



Ниже представлены рефераты научно-исследовательских работ, выполненных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по бюджетной тематике в период 2000–2002 гг.

Тема 1.6.1.9.4 «Разработка научных основ технологических процессов плавления титана с использованием губки и некомпактных шихтовых материалов при электрошлаковом процессе и других источниках нагрева для плавления»

Научный руководитель д-р техн. наук **Л. Б. Медовар**

Ответственные исполнители: канд. техн. наук **В. И. Ус**, д-р техн. наук **В. Я. Саенко**

Целью работы по теме НИР № 1.6.1.9.4 являлась разработка научных основ технологических процессов плавления титана с использованием губки и некомпактных шихтовых материалов при электрошлаковом процессе, а также других способов нагрева для плавления, которые могут эффективно применяться при создании новых энергосберегающих технологий изготовления титановых полуфабрикатов и внедрении их в производство. Данные исследования были начаты по инициативе академика НАН Украины Б. И. Медовара.

Несмотря на то, что история плавки титана имеет почти вековую историю, интерес к выбору способа производства титановых слитков остается достаточно острым, поскольку он во многом определяет стоимость выплавленного металла и его качество.

Растущая потребность предприятий различных отраслей в титановых полуфабрикатах диктует необходимость создания в Украине производства титановой продукции, целесообразность чего подтверждается наличием в стране крупных, промышленно разрабатываемых месторождений титанового сырья. Важным аргументом является также существование Запорожского титано-магниевого комбината (ЗТМК).

Многие ведущие фирмы мира заняты поиском путей совершенствования технологии и оборудования для выплавки титановых слитков, обеспечивающих 100%-ю гарантию расплавления тугоплавких высокоазотистых α -включений, которые могут содержаться в расходных шихтовых материалах. Основным направлением этих работ является создание техно-

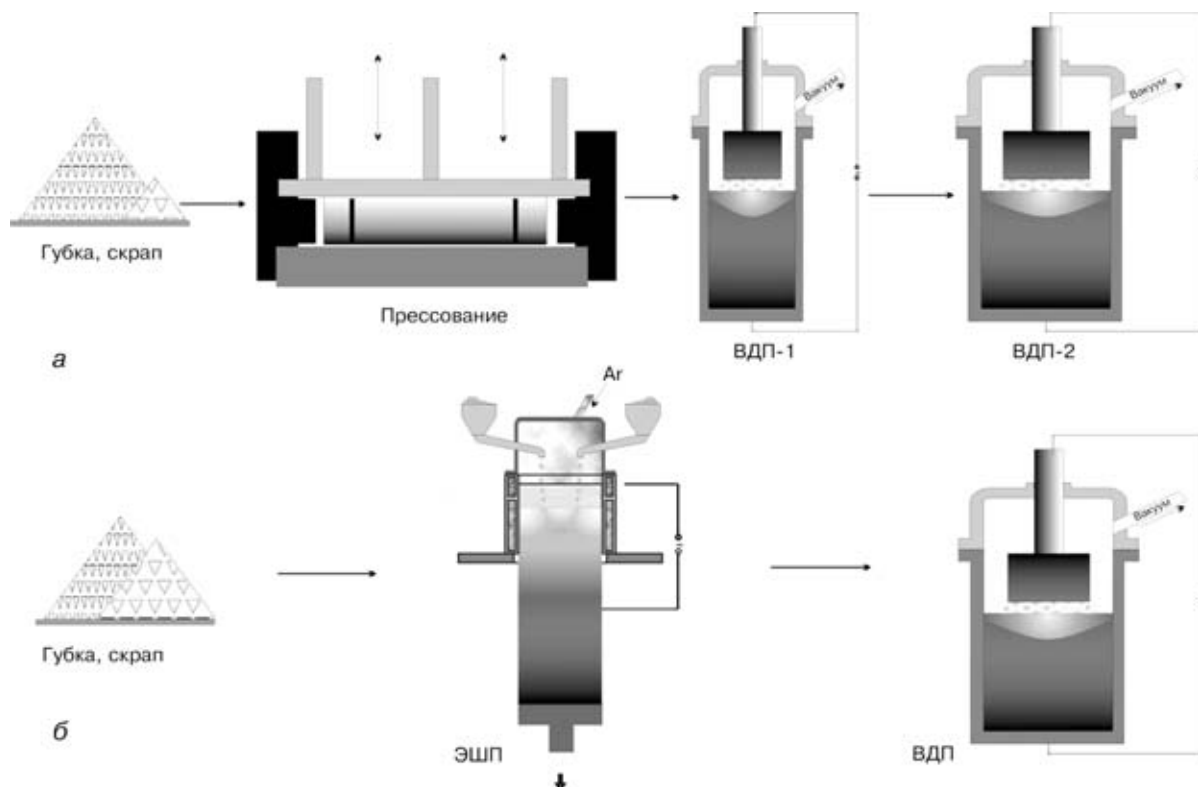


Рис. 1. Схема применения ЭШП в производстве титановых слитков: а — традиционная; б — с применением ЭШП ТК

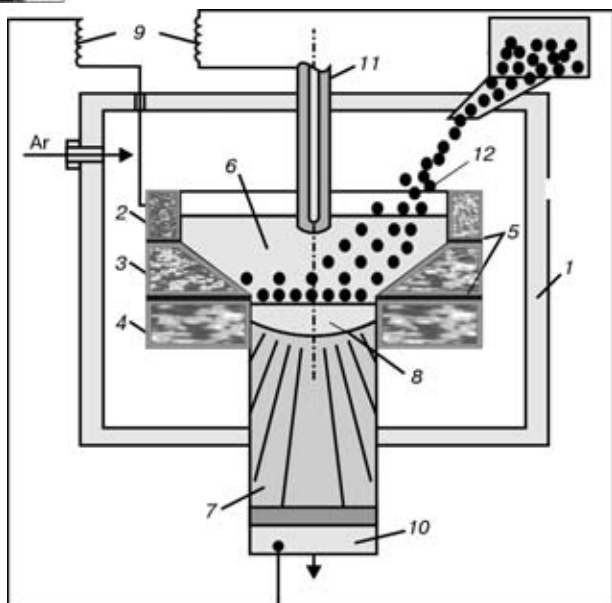


Рис. 2. Схема ЭШП ТК титановой губки [2]

логии и печей с разделением зон плавления и кристаллизации слитка. В частности, в России разработан способ вакуумной дуговой гарнисажной плавки с использованием гарнисажа в качестве расходуемого электрода предыдущей плавки.

Новые возможности в решении на основе электрошлакового технологии проблемы получения титановых слитков без твердых включений открываются благодаря применению процесса ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе (ЭШП ТК), при котором обеспечивается наиболее оптимальная технологическая схема ЭШП, заключающаяся в разделении зоны плавления расходуемых материалов и зоны формирования слитка. Наиболее важным достоинством ЭШП ТК является также то, что он может быть применен как процесс компактирования губки. В этом случае отпадает необходимость в такой дорогостоящей операции, как прессование расходуемых электродов из губки некомпактных шихтовых материалов.

В результате проведения комплекса исследований согласно плану НИР были разработаны технологические схемы для реализации переплава некомпактной титановой губки и шихтовых материалов [1, 2]. Схематически производство титановых слитков с применением процесса ЭШП ТК в сопоставлении с традиционной схемой переплава прессованных электродов представлено на рис. 1.

Схема разработанного процесса ЭШП ТК титановой губки в камерной печи показана на рис. 2. Процесс получения монолитного титанового слитка 7 из губки начинается с заполнения камеры 1 аргоном, заливки жидкого шлака в плавильное пространство токоведущего кристаллизатора 3 на поддон 10, установленный внутри формирующей секции 4 кристаллизатора таким образом, чтобы верхний срез поддона 10 располагался несколько ниже верхнего среза формирующей секции 4 и включения источников питания 9. Секции кристаллизатора 2–4 разделены изолирующими вставками 5. Шлаковая ванна 6 электропроводна и замыкает электрическую цепь токоподводящая секция 2 – поддон 10 – слиток 7 и непереходящий электрод 11 – поддон 10 – слиток 7, по которым начинает протекать ток, нагревая шлаковую ванну 6 до температуры 1700...1800 °С. Ток регулируется путем варьирования напряжения холостого хода в цепи токоподводящая секция 2 – поддон 10 – слиток 7 и изменением заглубления

непереходящего электрода 11 в шлаковую ванну 6 в цепи непереходящий электрод 11 – поддон 10 – слиток 7. После прогрева шлаковой ванны до указанной температуры на шлаковую ванну 6 в плавильное пространство кристаллизатора с помощью дозатора подают титановую губку 12. Благодаря несколько более высокой плотности, чем у шлака, титановая губка опускается, нагреваясь в шлаковой ванне 6, на поддон 10, где и происходит ее плавление в зоне контактного сопротивления шлак – поддон с образованием металлической ванны 8. Скорость вытягивания закрепленного на поддоне 10 слитка 7 из формирующей секции 4 кристаллизатора поддерживают с помощью индуктивного датчика уровня жидкой металлической ванны. Экспериментальные плавки титановой губки фракционного состава 12...20 мм по этой схеме проводили в токоподводящем кристаллизаторе с внутренним диаметром токоподводящей секции 350 мм и внутренним диаметром формирующей секции 100 мм.

Применение при ЭШП титановых слитков процесса ЭШП ТК позволяет более эффективно бороться с твердыми высокоазотистыми включениями. Экспериментально установлен эффект быстрого растворения в шлаке при ЭШП ТК крупных азотистых включений, которые были имплантированы в специально приготовленный расходуемый электрод (рис. 3). Естественно, что при этом происходит не плавление такого рода включений, а, скорее, их измельчение и равномерное распределение по объему титанового слитка. В случае применения добавок металлического кальция к шлаку при ЭШП ТК скорость растворения высокоазотистых включений может быть существенно увеличена. Однако реализация этого активного технологического процесса ЭШП возможна только в камерной печи с контролируемой атмосферой. Весьма перспективным может оказаться также применение вместо ЭШП менее энергоемкого способа дугошлакового переплава.

В результате выполнения НИР созданы научные основы технологических процессов плавления титана с использованием губки и некомпактных шихтовых материалов при условии применения электрошлакового процесса и других источников нагрева для плавления. Получены исходные данные для разработки новых эффективных технологий и оборудования с целью производства титановых полуфабрикатов методом полу- или непрерывного электрошлакового литья.

Полученные результаты могут быть использованы при организации нового промышленного производства титановых полуфабрикатов методом полу- или непрерывного электрошлакового литья на предприятиях Украины, в частности на заводе «Днепроспецсталь», где такое производство предполагается создать в ближайшее время.

1. Пат. 31837 Україна, МПК 6 С 22 В 9/00. Спосіб безперервного розливу титану і його сплавів у камері / Б. Є. Патон, Б. І. Медовар, Л. Б. Медовар та інші. — Оpubл. 17.12.2001; Бюл. № 11.
2. Пат. 34625 Україна, МПК 7 22 В 9/18. Спосіб одержання монолітного витратного електрода з титанової губки / Б. І. Медовар, Л. Б. Медовар, Б. Б. Федоровський та інші. — Оpubл. 15.03.2002; Бюл. № 3.

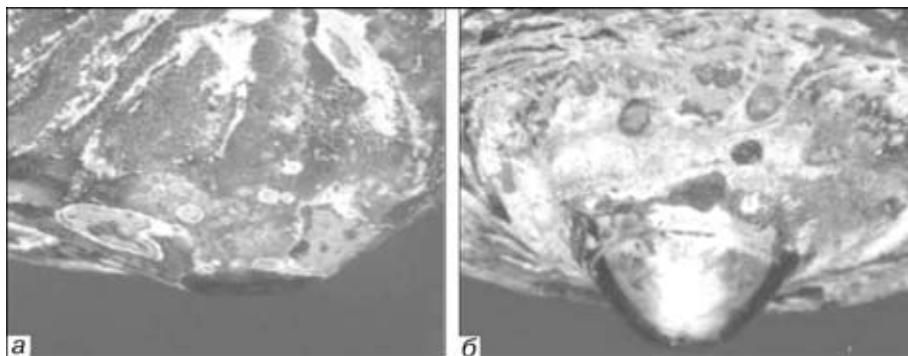


Рис. 3. Внешний вид оплавленных концов электродов, содержащих 30 (а) и 49 % (б) высокоазотистых включений



Тема 1.6.1.13.5 «Разработка электронно-лучевой технологии осаждения твердых градиентных покрытий с неравновесной структурой на основе углерода и бора»

Руководитель д-р техн. наук, акад. НАН Украины **Б. А. Мовчан**

Ответственный исполнитель инженер **А. Г. Маринский**

Выполнены исследования и разработка процесса электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме твердых градиентных защитных покрытий на основе карбидов титана, хрома и бора, в ходе которых изучали состав полученных конденсатов и структуру покрытий по толщине, а также их свойства.

Создана технология одновременного испарения многокомпонентной смеси (таблетки) из одного тигля с получением сложных карбидных покрытий, которая обеспечивает повторяемость и надежность процесса, исключает необходимость применения готовых карбидных соединений в качестве исходного сырья, а также способствует сокращению времени технологического процесса и повышению энергетических показателей, что существенно упрощает и удешевляет его по сравнению с другими технологическими схемами.

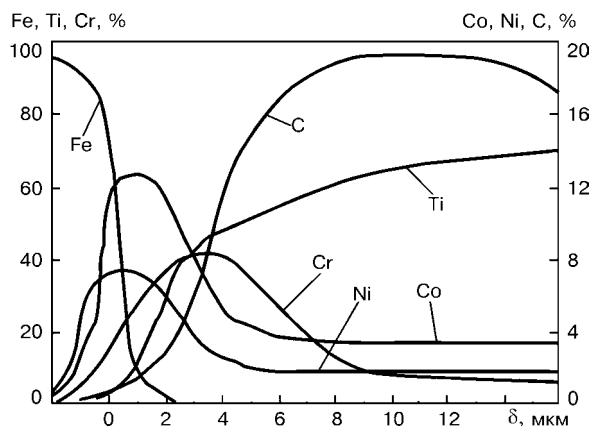


Рис. 1. Распределение элементов по толщине δ покрытий типа Ni-Co-Cr-Ti-C

Изучены закономерности формирования твердых покрытий с переменными, заранее заданными в широком диапазоне, составом и свойствами по толщине.

Путем испарения таблеток Ni-Cr-C; Co-Ti-C; Ni-Co-Ti-C и Ni-Co-Cr-Ti-C получены твердые карбидные покрытия на основе карбидов хрома и титана толщиной 15...20 мкм с градиентом состава, структуры и свойств по толщине.

Покрытия типа Co-Ti-C и Ni-Co-Ti-C в твердой области близки по составу и свойствам к стехиометрическому карбиду титана. Микротвердость покрытий достигает при этом 30...34 ГПа.

В покрытиях типа Ni-Co-Cr-Ti-C образуется смесь карбидов титана и хрома. Из-за высокого содержания элементов с большой упругостью пара начало роста концентраций титана и углерода смещено относительно начала покрытия, что способствует увеличению переходной зоны, смещению пика твердости к наружной поверхности при плавном темпе ее

изменения (рис. 1). Микротвердость таких покрытий составляет 30...32 ГПа (рис. 2).

Установлено, что при использовании электронно-лучевой технологии возможно получение сложных покрытий с отличающимися по своим свойствам компонентами, что было продемонстрировано на примере покрытий типа Ni-Cr-C. Состав, структура и свойства таких покрытий имеют ярко выраженный градиентный характер, а основной параметр (микротвердость) постепенно увеличивается по толщине покрытия и в поверхностной области составляет 20...22 ГПа, что соответствует свойствам высшего карбида хрома Cr₃C₂.

Применение разработанной технологии позволяет успешно синтезировать покрытия на основе карбида бора В₄C непосредственно на подложке, имеющей коэффициенты термического расширения, близкие к таковым карбида бора (например, на молибденовые пластины). Полученные таким образом карбидные покрытия имеют градиент состава, структуры и свойств по толщине. Микротвердость покрытия составляет 30...32 ГПа.

В ходе исследований свойств покрытий на основе конденсатов системы Ti-Cu зафиксирована их высокая мик-

ротвердость HV , ГПа

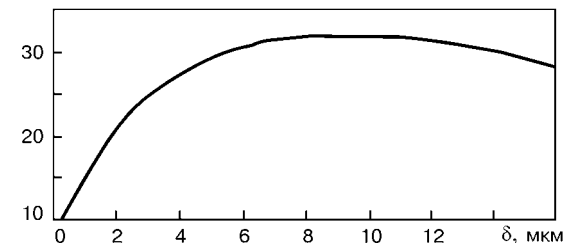


Рис. 2. Изменение микротвердости HV по толщине покрытий типа Ni-Co-Cr-Ti-C

ротвердость (20...25 ГПа), не зависящая от содержания меди вплоть до 30 % мас.

Изучение состава и структуры конденсатов системы Ti-Cu показало, что они состоят из твердых зерен карбида титана, расположенных в матрице меди, заполняющей пространство между узлами TiC вплоть до примерно 30 % мас. При массовой доле свыше 30 % в конденсатах системы Ti-Cu медь находится и внутри зерен, что снижает их микротвердость.

Результаты исследований могут быть положены в основу дальнейшей оптимизации технологии изготовления твердых покрытий и повышения их качества. Полученные покрытия можно рекомендовать для нанесения на стальной и твердосплавный режущий инструмент; на стальные изделия, работающие в условиях трения (скольжения) без смазки, в том числе при повышенных температурах; на детали, подвергаемые влиянию эрозии и коррозии, агрессивных сред и повышенной температуры.



Тема 20 / 6 «Исследование физико-химических процессов и разработка технологических параметров получения новых металлических материалов (на дисперсном поду, чешуйчатообразных, аморфных и монокристаллов) с использованием плазменно-дуговых и индукционных нагревателей новой генерации»

Руководитель канд. техн. наук **В. А. Шаповалов**

Ответственные исполнители: кандидаты техн. наук **О. С. Забарилло, Г. Ф. Торхов, И. В. Шейко**

Развитие современной техники требует применения новых металлических материалов, иногда с принципиально новым сочетанием свойств. В промышленно развитых странах с использованием новейших технологий создаются новые металлические материалы, а также разрабатываются и совершенствуются существующие технологии и оборудование для их производства.

Структурно отчет состоит из трех разделов.

Первый посвящен изучению физико-химических и технологических особенностей плазменно-дуговой плавки на дисперсном поду и разработке технологии компактирования тугоплавких и теплопроводных металлов и сплавов.

Второй содержит описание исследований плазменной технологии выплавки и рафинирования стали и ферросплавов.

Третий является комплексным. Он включает изучение особенностей выплавки однородных слитков титана и марганца в условиях индукционной плавки в секционном кристаллизаторе электрошлакового процесса, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и диспергирования металлического расплава.

Конверсия в оборонной промышленности Украины привела к образованию большого количества отходов редких и ценных металлов и их сплавов. Одним из направлений настоящей работы было создание технологического процесса и оборудования для компактирования отходов молибдена, хрома, ниобия, вольфрама, титана и других дорогостоящих металлов в слитки и заготовки, а также производство на их основе ферросплавов и лигатур, необходимых для металлургической промышленности и производства сварочных материалов.

Технологии высокого уровня направлены на использование процессов, обеспечивающих высокий уровень качества получаемых сталей и ферросплавов при минимальных энерго- и ресурсозатратах. При производстве стали таковым является дуплекс-процесс, при котором расплавление металла происходит в высокопроизводительных агрегатах, а доводка металла по химическому составу и его рафинирование выполняются внепечной обработкой с использованием электродугового нагрева металла графитированными электродами.

Целью исследований, проведенных в рамках указанной темы, было повышение качества стали и ферросплавов до уровня мировых стандартов, экономия энергетических и материальных ресурсов, уменьшение загрязнения окружающей среды.

В последние годы возрос интерес к проблемам производства и использования в промышленных масштабах металлических материалов, полученных способом быстрой закалки из расплава, а также выращивания крупных монокристаллов тугоплавких металлов. Эти материалы существенно превосходят по своим свойствам обычный литой или деформированный металл. В отчете приведены результаты научных исследований процессов получения указанных материалов, на основании которых были разработаны технологии и оборудование для их производства.

В материалах отчета представлены результаты исследований физико-химических процессов, протекающих в металлической ванне при выплавке и рафинировании расплавов, содержащих высокоактивные компоненты, с использованием мелкодисперсных шихтовых материалов при плазменно-дуговом и индукционном нагреве, а также при электрошлаковом процессе с нерасходуемым электродом.

Одним из направлений настоящей работы стала разработка технологий переплава отходов химически активных и тугоплавких металлов, компактирование которых обычными металлургическими способами с использованием открытых агрегатов, как правило, приводит к значительным потерям ценных компонентов или к загрязнению их газовыми примесями. Цель проведенных исследований — получение цилиндрических или плоских заготовок титана, ниобия, молибдена, тантала из их отходов с помощью плазменной металлургической технологии. Определены оптимальные режимы компактирования хрома, титана, тантала в круглые заготовки. Показано, что переработка отходов в ферросплавы и лигатуры является наиболее пригодным видом переработки отходов конверсии.

В отчете приведены методики изучения тепловых процессов, которые протекают в дисперсном пласте, а также влияния размеров частиц и толщины дисперсного пласта на энергетические показатели процесса.

Основными недостатками применения в металлургии электродугового нагрева являются повышенные затраты электроэнергии, огнеупорных материалов и графитированных электродов.

Нами предложены плазменно-дуговые нагреватели развращенного типа (ПДНРТ), которые представляют собой многодуговые нагревательные комплексы. Их питание осуществляется от источников постоянного, переменного тока или по комбинированным схемам. Разработаны принципиальные схемы ПДНРТ, на основе которых были созданы лабораторные и опытно-промышленные образцы этих нагревателей. Исследованы изменения электрических параметров ПДНРТ с пустотелыми графитированными электродами в зависимости от их геометрических размеров. Изучены энергетические параметры процесса выплавки ферросплавов с использованием ПДНРТ. Рекомендованы следующие удельные параметры дуговых сталеплавильных и рудовосстановительных печей: мощность на поверхности пода $600...1000 \text{ кВт/м}^2$; мощность в объеме ванны $450...600 \text{ кВт/м}^3$; активная мощность на площади распада электродов $1800...4400 \text{ кВт/м}^2$; плотность тока на поверхности ванны $5000...9000 \text{ А/м}^2$.

При производстве ряда прецизионных и специальных сплавов возникает необходимость в использовании марганца с низким содержанием примесей. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан и успешно реализован в промышленности способ электрошлакового рафинирования электролитического марганца в форме чешуек толщиной несколько миллиметров путем переплава в слое жидкого шлака.



На основе способа электрошлакового рафинирования марганца освоена технология выплавки высокодемпфирующих марганцево-медных сплавов. Достигнутая степень чистоты металла в соединении с высоким выходом годного дает основание считать этот способ весьма перспективным для получения сплавов системы марганец-медь, используемых при изготовлении высококачественных вибропоглощающих устройств.

В отчете дан анализ существующих способов и приведены данные о принципиально новом способе получения крупных монокристаллов тугоплавких металлов.

Показано, что плазменно-индукционный способ выращивания крупных монокристаллов вследствие гибкого управ-

ления температурным полем слитка позволяет снизить до минимума температурный градиент и механические напряжения в нем.

В отчете представлены результаты исследований процессов быстрой закалки металлических расплавов в условиях индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Итогом проведенных исследований стала разработка технологических регламентов процессов производства сталей высокого качества и способов выплавки ферросплавов из руд и промышленных отходов, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов, получения чешуйчатых металлических материалов с использованием плазменно-дуговых и индукционных нагревателей новой генерации.

Тема 1.16.22.17 «Разработка научных основ повышения эксплуатационных свойств сварных соединений и защитных покрытий методом изучения их тонкой структуры, химической неоднородности и определения параметров оптимизации структурно-фазового состава»

Руководитель чл.-кор. НАН Украины **Г. М. Григоренко**

По теме выполнялся комплекс аналитических, исследовательских, металловедческих и технологических работ. При проведении исследований использовались методы химического, атомно-абсорбционного, кулонометрического, эмиссионно-спектрального анализов. Металлографические исследования выполнялись с применением оптической, растровой и просвечивающей микроскопии. При изучении состава фаз использовались метод рентгеновской дифракции и дифференциальный термический анализ. В технологических работах применялась индукционная, электродуговая и плазменная плавка, диффузионная и ударная сварка в вакууме.

В работах, которые проводились совместно с технологическими отделами, использовались различные методы сварки, наплавки и напыления: электродуговая, электронно-лучевая, контактно-стыковая сварка, электродуговая и плазменная наплавка, плазменное и плазменно-детонационное напыление.

Работы по теме выполнялись по десяти разделам.

Первый раздел включал исследование кинетики сорбции азота жидкими высокорекреакционными металлами при различных условиях нагрева. Полученные результаты позволили определить численные значения констант скоростей реакции поглощения азота при индукционном, дуговом и плазменном плавлении и разработать физическую и математическую модели сорбции азота металлами IV и VA групп. Модель позволяет оптимизировать процессы сварки и плавки высокорекреакционных металлов и сплавов на их основе.

Во втором разделе рассмотрены закономерности формирования переходной зоны в соединениях трудносвариваемых разнородных металлов при различных термомеханических условиях контактно-стыковой сварки. Исследованы тонкая структура, фазовые превращения, изменение концентрации элементов и образование интерметаллидных фаз при сварке аустенитной стали 110Г13Л с рельсовой сталью М76, меди с алюминием и стали с алюминием. Определены условия, при которых этот метод сварки может быть использован для соединения трудносвариваемых металлов.

Третий раздел посвящен исследованиям процессов формирования структуры и свойств покрытий с повышенным уровнем износостойкости, жаро- и коррозионной стойкости

путем совмещения методов газотермического напыления, процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с последующей пропиткой покрытий, термической и химико-термической обработкой. Газотермическое напыление с последующей пропиткой алюмофосфатными связующими и термообработкой увеличивает прочность сцепления с основой в 1,5 раза и износостойкость в условиях абразивного износа в 6 раз. Определен состав порошков и скорректированы режимы напыления, позволившие получить наилучшее качество покрытий при детонационном и микроплазменном напылении FeTi+V₄C и воздушно-газовом напылении FeTi+SiC.

В четвертом разделе исследованы структурные превращения при сварке и ремонте теплостойких корпусных сталей. Установлено, что использование флюса СФТ-6 при сварке теплостойкой корпусной стали 25Х2НМФА тормозит развитие полигонизации в металле шва, обеспечивает уменьшение в 2 раза объемной доли неметаллических включений, их дробление и равномерное распределение по шву. Указанные факторы способствуют увеличению ударной вязкости в 1,5 раза в сравнении со сваркой под флюсом АН-43.

Пятый раздел посвящен исследованиям структуры высокопрочных сварных швов, выполненных электродами с ультранизким содержанием углерода. Получены закономерности структурного состава и состава неметаллических включений в зависимости от окислительного потенциала флюса и показано, что наиболее высокие значения прочности и вязкости характерны для швов с ультранизким содержанием углерода, выполненных под нейтральным или основным флюсом.

В шестом разделе представлены исследования закономерностей образования фаз и фазовых переходов в гетерогенной структуре многослойного коррозионно-стойкого наплавленного металла на основе железа, легированного ванадием, хромом, молибденом и фосфором. По результатам проведенных исследований были оптимизированы состав и структура наплавленного металла, что позволило увеличить его твердость и износостойкость в 2–3 раза.



Седьмой раздел посвящен исследованиям химической микронеоднородности в сварных соединениях алюминиево-литиевых сплавах и в зоне термического влияния при электродуговой и электронно-лучевой сварке. Показано, что легирование литием способствует упрочнению сварного шва и не влияет на перераспределение других легирующих элементов. Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с более высоким уровнем механических свойств.

В восьмом разделе представлены материалы, касающиеся разработки новой технологии изготовления оксидных катодов, был предложен новый способ изготовления оксидного катода, включающий использование вставки из порошковой смеси циркония с гексаборидом лантана и последующее ее соединение с медью методом ударной деформации в вакууме. Детальные металлографические исследования и стендовые испытания оксидных катодов в атмосфере аргона, углекислого газа и воздуха показали монолитность сварных соединений и их надежность в работе.

Девятый раздел посвящен изучению закономерностей образования структурной и химической неоднородности, а также неметаллических включений в приконтактных объемах металла при сварке давлением трубных сталей. Показано, что появление в зоне сварного соединения ферритной прослойки и белой полосы связано с наличием в ней физической и химической неоднородности. Предложен механизм образования ферритной прослойки, включающий совокупность диффузионных и рекристаллизационных процессов, приводящих к обезуглероживанию приконтактной зоны. Изучена природа светлой полосы и показано, что эти структурные изменения не имеют отрицательного влияния на качество сварного соединения.

В десятом разделе представлены разработанные и аттестованные новые методики эмиссионно-спектрального анализа содержания лития в алюминии и его сплавах в диапазоне 0,4... 2,7 % мас.; лития в меди в диапазоне 1... 10 % мас.; фосфора в меди, латунях и бронзах в пределах 0,035... 1,0 % мас.

В результате выполнения работ по теме получены следующие практические результаты.

Определены физико-химические константы, характеризующие взаимодействие азота с жидкими высокоррациональными металлами, которые позволяют управлять процессом легирования металла азотом из газовой фазы.

Созданы новые аналитические методики для химического и спектрального анализа лития и фосфора в металлах и сплавах.

Разработаны основы повышения эксплуатационных свойств сварных соединений и защитных покрытий путем оптимизации структурно-фазового и химического состава сварных швов, наплавов и покрытий для процессов: газотермического напыления с синтезом материалов покрытий; сварки давлением разнородных металлов; электродуговой сварки теплостойких сталей и низколегированных высокопрочных сталей, стойких против хрупкого разрушения; электродуговой и электронно-лучевой сварки высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием; наплавки износостойких материалов, упрочненных углеродом и фосфором; контактной стыковой сварки трубных сталей с повышенной стойкостью против разрушения при низких температурах; создания нового типа оксидных термохимических катодов со вставкой из порошковых материалов.

Тема 34/12 «Математическое моделирование макрофизических процессов при сварке разнородных сталей, гидродинамических явлений в сварке и спецэлектрометаллургии, кинетики роста дефектов в условиях нагружения сварных соединений»

Руководитель акад. НАН Украины **В. И. Махненко**

Работа проводилась по четырем направлениям.

Раздел 1. «Математическое моделирование макрофизических процессов при сварке разнородных сталей».

На основе тщательного выполненного литературного обзора процессов сварки плавлением разнородных сталей (ферритно-аустенитных) были сформулированы следующие семь основных проблем, определяющих качество сварного соединения, при решении которых роль математического моделирования может быть очень существенной:

нагрев изделия, размер зоны проплавления и ее химический состав;

первичная кристаллизация, особенности локальной химической неоднородности и микроструктура вблизи границ сплавления;

образование карбидов;

микроструктура и свойства сварного соединения;

сварочные напряжения и деформации при сварке разнородных сталей;

риск возникновения горячих и холодных трещин;

поведение сварочного соединения в эксплуатационных условиях, особенно при теплосменах.

Большинство из перечисленных проблем тесно связаны друг с другом, что во многих случаях требует комплексного

их рассмотрения при математическом моделировании реальных процессов сварки (наплавки) разнородных сталей.

Следует отметить, что при наплавке особенности разнородности проявляются наиболее остро и для их решения использование математического моделирования не менее актуально, чем для сварки. При наплавке количество технологических параметров, которые варьируются, как правило, больше и вопрос рационального их выбора с помощью соответствующих математических моделей решается эффективней, чем чисто экспериментальным путем.

В рамках сказанного работы данного раздела были связаны с созданием конкретных расчетных алгоритмов и выполнением соответствующих численных исследований типичных случаев сварки (наплавки) разнородных сталей.

Как типичные случаи, продиктованные потребностями промышленности Украины и зарубежных фирм, рассмотрены: наплавка под углом кромок листов ферритной стали аустенитным слоем для получения разнородного стыкового соединения ферритная сталь — аустенитная сталь (сотрудничество с энергетиками по договору №2362 с НТК ИЭС от 30 мая 2002 г.);

приварка трубок из аустенитной стали к трубной решетке из ферритной стали (сотрудничество с немецкими фирмами «SLV Mecklenburg» и «Infracon»);



наплавка коррозионно-стойкого слоя электродуговой сваркой по винтовой линии на поверхность валов из стали типа 35 или 40X (сотрудничество с судоремонтными предприятиями, ходовой договор с Управлением морских путей г. Одесса от 4 мая 2000 г.);

наплавка износостойкого слоя на тонкие пластины больших размеров из ферритной стали соответствующих заготовок для штамповки деталей, например, лопастей спецвентиляторов и т. п. (сотрудничество с немецкой фирмой «SLV Mecklenburg»);

контактная сварка оплавлением железнодорожных рельс из сталей Р65 и Гатфельда в стрелочных переходах (сотрудничество с отделом № 26 ИЭС и металлургическими предприятиями Украины, изготовителями стрелочных переходов); особенности транспорта водорода в разнородных соединениях (сотрудничество с украинской фирмой НПФ «Корба»); сварка встык через сплошной промежуточный слой пластин из пенистого материала (сотрудничество с немецкой фирмой «SLV Mecklenburg»).

Раздел 2. «Компьютерное моделирование гидродинамических явлений в технологических процессах сварки и спечэлектрометаллургии».

Разработаны сопряженные осесимметричные модели гидродинамики и теплообмена при формировании слитков методами специальной электрометаллургии: электронно-лучевого переплава слитков титановых сплавов и электронно-лучевой бестигельной зонной плавки монокристалла кремния. Модели основаны на полной системе уравнений динамики движения вязкой несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска, уравнении конвективно-кондуктивного переноса энергии и уравнении конвективной диффузии. Рассмотрены несколько силовых факторов, влияющих на движение расплава: 1) термогравитационная конвекция, возникающая в термически неоднородной жидкости под действием силы тяжести; 2) термокапиллярная конвекция, обусловленная градиентом коэффициента поверхностного натяжения на свободной поверхности металлической ванны; 3) вынужденная конвекция, возникающая в результате воздействия струи металла, который периодически выливается в кристаллизатор из промежуточной емкости. Задача гидродинамики решается в области сложной формы, образованной границами фазовых переходов, геометрия которых определяется в процессе решения сопряженной задачи. Граничные условия для определения поля температур учитывают радиационный теплообмен поверхности со стенками камеры (тепловым экраном), разные варианты распределения плотности источника электронно-лучевого нагрева, сканирования электронного луча по свободной поверхности металлической ванны. При зонной плавке монокристалла кремния предусмотрена возможность плавления в условиях невесомости. Для изучения перераспределения легирующих (примесных) элементов в процессе кристаллизации учитывается поток испарения по закону Ленгмюра, а также разбавление расплава за счет его слива из промежуточной емкости.

Проведен сравнительный анализ условий формирования монокристалла кремния при электронно-лучевой бестигельной плавке в земных условиях и в условиях микрогравитации. Определено, что при микрогравитации гидродинамика расплавленной зоны обусловлена действием силы Марангони, а скорость движения расплава уменьшается в 5 раз по сравнению со скоростью в земных условиях. Это приводит к большому потере энергии на радиационное излучение, к уменьшению высоты расплавленной зоны и появлению выпуклого фронта кристаллизации с высотой прогиба 0,35 мм. Показано, что использование короткого теплового экрана, расположенного ниже фронта кристаллизации, позволяет сохранить параметры расплавленной зоны на уровне, отвечающем земным условиям плавки. Установлена целесообразность сканирования электронного луча с частотой 200 Гц и более — такой технологический прием позволяет уменьшить интенсивность термокапиллярной конвекции в условиях микрогравитации за счет меньшего перегрева свободной поверхности расплавленной зоны. При этом одновременно достигается снижение электрической

мощности плавки при тех же геометрических параметрах зоны, что важно при проведении космического эксперимента в условиях ограниченного энергоснабжения.

Раздел 3. «Математическое моделирование дефектов в зоне сварных соединений и разработка расчетных алгоритмов и программ для оценки кинетики роста дефектов до критических размеров в условиях нагружения сварных соединений».

В этом разделе созданы математические модели для оценки несущей способности сварных узлов из разнородных сталей (главным образом толстостенных сварных оболочек из ферритной стали с наплавленным коррозионно-стойким слоем из аустенитной стали) в характерных условиях нагружения, соответствующих аварийному нагружению корпусов ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000, которые эксплуатируются в Украине.

В рамках этого же раздела разработана математическая модель для оценки безопасных условий заварки язвенных дефектов на внешней поверхности газо- и нефтепроводов без выведения соответствующих участков из эксплуатации. Результаты этой работы нашли практическое применение при создании нормативных материалов для устранения ремонтом указанных участков.

Раздел 4. «Разработка информационной системы компьютерного проектирования режимов электродуговой сварки конструкционных легированных сталей для сварочных материалов различных форм».

Интерес к современным информационным системам при решении различных технологических вопросов сварки, наплавки, нанесения покрытий всегда был одним из приоритетных в деятельности ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. За прошедшие годы выполнен целый ряд работ, связанных с созданием на электронных носителях баз данных, экспертных и расчетно-экспериментальных систем. Однако развитие вычислительной техники, методов математического моделирования, растущие потребности технологии требуют новых подходов в этом направлении.

В связи с этим работы выполняли по двум направлениям. Первое — связанное с актуализацией уже созданных баз данных и экспертных систем. Например, база данных «Механические свойства сварных соединений» или экспертная система «Наплавка». Второе направление связано с созданием систем на основе математического моделирования и определенных информационных подсистем, в которых математическому моделированию уделено достаточно большое внимание с целью получения необходимых для разработки технологий количественных данных. В частности, созданная совместно с НПФ «Корба» компьютерная система «Выбор сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей» предназначена, в определенной мере, для замены экспериментов, проводимых на соответствующих образцах сварных соединений.

Используя паспортные данные фирмы изготовителя сварочных материалов (электродов, порошковых проволок, флюсов) о рекомендуемых режимах дуговой сварки, коэффициенте наплавки, химическом составе наплавляемого металла, система позволяет получить для случаев сварки стыковых и тавровых соединений различных конструкционных сталей информацию относительно:

размеров и формы зоны проплавления (ЗП) для корневого шва и последующих проходов;

химического состава ЗП;

микроструктурного состава в ЗП и зоне термического влияния (ЗТВ);

механических свойств в ЗП и ЗТВ, включая твердость, временное сопротивление, границу текучести, относительное удлинение, ударную вязкость;

риска образования горячих и холодных трещин;

локальной концентрации водорода в ЗП и ее влияния на образование холодных трещин.

В данный момент система проходит апробацию на ряде предприятий Украины, в частности, на заводе «Океан» в г. Николаеве.

Тема 1.6.1.58.6 «Разработка электронно-лучевой технологии получения композиционных материалов на основе легких сплавов и упрочняющих волокон с диспергированного расплава в вакууме»

Руководитель д-р техн. наук Н. П. Тригуб

Ответственные исполнители: кандидаты технических наук С. В. Ахонин,

Г. В. Жук, А. Н. Калинюк, П. А. Пап

Разработан новый способ диспергирования расплава металла из промежуточной емкости посредством вращающегося барабана-кристаллизатора (рис. 1). В электронно-лучевой установке происходит плавление расходомерной заготовки или шихты как при электронно-лучевом переплаве. Накопленный в промежуточной емкости в процессе плавления расходомерной заготовки жидкий металл периодически сливается из промежуточной емкости на вращающийся барабан-кристаллизатор. Затем барабану сообщается высокая скорость вращения (2000 об/мин), и жидкий металл срывается с поверхности барабана в виде потока дисперсных жидких капель. Поток капель расплава направляют на формообразующую поверхность (подложку), где капли растекаются и моментально кристаллизуются без образования жидкой ванны. В качестве подложки могут быть использованы водоохлаждаемый кристаллизатор (для получения слитков), металлическая пластина (для получения биметаллических композиций), разделка свариваемых деталей (для сварки), каркас из упрочняющих элементов (для получения композиционных материалов).

Для проведения экспериментальных исследований по получению волокнистых металлических композитов использовали многоцелевую лабораторную электронно-лучевую установку УЭ-208. На ней смонтировали механизм диспергирования, конструктивно состоящий из диспергирующего барабана, его крепления, системы передачи вращения с вакуумно-плотным переходником, электродвигателя и системы управления.

Управление механизмом вращения осуществляется с помощью электронной системы «Размер», при этом скорость вращения делителя плавно регулируется в диапазоне 0...2500 об/мин. Остаточное давление в ходе процесса в камере плавки составляло 0,05 Па, в камере электронно-лучевого нагревателя — 0,005 Па. В качестве шихты использовали лом алюминиевых и титановых сплавов. Была сформирована струя капель диспергированного расплава, направленная на подложку, на которой размещен стальной каркас

с натянутыми волокнами (сталь, вольфрам). Волокна предварительно не нагревали. Производительность струи диспергированного расплава составила 150 кг/ч. После нанесения матрицы толщиной 30...40 мм процесс прекращали и выдерживали изделие в условиях вакуума в течение 1 ч.

Была создана математическая модель тепловых процессов в центрально-симметричной системе волокно-матрица с центром на оси волокна (рис. 2). Моделировали процесс, при котором материал матрицы наносили способом электронно-лучевого диспергированного расплава на подложку, над которой на разных уровнях натянуты упрочняющие волокна. На первом этапе моделировали теплофизические процессы в системе подложка-матрица без учета влияния волокон; на втором — рассчитывали локальные температурные поля в непосредственной близости к волокну.

В рамках предложенной модели были проведены расчеты тепловых полей для алюминиевой и титановой матриц. Определено, что для исключения возникновения на поверхности формирующейся матрицы жидкой ванны скорость нанесения диспергированного расплава для титана не должна превышать 3,0, для алюминия — 1,8 кг/с. При этом на протяжении всего процесса температура в области матрицы для алюминия составляет 820...855, для титана — 1350...1500 К, что гарантирует удовлетворительное качество соединения слоев наносимого материала.

Исследованы образцы композиционных материалов на основе алюминиевой и титановой матриц, упрочненных соответственно стальными и вольфрамовыми волокнами.

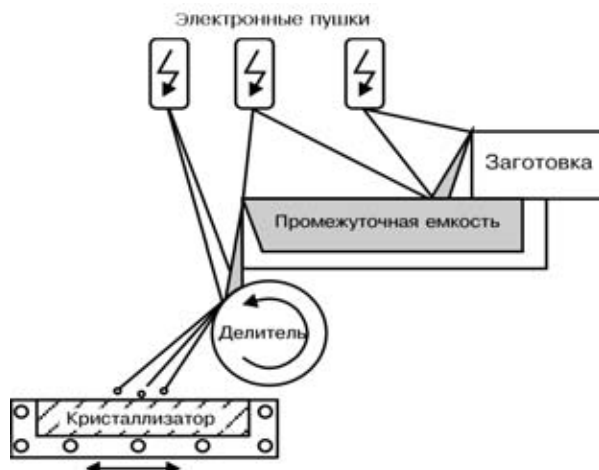


Рис. 1. Схема процесса диспергирования расплава из промежуточной емкости

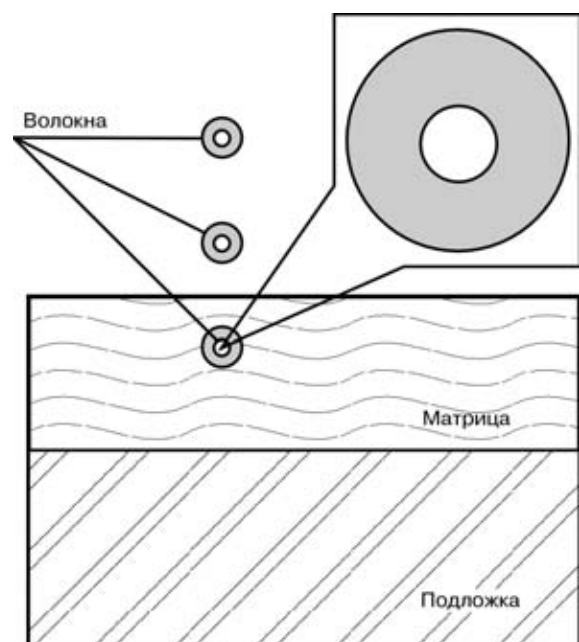


Рис. 2. Схема моделирования процесса получения волокнистого композиционного материала



Макроструктура поперечного сечения композита имеет полосчатую структуру с волнообразными границами, которые соответствуют слоям кристаллизации (рис. 3). Дефектов в виде пор и несплошностей, которые могут быть вызваны несплавлением последовательно кристаллизующихся слоев, не обнаружено.

Зафиксированные на макрошлифе слои кристаллизации образцов отличаются размером зерна и степенью травимости. Наряду с участками мелкого зерна (80...130 мкм) обнаружены участки, где размер зерна достигает 400 мкм.

При предварительном нагреве подложки на границе матрица-волокно в композите на основе алюминия происходит химическое взаимодействие металлов и образуется прослойка $FeAl_3$, толщина которой изменяется в пределах 10...50 мкм в зависимости от температуры предварительного нагрева подложки.

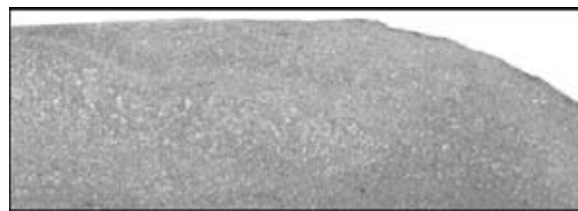


Рис. 3. Макроструктура поперечного сечения композита (X5)

Проведены механические испытания полученных образцов. Временное сопротивление композитов вдоль волокон для алюминиевой матрицы АМг1, армированной стальными волокнами, составило 90 МПа, для титановой ВТ1-0, армированной вольфрамовыми волокнами, — 550 МПа.

Тема 73/8 «Разработка научных основ и исследование физико-химических особенностей процессов нанесения покрытий, совмещенных с синтезом тугоплавких соединений и использованием термоактивных источников тепла»

Руководитель д-р техн. наук **Ю. С. Борисов**

Ответственный исполнитель канд. техн. наук **Е. А. Астахов**

На современном этапе развития инженерии поверхности, включающей технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхности, все большее значение имеют процессы, в которых осаждение покрытия сочетается с синтезом материала покрытия, а также процессы активирования путем воздействия плазмы, лазера или других источников энергии. Примерами могут служить такие вакуумные способы, как активированное реакционное испарение, реакционное ионное осаждение, процесс газофазного осаждения, активированный плазмой, и др. Таким образом, удается повысить скорость осаждения покрытий, расширить их номенклатуру, улучшить качество.

Подобные идеи развиваются и в области газотермического напыления (ГТН). В процессах реактивного плазменно-дугового напыления активность компонентов плазменной струи используют для синтеза нитридов и карбидов в процессе нагрева порошков металлов с формированием упрочненных покрытий. Другим способом сочетания синтеза материала покрытия с процессом ГТН является применение композиционных порошков (КП) и порошковых проволок, при нагреве которых происходит взаимодействие компонентов с образованием нового вещества, например интерметаллида, который и является материалом покрытия. Однако все упомянутые результаты были получены в разрозненных экспериментах и в основном продемонстрировали лишь принципиальную возможность таких решений в области ГТН.

Цель данной работы состояла в исследовании процесса экзотермического синтеза материала покрытия при ГТН КП с учетом особенностей различных видов ГТН — плазменного, микроплазменного, детонационного; в оценке возможности активирования процесса диффузионного хромирования; в совершенствовании технологии реакционного вакуумно-дугового осаждения нитридных покрытий и определении условий совмещения плазменно-детонационной обработки поверхности с легированием модифицированного слоя.

При разработке первого раздела темы выполнен анализ современного состояния этого направления в ГТН, а также современного уровня теории и практики самораспространя-

ющегося высокотемпературного синтеза (СВС) как перспективного в условиях ГТН режима реализации процесса синтеза в связи с высокими скоростями его протекания. В результате этого анализа выделены характеристики СВС, которые должны играть наиболее существенную роль в условиях ГТН. К ним отнесены теплота реакции синтеза и связанное с ней адиабатическое повышение температуры композиции, показатель кинетики процесса, влияющий на линейную скорость движения фронта СВС.

В качестве объектов исследования были выбраны КП, состоящие из ферросплавов титана, ванадия или хрома, а также карбидов бора или кремния. Термодинамическая оценка и данные дифференциального термического анализа позволили определить характеристики процесса экзотермического синтеза в этих композициях и наиболее эффективные составы этих композиций ($FeTi-15B_4C$, $FeTi-23SiC$, $FeV-20B_4C$, $FeV-22,5SiC$, $Fe-Cr-18B_4C$, $Fe-Cr-14,5SiC$). С целью получения опытных партий таких порошков для экспериментальных исследований были разработаны технологии изготовления КП способами конгломерирования на органических связках и реакционного припекания компонентов.

Для расчетно-теоретической оценки влияния экзотермической реакции синтеза на нагрев и движение частиц КП в плазменной струе разработана математическая модель процесса плазменного напыления, совмещенного с экзотермическим синтезом материала покрытия. На ее основе с учетом опыта разработки КП Ni-Al создано программное обеспечение для численного исследования особенностей плазменного напыления в данных условиях. Показано, что наибольшее влияние на динамику нагрева экзотермически реагирующих частиц оказывает кинетический показатель, связанный с механизмом межфазного взаимодействия, площадью контакта и рядом других характеристик. Высокие скорости процесса синтеза приводят к излишнему перегреву частиц, вплоть до их частичного испарения, а низкие — к переносу части процесса синтеза на основу с протеканием его в период формирования слоя покрытия. К другим факторам, влияющим на ход процесса синтеза в условиях плазменного напыления,



относятся размер частиц, расход порошка и температура плазменной струи (или мощного плазмотрона). Полученные результаты численного исследования позволяют выработать рекомендации относительно особенностей технологии плазменного напыления экзотермически реагирующих КП.

Эксперименты по ГТН указанных КП проведены в условиях плазменного, микроплазменного и детонационного напыления, отличающихся температурой и скоростью высокотемпературной газовой струи, что должно отражаться на длительности пребывания частиц в зоне нагрева и степени завершения процесса синтеза в период движения частиц к поверхности основы.

Методами оптической микроскопии, фотометрии и рентгенофазового анализа были исследованы структура и состав как напыленных покрытий, так и напыляемых частиц, улавливаемых водяной ванной. Результаты исследования показали, что наибольшая степень завершенности процесса синтеза отмечена в случае микроплазменного напыления, достаточно высокая — при обычном плазменном напылении. При детонационном напылении процесс взаимодействия начинается еще в стволе пушки, но завершается, как правило, уже на основе при формировании покрытия, что объясняется длительностью пребывания частиц в струе.

Структура получаемых покрытий содержит такие продукты синтеза, как бориды (при использовании КП с V_4C — VB , V_2B_3 , V_3B_6 , TiB_2 , CrB , FeB и др.), карбиды (VC , V_4C_3 , Cr_7C_3 , TiC и др.), силициды (при использовании КП с SiC — V_6Si_5 , $TiSi_2$, Ti_5Si_3 , $CrSi_2$ и др.), а также тройные фазы ($FeTiSi$, $FeSiC$). Кроме продуктов синтеза, обнаружен ряд оксидных фаз, причем наибольшее их количество зафиксировано в детонационных покрытиях. Микротвердость покрытий, содержащих боридные фазы, достигает 8000 МПа при детонационном напылении ($Fe-Cr-V_4C$) и 16900 МПа при плазменном напылении ($FeV-V_4C$). Микротвердость плазменных покрытий, содержащих карбиды и силициды, при напылении $FeV-SiC$ составляет 8200...18900, в случае $FeTi-SiC$ — 6000...11000 МПа.

Результаты испытаний покрытий на газообразивный износ в сочетании с указанными значениями их твердости позволили рекомендовать разработанные КП для практического применения в качестве износостойкого компонента при напылении в составе механических смесей с никелевыми или железными сплавами.

Кроме композиций ферросплав-неметаллическое тугоплавкое соединение, изучены условия формирования и свойства алюмокерамических покрытий, получаемых при плазменном напылении КП алюминий-ильменит. Показано наличие алюмотермической реакции при нагреве этой композиции с образованием в качестве продуктов синтеза оксида алюминия, а также алюминидов титана и алюминия. Полученные покрытия отличаются более высокой износостойкостью (в 5–10 раз),

чем покрытия из чистого алюминия, при сохранении высокой стойкости против коррозии, свойственной алюминию.

При исследовании возможности ускорения процессов диффузионного хромирования стальных изделий установлено, что введение активирующих добавок в насыщенную смесь в виде гидрида титана (2 % мас) и порошков сплавов алюминия с лантаном или кремнием (7 % мас) позволяет сформировать диффузионный слой толщиной 100...170 мкм в течение 60 мин. Полученные покрытия характеризуются высокой стойкостью против износа и коррозии. Испытания деталей с карбидохромовым покрытием в промышленных условиях показали увеличение их долговечности в 2–5 раз.

Изучено влияние скорости испарения катодного материала, давления реакционного газа в рабочей камере и энергии ионов в плазменном потоке на морфологию поверхности растущего слоя нитрида титана, структуру покрытия, адгезию конденсата к основе и физико-механические свойства покрытия. Показано, что формирование слоя стехиометрического нитрида титана происходит при давлении азота в рабочей камере $(2...3) \cdot 10^{-1}$ Па, а максимальной микротвердости и минимальной вязкости покрытий достигают при давлении реакционного газа $(1,2...2,5) \cdot 10^{-2}$ Па. Разработана и испытана новая конструкция цилиндрического вакуумно-дугового испарителя непрерывного действия с эродирующей в разряде боковой поверхностью. Установка предназначена для нанесения покрытий на большие поверхности при обеспечении равномерности толщины осаждаемого слоя.

С целью совершенствования способа плазменно-детонационного модифицирования (ПДМ) поверхности проведено математическое моделирование процесса взаимодействия импульсной плазменной струи с поверхностью. Показано, что максимальным тепловым потоком в поверхность получается, когда изделие становится анодом, а минимальным — при изоляции изделия от токового разряда. Установлено, что наиболее интенсивное совмещение процесса ПДМ с легированием поверхности из пароконденсатной фазы, образованной продуктами эрозии центрального электрода, происходит в режиме разрядки конденсаторной батареи изделие-катод. Определено влияние условий генерирования плазменного импульса на процесс модифицирования и легирования поверхности. На ток воздействуют в основном емкость конденсаторной батареи, расстояния от среза сопла до изделия и от торца центрального электрода до среза сопла. Показано, что при ПДМ стали У8 скорость закалки в поверхностных слоях достигает $7,5 \cdot 10^6$ град·с⁻¹, что приводит к формированию модифицированного слоя толщиной 60 мкм, а при использовании центрального электрода из молибдена возможно его легирование молибденом на глубину до 10 мкм. Практическое применение способа ПДМ с легированием поверхности обеспечивает повышение работоспособности инструмента в 2–6 раз.