

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.21+539.12.043

СТАЛЬМОШЁНОК

Елена Константиновна

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ,
ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Минск, 2009

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель — **Углов Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики твердого тела
физического факультета Белорусского
государственного университета.

Официальные оппоненты: **Гайдук Петр Иванович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры физической
электроники факультета радиофизики
и электроники Белорусского
государственного университета;

Поплавский Василий Владимирович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры физики Учреждения
образования «Белорусский государственный
технологический университет».

Оппонирующая организация — Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси».

Защита состоится 27 февраля 2009 года в 16⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская 8, корпус юридического факультета, ауд. 407.

Телефон ученого секретаря (017) 209-55-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « » января 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук,
доцент

В.Ф. Стельмах

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач физики конденсированного состояния и материаловедения является поиск новых способов модификации материалов. При этом большое количество исследований ведется в области обработки сплавов на основе железа, которые являются наиболее широко применяемыми технически важными материалами. Их модификация осуществляется с помощью легирования и изменения структуры. В последние десятилетия особое развитие получили методы поверхностной обработки, заключающиеся в воздействии концентрированных потоков энергии, в качестве которых выступают высокоэнергетические электронные и мощные ионные пучки и высокоэнергетические плазменные потоки. Модифицирование свойств материалов осуществляется в основном за счет нагрева поверхностного слоя вплоть до плавления и последующего закалочного эффекта, обусловленного быстрым охлаждением.

Значительные перспективы представляет использование квазистационарных плазменных ускорителей с собственным азимутальным магнитным полем, генерирующих компрессионные плазменные потоки, которые характеризуются относительно большой длительностью существования – сотни микросекунд. Такие параметры плазмы, в отличие от других источников концентрированных потоков энергии, обеспечивают большие глубины оплавления и модификации, а также продолжительность обработки, достаточную для протекания физических процессов, обеспечивающих формирование упроченной структуры.

Актуальным является возможность изменения под действием компрессионных плазменных потоков структуры поверхностных слоев материалов в условиях сверхбыстрого затвердевания с одновременным легированием различными элементами. Получение знаний о закономерностях формирования структуры, фазового состава и распределения элементов по глубине позволит создавать легированные поверхностные слои сталей, обладающие улучшенными механическими характеристиками, что важно для практического применения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Диссертационная работа выполнена в Белорусском государственном университете в рамках НИР БГУ. Тема диссертации соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 17 мая 2005 г., в частности, пунктам 3.3 «структура и свойства кристаллических и неупорядоченных систем, научные

основы создания новых магнитных, сегнетоэлектрических, полупроводниковых, сверхпроводящих, квантово-электронных и сверхтвердых материалов» и 3.4 «новые высокоэнергетические технологии обработки материалов».

Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих научных программ и исследовательских проектов:

– ГПФИ «Плазмодинамика», задание 01 «Исследование структурно-фазовых изменений и физико-механических свойств металлов и полупроводников при воздействии на них компрессионных плазменных потоков» (№ госрегистрации 20022186, 2002-2005 гг.);

– грант студентов и аспирантов БГУ «Синтез низкоразмерных структур при высокоинтенсивном плазменном воздействии» (№ госрегистрации 20042134, 01.01.2004-31.12.2004);

– грант студентов и аспирантов БГУ «Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях при плазмо-ассистируемой обработке» (№ госрегистрации 20051091, 01.01.2005-31.12.2005);

– грант студентов и аспирантов БГУ «Структурно-фазовое состояние и механические свойства системы покрытие-подложка, подвергнутой воздействию компрессионных плазменных потоков» (№ госрегистрации 20061005, 01.01.2006-31.12.2006);

– проект Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Формирование композитных слоев и поверхностных структур при воздействии компрессионных плазменных потоков на металлы и полупроводники» (№ госрегистрации 20064415, договор №Т06М-193 от 01.04.2006);

– ГПОФНИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание 1.24 «Модификация поверхностных свойств металлов и сплавов при высокоэнергетическом воздействии компрессионных плазменных потоков, изучение их структуры и свойств для разработки новых технологий улучшения эксплуатационных характеристик материалов» (№ госрегистрации 20068499, 2006-2010 гг.);

– ГКПНИ «Кристаллические и молекулярные структуры», задание 41 «Структурно-фазовое состояние многокомпонентных поверхностных слоев металлических и полупроводниковых материалов, формируемых при воздействии концентрированных плазменных потоков» (№ госрегистрации 20063174, 2006-2010 гг.).

Цель и задачи исследования. *Целью* работы являлось установление закономерностей и особенностей формирования структурно-фазового состояния и распределения элементов в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами под действием компрессионных плазменных потоков, формируемых в среде азота.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать способ легирования поверхностных слоев углеродистой стали металлами под действием компрессионных плазменных потоков;
- изучить закономерности и особенности структурно-фазовых изменений и распределений элементов по глубине в зависимости от параметров воздействия и типа легирующего металла;
- разработать модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков;
- изучить механические свойства легированных слоев и их термическую стабильность.

Объектом исследования являлась углеродистая сталь Ст3, представляющая собой модельный материал, не содержащий других легирующих элементов, кроме углерода, что позволяет выявить основные закономерности влияния легирования и воздействия компрессионных плазменных потоков на структурно-фазовые изменения и механические свойства железоуглеродистых сплавов. В качестве легирующих элементов использовались металлы Zr, Ti, Mo, Cr и Ni. Выбор легирующих металлов связан с выявлением влияния элементов различных групп периодической системы Д.И. Менделеева на структурно-фазовое состояние и свойства легированных слоев стали.

Предметом исследования являлись структурно-фазовое состояние, распределение элементов, твердость и коэффициент трения, термическая стабильность структуры, состава и механических свойств поверхностных слоев углеродистой стали, легированных под действием компрессионных плазменных потоков.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный способ легирования поверхностных слоев углеродистой стали, включающий предварительное нанесение на поверхность стали слоя легирующих металлов (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) толщиной 0,4-10,0 мкм и последующее воздействие концентрированных потоков энергии, отличающийся тем, что воздействие осуществляют компрессионными плазменными потоками, формируемыми в среде азота, длительностью 100 мкс при плотности мощности $(1,3-4,0) \cdot 10^5$ Вт/см², что обеспечивает формирование глубоких (5-20 мкм) слоев, легированных металлами (2-25 ат.%) и азотом (8-62 ат.%).

2. Разработанная модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков, учитывающая нагрев и плавление поверхностных слоев, жидкофазное перемешивание легирующего металла и основы, включающее диффузию металла в расплаве и конвективное перемешивание расплава под действием градиентов температуры и концентрации, охла-

ждение за счет теплоотвода на массу образца, перераспределение легирующего металла на движущейся со скоростью 0,3-0,7 м/с границе затвердевания, диффузионное насыщение азотом из остаточной атмосферы в жидкой и твердой фазах, формирование твердых растворов легирующих элементов в α - и γ -Fe и нитридов легирующих металлов при взаимодействии с азотом в приповерхностных слоях, не превышающих глубину проникновения азота.

3. Экспериментально установленные особенности изменения механических свойств углеродистой стали Ст3, заключающиеся в увеличении твердости поверхностных слоев, легированных металлами (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni), до 3,5 раз; уменьшении коэффициента трения в 1,5-3,7 раза при легировании цирконием и молибденом; сохранении повышенных значений твердости легированного цирконием слоя стали при нагреве до 800 °С, что обусловлено формированием твердых растворов, нитридов и мелкодисперсной структуры легированных слоев.

Личный вклад соискателя. Соискатель принимал участие в обсуждении задач исследования, приготовлении и обработке образцов, выполнял анализ и интерпретацию результатов по морфологии, элементному и фазовому составу, полученных методами растровой электронной микроскопии, оже-электронной спектроскопии, резерфордовского обратного рассеяния, мессбауэровской спектроскопии, рентгеноструктурного анализа. Соискателем определены твердость и трибологические характеристики поверхностных слоев исследуемого материала, выполнены эксперименты по изучению термической стабильности, разработана модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков, сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту. Соискатель проводил расчеты распределения температуры, диффузионного распределения легирующих элементов и конвективного перемешивания. Научный руководитель д.ф.-м.н. Углов В.В. сформулировал цель и задачи исследований, принимал участие в обсуждении полученных результатов, выводов и положений. Соавтор работ д.ф.-м.н. Анищик В.М. принимал участие в обсуждении результатов работы. К.ф.-м.н. Черенда Н.Н. оказал помощь в получении спектров резерфордовского обратного рассеяния и их анализе, а также высказал ряд ценных замечаний по содержанию публикуемых материалов. Спектры оже-электронов были получены Уховым В.А. К.ф.-м.н. Федотова Ю.А. оказала помощь в получении мессбауэровских спектров. Обработка образцов компрессионными плазменными потоками проводилась при помощи сотрудников сектора физики плазменных ускорителей Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не затрагивающих тему диссертационной работы.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты, изложенные

в диссертационной работе, докладывались на: XIV, XV и XVII Международных совещаниях «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2004, 2005 и 2007); XXXIV-XXXVIII Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2004-2008); Nanomeeting-2005: International Conference on Physics, Chemistry and Application of Nanostructures (Minsk, 2005); VI и VII Международных конференциях «Взаимодействие излучения с твердым телом» (ВИТТ) (Минск, 2005 и 2007); V International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT) (Minsk, 2006); 10-th International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta (Crimea), 2004); IV International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation» (NEET) (Zakopane, 2005); V and VI International symposium «Ion Implantation and Other Application of Ions and Electrons» (ION) (Kazimierz Dolny, 2004 and 2006); XV Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2007); Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ) (Минск, 2007); XII-XIV Республиканских научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов по физике конденсированного состояния (ФКС) (Гродно, 2004-2006); X Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС-2005» (Минск, 2005).

Опубликованность результатов диссертации. Результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 33 научных работах: 9 статьях в рецензируемых научных журналах, что составляет 5,3 авторских листа; 10 статьях в материалах научных конференций, 14 тезисах докладов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основного текста, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 157 страниц, включая 53 рисунка на 30 страницах, 8 таблиц на 4 страницах, 2 приложения на 5 страницах. Библиографический список содержит 205 наименований на 19 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проводится анализ современного состояния исследований по поверхностному легированию материалов. Поверхностная обработка может обеспечить как уменьшение потребности в большом количестве легирующих элементов, так и создание твердого износостойкого слоя на рабочей поверхности материала, имеющего вязкую сердцевину. Рассмотрено развитие методов поверхностного легирования от традиционной химико-термической обработки

и ионной имплантации до воздействия концентрированных потоков энергии, когда поверхностный слой подвергается нагреву до высоких температур и последующей закалке. Структурно-фазовые изменения в модифицированных слоях при этом определяются исходным состоянием обрабатываемого материала и параметрами воздействия – плотностью мощности, длительностью и количеством импульсов, составом потока, что характеризует преимущества и недостатки использования различных пучков заряженных частиц. Среди видов концентрированных потоков энергии выделяются компрессионные плазменные потоки (КПП), характеризующиеся относительно большой длительностью существования – 100-500 мкс, плотностью мощности – 10^5 - 10^6 Вт/см², температурой плазмы – 10^4 - 10^5 К, что делает перспективным их использование для поверхностной модификации материалов. В настоящее время накоплен обширный материал по изучению структурно-фазовых изменений, происходящих в железе и сплавах на его основе под действием КПП, получено формирование упрочненных поверхностных слоев, характеризующихся многозонной структурой (зона оплавления и зона термического влияния). Дальнейшая модификация поверхностных слоев сталей может осуществляться за счет дополнительного легирования, что вызывает необходимость поиска способа легирования под действием КПП, а также выявления особенностей структурно-фазовых состояний, сформированных под действием высокоэнергетического воздействия в условиях легирования элементами различных групп периодической системы и высокоскоростного затвердевания из расплава. Для осуществления эффективной модификации поверхностных слоев материалов требуется получение полной картины физических процессов, обеспечивающих легирование под действием плазменных потоков. Таким образом, проведенный анализ современного состояния исследований по поверхностному легированию материалов позволил определить предмет и сформулировать цель и задачи исследования.

Во **второй главе** описывается объект исследования, методы обработки и экспериментальные методы исследования. Объектом исследования являлась углеродистая сталь Ст3 (состав в вес.% – 0,2 С, 0,2 Si, 0,5 Mn). В качестве легирующих элементов использовались металлы IV, VI и VIII групп периодической системы: Zr, Ti, Mo, Cr и Ni.

Для осуществления легирования был использован разработанный способ, включающий предварительное нанесение на поверхность стали покрытия легирующего металла (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) толщиной 0,4-10,0 мкм и последующее воздействие КПП, формируемых в среде азота, длительностью 100 мкс. Воздействие КПП осуществлялось с помощью магнитоплазменного компрессора в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанная вакуумная камера заполнялась рабочим газом – азотом – до давления в 400 Па. Варьирова-

лись параметры воздействия: плотность мощности (W) – $(1,3-4,0) \cdot 10^5$ Вт/см² и количество импульсов КПП (n) – один или пять. Плотность мощности – это величина, определяющая количество выделившейся энергии за единицу времени на единице площади поверхности, и характеризующая тепловой поток, который обеспечивает нагрев поверхностных слоев материала.

Приведено описание комплекса современных аналитических методов исследования, которые дают наиболее полную информацию о структурно-фазовом состоянии и элементном составе сформированных поверхностных слоев. Морфологию поверхности и толщину модифицированных слоев анализировали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, LEO1455VP). Элементный состав и распределение элементов по глубине определяли методами резерфордовского обратного рассеяния (РОР, High Voltage Engineering tandetron system, ионы гелия с энергией 6 МэВ), оже-электронной спектроскопии (ОЭС, РН-660, ионы аргона с энергией 3,5 кэВ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА, Röntec). Фазовый состав определяли методами рентгеноструктурного анализа (РСА, ДРОН-4, CuK_α) и конверсионной электронной мессбауэровской спектроскопии (КЭМС, ЯГРС-4, $^{57}\text{Co/Rh}$, 25 мКи). Измеряли твердость методом микроиндентирования (ПМТ-3, 0,2-2,0 Н), определяли коэффициент сухого трения скольжения (ТАУ-1М, 1,0 Н). Изучали термическую стабильность с помощью изохронного отжига (вакуум не хуже 10^{-3} Па, 200-1000 °С, 30 мин).

Третья глава содержит результаты исследования структуры поверхностных и объемных слоев углеродистой стали, изучения процессов, протекающих при воздействии КПП на сталь с нанесенным слоем легирующего металла, а также установления механизмов перераспределения легирующих металлов по глубине.

Обнаружено, что в результате воздействия КПП при $W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см² формируется слой толщиной 10-15 мкм, содержащий легирующий металл (рисунок 1). Элементы покрытия проникают на глубину, в несколько раз превышающую толщину предварительно нанесенного слоя металла. Легирование осуществляется в жидкой фазе на глубину, соответствующую расплавленному слою. С ростом плотности мощности с 1,3 до $4,0 \cdot 10^5$ Вт/см² обнаружено увеличение толщины расплавленного слоя и глубины легирования с 5 до 20 мкм. Воздействие КПП при $n=5$ обеспечивает более однородное легирование. Легированный слой обладает плохой травимостью в спиртовом растворе азотной кислоты («белый» слой), что свидетельствует об его гетерогенной высокодисперсной структуре (рисунок 1). Увеличение времени травления выявило мелкодисперсную структуру слоя, размер структурных составляющих более чем на порядок меньше по сравнению с исходной ферритно-перлитной структурой стали, что обусловлено увеличением числа центров кристаллизации в условиях сильного переохлаждения расплава и высокой скорости затвердевания.

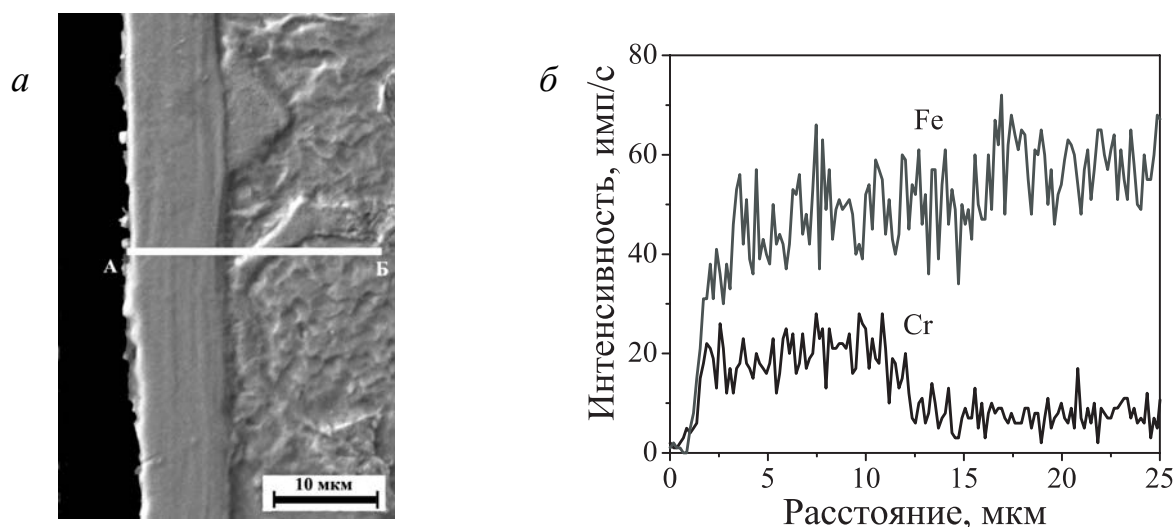


Рисунок 1 – РЭМ изображение поперечного сечения (а) и распределения интенсивностей линий характеристического рентгеновского излучения $K_{\alpha 1}$ Fe и Cr (б), измеренные вдоль линии АБ, поверхностного слоя стали, легированного хромом под действием КПП ($W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см², $n=5$, N_2)

Параметры плавления, вызванного воздействием КПП, и последующей кристаллизации в результате теплоотвода на массу образца определялись с помощью моделирования температурных полей с учетом фазовых переходов, включающих процессы плавления и кристаллизации, при наличии теплового источника, задаваемого режимами воздействия. Согласно расчету, скорости нагревания и охлаждения при $W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см² составляют 2,0 и $1,5 \cdot 10^7$ К/с, соответственно, и увеличиваются с ростом W до $4,0 \cdot 10^5$ Вт/см² и составляют 3,5 и $2,5 \cdot 10^7$ К/с, соответственно. Определен градиент температуры, который при используемых величинах W изменяется в диапазоне $-(2-8) \cdot 10^7$ К/м. Согласно полученной зависимости толщины расплавленного слоя от времени определено, что скорость затвердевания при $W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см² составляет $\sim 0,7$ м/с и уменьшается до $\sim 0,3$ м/с с ростом W до $4,0 \cdot 10^5$ Вт/см².

Расчеты показали, что в результате диффузии в расплаве и в твердой фазе под действием градиентов температуры и концентрации легирующий металл, в частности титан, проникает на глубину, не превышающую 3,5 мкм. Расхождение рассчитанной и экспериментальной (10 мкм) глубины проникновения свидетельствует о необходимости учета дополнительных процессов массопереноса. Таким процессом является перемешивание вещества в расплавленном слое в гидродинамическом режиме. При нагреве поверхностных слоев стали с нанесенным слоем легирующего металла под действием КПП в расплаве устанавливается неоднородный по глубине профиль температуры и концентрации. В условиях неустойчивого поверхностного натяжения, зависящего от температуры и концентрации, появляется неустойчивость процесса тепло- и массопереноса.

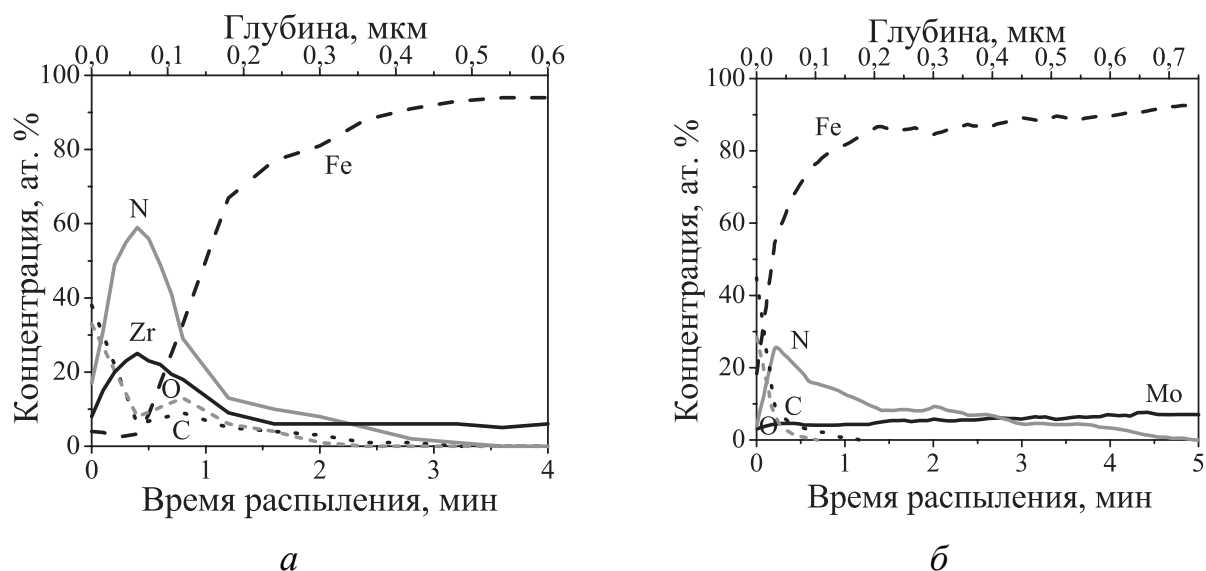
Поверхностные силы вызывают движение приповерхностных слоев расплава, которые из-за вязкости, в свою очередь, увлекают более глубинные слои. Устанавливается регулярное движение расплава. Расчет показал, что размер циклических вихрей конвективного движения расплава сравним с толщиной расплавленного слоя, причем вихри успевают совершить 2-7 оборотов за время существования расплава (80-170 мкс), что обеспечивает массоперенос легирующего металла на всю глубину расплавленного слоя (рисунок 1).

Таким образом, определено, что формирование легированных слоев стали с помощью разработанного способа обусловлено протеканием процессов нагревания, плавления, диффузии, конвективного перемешивания и последующего высокоскоростного затвердевания из расплава.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей и закономерностей распределения элементов и формирования структурно-фазовых состояний поверхностных слоев углеродистой стали, легированных металлами под действием КПП.

Обнаружено, что концентрация легирующего металла в сформированных слоях составляет 2-25 ат.%. Варьирование содержания легирующих металлов достигается изменением толщины предварительно нанесенного покрытия металла при постоянной толщине расплавленного под действием КПП слоя. Так, в результате воздействия КПП при $W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см² на сталь с нанесенным слоем титана толщиной 0,4; 0,7 и 1,0 мкм, концентрация титана составила ~5, 7 и 10 ат.%, соответственно. Воздействие на сталь с нанесенным слоем никеля толщиной 10,0 мкм позволило увеличить концентрацию легирующего металла до 25 ат.%. Другим способом является изменение плотности мощности воздействия при постоянной толщине предварительно нанесенного слоя металла. Так, в результате воздействия КПП при W в диапазоне $(1,3-4,0) \cdot 10^5$ Вт/см² концентрация циркония в легированном слое изменяется от 12 до 2 ат.%, что обусловлено увеличением толщины расплавленного слоя.

Обнаружено, что приповерхностные слои стали, легированные металлами, содержат азот – плазмообразующий элемент – с концентрацией 8-62 ат.% в максимуме его распределения (рисунок 2). При легировании цирконием, титаном, молибденом и никелем толщина азотсодержащего слоя составляет 0,5-0,7 мкм, а при легировании хромом – более 3,0 мкм. Расчет показал, что глубина проникновения азота соответствует его диффузионной длине в жидком и твердом железе, содержащем легирующие элементы. При этом насыщение поверхностных слоев азотом осуществляется преимущественно после окончания действия потока плазмы. Азот из окружающей среды камеры диффундирует в расплаве за время его существования и в твердой фазе, находящейся после затвердевания при высокой температуре.



а – легирование цирконием ($n=5$); б – молибденом ($n=1$)

Рисунок 2 – Распределение элементов (ОЭС) по глубине в поверхностных слоях стали, легированных металлами под действием КПП ($W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см², N₂)

Методами РОР и ОЭС обнаружено, что насыщение цирконием и титаном обеспечивает не только объемное легирование, но и формирование у поверхности слоя с повышенным содержанием этих металлов, в то время как распределение молибдена, хрома и никеля однородно по всему легированному слою (рисунок 2). При легировании цирконием и титаном можно выделить три подслоя, характеризующихся различным элементным составом. Первый приповерхностный слой толщиной $\sim 0,2$ мкм характеризуется преимущественным содержанием циркония и азота (рисунок 2 а). Далее следует слой, в котором еще присутствует азот, при этом глубина всего азотсодержащего слоя не превышает 0,6 мкм. За ним следует собственно легированный цирконием слой стали. В результате легирования молибденом, хромом и никелем выделяются только азотсодержащий и собственно легированный металлом слой стали (рисунок 2). При легировании цирконием и титаном азот локализуется преимущественно в слое с повышенным содержанием этих металлов, в то время как при легировании молибденом, хромом и никелем, максимум распределения азота располагается в слое, где основным элементом является железо.

Обнаруженная особенность наличия приповерхностного слоя с повышенной концентрацией циркония и титана в отличие от молибдена, хрома и никеля обусловлена процессами перераспределения легирующих металлов на движущейся границе раздела «расплав-кристалл». При кристаллизации сплавов, содержащих легирующий элемент, растворимость которого в твердом состоянии меньше чем в жидком, тонкий слой расплава, примыкающий к движущейся границе затвердевания, обогащается этим элементом. Рассчитанный неравно-

весный коэффициент распределения примеси меньше единицы для циркония и титана в отличие от других используемых легирующих металлов, что подтверждает формирование приповерхностного слоя с повышенным содержанием легирующего металла в этих случаях.

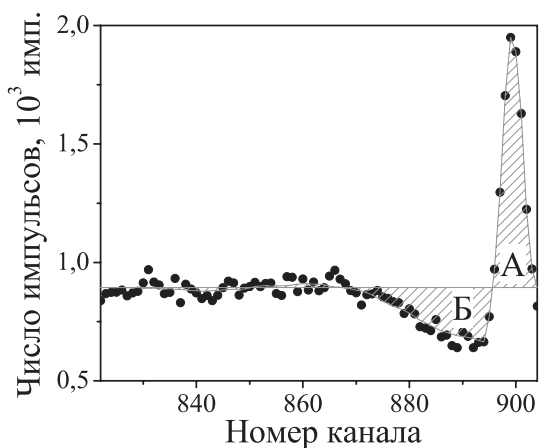


Рисунок 3 – Участок спектра РОР поверхностного слоя стали, легированного цирконием под действием КПП ($W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см², $n=5$, N_2)

Методом РОР (рисунок 3) обнаружена также особенность в распределении циркония, заключающаяся в наличии области (область Б), обедненной цирконием, причем она располагается за приповерхностным слоем с повышенным содержанием легирующего металла (область А), что свидетельствует о том, что формирование приповерхностного слоя с повышенной концентрацией циркония обусловлено вкладом дополнительного фактора.

Согласно исследованию фазового состава в результате воздействия КПП, формируемых в среде азота, при легировании цирконием и титаном образуются нитриды ZrN и TiN (рисунок 4).

Цирконий и титан характеризуются наибольшим сродством к электрону и наименьшими теплотой и свободной энергией образования нитридов по сравнению с другими легирующими металлами и железом. Таким образом, в случае легирования цирконием и титаном происходит замедление диффузии азота вглубь поверхностного слоя вследствие интенсивного образования нитридов. И наоборот, образование нитридов вызывает диффузию циркония и титана к поверхности под действием градиента химического потенциала, что увеличивает их концентрацию в приповерхностном слое.

Основными фазовыми составляющими легированных слоев являются твердые растворы на основе α - и γ -Fe (рисунок 4). С учетом диаграмм состояния, различное влияние легирующих элементов на полиморфное $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение железа при остывании обеспечивает многообразие сформированного структурно-фазового состояния при легировании металлами и азотом под действием КПП. Так, при высокоскоростном затвердевании расплава, содержащего никель, сформированный легированный слой состоит из твердого раствора γ -Fe(Ni,N,C). Легирование цирконием, титаном и молибденом приводит к формированию твердых растворов преимущественно на основе α -Fe. При этом достигаемая концентрация циркония и титана превышает их предельную раствори-

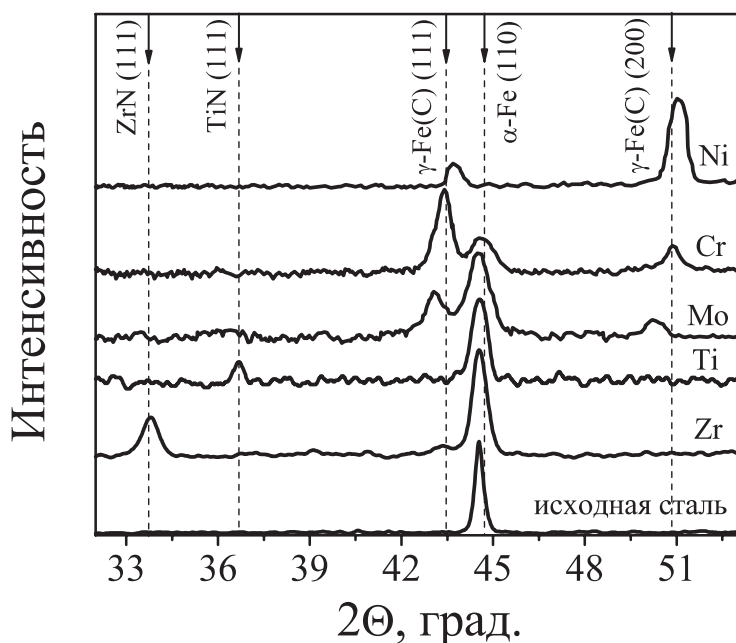


Рисунок 4 – Участки рентгенограмм исходной стали и поверхностных слоев, легированных металлами под действием КПП ($W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см², $n=1$ и 5 , N_2). Пунктирные линии соответствуют табличным значениям углов дифракции фаз TiN, ZrN, α -Fe и γ -Fe(C)

Обобщение обнаруженных результатов позволило разработать модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков, учитывающую нагрев и плавление поверхностных слоев, жидкофазное перемешивание легирующего металла и основы, включающее диффузию металла в расплаве и конвективное перемешивание расплава под действием градиентов температуры и концентрации, охлаждение за счет теплоотвода на массу образца, перераспределение легирующего металла на движущейся со скоростью 0,3-0,7 м/с границе затвердевания, диффузионное насыщение азотом из остаточной атмосферы в жидкой и твердой фазах, формирование твердых растворов легирующих элементов в α - и γ -Fe и нитридов легирующих металлов при взаимодействии с азотом в приповерхностных слоях, не превышающих глубину проникновения азота.

Пятая глава диссертации посвящена изучению изменений механических свойств легированных слоев стали и их термической стабильности.

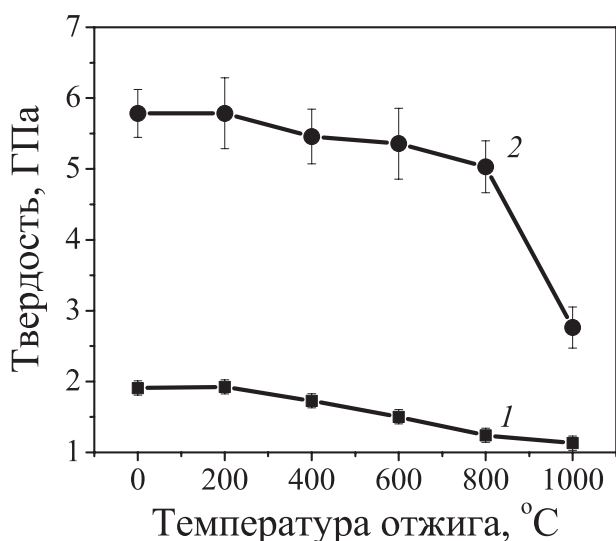
Было обнаружено, что воздействие КПП и легирование металлами позволяет достигать увеличения твердости до 3,5 раз. Упрочнение обусловлено формированием твердых растворов (твердорастворный механизм), а также диспергированием структуры и формированием высокой плотности дефектов в ре-

мость в α -Fe согласно равновесным диаграммам состояния, таким образом, твердые растворы являются пересыщенными. В случае легирования молибденом и цирконием обнаружено также формирование твердого раствора на основе γ -Fe. Учитывая диаграммы состояния и сравнительные эксперименты по воздействию КПП, формируемых в среде водорода, установлено, что образование твердого раствора на основе γ -Fe в этих случаях обусловлено наличием азота, который стабилизирует твердый раствор на основе γ -Fe при остывании.

зультате высокоскоростной закалки из расплава и генерации термоупругих напряжений (зернограничное и деформационное упрочнение). Кроме того, распад пересыщенных твердых растворов и локальное формирование интерметаллидов, нитридов и карбонитридов может приводить к образованию мелкодисперсных выделений, что обеспечит дополнительное дисперсионное упрочнение. Определено, что наибольший вклад в упрочнение вносит твердорастворный механизм.

Обнаружено, что достигается уменьшение коэффициента трения поверхностных слоев стали в 1,5-3,7 раза в результате их легирования цирконием и молибденом, что коррелирует с наибольшей величиной упрочнения в этих случаях. Формирование твердых растворов обеспечивает уменьшение коэффициента трения вследствие увеличения прочности на сдвиг. Было установлено, что основным механизмом износа легированных слоев является износ в результате пластического деформирования, в отличие от исходной стали, где основной вклад в разрушение материала вносит абразивный механизм износа.

Сталь Ст3 является нетеплостойкой, теряет свои свойства при нагреве



1 – исходная сталь; 2 – легирование цирконием

Рисунок 5 – Зависимость твердости исходной стали и поверхностного слоя стали, легированного цирконием под действием КПП ($W=1,3 \cdot 10^5$ Вт/см², $n=5$, N₂), от температуры отжига

свыше 200 °C (рисунок 5). Высокие значения твердости поверхностного слоя стали, легированного цирконием под действием КПП, сохраняются при нагреве вплоть до 800 °C (рисунок 5). Нагрев при 1000 °C приводит к снижению твердости, однако ее величина по-прежнему остается больше как твердости отожженной, так и неотожженной стали. Полученный результат сравним с температурным поведением твердости высоколегированных инструментальных сталей. Выявленное в результате отжига сохранение повышенных значений твердости при нагреве до 800 °C подтверждает

формирование дисперсной структуры, которая характеризуется устойчивостью к распаду твердого раствора и коагуляции дисперсных фаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан способ легирования поверхностных слоев углеродистой стали, включающий предварительное нанесение на поверхность стали слоя легирующих металлов (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) толщиной 0,4-10,0 мкм и последующее воздействие концентрированных потоков энергии, отличающийся тем, что воздействие осуществляют компрессионными плазменными потоками, формируемыми в среде азота, длительностью 100 мкс при плотности мощности $(1,3-4,0) \cdot 10^5$ Вт/см². Методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа обнаружено, что данный способ обеспечивает формирование глубоких (5-20 мкм) слоев, легированных элементами металлического покрытия. Увеличение плотности мощности воздействия с 1,3 до $4,0 \cdot 10^5$ Вт/см² обеспечивает увеличение толщины легированного цирконием слоя с 5 до 20 мкм. При моделировании температурных полей с учетом фазовых переходов, включающих процессы плавления и кристаллизации, при наличии теплового источника, задаваемого режимами воздействия, получено, что под действием плазменных потоков осуществляется нагрев со скоростью $(2,0-3,5) \cdot 10^7$ К/с, плавление поверхностных слоев и последующая кристаллизация в результате высокоскоростного $((1,5-2,5) \cdot 10^7$ К/с) остывания за счет теплоотвода на массу образца [1-А, 3-А – 6-А, 12-А, 14-А, 15-А, 21-А, 23-А, 25-А, 26-А, 28-А].

2. Методами оже-электронной спектроскопии, резерфордовского обратного рассеяния и рентгеноспектрального микроанализа обнаружено, что в результате воздействия компрессионных плазменных потоков при плотности мощности $(1,3-4,0) \cdot 10^5$ Вт/см² на углеродистую сталь Ст3 с предварительно нанесенным слоем металла (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) толщиной 0,4-10,0 мкм сформированный поверхностный слой содержит 2-25 ат.% легирующего металла. При этом легирование цирконием и титаном формирует слой, характеризующийся наличием приповерхностной области (0,1-0,2 мкм) с повышенной концентрацией этих металлов – 19-38 ат.%, что в несколько раз превышает их концентрацию в глубине легированного слоя – 2-12 ат.%. Существенно, что распределение молибдена, хрома и никеля однородно по всей глубине легированного слоя. Расчеты согласно известным моделям диффузионного и конвективного массопереноса показали, что относительная роль массопереноса легирующего металла в расплаве за счет конвекции больше, чем за счет диффузии. Массоперенос легирующего металла на всю глубину расплавленного слоя осуществляется посредством развития регулярного движения расплава в условиях нестабильного поверхностного натяжения, зависящего от температуры и концентрации легирующих элементов. Сегрегация циркония и титана в приповерхностном слое

обусловлена обогащением движущегося фронта затвердевания вследствие различия растворимости этих легирующих металлов в жидкой и твердой фазах и их диффузией из объема под действием градиента химического потенциала [1-А, 5-А, 6-А, 8-А, 11-А, 14-А – 17-А, 32-А].

3. Методами оже-электронной спектроскопии и резерфордовского обратного рассеяния обнаружено, что приповерхностные слои углеродистой стали Ст3 дополнительно содержат плазмообразующий азот с концентрацией 8-62 ат.%. Легирование цирконием, титаном, молибденом и никелем обеспечивает формирование азотсодержащих слоев толщиной 0,5-0,7 мкм, а легирование хромом – более 3,0 мкм. Экспериментальные данные согласуются с известной моделью миграции азота, учитывающей его диффузию в жидкой и твердой фазах после окончания действия импульса плазмы [3-А, 4-А, 13-А, 16-А, 17-А, 23-А, 25-А, 26-А, 28-А].

4. Обнаружено, что приповерхностная область легированного цирконием и титаном слоя стали состоит преимущественно из нитридов ZrN и TiN; следующий за ним слой, где также присутствует азот, содержит пересыщенные твердые растворы α -Fe(Zr,N,C) и α -Fe(Ti,N,C); основной фазовой составляющей собственно легированного металлом слоя являются пересыщенные твердые растворы α -Fe(Zr,C) и α -Fe(Ti,C). При легировании молибденом, хромом и никелем легированный слой состоит из азотсодержащего слоя, характеризующегося наличием твердых растворов азота, углерода и легирующих металлов в α - и γ -Fe, и собственно легированного металлом слоя стали, фазовыми составляющими которого являются твердые растворы углерода и металла в α - и γ -Fe. Изменение фазового состава по глубине легированных слоев обусловлено протеканием высокоскоростного затвердевания в условиях насыщения приповерхностных слоев плазмообразующим азотом в направлении, обратном движению фронта кристаллизации, и последующей диффузии легирующего металла к поверхности, вызванной формированием нитрида [1-А – 8-А, 12-А – 14-А, 16-А – 18-А, 20-А – 22-А, 24-А, 26-А, 28-А – 30-А, 33-А].

5. Разработана модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков, учитывающая нагрев и плавление поверхностных слоев, жидкофазное перемешивание легирующего металла и основы, включающее диффузию металла в расплаве и конвективное перемешивание расплава под действием градиентов температуры и концентрации, охлаждение за счет теплоотвода на массу образца, перераспределение легирующего металла на движущейся со скоростью 0,3-0,7 м/с границе затвердевания, диффузионное насыщение азотом из остаточной атмосферы в жидкой и твердой фазах, формирование твердых растворов легирующих элементов в α - и γ -Fe и

нитридов легирующих металлов при взаимодействии с азотом в приповерхностных слоях, не превышающих глубину проникновения азота. Согласно модели и в соответствии с экспериментальными данными, воздействие компрессионных плазменных потоков на углеродистую сталь Ст3 с предварительно нанесенным покрытием металла приводит к формированию глубоких легированных слоев, характеризующихся мелкодисперсной структурой и изменяющимся по глубине фазовым составом [1-А, 8-А, 16-А, 21-А].

6. Легирование поверхностных слоев углеродистой стали Ст3 металлами (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) и насыщение азотом под действием компрессионных плазменных потоков обеспечивает увеличение твердости до 3,5 раз. Показано, что легирование цирконием и молибденом при плотности мощности воздействия в интервале $(1,3-3,5) \cdot 10^5$ Вт/см² приводит к уменьшению коэффициента трения поверхностных слоев стали в 1,5-3,7 раза. В результате изохронного отжига поверхностных слоев стали, легированных цирконием, обнаружено сохранение повышенных значений твердости при нагреве до 800 °С, что сравнимо с температурным поведением механических свойств высоколегированных инструментальных сталей. Улучшение механических свойств обусловлено формированием твердых растворов, нитридов и мелкодисперсной структуры легированных слоев, что согласуется с разработанной моделью структурно-фазовых изменений [1-А, 2-А, 4-А, 5-А, 7-А, 9-А, 10-А, 12-А, 14-А, 19-А, 20-А, 23-А, 25-А – 28-А, 31-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанный способ легирования поверхностных слоев металлических материалов рекомендуется использовать для повышения твердости, износо- и теплостойкости рабочих поверхностей деталей и инструментов. Способ является перспективным для использования в Республике Беларусь в отраслях машиностроения, металлургии, медицины, деревообрабатывающей и химической промышленности, и в других областях, где требуется улучшение механических характеристик рабочих поверхностей, а также создание поверхностных сплавов со специальными свойствами и составом.

Результаты исследования используются при проведении спецпрактикума по «Резерфордскому обратному рассеянию», что подтверждается актом внедрения в учебный процесс физического факультета Белорусского государственного университета, и могут быть использованы также при чтении спецкурсов по «Физике защитных покрытий», «Материаловедению» и «Модификации материалов концентрированными потоками энергии» в высших учебных заведениях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

1-А. Compression plasma flow interaction with titanium-on-steel system: structure and mechanical properties / V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmickii, A.V. Punko // Journal of High Temperature Material Processes. – 2004. – Vol. 8, № 4. – P. 605-616.

2-А. Modification of coating-substrate systems under the action of compression plasma flow / V.M. Astashynski, I.G. Gimro, A.M. Kuzmitski, E.A. Kostyukevich, A.V. Kovyazo, A.A. Mishchuk, V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Physics. – 2005. – № 2. – P. 217-219.

3-А. Структурно-фазовое состояние системы титан-сталь, облученной компрессионным плазменным потоком азота / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 2. – С. 36-41.

4-А. Mixing of chromium/carbon steel by compressive plasma flows / V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, E.A. Kostyukevich, A.V. Kovyazo // Vacuum. – 2005. – Vol. 78, № 2-4. – P. 489-493.

5-А. Перемешивание системы цирконий/сталь компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, А.Г. Кононов, Н.С. Тарасюк, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, А.В. Ковязо // Вакуумная техника и технология. – 2006. – Т. 16, № 2. – С. 123-131.

6-А. Элементный и фазовый состав системы цирконий/сталь, перемешанной воздействием компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, Н.С. Тарасюк, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, В.А. Ухов // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 1. – С. 40-45.

7-А. Comprehensive modification of semiconductors and metals providing new structural features of surface layers subjected to compression plasma flows / V.M. Astashynski, S.I. Ananin, E.A. Kostyukevich, A.M. Kuzmitski, V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, Yu.V. Sveshnikov // Journal of High Temperature Material Processes. – 2007. – Vol. 11, № 4. – P. 536-548.

8-А. Formation of alloying layers in a carbon steel by compression plasma flows / V.V. Uglov, N.N. Cherenda, V.M. Anishchik, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashynski, A.A. Mishchuk // Vacuum. – 2007. – Vol. 81. – P. 1341-1344.

9-А. Влияние температуры отжига на элементный и фазовый состав углеродистой стали, легированной под действием компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, Ю.Г. Шедко // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 6. – С. 57-61.

Статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций:

10-А. Трибологические свойства системы титан-сталь, облученной компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, В.В. Аскерко, А.В. Ковязо, И.Г. Гимро // Радиационная физика твердого тела: труды XIV международного совещания, Севастополь, Украина, 5-10 июля 2004 г. / Изд. НИИ ПМТ; редкол.: Г.Г. Бондаренко. – Москва, 2004. – С. 280-284.

11-А. Formation of cellular structure on the surface of coating-substrate system treated by compression plasma flow / V.V. Uglov, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashinski, A.M. Kuzmickii // Physics, Chemistry, and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2005, Minsk, Belarus, 24-27 May 2005 / World Scientific; edit.: V.E. Borisenko [et al.]. – Singapore, 2005. – P. 509-511.

12-А. Перемешивание в системе цирконий-сталь под действием компрессионных плазменных потоков / В.М. Анищик, В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, Н.С. Тарасюк, В.М. Асташинский, Е.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий, Ч. Карват // New electrical and electronic technologies and their industrial implementation (NEET'2005): proceedings of IV International conference, Zakopane, Poland, June 21-24, 2005 / Lublin University of Techn. – Zakopane, 2005. – P. 14-17.

13-А. Фазообразование в системе титан-сталь в результате обработки компрессионным плазменным потоком азота / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.В. Ковязо, И.Г. Гимро, Ю.А. Федотова, Я. Станек // Радиационная физика твердого тела: труды XV международного совещания, Севастополь, Украина, 4-9 июля 2005 г. / Изд. НИИ ПМТ; редкол.: Г.Г. Бондаренко. – Москва, 2005. – С. 15-19.

14-А. Поверхностное легирование углеродистой стали при воздействии компрессионных плазменных потоков на систему молибден-сталь / В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, Д.В. Дмитриев, В.М. Асташинский, М. Opielak // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 6-ой международной конференции, Минск, 28-30 сентября 2005 г. / БГУ; редкол.: В.М. Анищик [и др.]. – Минск, 2005. – С. 161-163.

15-А. Solidification microstructures of the steels treated by compression plasma flow / V.V. Uglov, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, D.V. Dmitriev, A.V. Sevriuk

// Plasma physics and plasma technology: contributed papers of V International conference, Minsk, Belarus, September 18-22 2006: in 2 v. / Institute of Molec. and Atom. Phys. NAS Belarus. – Minsk, 2006. – P. 563-566.

16-А. Поверхностное легирование низкоуглеродистой стали при компрессионном плазменном воздействии / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Анищик, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, Ю.Г. Шедко // Радиационная физика твердого тела: труды XVII международного совещания, Севастополь, Украина, 9-14 июля 2007 г. / Изд. НИИ ПМТ; редкол.: Г.Г. Бондаренко. – Москва, 2007. – С. 38-44.

17-А. Влияние состава компрессионного плазменного потока на структурно-фазовое состояние и свойства углеродистой стали, легированной цирконием / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-ой международной конференции, Минск, 26-28 сентября 2007 г. / БГУ; редкол.: В.М. Анищик [и др.]. – Минск, 2007. – С. 231-233.

18-А. Структурно-фазовые изменения в поверхностном слое стали, легированной титаном и хромом в результате воздействия компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Н.С. Тарасюк, Е.К. Стальмошенок, Д.П. Русальский, В.М. Асташинский, Ю.Г. Шедко // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ 2007): сборник докладов Международной научной конференции, Минск, Беларусь, 23-26 октября 2007 г.: в 3 т. / Изд. центр БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 3. – С. 393-395.

19-А. Модификация трибологических свойств углеродистой стали, легированной металлами под действием компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, Д.П. Русальский // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ 2007): сборник докладов Международной научной конференции, Минск, Беларусь, 23-26 октября 2007 г.: в 3 т. / Изд. центр БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 3. – С. 419-421.

Тезисы докладов

20-А. Стальмошенок, Е.К. Структурно-фазовое состояние и механические свойства системы покрытие-подложка, подвергнутой воздействию компрессионных плазменных потоков / Е.К. Стальмошенок // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XII Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 21-23 апреля 2004 г. / ГрГУ; редкол.: В.А. Лиопо. – Гродно, 2004. – С. 410-413.

21-А. Структурно-фазовое состояние системы титан-сталь, облученной компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий // Фи-

зика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXIV международной конференции, Москва, Россия, 31 мая-2 июня 2004 г. / Изд. МГУ; редкол.: В.С. Куликаускас [и др.]. – Москва, 2004. – С. 104.

22-А. Plasma mixing of chromium/carbon steel system by compressive plasma flows / V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, E.A. Kostyukevich, A.V. Kovyazo // Ion Implantation and other application of ions and electrons: abstracts of V-th International symposium, Kazimierz Dolny, Poland, June 14-17, 2004 / Maria Curie-Skłodowska University; edit.: J. Żuk and J. Filiks. – Lublin, 2004. – P. 162.

23-А. Modification of coating-substrate systems under the action of compression plasma flow / V.M. Astashynski, I.G. Gimro, A.M. Kuzmitski, E.A. Kostyukevich, A.V. Kovyazo, A.A. Mishchuk, V.V. Uglov, V.M. Anishchik, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak // Plasma Physics and Controlled Fusion: book of abstracts of 10th International conference and school, Alushta (Crimea), Ukraine, September 13-18, 2004 / NSC «Kharkov institute of phys. and techn.». – Alushta, 2004. – P. 213.

24-А. Петухов, Ю.А. Структурно-фазовые изменения в системе никель-сталь в результате воздействия компрессионных плазменных потоков / Ю.А. Петухов, Е.К. Стальмошенок // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIII Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 26-28 апреля 2005 г. / ГрГУ; редкол.: В.А. Лиопо. – Гродно, 2005. – С. 353-355.

25-А. Тарасюк, Н.С. Изменение структурно-фазового состояния и механических свойств системы цирконий-сталь после воздействия компрессионных плазменных потоков / Н.С. Тарасюк, Е.К. Стальмошенок // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIII Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 26-28 апреля 2005 г. / ГрГУ; редкол.: В.А. Лиопо. – Гродно, 2005. – С. 371-373.

26-А. Модификация системы “покрытие-подложка” под влиянием компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, А.В. Ковязо // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXV международной конференции, Москва, Россия, 31 мая-2 июня 2005 г. / Изд. МГУ; редкол.: В.С. Куликаускас [и др.]. – Москва, 2005. – С. 144.

27-А. Тарасюк, Н.С. Изменение механических свойств системы цирконий-сталь в результате плазменного воздействия / Н.С. Тарасюк, Е.К. Стальмошенок, В.В. Углов // «НИРС-2005»: сборник тезисов докладов X Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь, Минск, 14-16 февраля 2006 г.: в 3 частях / БГУ. – Минск, 2005. – Ч. 2. – С. 204.

28-А. Тарасюк, Н.С. Влияние варьирования энергии компрессионной плазмы на модифицирование системы цирконий-сталь / Н.С. Тарасюк, Е.К. Стальмошенок // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIV Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 26-28 апреля 2006 г. / ГрГУ; редкол.: В.А. Лиопо. – Гродно, 2006. – С. 430-433.

29-А. Влияние состава потока компрессионной плазмы на структуру легированного цирконием поверхностного слоя углеродистой стали / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, Н.С. Тарасюк, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, А.В. Ковязо // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVI международной конференции, Москва, Россия, 30 мая-1 июня 2006 г. / Изд. МГУ; редкол.: В.С. Куликаускас [и др.]. – Москва, 2006. – С. 118.

30-А. Formation of alloying layers in carbon steel by compression plasma flows / V.V. Uglov, N.N. Cherenda, V.M. Anishchik, A.K. Stalmashonak, V.M. Astashinski, A.A. Mishchuk // Ion Implantation and other application of ions and electrons: abstracts of VI-th International symposium, Kazimierz Dolny, Poland, June 26-29, 2006 / Maria Curie-Skłodowska University; edit.: J. Żuk and J. Filiks. – Lublin, 2006. – P. 130.

31-А. Термическая стабильность углеродистой стали, легированной цирконием и азотом под действием плазменных потоков / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVII международной конференции, Москва, Россия, 29-31 мая 2007 г. / Изд. МГУ; редкол.: В.С. Куликаускас [и др.]. – Москва, 2007. – С. 162.

32-А. Растрово-электронномикроскопические исследования морфологии поверхности сталей в результате воздействия компрессионных плазменных потоков / С.В. Сякерский, Л.Д. Буйко, В.В. Углов, Е.К. Стальмошенок, А.В. Севрюк // Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твердых тел: тезисы докладов XV Российского симпозиума, Черноголовка, 4-7 июня 2007 г. / РАН. – Черноголовка, 2007. – С. 205.

33-А. Синтез соединений в системе Ti/сталь 3 воздействием компрессионных плазменных потоков / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Е.К. Стальмошенок, М.Г. Полуянова, Л.А. Удот, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVIII международной конференции, Москва, Россия, 27-29 мая 2008 г. / Изд. МГУ; редкол.: В.С. Куликаускас [и др.]. – Москва, 2008. – С. 158.

РЭЗІЮМЕ

Стальмашонак Алена Канстанцінаўна

Структурна-фазавыя станы і механічныя ўласцівасці паверхневых пластоў вугляродзістай сталі, легіраваных металамі пад уздзеяннем кампрэсійных плазменных плыняў

Ключавыя словы: вугляродзістая сталь, кампрэсійная плазмавая плынь, легіраванне, высакахуткасная крышталізацыя, размеркаванне элементаў, структурна-фазавы стан, механічныя ўласцівасці.

Мэта работы: выяўленне заканамернасцей і асаблівасцей фарміравання структурна-фазавых станаў і размеркавання элементаў у паверхневых пластах вугляродзістай сталі, легіраваных металамі пад уздзеяннем кампрэсійных плазменных плыняў, якія фармаваліся ў асяроддзі азоту.

Метады даследавання: растрвая электронная мікраскапія, рэнтгенаспектральны мікрааналіз, рэзерфордаўскае адваротнае рассеянне, ажэ-электронная спектраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, мёсбаўэровая спектраскапія, вымярэнне цвёрдасці метадам мікраіндэнціравання, вызначэнне каэфіцыента трэння, ізахронны адпал.

Атрыманыя вынікі: распрацаваны спосаб легіравання паверхневых пластоў вугляродзістай сталі, які ўключае папярэдняе нанясенне пласта легіруючых металаў (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) і наступнае ўздзеянне кампрэсійных плазменных плыняў, якія фармаваліся ў асяроддзі азоту, што забяспечвае фармаванне глыбокіх пластоў, легіраваных металамі і азотам. Распрацаваная мадэль структурна-фазавых змен у паверхневых пластах вугляродзістай сталі, легіраваных металамі і азотам пад ўздзеяннем кампрэсійных плазменных плыняў, паводле якой сфармаваныя пласты характарызуюцца дробнадыспергаванай структурай і фазавым складам, які змяняецца па глыбіні і складаецца з цвёрдых раствораў на аснове аб'ёмна- і гранецэнтраванай кубічнай рашоткі жалеза і нітрыдаў, што забяспечвае павелічэнне цвёрдасці пластоў сталі да 3,5 разоў, памяншэнне каэфіцыента трэння да 3,7 разоў і захаванне павышаных значэнняў цвёрдасці пры нагрэве да 800 °С.

Распрацаваны спосаб легіравання рэкамендуецца выкарыстоўваць у галінах металургіі, машынабудавання і іншых, дзе патрабуецца стварэнне паверхневых сплаваў з палепшанымі механічнымі характарыстыкамі і павышанай термічнай стабільнасцю. Вынікі працы ўкаранёныя таксама ў вучэбны працэс фізічнага факультэта БДУ.

РЕЗЮМЕ

Стальмошёнков Елена Константиновна

Структурно-фазовые состояния и механические свойства поверхностных слоев углеродистой стали, легированных металлами под действием компрессионных плазменных потоков

Ключевые слова: углеродистая сталь, компрессионный плазменный поток, легирование, высокоскоростная кристаллизация, распределение элементов, структурно-фазовое состояние, механические свойства.

Цель работы: установление закономерностей и особенностей формирования структурно-фазового состояния и распределения элементов в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами под действием компрессионных плазменных потоков, формируемых в среде азота.

Методы исследования: растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, резерфордское обратное рассеяние, оже-электронная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, мессбауэровская спектроскопия, измерение твердости методом микроиндентирования, определение коэффициента трения, изохронный отжиг.

Полученные результаты: разработан способ легирования поверхностных слоев углеродистой стали, включающий предварительное нанесение слоя легирующих металлов (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) и последующее воздействие компрессионных плазменных потоков, формируемых в среде азота, что обеспечивает образование глубоких слоев, легированных металлами и азотом. Разработана модель структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях углеродистой стали, легированных металлами и азотом под действием компрессионных плазменных потоков, согласно которой сформированные слои характеризуются мелкодисперсной структурой и изменяющимся по глубине фазовым составом, который состоит из твердых растворов на основе объемно- и гранецентрированной кубической решетки железа и нитридов, что обеспечивает увеличение твердости слоев стали Ст3 до 3,5 раз, уменьшение коэффициента трения до 3,7 раз и сохранение повышенных значений твердости при нагреве до 800 °С.

Разработанный способ легирования рекомендуется использовать в отраслях металлургии, машиностроения и других, где требуется создание поверхностных сплавов с улучшенными механическими характеристиками и повышенной термической стабильностью. Результаты работы внедрены также в учебный процесс физического факультета БГУ.

SUMMARY

Stalmashonak Alena Kanstantsinauna

Structure-phase states and mechanical properties of the carbon steel surface layers alloyed by metals under the action of the compression plasma flows

Keywords: carbon steel, compression plasma flow, alloying, high-speed crystallization, elements distribution, structure-phase state, mechanical properties.

The aim of the work: determination of the regularities and features of the structure-phase state and elements distribution in the carbon steel surface layers alloyed by metals under the action of the compression plasma flows formed in the environment of nitrogen.

Research methods: scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, Rutherford back scattering, Auger electron spectroscopy, X-ray diffraction analysis, Mössbauer spectroscopy, hardness measurement by the microindentation, definition of the friction coefficient, isochronous annealing.

Obtained results: The method of the alloying of carbon steel surface layers inclusive previous deposition of the alloying metals (Zr, Ti, Mo, Cr, Ni) layer and subsequent action of the compression plasma flows formed in the environment of nitrogen has been developed. It provides the formation of deep layers alloyed by metals and nitrogen. It has been developed the model of the structure-phase changes in the carbon steel surface layers alloyed by metals and nitrogen under the action of the compression plasma flows. In accordance with the model formed layers are characterized by the fine-dispersed structure and varying in the depth phase composition, which consists of solid solutions on the basis of body- and face-centered cubic lattice of iron and nitrides. It provides the increase in hardness of St3 steel layers up to 3,5 times more, reduction of the friction coefficient up to 3,7 times less and keeping of the increased hardness value at the heating up to 800 °C.

The developed method of the alloying is recommended to be used in the industry, such as metallurgy, machine-building and others, where formation of surface alloys with improved mechanical characteristics and increased thermal stability is required. Results of the work are applied also in the educational process of physics department of Belarusian State University.