



Поликевич Ксения Борисовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.6.17. - Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Плохих Андрей Иванович**
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой материаловедения

Официальные оппоненты: **Страумал Борис Борисович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики твердого
тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии
наук (ИФТТ РАН),
заведующий лабораторией поверхностей раздела
в металлах

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович
кандидат технических наук,
Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии
наук (СО РАН),
заведующий лабораторией физического
материаловедения

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «МАДИ»)

Защита диссертации состоится « » _____ 2025 г. в _____ час. _____ мин.
на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим высылать по указанному адресу.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Известно, что благодаря диффузионным процессам происходит перераспределение вещества в твердом теле, поэтому именно диффузия играет ключевую роль в создании новых материалов и усовершенствовании существующих технологических процессов. Актуальным является разработка эффективных и производительных методов упрочнения материалов для повышения их эксплуатационных характеристик. Помимо этого, возрастает потребность в повышении эффективности проведения химико-термических обработок, что влияет на износостойкость изделий и, как следствие, на их ресурс.

Как показывают результаты исследований, существует возможность интенсификации диффузионных процессов, протекающих при химико-термических обработках, таких как азотирование, цементация, борирование и др. Эти методы связаны с применением ионизированных сред (Арзамасов Б.Н., Лахтин Ю.М.), использованием газобарического азотирования (Герасимов С.А., Мухин Г.Г., Алексеева М.С.), использование ультразвукового воздействия (Приходько В.М, Чудина О.В.), применение интенсивной пластической деформацией (Валиев Р.З.), а также с созданием специальной оребренной поверхности методом деформирующего резания (Зубков Н. Н.). Все рассмотренные процессы направлены на ускорение диффузии как по объему зерна, так и по межзеренным границам, скорость в которых значительно превышает скорость диффузионных процессов, происходящих в объеме (Бокштейн Б.С., Петелин А.Л., Страумал Б.Б.). Все рассмотренные методы имеют как ряд преимуществ, так и ряд недостатков.

Проведенный анализ показал, что актуальным может оказаться применение многослойных конструкционных материалов, обладающих искусственно созданной многослойной (ламинарной) структурой (Плохих А.И., Колесников А.Г.), с целью повышения интенсивности диффузионных процессов при поверхностном насыщении изделий.

Цель работы - разработка условий формирования диффузионных слоев при проведении азотирования многослойных стальных материалов с целью повышения их износостойкости.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решались следующие задачи:

1. Установление закономерностей протекания диффузионных процессов атомов внедрения в материалах, имеющих многослойное строение, протекающих по кинетическим моделям А, В, С (по Харрисону)
2. Установление закономерностей влияния толщины ламинарного слоя многослойных материалов на параметры диффузионного слоя.
3. Определение диффузионных параметров азота при диффузионном насыщении многослойных материалов, полученных на основе исследуемых сталей
4. Определение триботехнических характеристик диффузионных слоев многослойных материалов после химико-термической обработки (азотирования)

5. Разработка рекомендаций по формированию исходных композиций многослойных материалов с целью получения азотированных слоев максимальной глубины.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что основным фактором, стимулирующим увеличение глубины азотированного слоя, является ускоренная межслойная диффузия, которая является следствием:

- присутствия в структуре данных материалов ламинарных слоев, ориентированных в направлении диффузионного потока, при уменьшении толщины которых, увеличивается число межслойных границ, облегчающих проникновения азота от насыщаемой поверхности вглубь материала;

- работы источников объемной диффузии, которыми являются протяженные межслойные границы, заполняющие объемы ламинарных слоев в глубине многослойного материала при проведении азотирования.

Практическая значимость работы:

1. Экспериментально определены параметры межслойной диффузии для бинарных композиций многослойных материалов составов 08кп+08X18Н10, У8+08X18, У8+08X18Н10 при толщинах ламинарных слоев 100 мкм и 20 мкм при насыщении азотом.

2. Разработаны рекомендации по выбору сталей для создания азотируемых многослойных материалов, с реализацией кинетических моделей диффузии А и В (по Харрисону).

Апробация работы:

Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на Международной научно-практической конференции «Ключевые тренды в композитах: новые материалы и технологии» (Москва, 2018, 2019, 2020, 2021 г.), Междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (РАН РФ Москва, 2018, 2019 г.), Международных конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2018 г.), XII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (ИМЕТ РАН, 2018 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Высокопрочные стали для аэрокосмической техники и технологии их производств» (НИЦ «Курчатовский институт» ВИАМ, Москва, 2019 г.), XI Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, НИТУ «МИСиС», 2023 г.), Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2021, 2023, 2025 г.)

Методы исследования и достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечена использованием современного исследовательского оборудования, встроенных программ сбора и обработки данных и комплекса взаимодополняющих методов структурных исследований (оптическая микроскопия, электронная микроскопия). Обоснованность теоретических выводов подтверждена экспериментальными данными, полученными автором лично.

Личный вклад автора.

Вошедшие в диссертацию результаты получены автором под научным руководством кандидата технических наук, доцентом Плохих Андрея Ивановича. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке цели и задач исследования. Диссертантом был выполнен металлографический анализ объектов исследования с помощью оптической и электронной микроскопии с использованием оборудования кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автором был лично проведен расчет и определение параметров межслойной диффузии азота при насыщении многослойных материалов. Трибологические испытания были проведены на оборудовании лаборатории “Прочность конструкционных материалов” УЦД НУК МТ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе статьи в российских периодических рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 123 наименований. Работа содержит 140 страниц машинописного текста, 93 рисунка и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи работы, определены ее научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** дан обзор научных работ, посвященных вопросам интенсификации диффузионных процессов, среди которых интенсивная пластическая деформация (РКУП, ППД, ИП), физические методы воздействия (ультразвуковое воздействие, ударно-волновое воздействие), использование ионизированных сред (ионное азотирование), специальная подготовка поверхности (деформационное резание), газобарическое азотирование. Показано, что указанные методы имеют как ряд достоинств, так и ряд недостатков.

Показано, что применение ламинарных структур возможно для увеличения глубины диффузионного слоя за счет наличия протяженных границ без тройных стыков, что способствует увеличению коэффициента межслойной диффузии D_b .

На основе анализа литературных данных были сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** содержится описание выбора объектов исследования, способа их получения и методов исследования.

Для получения объектов исследования были использованы стали различных структурных групп, из которых были составлены следующие композиции: 08кп+У8, 08кп+08Х18Н10, У8+08Х18, У8+08Х18Н10, 08Х18Н10+08Х18, 08Х18+40Х13, 08Х18Н10+40Х13. Образцы данных многослойных материалов имели следующие структурное строение: 100-слойные образцы с толщинами

единичного (ламинарного) слоя -100 и 20 мкм, 1400-слойные с толщинами единичного (ламинарного) слоя 5 мкм и 1 мкм.

Подбор сталей для составления бинарных композиций осуществлялся в соответствии с анализом литературных данных по кинетике объемной диффузии элементов внедрения в присутствии различных легирующих элементов.

Установлено, что газовое азотирование дает оптимальное формирование концентрационного профиля для дальнейшего изучения и выполнения аналитической задачи по расчету параметров межслойной диффузии (тройного произведения $s\delta D_b$) азота в многослойных материалах.

Металлографические исследования проводились с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 с использованием программного обеспечения для анализа изображений SIAMS Photolab.

Микрорентгеноспектральный анализ выполнялся на шлифах, используемых при анализе для световой микроскопии. Исследования осуществлялись на сканирующем электронном микроскопе VEGA TS5130 при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Расчет тройного произведения $s\delta D_b$ для межслойной диффузии был выполнен по графической методике определения величины контурного угла при анализе диффузионных профилей, формируемых при химико-термической обработке (газовом азотировании), основанной на модели Фишера для расчета диффузионных процессов по границам зерен в металлических образцах. Ранее в работах было установлено, что слои в многослойной композиции отделены друг от друга большой угловой границей с углом разориентировки не менее 15° , таким образом, методика, основанная на модели Фишера, может быть применима для определения тройного произведения $s\delta D_b$ для межслойной диффузии азота в многослойных материалах.

$$s\delta D_b = (\Pi t)^{1/2} \cdot D^{3/2} \cdot \text{ctg} \Theta^2 \quad (1)$$

где s - коэффициент обогащения границы атомами диффундирующего компонента, t - время насыщения, D - коэффициент объемной диффузии, Θ - угол наклона концентрационного профиля к межслойной границе.

Для проведения триботехнических испытаний были использованы образцы после газового азотирования, проведенного при температуре 540°C и времени выдержки 45 ч с толщиной ламинарного слоя 100 мкм и количеством слоев 100 шт., прошедшие первый технологический цикл, также испытания проводились на образцах, прошедших второй технологический цикл, с количеством слоев 1500 шт. и толщиной ламинарного слоя 5 мкм.

Для оценки влияния структуры многослойных материалов на их износостойкость испытания проводились на триботехнической машине Scoda-Savina, которая была подвергнута модернизации в целях автоматизации процесса сбора и обработки экспериментальных данных. На место штатного индикатора часового типа был встроены датчик линейного перемещения ЛИР 17 (производитель СКБ ИС, Санкт-Петербург) с дискретностью измерения $0,1 \dots 10$ мкм.

На протяжении всего испытания фиксировалось заглубление h контртела (диск из ВК8) в испытываемый образец. Подключенный к АЦП-ЦАП датчик позволяет вводить массивы данных в ПК для дальнейшей их обработки. Визуализация процесса производится во время испытания в режиме реального времени в виде построения кривой изнашивания в координатах “заглубление-время” с частотой опроса датчика 1,5 с. По значению линейного заглубления возможно определять ряд основных триботехнических величин, таких как объемный износ, интенсивность изнашивания, скорость изнашивания, а также контактное давление в месте испытания.

Объёмный износ определяли из полученных величин линейного заглубления h и параметров контртела, выполненного в виде диска из ВК8. Считалось, что параметры контртела при проведении испытания оставались неизменными.

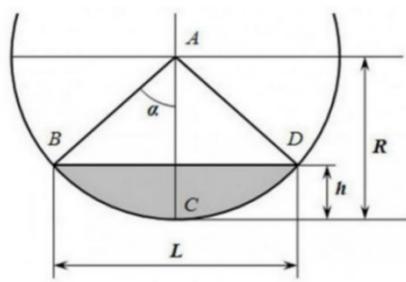


Рис. 1. Схема контртела

Изначально производились вычисления площади выработанного сектора (Рис.1), мкм^2 :

$$S_{ABC} = R^2 \arccos(1-h/R) - (R-h)((2Rh-h^2))^{1/2} \quad (2)$$

где h - линейное заглубление, R - радиус диска.

Объёмный износ определялся по формуле, $[\text{мкм}^3]$

$$V = Sb \quad (3)$$

где b - ширина диска

Интенсивность изнашивания определяется из отношения объемного износа V к пути трения l , $[\text{мкм}^3/\text{мкм}]$

$$I = V/l \quad (4)$$

Путь трения $[\text{мкм}]$, в свою очередь, зависит от частоты вращения ролика в единицу времени ω и времени проведения испытания.

$$l = t\omega \cdot 2\pi R \quad (5)$$

Скорость изнашивания - это отношение объемного износа к времени испытания, $[\text{мкм}^3/\text{с}]$.

$$v = V/t \quad (6)$$

Контактное давление в месте испытания $[\text{МПа}]$ в первоначальный момент времени определяли по формуле Герца, дальнейшее изменение - как отношение приложенной силы к площади выработки:

$$\sigma = m(FE_{\text{пр}}^2/R_{\text{пр}}^2)^{1/2} \quad (7)$$

где F - величина нагрузки, $E_{\text{пр}}$ - приведенный модуль упругости, $R_{\text{пр}}$ - приведенный радиус контактирующих тел, m - коэффициент, зависящий от соотношения радиусов кривизны контактирующих поверхностей.

По разработанной методике были произведены сравнительные триботехнические испытания многослойных материалов в направлении приложения нагрузки вдоль и поперек расположения слоев при нагрузке 98,07 (10 кг) (Рис. 2).

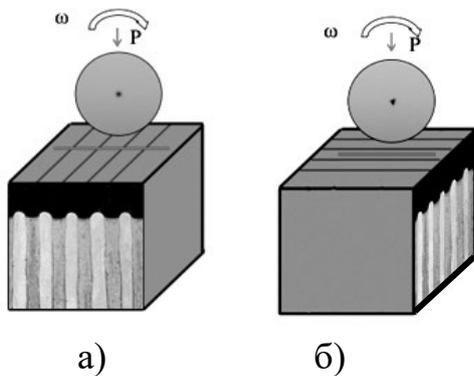


Рис. 2. Схема нагружения многослойных материалов (а - поперек слоев, б - вдоль слоев)

той же температуре, но при разной степени структуризации многослойной композиции, возможно изменение типа кинетического режима.

Показано, что преобладающая межслойная диффузия, при наличии объемной диффузии, относится к режиму А по Харрисону. Было установлено, что данный режим наблюдается на композиции, состоящей из легированных сталей 08X18+08X18N10 (Рис.3). В данном случае также наблюдается преобладающая межслойная диффузия, протекающая по большим угловым межслойным границам, но также наблюдается и объемная диффузия, протекающая по дефектам внутри слоя.

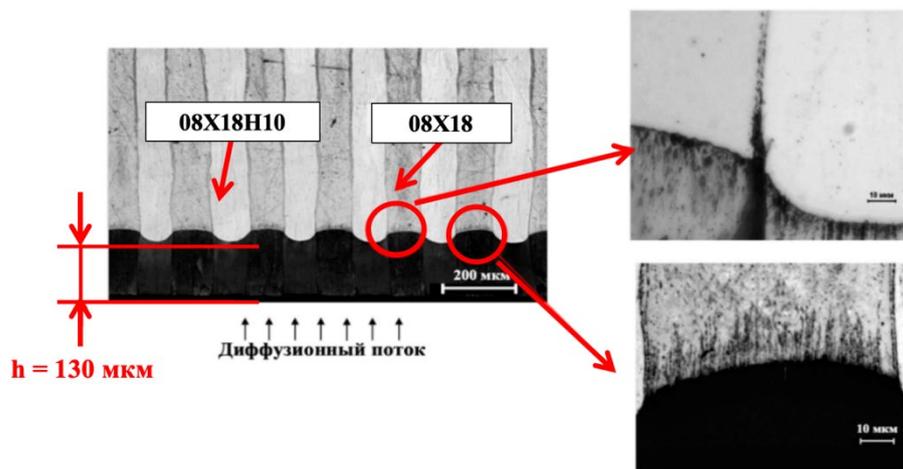


Рис. 3. Микроструктура композиции 08кп+У8 после газового азотирования. Толщина ламинарного слоя 100 мкм.

Установлено формирование в соседних слоях сталей выпуклых и вогнутых диффузионных менисков, что говорит о более интенсивном протекании объемной диффузии в стали 08X18, так как растворимость азота в присутствии никеля снижается, что проявляется в формировании вогнутого мениска. Данные предположения подтверждены результатами растровой электронной микроскопии. Результаты приведены в тексте диссертации.

В композициях 08кп+08X18N10 (Рис.4), У8+08X18N10 (Рис.5), У8+08X18 (Рис.6), установлено, что наблюдается опережающая межслойная диффузия с дальнейшим оттоком диффузанта в слой легированной стали за счет большей растворимости азота в присутствии легирующих элементов.

Формирование диффузионных слоев по такой схеме определяет кинетический режим В по Харрисону, который подразумевает преобладающую межслойную диффузию при возможности протекания объемной. Исходно диффузانت начинает двигаться по межслойной границе с дальнейшим оттоком в слой, что формирует концентрационный профиль определенного вида.

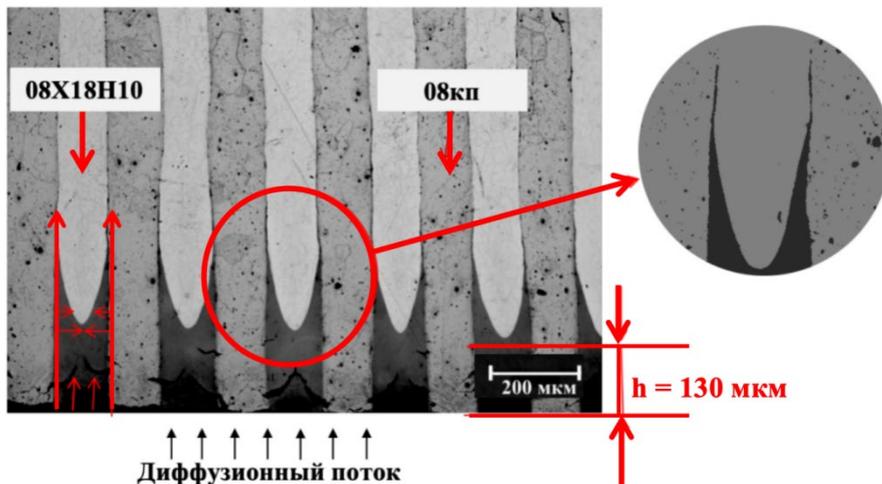


Рис. 4. Микроструктура композиции 08kp+08X18N10 после газового азотирования. Толщина ламинарного слоя 100 мкм

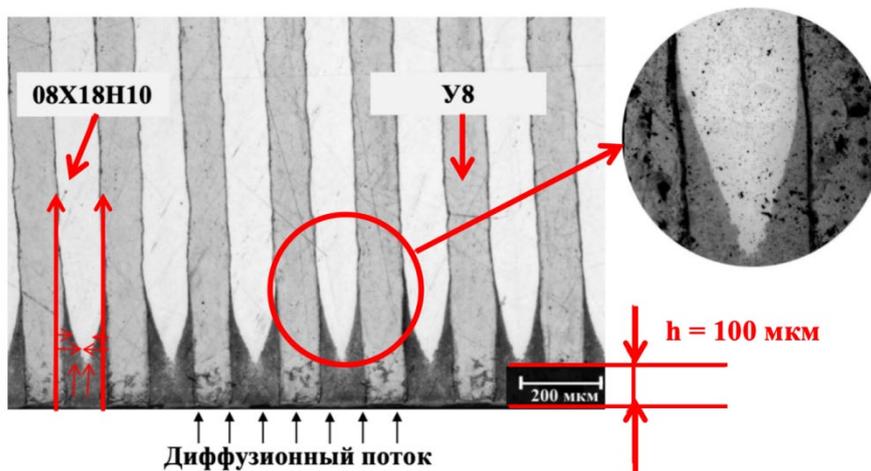


Рис. 5. Микроструктура композиции Y8+08X18N10 после газового азотирования. Толщина ламинарного слоя 100 мкм

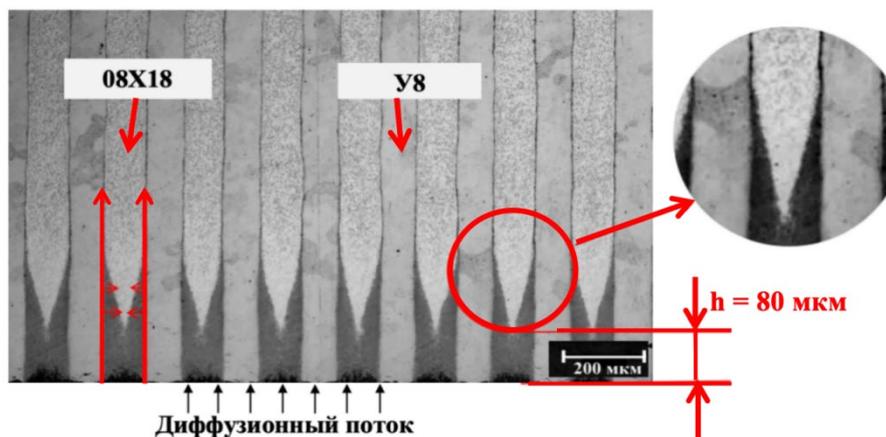


Рис. 6. Микроструктура композиции Y8+08X18 после газового азотирования. Толщина ламинарного слоя 100 мкм

Поэтому в данной композиции диффузионная проницаемость должна обеспечиваться движением азота именно по специально подготовленным границам, что говорит о протекании кинетического режима С по классификации Харрисона.

Таким образом, установлено, что в зависимости от химического состава многослойных материалов, наблюдаются различные кинетические режимы формирования диффузионных слоев по Харрисону. При толщине ламинарного слоя 100 мкм и при одной и той же температуре появление того или иного кинетического режима межслойной диффузии зависит от степени растворимости диффузанта в объеме материала. На основе проведенного анализа необходима корректировка моделей Харрисона в применении к многослойным металлическим материалам.

В предельной композиции, состоящей из попеременно чередующихся слоев сталей 08кп и У8 не было обнаружено активного потока объемной диффузии ввиду низкой растворимости азота в чистом железе, а также в присутствии углерода (Рис. 7).

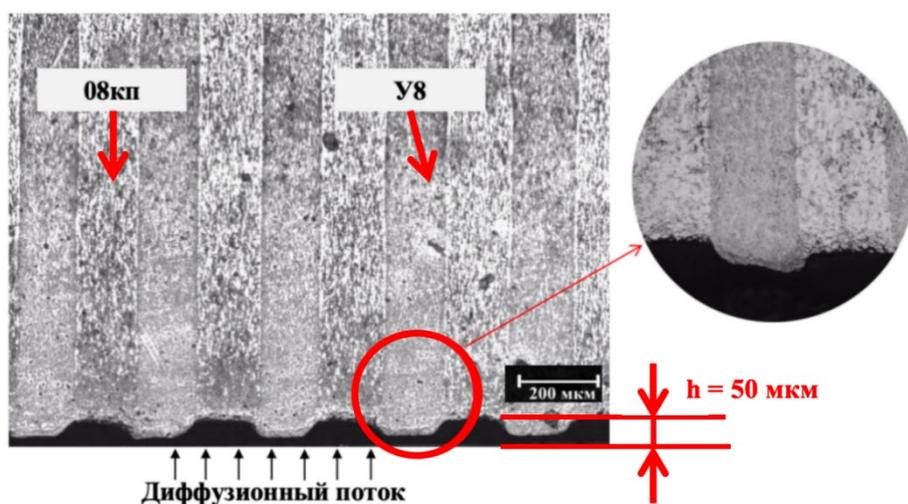


Рис. 7. Микроструктура композиции 08кп+У8 после газового азотирования. Толщина ламинарного слоя 100 мкм

Так как разработанный технологический процесс позволяет получать многослойные композиции с различными толщинами ламинарных слоев (100 мкм, 20 мкм, 5 мкм, 1 мкм), то важным оказался анализ влияния толщины ламинарного слоя на глубину диффузионного слоя. Установлено, что зависимость глубины диффузионного слоя от толщины ламинарного слоя многослойного материала имеет следующую зависимость: при уменьшении толщины ламинарного слоя происходит увеличение глубины диффузионного слоя (Рис. 8).

Данная закономерность выявляется на всех рассматриваемых композициях, вне зависимости от системы легирования, что подтверждает определяющую роль межслойных границ в процессе диффузионного насыщения.

Металлографические исследования, проведенные на многослойных композициях с толщиной ламинарного слоя 5 мкм, показывают преобладающую межслойную диффузию, о которой можно судить по продолжительным диффузионным трекам, направленным по межслойным границам (Рис.9).

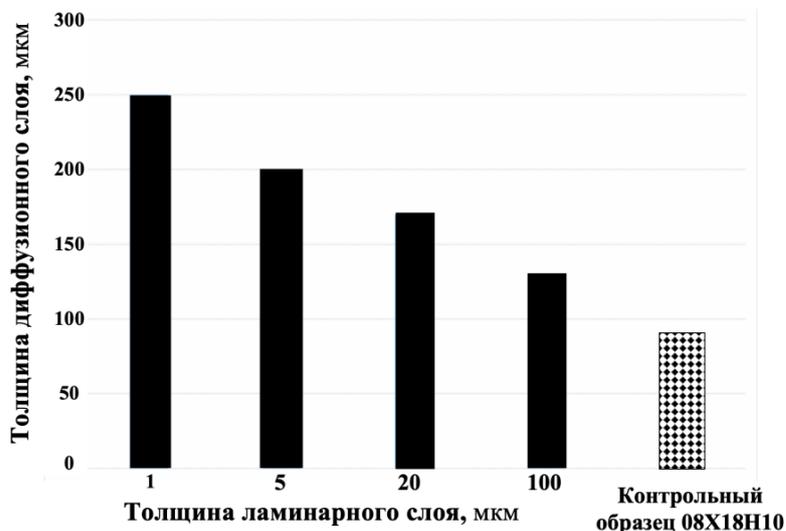


Рис. 8. Зависимость глубины диффузионного слоя в зависимости от толщины ламинарных слоев многослойного материала (08X18+08X18H10)

лируют с общими положениями о диффузионных процессах (Таблица 1).

Оценочный коэффициент межслойной диффузии определялся по статистическому набору углов, построенных к межслойной границе, после чего выводилось среднеквадратичное отклонение. Исследования, проведенные на образцах с толщинами ламинарных слоев 100 мкм и 20 мкм показали, что при уменьшении толщин ламинарных слоев коэффициент межслойной диффузии также увеличивается.

В четвертой главе

приведены результаты определения коэффициентов межслойной диффузии в многослойных материалах при толщинах ламинарных слоев 100 мкм и 20 мкм и при различных режимах насыщения ($t = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 45\text{ ч}$, $t = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 25\text{ ч}$).

Было установлено, что при увеличении температуры насыщения происходит рост оценочного коэффициента межслойной диффузии D_b . Полученные данные коррелируют с общими положениями о диффузионных процессах (Таблица 1).

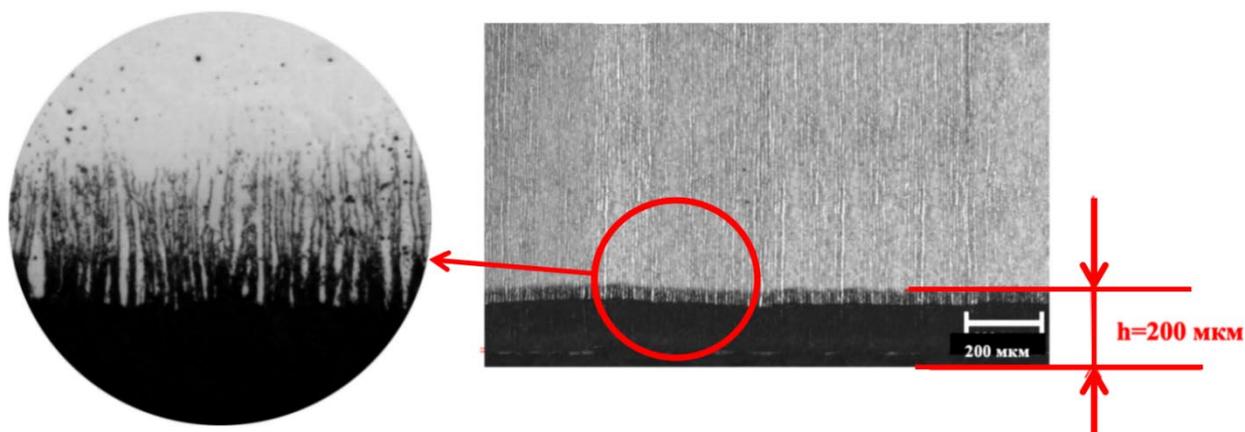


Рис. 9. Опережающая диффузия по межслойным границам в композиции 08X18+08X18H10. Толщина ламинарного слоя 5 мкм

Для объяснения полученных результатов сделано предположение о ведущей роли специально подготовленных межслойных границ, которое составило содержание научной новизны работы (Рис.10).

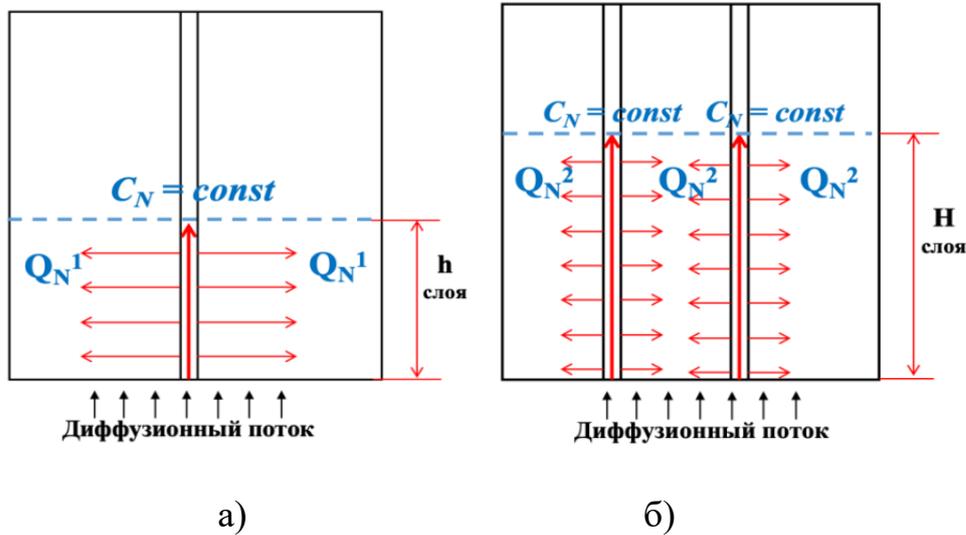


Рис. 10. Схема опережающей межслойной диффузии а) - толщина ламинарного слоя 100 мкм, б) - толщина ламинарного слоя 5 мкм). Q - количество диффузанта

Таблица 1.

Зависимость оценочного коэффициента D_b межслойной диффузии от температуры

Композиция	t насыщения, °C	$D_b, \text{м}^2/\text{с}$
08кп+08X18H10	540	$(6,9 \pm 2,9) \cdot 10^{-11}$
	580	$(2,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-10}$
У8+08X18H10	540	$(5,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-11}$
	580	$(2,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-10}$
У8+08X18	540	$(5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-11}$
	580	$(17,9 \pm 6,2) \cdot 10^{-10}$

Таблица 2.

Зависимость оценочного коэффициента межслойной диффузии D_b от толщин ламинарных слоев многослойного материала

Композиция	Толщина ламинарного слоя, мкм	$D_b, \text{м}^2/\text{с}$
08кп+08X18H10	100	$(6,9 \pm 2,9) \cdot 10^{-11}$
	20	$(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$

Продолжение Таблицы 2.

У8+08Х18Н10	100	$(5,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-11}$
	20	$(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$
У8+08Х18	100	$(5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-11}$
	20	$(1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$

Пятая глава посвящена описанию результатов трибологических испытаний многослойных материалов и анализу влияния ламинарной структуры на износостойкость исследуемых композиций. Результаты трибологических испытаний многослойных материалов различных композиций представлены ниже. Для получения значений, представленных в таблице, анализировалась кривая изнашивания на предмет установившегося износа и устанавливалось среднее арифметическое значение. Установлено, что все рассматриваемые композиции имеют значительную износостойкость при толщине ламинарного слоя 5 мкм при приложении нагрузки перпендикулярно расположению слоев.

Таблица 3.

Объемный износ материалов V [мм³] при 10 кг

Толщина слоя, мкм	Нагружение	08Х18+08Х18Н10	У8+08Х18	У8+08Х18Н10	40Х13+08Х18	40Х13+08Х18Н10
100	слоям	1,33	0,35	0,72	0,90	1,04
	⊥слоям	1,09	0,18	0,27	0,34	0,45
5	слоям	0,82	0,11	0,28	0,27	0,34
	⊥слоям	0,73	0,10	0,14	0,25	0,27

Таблица 4.

Интенсивность изнашивания материалов I, 10⁻⁷ [мм³/мм] при 10 кг

Толщина слоя, мкм	Нагружение	08Х18+08Х18Н10	У8+08Х18	У8+08Х18Н10	40Х13+08Х18	40Х13+08Х18Н10
100	слоям	10,1	3,81	10,2	6,02	5,78
	⊥слоям	7,79	1,49	2,05	2,57	3,35
5	слоям	7,74	2,20	2,04	2,48	2,06
	⊥слоям	5,38	1,46	1,57	1,86	1,63

Таблица 5.

Скорость изнашивания материалов $v, 10^{-3}$ [мм³/с] при 10 кг

Толщина слоя, мкм	Нагружение	08X18+ 08X18H10	У8+ 08X18	У8+ 08X18H10	40X13+ 08X18	40X13+ 08X18H10
100	слоям	5,4	1,16	1,71	2,36	2,54
	⊥слоям	3,7	0,89	0,62	0,83	1,19
5	слоям	1,8	0,57	0,62	0,76	0,81
	⊥слоям	0,74	0,51	0,45	0,67	0,73

Таблица 6.

Контактные напряжения материалов σ [МПа] при 10 кг

Толщина слоя, мкм	Нагружение	08X18+ 08X18H10	У8+ 08X18	У8+ 08X18H10	40X13+ 08X18	40X13+ 08X18H10
100	слоям	17,72	24,13	22,22	19,04	19,43
	⊥слоям	18,28	26,78	25,79	23,48	21,43
5	слоям	18,77	31,15	25,97	25,45	23,85
	⊥слоям	19,34	33,74	30,32	27,26	29,21

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что при уменьшении толщины ламинарных слоев от 100 до 5 мкм, количество слоев в зоне контакта увеличивается за счет увеличения «дисперсности» многослойной структуры. Важным в данном случае является и то, что в процессе эксперимента, по-разному меняется характер выработки пятна контакта на образце, при параллельном или перпендикулярном испытании соответственно. При параллельном испытании (|| слоям), число слоев остается постоянным по всей ширине контртела (Рис. 11а). В тоже время при перпендикулярном испытании (⊥слоям), число слоев по мере увеличения протяженности дуги контакта (по мере заглубления контртела) также увеличивается (Рис. 11б). Это приводит к тому, что по мере заглубления контртела, сопротивляется износу все большее количество структурных элементов (слоев), ранее не подвергнутых износу, что приводит к повышению износостойкости многослойного материала.

Сравнительный эксперимент на образцах композиции 08X18H10+08X18 и образцах хромоникелевой коррозионностойкой мартенситностареющей стали 03X11H10M2T, которые были подвергнуты совместному азотированию, показал, что наличие многослойной структуры в отсутствие дисперсной упрочняющей фазы в композиции 08X18H10+08X18, повышает износостойкость материала (уменьшает объемный износ), особенно при уменьшении толщины ламинарных слоев до 5 мкм. Установлено, что в композиции

08X18H10+08X18 в местах контакта со сталью 08X18, наблюдается более интенсивный износ в сравнении с соседней аустенитной сталью. Большая износостойкость многослойной композиции в сравнении поликристаллическим образцом из стали 03X11H10M2T может быть объяснена многослойным строением и более высокой степенью дисперсности структурных составляющих.

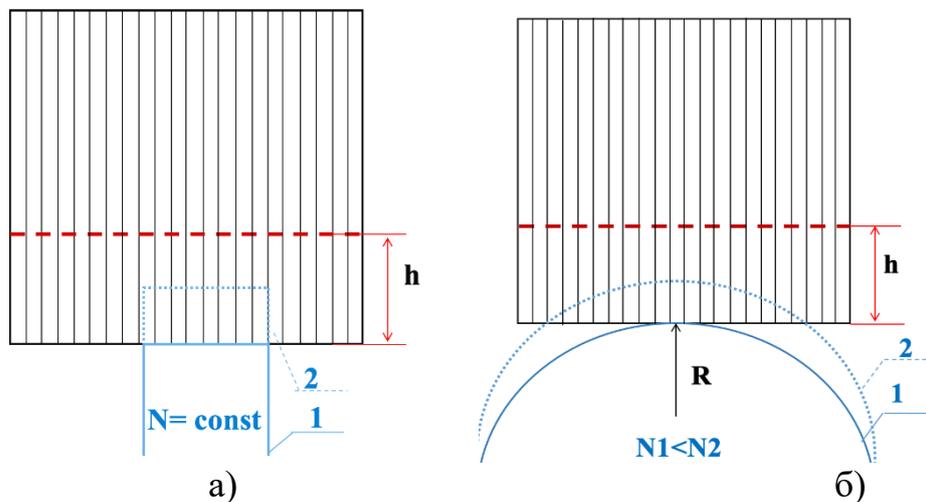


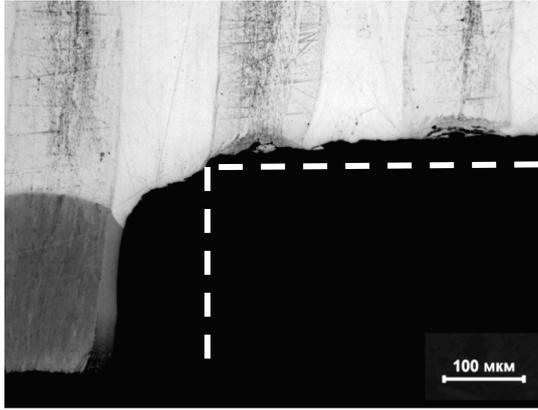
Рис. 11
Схема контактирования контртела с многослойным образцом

(N - количество слоев в зоне контакта) а) приложение нагрузки параллельно слоям б) приложение нагрузки перпендикулярно слоям

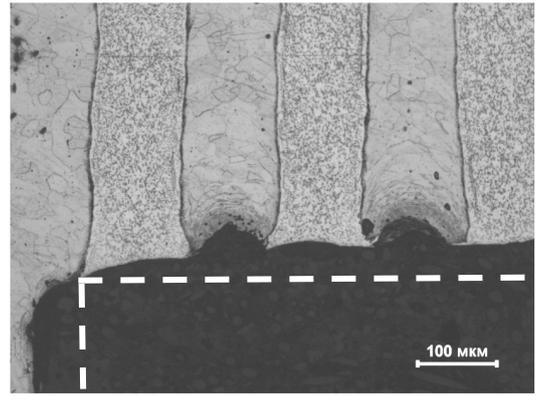
Это также подтверждается микроструктурой образца композиции У8+08X18H10, в которой наблюдается чередование твердых слоев (ранее бывших сталью 08X18H10) с карбидной фазой Cr_{23}C_6 и мягких слоев, обедненных углеродом (ранее бывших сталью У8), которые подвергаются активному износу (Рис. 12).

Таким образом, основной причиной повышения стойкости к износу является многослойное строение, что подтверждается проведенным сравнительным анализом характеристик износостойкости многослойной композиции и поликристаллического образца на основе коррозионностойких сталей, дополнительным фактором является наличие разнородных по фазовому составу слоев в присутствии упрочняющей карбидной фазы.

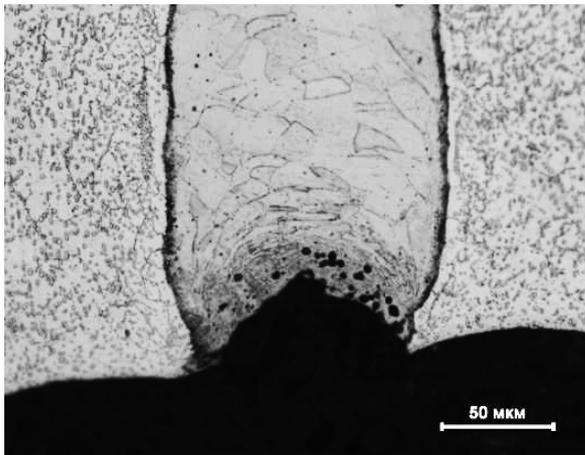
Для оценки влияния структуры многослойных материалов также были проведены сравнительные испытания многослойных материалов с промышленно используемыми сложнолегированными сталями 15X12H2MBФАБ, 38X2MЮА, 15X16K5H2MBФ, 03X11H10M2T после закалки и газового азотирования. Сравнительный анализ проводился с многослойными материалами при приложении нагрузки перпендикулярно слоям после первого и второго технологических циклов с толщинами ламинарных слоев 100 мкм и 5 мкм, соответственно. Установлено, что все композиции после второго технологического цикла с толщиной ламинарного слоя 5 мкм обладают меньшим объемным износом, чем промышленно используемые стали, что говорит об их высоком уровне износостойкости (Рис.13).



а)



б)



в)

Рис. 12. Микроструктура многослойных композиций в зоне контакта при приложении нагрузки параллельно слоям. а) композиция 08X1810+08X18 б) композиция У8+08X18Н10, в) фрагмент участка износа У8+08X18Н10. Пунктиром обозначен профиль контртела.

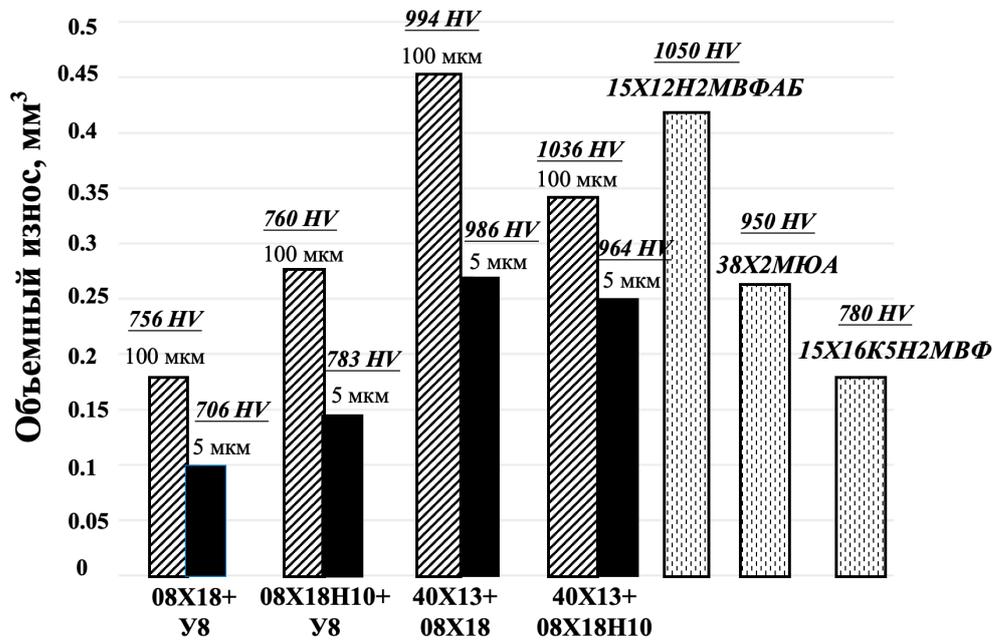


Рис. 13. Объемный износ многослойных материалов и промышленно используемых сталей (100 мкм и 5 мкм - толщина ламинарного слоя)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В работе установлены следующие закономерности диффузии атомов азота в материалах, имеющих ламинарное строение с реализацией кинетических моделей по Харрисону А - (08X18+08X18N10), В - (08кп+08X18N18, У8+08X18, У8+08X18N10) и С - (08кп+У8):

- многослойные материалы, подобранные под кинетические режимы А и В показали соответствие теоретическим режимам. Установлено, что в композиции 08X18+08X18N10 наблюдается ускоренная межслойная диффузия, также наблюдается активная объемная диффузия, что приводит к образованию диффузионных профилей, формирование которых складывается из потоков объемной и межслойной диффузии;

- в композициях, соответствующих моделям типа В (08кп+08X18N18, У8+08X18, У8+08X18N10), протекает активная межслойная диффузия с последующим оттоком диффузанта в слои легированной стали, что приводит к формированию диффузионного профиля, отличного от профиля, формирующегося в композициях, классифицирующийся по кинетическому режиму типа А;

2. Установлено, что с уменьшением толщины единичного (ламинарного) слоя многослойных материалов происходит увеличение глубины диффузионного слоя: в композиции 08X18N10+08X18, диффузионное насыщение которой исходно происходит по кинетическому режиму А, глубина диффузионного слоя составляет 130 мкм, 180 мкм, 200 мкм, 250 мкм при толщинах ламинарных слоев 100 мкм, 20 мкм, 5 мкм и 1 мкм, соответственно, при глубине азотированного слоя контрольного образца из стали 08X18N10, равной 90 мкм; в композиции У8+08X18N10, диффузионное насыщение которой исходно происходит по кинетическому режиму В, глубина диффузионного слоя составляет 80 мкм, 180 мкм, 200 мкм при толщинах ламинарных слоев 100 мкм, 20 мкм, 5 мкм, соответственно.

2. Определены оценочные коэффициенты межслойной диффузии при диффузионном насыщении азота многослойных материалов при температурах 540 °С и 580 °С.

t = 540 °С: 08кп+08X18N10 $D_b = (6,9 \pm 2,9) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18N10 $D_b = (5,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18 $D_b = (5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$.

t = 580 °С: 08кп+08X18N10 $D_b = (2,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18N10 $D_b = (2,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18 $D_b = (17,9 \pm 6,2) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определены оценочные коэффициенты межслойной диффузии при диффузионном насыщении азота многослойных материалов при толщине ламинарного слоя 100 мкм и 20 мкм.

100 мкм: 08кп+08X18N10 $D_b = (6,9 \pm 2,9) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18N10 $D_b = (5,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18 $D_b = (5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$.

20 мкм: 08кп+08X18N10 $D_b = (1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18N10 $D_b = (1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, У8+08X18 $D_b = (1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

4. При проведении сравнительных испытаний на машине Scoda-Savina установлено:

- все образцы композиций многослойных материалов с толщинами ламинарных слоев 5 мкм имеют большую износостойкость (меньший объемный износ) по сравнению с образцами композиций с толщинами слоев 100 мкм.
- сравнительные испытания образцов стали 03X11H10M2T после азотирования и объемной обработки и образцов многослойных материалов композиции 08X18H10+08X18 с толщинами ламинарных слоев 5 мкм показали, что износостойкость многослойных материалов более чем в 4 раза превосходит свойства указанной стали.
- сравнительные испытания образцов сталей 15X12H2МВФАБ, 38Х2МЮА, 15Х16К5Н2МВФ после азотирования и объемной обработки и образцов многослойных материалов композиций У8+08Х18, У8+08Х18Н10 с толщинами ламинарных слоев 5 мкм показали, что многослойные материалы превышают износостойкость рассмотренных сталей не менее чем в 2 раза.

5. На основании проведенных исследований по изучению закономерностей формирования диффузионных слоев и износостойкости можно рекомендовать выбор бинарных композиций сталей, основанный на реализации кинетических моделей типа А и В (по Харрисону). Максимальная глубина азотированного слоя и износостойкость может быть обеспечена при использовании многослойных материалов с толщиной ламинарного слоя 5 мкм.

Основные положения диссертации отражены в указанных ниже работах

1. Поликевич К.Б. Диффузия азота по границам слоев при азотировании многослойных материалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67. № 3. С. 318-324. (0.69 п.л./0.23 п.л.)
2. Поликевич К. Б., Плохих А. И. Исследование сравнительной износостойкости многослойных стальных материалов после азотирования методом Шкода-Савина // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23. № 1. – С. 32-39. (0.69 п.л./0.35 п.л.)
3. Polikevich K. B. Grain-boundary nitrogen diffusion model in multilayer materials [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т.1990. № 1. P. 012004. DOI 10.1088/1742-6596/1990/1/012004. (0.25 п. л. /0.06 п. л.)
4. Polikevich K. B., Plokhikh A. I., Fomina L. P. Possibilities of Obtaining Diffused Layers upon Saturation of Multilayer Materials with Nitrogen and Carbon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т.934. № 1. P. 012054. DOI 10.1088/1757-899X/934/1/012054. (0.58 п. л. / 0.2 п. л.)
5. Polikevich K. B., Plokhikh A. I. Study of the process of nitriding in multilayer materials based on steel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Т. 683. № 1. P. 012054. DOI 10.1088/1757-899X/683/1/012048. (0.46 п. л./ 0.23 п.л.)
6. Plokhikh A. I, Polikevich K. B. Nitriding of multilayer steel materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 560. № 1. P. 012086. DOI 10.1088/1757-899X/560/1/012086. (0.58 п. л. / 0.29 п. л.)

7. Поликевич К. Б., Плохих А. И. Исследование закономерностей процесса азотирования многослойных металлических материалов, полученных на основе сталей // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции. 2019. С. 592-597. (0.46 п. л./ 0.23 п. л.)
8. Поликевич К. Б., Тенькова А. С., Плохих А. И. Сравнительный анализ процессов структурообразования в многослойных металлических материалах при диффузионном насыщении элементами внедрения (С, N) // Новые материалы и перспективные технологии: Сборник материалов пятого междисциплинарного научного форума с международным участием. 2019. С. 725-729. (0.35 п. л./ 0.11 п. л.)
9. Поликевич К. Б., Плохих А. И., Петелин А. Л. Оценка коэффициента зернограничной диффузии азота в многослойных металлических материалах путем построения математической // Новые материалы и перспективные технологии: Сборник материалов Шестого междисциплинарного научного форума с международным участием. 2020. Т 1. С. 210-213. (0.35 п. л./ 0.11 п. л.)
10. Поликевич К. Б., Плохих А. И., Фомина Л. П. Модель зернограничной диффузии азота в многослойных материалах // Необратимые процессы в природе и технике: Одиннадцатая Всероссийская конференция: труды конференции. 2021. Т.1. С. 102-105. (0.35 п. л./ 0.11 п. л.)
11. Плохих А. И., Поликевич К. Б. Возможности интенсификации диффузионных процессов при азотировании ламинарной структуры// Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2023: Сборник трудов XI Евразийской научно-практической конференции. 2023. С. 199. (0.12 п. л./ 0.06 п. л.)
12. Поликевич К. Б., Плохих А. И. Определение коэффициента зернограничной диффузии в многослойных металлических материалах с различной степенью структуризации // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Двенадцатой Всероссийской конференции. 2023. С. 462-464. (0.23 п. л./ 0.11 п. л.)
13. Плохих А. И., Поликевич К. Б., Гулай П. А. Химико-термическая обработка многослойных конструкционных материалов, полученных на основе сталей // Будущее машиностроения России. 2018. С. 162-166. (0.4 п. л./ 0.13 п. л.)
14. Поликевич К. Б., Тенькова А. С., Плохих А. И. Анализ зернограничной диффузии азота в многослойных материалах по величине концентрационного профиля // Будущее машиностроения России. 2019. С. 278 - 282. (0.4 п. л./ 0.13 п. л.)