

1564257

На правах рукописи

СЕМЕНОВ Михаил Юрьевич

УДК 621.785.533.689.14

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ИОННОЙ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка
металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1989

Работа выполнена в Московском Государственном
Техническом Университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук
Н.М. Рыков

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
В.М. Зинченко,
старший научный сотрудник,
кандидат технических наук
В.И. Грютин

Ведущее предприятие: Московское
машиностроительное
производственное предприятие (ММП)
"Салют"

Защита диссертации состоится 29.09 1999 года на
заседании диссертационного совета К 053.15.13 Московского
Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана
по адресу: Москва, Бауманская, 5.

Ом экземпляре, заверенный
ому адресу.
ся в библиотеке МГТУ им.

1999 года

1564252

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1564257

Семенов М.Ю. Разработка ме

Шушин

Актуальность работы. Растущие требования к повышению долговечности и надежности деталей машин диктует необходимость совершенствования технологии их поверхностного упрочнения. Важное значение для реализации этого требования имеет применение химико-термической обработки (ХТО), осуществляемой в плазме тлеющего разряда - ионной цементации и нитроцементации. Эти процессы отвечают требованиям гибкой, интенсивной и энергосберегающей технологии и являются приоритетными способами диффузионного насыщения высоконагруженных деталей машин.

Особенно высокая эффективность свойственна высокотемпературной ионной нитроцементации (ИНЦ). Важное ее преимущество - отсутствие окисления легирующих элементов в диффузионном слое, что снижает ограничения на его толщину (не более 1 мм при газовых процессах) и предельную (до 0,35 %) концентрацию азота в нем. При ИНЦ возможно формирование протяженных (2 мм и более) качественных диффузионных слоев с повышенной концентрацией азота, что заметно увеличивает несущую способность диффузионного слоя.

Вместе с тем ИНЦ - наименее разработанный технологический процесс. До настоящего времени преобладает экспериментальный метод выбора технологических режимов, который не позволяет реализовать большие технологические возможности нового процесса.

Технологическое оборудование допускает выполнение ИНЦ по различным режимам обработки: одностадийным, двухстадийным, циклическим, термоциклическим (с изменяющимися активностью газовой среды и температурой). Многообразие вариантов проведения ИНЦ практически исключает оптимальный выбор режима обработки на основе экспериментальных исследований. Возникает необходимость создания надежного расчетного метода проектирования технологии диффузионного насыщения, основанного на математической модели процесса. Прогнозирование насыщенности диффузионного слоя на основе модели ИНЦ актуально для двух групп сталей: низколегированных, используемых в автомобилестроении и в буровой технике, и комплексно-легированных теплостойких, используемых в авиационной промышленности. Для первой группы сталей диффузионное насыщение проводится в пределах твердого раствора; для второй группы сталей - сопровождается образованием избыточной карбонитридной фазы, которая необходима для обеспечения высоких эксплуатационных свойств.

Моделирование процесса ИНЦ требует построения граничных усло-

им. Н. Э. Баумана

БНХ-10784

вия в параметрическом виде по причине отсутствия теории массопереноса насыщающих элементов в ионизированной атмосфере, обусловленного неоднозначностью процессов, происходящих в катодной области тлеющего разряда. Моделирование процесса ИЦ комплексно-легированных сталей дополнительно усложняется необходимостью учета в диффузионном массопереносе углерода и азота стока этих элементов в частицы карбонитридов, зависящего от скорости зарождения и диффузионного роста этих частиц. Оценка скоростных факторов стока требует установления влияния легирующих элементов и параметров технологического процесса на кинетику зарождения частиц по зернограничному и дислокационному механизмам. Учет данного фактора важен для предупреждения образования цементитной сетки по границам зерен.

Цель работы: создание расчетного метода проектирования технологии высокотемпературной ионной нитроцементации низколегированных и комплексно-легированных теплостойких сталей на основе моделирования процессов диффузионного насыщения углеродом и азотом.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка граничного условия - ключевого звена математической модели, отражающего взаимодействие ионизированной технологической атмосферы с насыщаемой поверхностью металла.

2. Разработка математической модели и программных средств для решения прямой диффузионной задачи по расчету распределения концентрации углерода и азота в твердом растворе низколегированных сталей при выбранных технологических параметрах процесса.

3. Создание расчетного метода для прогнозирования результатов диффузионного насыщения при циклических и термоциклических режимах.

4. Экспериментальное исследование карбонитридной фазы в диффузионном слое теплостойких сталей и разработка на его основе положений физической модели формирования частиц избыточной фазы.

5. Разработка математической модели процесса ИЦ с учетом образования избыточной фазы в диффузионном слое теплостойких сталей.

6. Анализ на основе расчетного метода влияния технологических факторов при различных вариантах проведения ИЦ на характеристики диффузионного слоя низколегированных и комплексно-легированных сталей.

7. Разработка методики решения обратной диффузионной задачи для расчета технологических параметров процесса ИЦ, обеспечивающих заданную насыщенность диффузионного слоя в низколегированных сталях.

8. Разработка рекомендаций по выбору режимов ИЦ, обеспечивающих повышение износостойкости и контактной выносливости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель высокотемпературной ИНЦ, описывающая кинетику диффузионного насыщения легированного твердого раствора, в которой в качестве граничных условий II и III рода использованы установленные параметрические зависимости плотности потока углерода и азота, а также углеродного и азотного потенциалов и коэффициентов массопереноса от технологических параметров процесса.

2. Разработана математическая модель неаизотермических процессов ионной нитроцементации, учитывающая установленную расчетно-экспериментальным путем температурную зависимость эффективного коэффициента диффузии углерода.

3. На основе разработанной математической модели и выполненного с ее помощью анализа установлены закономерности, отражающие влияние технологических параметров процесса на характеристики диффузионного слоя.

4. Установлена закономерная связь контактной выносливости диффузионного слоя теплостойких сталей с его характеристиками в виде зависимостей предела контактной выносливости от эффективной толщины слоя, градиента концентрации и объемной доли карбонитридной фазы.

5. Определены термодинамические и кинетические соотношения, связывающие размер и морфологию частиц карбонитридов цементитного типа и специальных карбонитридов с концентрацией легирующих элементов в стали и температурой процесса. На основе полученных соотношений разработана математическая модель процесса ИНЦ комплексно-легированных теплостойких сталей, прогнозирующая распределение концентраций углерода и азота в диффузионном слое, объемную долю избыточной фазы и размерно-количественное распределение ее частиц.

6. Разработана методика решения обратной диффузионной задачи, дающая возможность рассчитывать оптимальные значения параметров ИНЦ для заданного распределения насыщающих элементов.

Практическая ценность работы :

Разработан расчетный метод прогнозирования характеристик нитроцементованного слоя, включающий математическую модель ИНЦ и соответствующее программное обеспечение. Расчетный метод дает возможность существенно сократить затраты на разработку режимов ИНЦ и находить оптимальные технологические решения.

Показана целесообразность применения циклических режимов, которые дают возможность сократить время обработки и получить слои с концентрационной горизонтальной площадкой протяженностью до 1 мм. Выявлена особая эффективность термоциклических режимов, применение

которых ведет к дополнительному уменьшению времени процесса и повышению насыщенности слоя азотом.

Предложены варианты технологических режимов ИНЦ, обеспечивающие высокий уровень износостойкости и контактной выносливости деталей буровых долот и зубчатых колес, которые приняты ВНИИЕТ и ММПП "Салют" для промышленного опробования.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научно-технической конференции по программе "Технические Университеты России" (Москва, 1996 г.), на 3-м Собрании металлургов России (Рязань, 1996 г.) и на 11-м Конгрессе Международной организации по термической обработке (МОТО) (Флоренция, Италия, 1998 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 125 наименований и приложения; содержит 232 страниц машинописного текста, 76 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы и ее научная новизна.

В первой главе дан обзор отечественной и зарубежной литературы по способам нитроцементации и методике математического моделирования диффузионного насыщения легированных сталей.

Отмечено, что высокотемпературная газовая нитроцементация находит широкое применение в условиях массового производства для поверхностного упрочнения деталей машин из низколегированных сталей. Показаны недостатки газовой нитроцементации: большая длительность процесса (8-12 ч.), необходимость строго регламентировать насыщенность диффузионного слоя углеродом и азотом, возможность развития дефектных структур, ограничение толщины диффузионного слоя 1 мм.

Отмечены преимущества ионной нитроцементации, заключающиеся главным образом в сокращении времени процесса до 2-6 ч., возможности обеспечения высокого качества диффузионного слоя и в высокой технологической гибкости.

Для ИНЦ характерно большое число возможных режимов диффузионного насыщения, что, с одной стороны, дает возможность обеспечивать требуемую насыщенность нитроцементованного слоя, а, с другой стороны, практически исключает определение экспериментальным путем оптимального варианта обработки.

В настоящее время разработаны математические модели для определения насыщенности твердого раствора при газовой цементации и нитроцементации в контролируемых по углеродному потенциалу газовых средах.

Модели диффузионного насыщения с образованием избыточной фазы для обычных газовых процессов разработаны только для цементации. При этом ни одна из моделей не содержит математического описания процесса зарождения частиц избыточной фазы и влияния на него химического состава обрабатываемых сталей. В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют сведения о построении математических моделей ионных процессов ХТО.

На основании обзора литературы определены цель настоящей работы и направления исследований.

Во второй главе описана методика экспериментальных исследований. При разработке граничного условия модели выполнен комплекс экспериментальных исследований состава и строения диффузионного слоя. Объектами исследования служили тонкие образцы (фольга толщиной 100 мкм) и массивные образцы $\varnothing 40 \times 15$ мм и $\varnothing 30 \times 120$ мм. Диффузионное насыщение проводили на опытно-промышленной установке ИНЦ.

Диффузионному насыщению подвергали легированные стали двух групп. Первую группу составляли низколегированные стали 25ХГМ, 14ХГН, 16ХГ, применяемые в автомобилестроении, а также сталь 20ХНЗА, используемая в буровой технике. Образцы этих сталей насыщали до концентраций углерода и азота, не превышающих предела их растворимости в аустените.

Вторую группу составляли комплексно-легированные стали 20ХЗМВФА, 12ХЗНВФА и 16ХЗНВФМБ-Ш, применяемые для изготовления авиационных зубчатых колес и других высоконагруженных деталей. Диффузионное насыщение этих сталей проводили до значений концентрации углерода и азота, которым соответствует образование развитой избыточной карбонитридной фазы.

Опытные образцы после ИНЦ проходили термическую обработку, применяемую в заводской практике. Термическая обработка низколегированных сталей состояла из закалки в масле и низкого отпуска при температуре 200 ± 10 °С. Обработка теплостойких сталей включала высокий отпуск при 650 °С, закалку в масло, обработку холодом и низкий отпуск при 280 ± 10 °С.

Распределение концентрации углерода по толщине диффузионного слоя определяли послойно двумя способами - спектральным и химическим (сжиганием стружки) с точностью, составлявшей, соответственно,

+0,02 и ±0,05 %. Концентрацию азота определяли методом вакуум-плавления стружки, снятой послойно, с точностью +0,01 %.

Послойный фазовый анализ карбидной и карбонитридной зоны диффузионного слоя выполняли путем электрохимического разделения избыточной карбонитридной фазы в тонких слоях с последующим рентгеноструктурным и химическим анализом изолированных фаз.

Размерно-количественный анализ частиц карбидов и карбонитридов азавтектоидной зоны диффузионного слоя проводили послойно на автоматическом анализаторе изображений "Квантимет-720".

Испытания на контактную выносливость выполняли на роликовых образцах из теплостойких сталей на двухконтактной роликовой машине. Предел контактной прочности определяли методом ускоренных испытаний.

В третьей главе описано решение задачи моделирования процесса высокотемпературной ИНЦ без образования избыточной карбидной фазы.

Структура математической модели ИНЦ для расчета концентрационных кривых углерода и азота в твердорастворной области включает систему дифференциальных уравнений, граничные и начальные условия:

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^2 \frac{D_{ij}}{dx} \frac{dC_j}{dx}; \quad (1)$$

при $x = 0, \tau = 0$: $C_i = C_i^0$; при $x = \infty$: $C_i = C_i^0$;

$$\text{при } x = 0, \tau > 0: -D_{i1} \frac{dC_i}{dx} = J_i = \beta_i [\pi_i - C_i(x, \tau)];$$

где C_i - концентрации насыщающих элементов; x - глубина; τ - время; D_{ij} - коэффициенты диффузии, характеризующие поток элемента i под действием градиента концентрации элемента j ; C_i^0 - начальная концентрация элемента i ; π_i - углеродный (азотный) потенциал; β_i - коэффициент массопереноса углерода (азота); J_i - плотность потока углерода (азота) в единицу времени.

Из-за отсутствия развитых физических представлений о массопереносе углерода и азота в ионизированной атмосфере граничное условие находили в параметрической форме по результатам насыщения фольг или массивных образцов.

Граничные условия II рода искали в виде уравнения:

$$J_i = f_i(T, P, q_C, q_N, \tau); \quad (2)$$

где T - температура процесса; P - давление технологической атмосферы; q_C - объемная концентрация углеводорода в газовой среде; q_N -

объемная концентрация аммиака; τ - время процесса.

Методика построения граничного условия II рода основана на определении количества перенесенной в металл массы m_1 насыщающих элементов путем графического интегрирования экспериментальных концентрационных кривых углерода и азота при различных значениях времени процесса и определенном соотношении остальных технологических параметров. Результаты определения m аппроксимировали уравнением $m_1 = at^b$, $b < 1$. Плотность потока определяли как $J_1 = dm_1/dt = ct^{-d}$. На основе регрессионного анализа серии таких уравнений (определены для различных сочетаний технологических параметров) получены параметрические выражения граничных условий в виде зависимостей потока насыщающих элементов для нескольких марок сталей.

Для определения граничных условий было проведено более 100 опытов. На основе анализа полученных уравнений оценена степень влияния состава атмосферы, температуры и давления газовой среды на плотности потока углерода и азота, характеризующие скорость диффузионного насыщения исследуемых сталей. Показана слабая зависимость скорости диффузионного насыщения от химического состава сталей.

Кинетический характер граничного условия II рода допускает надежное моделирование одностадийных и двухстадийных режимов ИНЦ. Однако из-за отсутствия количественной связи плотностей потоков углерода и азота с концентрацией этих элементов на поверхности стали граничное условие II рода оказалось непригодным для моделирования циклических режимов. Это обстоятельство определило необходимость разработки более универсального граничного условия III рода:

$$J_i = \beta_i(\pi_i - C^{\pi}_i), \quad (3)$$

где C^{π}_i - концентрация i -го элемента на поверхности.

За углеродный (азотный) потенциал ионизированной атмосферы π_C (π_N) принимали установившиеся после длительного насыщения стальных образцов значения концентраций углерода (азота) на поверхности, которые измеряли с помощью прибора спектральной диагностики. Зависимости кинетических коэффициентов массопереноса β_C (β_N) от температуры процесса определяли на основе решения диффузионной задачи.

Экспериментально-расчетным путем впервые для ионизированной атмосферы получены зависимости:

$$\pi_i = \varphi_i(T, P, q_C, q_N); \quad \beta_i = \alpha_i \exp(-\varepsilon_i/RT); \quad (4)$$

где α_i , ε_i - определяемые путем регрессионного анализа коэффициенты; R - универсальная газовая постоянная.

Коэффициенты диффузии вычисляли по имеющимся в литературе параметрическим выражениям. Выбор этих выражений был осуществлен после

проведения проверки сходимости расчетных и экспериментальных концентрационных кривых. Коэффициент взаимного влияния углерода и азота рассчитывали по известным теоретическим соотношениям. При расчете учитывали влияние легирования стали на скорость диффузии.

Дважды нелинейную прямую диффузионную задачу решали численно с использованием явной разностной схемы. Показана устойчивость решения при использовании указанной схемы. Проверкой адекватности математической модели полученным экспериментальным данным, установлено, что абсолютная погрешность определения концентрации углерода не превышает 0,10 %, азота - 0,05 %, эффективной толщины - 0,1 мм. Удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных кривых концентраций определяет возможность прогнозирования характеристики диффузионного слоя при выбранных технологических параметрах процесса и с их помощью устанавливать рациональные режимы обработки.

В четвертой главе выполнен анализ технологических режимов ИНЦ при обработке низколегированных сталей на основе расчетной модели.

Подтверждено, что одностадийные режимы формируют "крутопадающие" концентрационные кривые углерода и азота. Двухстадийные режимы обеспечивают плавное распределение концентрации насыщающих элементов, но с ограниченной протяженностью приповерхностной площадки равной концентрации и равной твердости. Большей эффективностью в формировании пологих концентрационных кривых обладают циклические режимы.

Проанализировано влияние технологических параметров двухстадийных и циклических режимов (температуры, активности газовой среды, продолжительности стадий цикла, числа циклов, времени обработки) на распределение концентрации углерода и азота в диффузионном слое. Повышение температуры и углеродного потенциала газовой среды сопровождается повышением насыщенности углеродом диффузионного слоя. Увеличение общей продолжительности процесса и особенно температуры вызывает рост протяженности слоя. При двухстадийных и циклических режимах время пассивной стадии необходимо назначать с учетом уровня углеродного потенциала на стадии активного насыщения. Оно должно быть достаточным для устранения приповерхностного максимума концентрации до образования горизонтальной площадки.

Установлены зависимости, характеризующие распределение концентрации азота при различных вариантах проведения ИНЦ. Двухстадийные и циклические режимы обеспечивают проникновение азота на значительную глубину от поверхности. Требуемая концентрация азота на поверхности достигается достаточно просто путем изменения температуры и времени

насыщения. Снижение температуры процесса сопровождается значительным ростом концентрации азота, достигающей у поверхности 0,5-0,6 % при температуре 920 °С. Увеличение времени процесса свыше 2-х часов при большом градиенте концентрации углерода сопровождается снижением концентрации азота на поверхности и образованием приповерхностного максимума. Наиболее высокие концентрации азота (1 % и более) обеспечивают термоциклические режимы.

Для расчета характеристик диффузионного слоя при термоциклических режимах выполнена корректировка эффективного коэффициента диффузии углерода на основе представлений о влиянии температуры на упругие свойства кристаллической решетки. Предложено аналитическое выражение для определения эффективного коэффициента диффузии, учитывающее вклад в диффузионный массоперенос углерода дефектов кристаллического строения, образующихся при фазовой перекристаллизации.

Показано, что термоциклические режимы ИНЦ создают благоприятные условия для формирования протяженных диффузионных слоев с приповерхностной площадкой до 1 мм. Применение таких режимов дает возможность на 40 % сократить время обработки.

Разработаны циклические режимы ИНЦ для упрочнения шарошек буровых долот из стали 20ХНЗМА, принятые для промышленного опробования.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований избыточной карбонитридной фазы, образующейся при высокотемпературной нитроцементации комплексно-легированных сталей и модельных сплавов железа - легирующий элемент (Cr, Mo, W, V, Ni), физический анализ условий и кинетики образования избыточной фазы; описаны компоненты математической модели ИНЦ теплостойких сталей.

На основе экспериментальных исследований диффузионных слоев комплексно-легированных сталей установлено, что при высокотемпературной (950-1000 °С) ИНЦ строение приповерхностной зоны диффузионного слоя аналогично строению цементованного слоя, полученного при одинаковой науглероживающей способности технологической атмосферы. Азот присутствует в количестве 0,1...0,2 % и оказывает слабое влияние на фазовый состав диффузионного слоя. Оно сводится к образованию азотистого цементита и небольшого количества нитридов хрома. При построении модели высокотемпературной ИНЦ избыточной нитридной фазой пренебрегали. При температуре процесса ИНЦ ниже 940 °С такое допущение становится неправомерным из-за увеличения количества азота в слое и количества частиц нитридной фазы.

Установлено, что при высокотемпературной ИНЦ комплексно-легированных сталей избыточная фаза в диффузионном слое состоит из леги-

рованного хромом цементита и относительно небольшого количества специальных карбидов и нитридов, которые образуются в виде дисперсных частиц, имеющих размер менее 0,5 мкм. Преобладающая карбидная фаза - легированный цементит образуется в виде глобулярных частиц размером 1-3 мкм либо в виде сетки по границам зерен.

На основе выполненных экспериментальных исследований принят ряд положений физической модели образования частиц избыточной фазы. В частности, предусмотрена возможность двух механизмов образования карбонитридной фазы: первоначально по механизму внутреннего науглероживания (заотирования) образуются частицы специальных карбидов и нитридов, при дальнейшем насыщении по механизму внешнего науглероживания - частицы легированного цементита. Учитывали также влияние температуры и химического состава стали на способность к выделению частиц на дислокациях внутри зерна аустенита или на границах зерен. За движущую силу процесса карбидообразования принята степень перенасыщения твердого раствора углеродом. Концентрация углерода в аустените зависит от скорости его поступления из активной среды и скорости стока в образующиеся и растущие частицы новой фазы.

Принятые положения физической модели карбидо- и нитридообразования использована при построении математической модели высокотемпературной ИНЦ, учитывающей развитие фазового превращения при диффузионном насыщении комплексно-легированных теплостойких сталей. Модель описывает процесс формирования диффузионного слоя, включая зарождение и рост карбонитридных частиц в зависимости от технологических параметров процесса и химического состава насыщаемой стали. Структура модели в общем виде представлена уравнениями:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC}{dx} \right) - \frac{dC_c}{d\tau}; \quad (5)$$

$$J_c = \frac{dn_c}{d\tau} = N_c \exp \left(- \frac{\Delta G_a}{RT} \right); \quad dp = \left| \frac{D}{2\tau} \frac{C_0 - C_0}{C_c - C_0} \right|^{1/2} d\tau;$$

$$dC_c = 4\pi/3 C_c \rho^3(n_c) dn_c; \quad \text{при } \tau = 0: n_c = 0,$$

$$\text{при } x = 0: \beta(\pi_C - C) = D \frac{dC}{dx}; \quad \text{при } \tau = 0, x = 0 \dots \infty: C = \text{const};$$

где C - концентрация углерода в стали; C_c - концентрация углерода в карбидной фазе; π_C - углеродный потенциал технологической атмосферы

ры; C_c - концентрация углерода в цементите; C_0 - концентрация углерода в аустените; C_a - предел растворимости углерода в аустените; D - коэффициент диффузии углерода в аустените; β - коэффициент массопереноса углерода; ρ - радиус растущей карбидной частицы; n_c - количество частиц карбидов данного размера в 1 м^3 ; J_c - скорость зародышеобразования, $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$; N_c - количество возможных мест зародышеобразования в 1 м^3 ; ΔG_a - энергия активации образования критического зародыша; T - температура; R - газовая постоянная; x - координата; τ - время.

Данная задача четырежды нелинейна. Ее решение реализовано численным методом с использованием явной разностной схемы. Использование этой модели дает возможность расчетным методом адекватно определять распределение углерода и азота в слое, объемную долю избыточной карбонитридной фазы и распределение ее частиц по размерам (рис.1).

Выполнен анализ влияния карбидообразующих легирующих элементов на процесс образования частиц избыточной карбидной фазы при ИНЦ. Подтверждено положительное влияние хрома на образование кристаллов цементита. Хром, являясь относительно сильным карбидообразующим элементом (по сравнению с железом и марганцем), в большей мере снижает энергетический выход реакции образования цементита по дислокационному механизму, чем по зернограничному. Это увеличивает стабильность легированного цементита и способствует формированию его в виде частиц благоприятной глобулярной формы.

Подтверждена целесообразность легирования стали хромом в количестве не менее 3 %. При концентрации хрома в 2 % возможно образование легированного цементита по обоим механизмам. Повышение концентрации хрома в стали сопровождается уменьшением среднего размера частиц цементита, что обусловлено повышением термодинамической стабильности цементита и интенсификацией зарождения его частиц.

При повышении температуры процесса увеличивается средний размер частиц. Если температура процесса превосходит некоторое пороговое значение (980°C для стали, содержащей 3 % хрома), то карбидообразование происходит преимущественно по зернограничному механизму. Высказано предположение, что эта особенность обусловлена уменьшением числа дислокаций и возрастанием поверхностной энергии границ зерен с повышением температуры.

Разработана методика построения расчетной модели образования специальных карбидов и нитридов, основанная на использовании результатов решения диффузионной задачи с учетом зарождения и диффу-

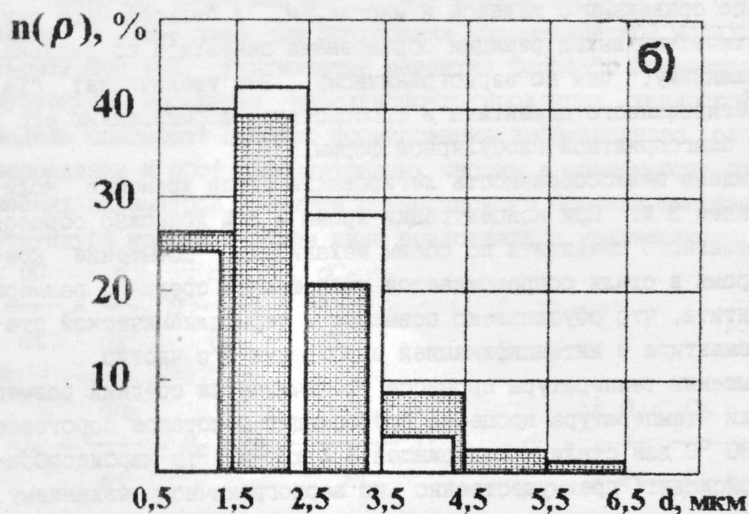
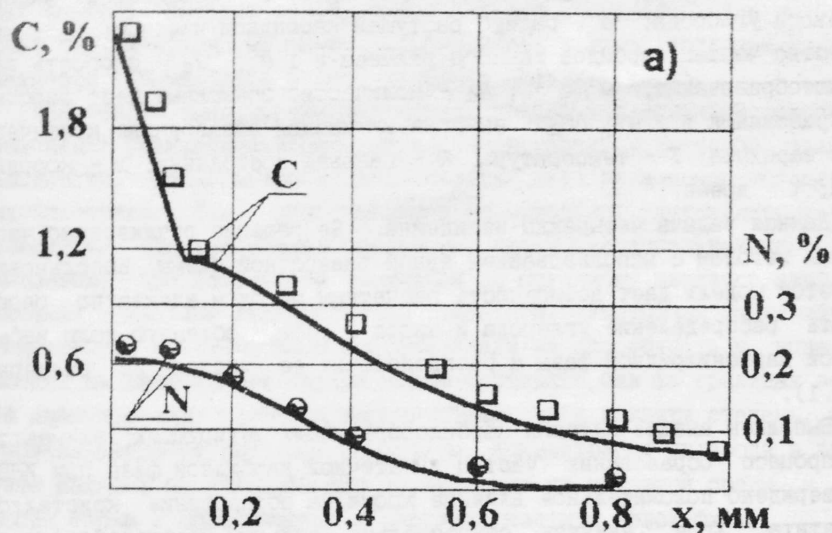


Рис. 1. Результаты ИНЦ стали 20Х3МВФА по режиму: $T = 980 \text{ } ^\circ\text{C}$; $q_c = 3,5 \%$; $P = 20 \text{ гПа}$; время процесса 1,0 ч.: а) экспериментальные и расчетные концентрационные кривые углерода и азота; б) частотное распределение карбидных частиц по размерам в диффузионном слое, светлые столбики - расчетные данные, заштрихованные столбики - экспериментальные результаты.

сионного роста карбидов и нитридов сильных карбидообразующих элементов на сегрегациях атомов этих элементов. Рассчитанные значения размеров специальных карбидов находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Выполнен анализ влияния технологических параметров на характеристики диффузионного слоя, содержащего избыточную карбонитридную фазу, включая такие характеристики как протяженность активной карбонитридной зоны и объемную концентрацию избыточной фазы. Установлено, что влияние технологических параметров на эффективную толщину слоя и концентрацию насыщающих элементов на поверхности проявляется аналогично случаю проведения ИНЦ низколегированных сталей. Повышение температуры процесса и увеличение его продолжительности вызывает рост эффективной толщины слоя и протяженности его активной зоны (от времени процесса по закону, близкому к параболическому). Установлено, что при ИНЦ теплостойких сталей изменение состава газовой атмосферы оказывает более сильное влияние на концентрацию на поверхности углерода и азота, чем на протяженность слоя. Показано, что при равных значениях технологических параметров - температуры и суммарного времени процесса - при проведении ИНЦ по циклическому режиму достигается большая протяженность активной карбидной зоны, чем при одностадийных процессах при равной эффективной толщине слоя.

На основе стендовых испытаний показана возможность значительно снижения скорости изнашивания в условиях микрорезания и адгезионного взаимодействия за счет увеличения объемной доли избыточной фазы и повышения протяженности ее активной зоны. С другой стороны, установленная зависимость контактной выносливости от насыщенности диффузионного слоя характеризуется наличием выраженного максимума, соответствующего объемной доле избыточной фазы, равной 10-18 %.

Расчетная модель была использована для разработки режимов ИНЦ зубчатых колес топливной системы авиадвигателей, работоспособность которых определяется требованиями износостойкости. Были предложены циклические режимы обработки, которые обеспечивают необходимый уровень износостойкости за счет формирования протяженной активной карбидной зоны в зубьях колес небольшого модуля. В целях ограничения эффективной толщины диффузионного слоя в таких зубчатых колесах в предложенных режимах предусмотрено проведение процесса ИНЦ при высоком углеродном потенциале на двух уровнях температуры: более высоком на первом этапе процесса и более низкой на втором.

В шестой главе описана методика решения обратной диффузионной

задачи. Методика включает метод построения оптимизационной функции и алгоритм ее минимизации.

В качестве оптимизационной функции использована функция качества, характеризующая отклонение характеристик диффузионного слоя от их требуемых значений. Осуществлен выбор алгоритма ее минимизации для двух случаев: двухстадийного процесса (детерминированный метод Гаусса-Зайделя) и симметричного циклического процесса (метод случайного поиска с линейным пересчетом, являющийся оптимальным для данной постановки задачи по критерию минимизации потерь - т.е. нерезультативных шагов поиска). Разработано программное обеспечение, осуществляющее расчет параметров обработки по режимам: двухстадийному и симметричному циклическому режимам.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

Разработан универсальный расчетный метод проектирования технологических режимов ионной нитроцементации. Метод включает математическую модель и соответствующее программное обеспечение, обеспечивающие на основе прогнозирования характеристик диффузионного слоя и выбор параметров технологического процесса высокотемпературной ИНЦ для низколегированных и комплексно-легированных теплоустойчивых сталей.

1. Разработана математическая модель ионной нитроцементации в твердорастворной области, учитывающая взаимное влияние углерода и азота, а также легирование сталей. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений; граничные и начальные условия. Граничные условия получены в виде параметрических зависимостей потока углерода и азота (II рода), а также в виде зависимостей углеродного и азотного потенциалов и коэффициентов массопереноса (III рода) от технологических параметров процесса ИНЦ.

2. Показана целесообразность применения в математической модели ИНЦ граничных условий III рода в связи с их универсальностью, а также повышенной точностью расчета концентрационных кривых по сравнению с граничными условиями II рода. Расчетная модель, реализованная в программном обеспечении для ЭВМ, дает возможность прогнозировать распределение концентрации углерода и азота в диффузионном слое при проведении ИНЦ по одностадийным, двухстадийным и циклическим режимам изменения углеродного потенциала атмосферы.

3. На основе расчетного метода выполнен анализ влияния технологических параметров на характеристики диффузионного слоя низколеги-

рованных и комплексно-легированных сталей при различных вариантах проведения ИНЦ. Показано влияние состава газовой атмосферы, температуры, продолжительности стадий активного насыщения и диффузионного выравнивания на характеристики диффузионного слоя.

4. Разработана математическая модель неизоэотермической ионной нитроцементации, основанная на температурной зависимости коэффициента диффузии для неизоэотермических условий, адекватная экспериментальным данным. Показано, что термоциклирование в процессе диффузионного насыщения на 40 % сокращает время обработки и способствует увеличению концентрации азота в нитроцементированном слое.

5. Экспериментально исследован химический и фазовый состав нитроцементированного слоя, его структура и свойства при обработке комплексно-легированных сталей. Установлены требования к характеристикам диффузионного слоя - его насыщенности углеродом и азотом, количеству избыточной фазы, протяженности приповерхностной площадки на кривой концентрации, выполнение которых обеспечивает высокую износостойкость в условиях микрорежания и адгезионного взаимодействия.

6. Разработаны режимы ИНЦ деталей буровых долот из стали 20ХНЗМА, обеспечивающие характеристики диффузионного слоя, отвечающие высоким значениям контактной выносливости.

7. На основании экспериментальных исследований установлено, что избыточная фаза в диффузионных слоях комплексно-легированных сталей состоит из легированного цементита и относительно небольшого количества специальных карбидов и нитридов, которые образуются в виде дисперсных частиц, имеющих размер менее 0,5 мкм. Преобладающая карбидная фаза - легированный цементит образуется в виде глобулярных частиц размером 1-3 мкм или в виде сетки по границам зерен.

8. Разработана расчетная модель ИНЦ легированных сталей с образованием избыточной карбонитридной фазы, включающая в себя систему дифференциальных уравнений, описывающих: 1) диффузионное перераспределение углерода и азота из активной среды в объем металла с учетом стоков в карбиды; 2) скорость зарождения частиц, зависящую от степени пересыщения твердого раствора насыщающими элементами и от легирования стали; 3) диффузионный рост образовавшихся частиц.

9. Выполненный на основе расчетной модели анализ межазерного и дислокационного механизмов образования цементитной фазы показывает необходимость применения стали, легированной хромом в количестве не менее 3 %. Проведение ИНЦ с высоким углеродным потенциалом обеспе-

чивает получение избыточной фазы благоприятной глобулярной формы.

10. Для зубчатых колес из теплостойких сталей разработаны технологические режимы ИИЦ, обеспечивающие получение диффузионных слоев с развитой избыточной фазой и повышенными эксплуатационными свойствами.

11. Разработана методика решения обратной диффузионной задачи, включающая в себя методику построения оптимизационной функции и алгоритм ее минимизации.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Комплексная система управления процессом ионной нитроцементации / Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов, М.Ю. Семенов, К.И. Кириллов // МИТОМ. - 1996. - № 1. - С. 11-15.

2. Семенов М.Ю., Рыжов Н.М. Модель карбидообразования при цементации // Тез. докл. 3-го собрания металлургов России. - Рязань, 1996. - С. 39-41.

3. Семенов М.Ю., Рыжов Н.М. Моделирование неадиабатических процессов ионной нитроцементации // Тез. докл. 3-го собрания металлургов России. - Рязань, 1996. - С. 14-15.

4. Семенов М.Ю., Рыжов Н.М. Износостойкость цементованного слоя легированной стали с избыточной карбидной фазой // Трение и износ. - 1998. - Т. 19. № 2. - С. 235-240.

5. Модель диффузионного роста частиц карбидной фазы в цементованном слое теплостойких сталей / Н.М. Рыжов, М.Ю. Семенов, Р.С. Фахуртдинов, А.Е. Смирнов // МИТОМ. - 1998. - № 9. - С. 26-30.

6. Ryzhov N.M., Semenov M.J. Computer Simulation for Plasma Carburizing and Nitrocarburizing of Alloyed Steels // 11-th Congress of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering: Poster presentations - Florence (Italy), 1998. - Vol. III. - P. 37-43.

Подписано к печати 19.05.99г. Зак. 73 Объем 1.0 Тир. 100

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана