитридной сетки увеличивается от 23 до 90 мкм.

Электронномикроскопические исследования тонких фольг выявили повышение однородности распределения нитридов легирующих элементов прежде всего по границам зерен: уменьшения плотности распределения частиц и их размеров, что можно объяснить резким увеличением площади высокоугловых и малоугловых границ и, соответственно, увеличением путей граничной диффузии азота (при уменьшении размера зерна от № 5-6 до № 12-13 площадь границ зерен возрастает более чем в 70 раз).

Рентгеноструктурные исследования по определению величины микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора в азотированном слое выявили их увеличение ~ в 1,5 раза при увеличении зерна от № 12-13 до № 5-6, что подтверждает вывод о возрастании неоднородности микропластической деформации в данном случае.

Фрактографические исследования изломов азотированных образцов обнаружили уменьшение размеров фасеток квазискола в азотированном слое в ~ 3 раза при уменьшении размера зерна в ~ 12 раз, что, очевидно, связано с увеличением барьеров распространению трещины (границ зерен, реек мартенсита, выделений нитридов на дефектах кристаллической решетки матрицы).

Проведенные структурные исследования позволили предположить увеличение сопротивления усталостным разрушениям азотированного слоя при уменьшении размера зерна, что и подтвердили контактные испытания на машине МКВ-К образцов стали ВКС-7. При увеличении размера зерна от № 12-13 (5-3 мкм) до № 5-6 (60-40 мкм) контакт-

ная долговечность N_{50} уменьшилась с 32,7 млн.циклов до 9,36 млн.циклов.

Разработаны различные способы получения мелкого зерна стали ВКС-7 с последующим азотированием: методом закалки с нагрева ТВЧ, закалкой с нагрева лазером, на которые поданы заявки на изобретение и получены авторские свидетельства и положительные решения. Предложена технология циклической закалки и отпуска для измельчения зерна стали ВКС-7: 1-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 975 °С, 1 час, масло; 2-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 900 °С, 1 час, масло; 3-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 900 °С, 1 час, масло, отпуск 600 °С, 2 часа. На данный способ разработана технологическая инструкция на НПО "Машпроект", в соответствии с которой обработана партия азотируемых зубчатых колес судового редуктора.

В пятой главе приведены результаты исследования влияния режимов ионного азотирования на структуру и контактную выносливость сталей.

Азотирование, как заключительная операция технологического процесса изготовления деталей, формируя определенную структуру азотированного слоя, создает тот комплекс свойств, который и определяет способность детали сопротивляться контактным разрушениям. Варьируя технологическими параметрами процесса - составом насыщающей среды, давлением, температурой, временем - можно воздействовать на структуру и свойства азотированного слоя.

Исследования влияния состава насыщающей среды проводились в азотосодержащей атмосфере с различным содержанием водорода: в среде полностью диссоциированного аммиака и в азоте особой чистоты ГОСТ 9293-71, на образцах сталей ВКС-7, 10ХЗГНМФА. Установлено, что введение в азотную среду водорода способствует увеличению толщины высокоазотистой ϵ -фазы. Результаты усталостных испытаний при напряжении $\sigma_{\text{max}} = 5000$ Н показали снижение долговечности как образцов из стали ВКС-7, так и из стали 10ХЗГНМФА, азотированных в среде с водородом, на 30% и 25% соответственно, по сравнению с образцами азотированными в азотной среде без водорода, что можно объяснить отрицательным влиянием хрупкой ϵ -фазы.

Изучение влияния давления азота на фазовый состав нитридного фильма при различных температурах ионного азотирования позволило рекомендовать оптимальные величины давления, исходя из условия отсутствия или минимальной толщины ϵ -фазы.

Для обеспечения высокой контактной выносливости азотирован-

ных сталей необходимо создавать слой с максимально возможной толщиной. Установлено влияние времени азотирования на толщину упрочненного слоя стали ВКС-7 при различных температурах азотирования. При температуре 540 °С азотированный слой глубиной 0,7 мм возможно получить не менее чем за 60 часов.

В наибольшей степени на структуру, фазовый состав и свойства как нитридного фильма, так и диффузионного слоя оказывает влияние температура азотирования.

Проведенные микроструктурные и дилатометрические исследования стали ВКС-7, азотированной при температурах 460 °С, 500 °С, 540 °С, 580 °С и по двухступенчатому режиму 500 °С + 540 °С при оптимальных давлениях и в течение времени, позволяющем получить слой не менее 0,5 мм, не обнаружили значительных отличий, за исключением резкого снижения твердости слоя (на ~ 200 единиц по HV5) и увеличения толщины ϵ -фазы при температуре 580 °С.

Электронномикроскопическое изучение структуры тонких фольг показало существенное влияние на нее температуры азотирования. С увеличением температуры происходит переход преимущественно когерентной связи (460 °С) нитридной фазы с матрицей внутри зерен, через полукogerентную (500 °С и 540 °С) к преимущественно некогерентной при 580 °С, при этом уменьшается плотность распределения и увеличивается размер нитридных частиц. В то же время на темнопольных изображениях при всех температурах азотирования наблюдаются два типа частиц сильно отличающихся по размерам (в 4-5 раз): мелкие, когерентно связанные с матрицей или полукogerентно в зависимости от температуры азотирования, выделяющиеся внутри зерен, и крупные, некогерентно связанные частицы, выделяющиеся на дефектах. Отмеченные отличия в тонкой структуре азотированного слоя приводят к различной величине микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора и различным размерам блоков. При этом с повышением температуры величина упругих искажений уменьшается (при увеличении температуры от 460 °С до 540 °С более чем в 1,5 раза), размер областей когерентного рассеяния незначительно увеличивается. Установлено увеличение размеров фесеток поверхности излома азотированного слоя образцов стали ВКС-7, разрушенного по механизму транскристаллитного квазискола, при увеличении температуры азотирования, что связано с возрастанием размеров блоков.

Приведенные результаты исследований позволяют объяснить увеличение контактной долговечности стали ВКС-7 при изменении

температуры азотирования от 460 °С (9,12 млн. циклов), до 540 °С (16,27 млн. циклов) за счет образования более однородной тонкой структуры и, соответственно, меньших микродеформаций кристаллической решетки азотированной матрицы. Дальнейшее снижение долговечности (8,96 млн. циклов) при повышении температуры до 580 °С связано с изменением макрофактора: уменьшением твердости слоя и его пластической деформацией в процессе испытаний. Максимальную контактную долговечность (20,23 млн. циклов) обеспечивает двухступенчатый режим ионного азотирования: 1-я ступень - температура азотирования 500 °С, давление среды 399-532 Па, время азотирования 20 часов; 2-я ступень - температура азотирования 540 °С, давление среды 532-665 Па, время азотирования 40 часов. При этом микродеформация кристаллической решетки и величина блоков те же, что и при температуре 540 °С, в тоже время плотность распределения нитридов соответствует температуре 500 °С.

В шестой главе приведены результаты сравнительных испытаний стали ВКС-7, обработанной по предлагаемой технологии ионного азотирования и сталей, используемых при изготовлении цементованных и азотируемых зубчатых колес, на стендах, имитирующих условия работы зубчатых передач.

Испытания на контактную усталость проводились на роликовых образцах сталей 38Х2МФА, 38ХНЗМФА, ВКС-7, азотированных в одной садке в среде азота особой чистоты по двухступенчатому режиму азотирования. Термическая обработка стали ВКС-7 проводилась по разработанной технологии трехкратной объемной закалки и отпуска. Испытывались и цементованные образцы из стали 18Х2Н4ВА.

По результатам испытаний построены кривые контактной усталости и определены пределы контактной выносливости σ_{Hlimb} (см. табл.). Таким образом, предел контактной выносливости рекомендуемой стали, упрочненной по разработанной технологии выше предела выносливости применяемых азотированных сталей в ~ 1,6 раза и находится на одном уровне с цементованной сталью.

Таблица

Сталь	ВКС-7	38ХНЗМФА	38Х2МФА	18Х2Н4ВА
Обработка	азотирование			цементация
σ_{Hlimb} , МПа	2400	1800	1650	2200

Испытания на изгибную усталость проводились на азотированных зубчатых колесах, изготовленных из стали ВКС-7 и упрочненных по разработанной кратной термической обработке и двухступенчатому режиму азотирования, и цементованных - из стали 18Х2Н4ВА на электромагнитном пульсаторе. Установлено, что азотированная сталь ВКС-7 обладает достаточным пределом изгибной выносливости ($\sigma_{\text{Flimb}} = 8500$ МПа), соизмеримым с пределом цементованной стали 18Х2Н4ВА ($\sigma_{\text{Flimb}} = 9000$ МПа).

Натурные испытания судового планетарного редуктора ГТГ-2500, зубчатые колеса которого были изготовлены из рекомендованной стали ВКС-7 по разработанной технологии термической обработки и азотирования проводились на установке замкнутого контура У-507 согласно программы 049 ТПШМ-ООИ НПО "Машпроект". Параметры испытываемых зубчатых колес: число зубьев - 27 и 49, модуль - 4 мм, ширина венца - 55 мм, угол профиля - 20° , степень точности 5-4-4В по ГОСТ 1643-81, окружная скорость - 80 м/с.

Зубчатые колеса редуктора ГТГ-2500 испытания прошли успешно и рекомендуются для внедрения в серию.

ВЫВОДЫ

1. Установлена закономерность изменения контактно-усталостных характеристик азотированных сталей в зависимости от величины микроискажений кристаллической решетки α -твердого раствора, плотности распределения и размеров выделений нитридов, размера зерна аустенита:

- уменьшение микроискажений второго рода стали ВКС-7 в 1,6 раза приводит к увеличению контактной долговечности на 80%;

- уменьшение микроискажений второго рода в азотированном слое стали ВКС-7 в 2 раза по сравнению со сталью 38Х2М0А приводит к увеличению предела контактной выносливости с 1650 МПа до 2400 МПа;

- уменьшение зерна аустенита от № 5-6 (60-40 мкм) до № 12-13 (8-5 мкм) стали ВКС-7 обеспечивает повышение контактной долговечности в 3,5 раза.

2. Показано положительное влияние легирования никелем на однородность выделяющихся в процессе азотирования нитридов и карбидов легирующих элементов при одновременном увеличении плотности их распределения и уменьшении размеров нитридов.

3. На основе установленных закономерностей показана возможность изготовления высокоточных азотированных зубчатых колес су-

довых редукторов соизмеряемых по контактной и изгибной выносливости с цементированными при одновременном снижении трудоемкости их изготовления вследствие исключения финишной операции зубошлифования. Полученный результат достигнут за счет обоснованного выбора малоуглеродистой теплоустойчивой вторичнотвердеющей мартенситного класса стали ВКС-7, разработки технологии предварительной термической обработки и технологии ионного азотирования.

4. Установлено, что высокая контактная выносливость азотированной стали ВКС-7 связана с возможностью получения высокой твердости азотированного слоя при минимальном уровне микродеформаций кристаллической решетки α -твердого раствора, от выделений нитридов и карбидов необразующих цементитную сетку по границам исходных аустенитных зерен, равномерного распределения нитридных фаз по объему зерна, малой глубиной залегания пограничных выделений γ' -фазы, минимальной толщины или отсутствием фильма ϵ -фазы, мелкого зерна аустенита (до №13), глубины азотированного слоя до 0,7 мм, высокой прочности сердцевины (до 1280 МПа), эффективной толщины упрочненного слоя более 0,3 мм при твердости не ниже 500 HV5.

5. Разработаны способы и режимы предварительной термической обработки, позволяющей получить высокую прочность сердцевины стали ВКС-7 и мелкое зерно аустенита:

- циклической объемной закалки с промежуточным отпуском с получением зерна аустенита № 9-10: 1-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 975 °С, 1 час, масло; 2-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 900 °С, 1 час, масло; 3-й цикл - отпуск 650 °С, 2 часа + закалка 900 °С, 1 час, масло, отпуск 600 °С, 2 часа.

- поверхностной закалки с нагревом токами высокой частоты, обеспечивающий получение зерна аустенита № 12-13, который защищен авторскими свидетельствами.

6. Разработана технология ионного азотирования стали ВКС-7 в среде азота особой чистоты ГОСТ 9293-74, обеспечивающая получение упрочненного слоя с максимальной контактной выносливостью:

1-я ступень - температура азотирования 500 °С, давление среды 399-532 Па, время азотирования 20 часов; 2-я ступень - температура азотирования 540 °С, давление среды 532-665 Па, время азотирования 40 часов.

7. На основе успешных натуральных испытаний зубчатых колес судового редуктора ГТГ-2500 на НПО "Машпроект" сталь ВКС-7, технология ее термической обработки и ионного азотирования введены в

технические условия чертежей на их изготовление. Технический эффект внедрения разработанной технологии состоит в повышении контактной выносливости азотированных зубчатых колес в $\sim 1,5$ раза, достижении уровня контактной выносливости цементованных сталей при более высокой износостойкости, задиристостойкости и теплостойкости; экономический эффект - в уменьшении себестоимости изготовления высоконапряженных высокоточных зубчатых колес на $\sim 30\%$ за счет устранения финишной операции зубошлифования.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. О возможности повышения контактной долговечности азотированных сталей / Б.Н. Арзамасов, С.А. Герасимов, С.Д. Карпухин и др. // Новые технологии термической и химико-термической обработок деталей машин и инструмента: Тез. докл. Всесоюз. науч.-технич. конф., г. Махачкала, 20-22 сент. 1989 г. - М., 1990. - С. 110-112.
2. Герасимов С.А., Карпухин С.Д., Аваков Ю.М. Исследование контактной долговечности азотированных сталей // Современные методы расчета и проектирования зубчатых передач: Тез. докл. Всесоюз. науч.-технич. конференции, г. Уфа, 2-4 нояб. 1987 г. - М., 1987. - С. 64-65.
3. Повышение износостойкости азотированных сталей перлитного класса / С.А. Герасимов, В.Г. Пучков, С.Д. Карпухин и др. // Новые технологии термической и химико-термической обработок деталей машин и инструмента: Тез. докл. Всесоюз. науч.-технич. конференции, г. Тольятти, 5-7 июня 1986 г. - М., 1986. - С. 153-155.
4. А.с. № 1574649 СССР, МКИ⁴ с 21 D 1/78. Способ азотирования деталей / Б.Н. Арзамасов, С.А. Герасимов, С.Д. Карпухин и др. - № 4429446/02; Заявл. 23.05.88.; Опущ. 28.07.90. Бюл. № 30 // Открытия и изобретения. - 1990. - № 30. - С. 12-13.
5. А.с. № 1770445 СССР, МКИ⁴ с 21 D 1/78. Способ азотирования деталей / С.Д. Карпухин, С.А. Герасимов, Э.А. Елисеев и др. - № 4887500/02; Заявл. 03.12.90.; Опущ. 20.09.92. Бюл. № 39 // Открытия и изобретения. - 1992. - № 39. - С. 12-13.