



Представляем рефераты научно-исследовательских работ, выполненных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по бюджетной тематике в период 2003–2006 гг.

Тема 1.6.1.22.33 «Разработка методологии проведения исследований и оценка деградации структуры, фазового и химического состава конструкционных сталей после длительной эксплуатации в сложных условиях»

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

Работу выполняли в 2002–2006 гг. в отделе № 22 ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Цель работы заключалась в установлении возможных причин и механизмов процессов, приводящих к уменьшению ресурса металла ответственных конструкций различного назначения и отрицательно влияющих на продолжительность безопасной эксплуатации агрегатов, механизмов, конструкций, сооружений, узлов и т. п. в условиях взаимодействия металла с агрессивной средой (рабочей, внешней).

Работу выполняли комплексно, с привлечением 15 различных методов исследования на современных научных приборах как отечественного, так и зарубежного производства. Предварительный анализ литературы по этому вопросу показал, что только в некоторых отраслях техники предпринимались отдельные попытки выявить причины уменьшения сроков безопасной эксплуатации металлов, но они, как правило, ограничивались лишь металлографией, испытанием механических и коррозийных свойств. Однако выяснилось, что указанные методы для решения данной задачи малопригодны, поскольку на макроуровне они практически не выявляли никаких изменений в металле, вплоть до момента его разрушения. Поэтому реально ресурс безопасной работы металлических изделий в условиях эксплуатации до настоящего времени устанавливали не на основе научно обоснованных положений, а с учетом предыдущего опыта эксплуатации аналогов этого оборудования или статистических данных по этой же отрасли. Систематических целенаправленных исследований процессов, происходящих в металле на мезо- и микроуровне во время длительной (многолетней) эксплуатации, до настоящего времени не проводили.

Поскольку методы исследования, используемые до настоящего времени для контроля за состоянием металла (прежде всего методы световой металлографии), оказались малочувствительными к возможным изменениям в металле в процессе длительной эксплуатации, то нами задействованы более чувствительные методы и современное научное оборудование (приборный комбайн-лаборатория для

трехмерного анализа поверхностных слоев металла с разрешающей способностью в 1... 2 нм по глубине — LAS-2000, Riber, Франция), на котором выполняли исследования методами оже-электронной спектроскопии (ОЭС), масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС), термодесорбционной масс-спектрометрии, электронной спектроскопии для химического анализа — ЭСХА) и др.; использовали также методы микрорентгенографии (установки Comebax-4M и Comebax-SM-50 фирмы «Comesa», Франция); световой микроскопии (микроскопы Versamet-2 и Neofot-32), растровой электронной микроскопии (электронные микроскопы SEM-515 фирмы «Phillips» (Нидерланды) и JSM-840 фирмы «JEOL» (Япония) с энергодисперсионными электронными спектрометрами Link Systems (Великобритания), локального масс-спектрального анализа с лазерным микрозондом (установка ЭХО-4M, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Украина); электронный просвечивающий микроскоп JEM-200CX фирмы «JEOL» (Япония) и др.

Изучены возможные изменения в структуре, фазовом и химическом составе на мезо- и микроуровнях (зерен, границ зерен, микровключений и т. п.) ряда агрегатов, механизмов и конструкций с целью выявления общих процессов, развитие которых могло бы повлиять на продолжительность сохранения первичных механических и других служебных характеристик металла в условиях длительной эксплуатации. Поэтому выбрали широкую гамму разнообразных объектов: отдельные элементы пароводяного тракта паровых котлов тепловых и атомных электростанций (трубопровод питательной воды, парогенераторы, паронагреватели и др.); лопатки паровых турбин; трубы нефтепроводов и газопроводов; кожух доменной печи; корпус емкости нефтехранилища, а также отдельные ответственные узлы гидроагрегата Днепрогэса, эскалатора киевского метрополитена и др.

Для повышения степени достоверности полученных результатов и их соответствия реальному состоянию в металле после длительной (до 45 лет) эксплуатации усовершенствованы некоторые существ-



вующие и разработаны две новые методики электронно-микроскопического исследования, а также создано два новых метода исследования наноструктурных элементов в металлах (в том числе и ультрамикродисперсных включений нанометровых размеров). В результате проведенных исследований установлено следующее:

на макро-, частично на мезоуровне, в металле после продолжительной эксплуатации не происходит существенных изменений структуры, но появляются ультрадисперсные неметаллические включения, скапливающиеся в определенных местах. В межзеренных прослойках происходит локализованная пластическая деформация и изменяется локальный химический состав основного металла в приграничной полосе шириной 250...300 нм. Это способствует изменению локальных механических свойств, ослаблению межзеренных связей и охрупчиванию металла;

межзеренные прослойки в металле, а также его внешняя поверхность обогащаются во время эксплуатации (по сравнению с исходным основным металлом) такими химическими элементами, как водород, кислород, углерод, азот, фтор, хлор, медь. Внутренняя поверхность труб парохладителей котла поглощает из питательной воды натрий, кальций, серу, кремний, марганец;

причиной формирования коррозионных поражений и свищей на поверхности труб змеевика по ходу парового потока в котле является наличие в нем примесей органических и неорганических кислот, а также появление первичного конденсата, содержащего повышенное количество этих кислот на поверхности труб, лопаток, которые обращены в сторону потока пара. На поверхности распределения металл-капля первичного конденсата (в трубах котлов на поверхности лопатки турбины, а при атмосферных условиях — конденсат из воздуха на поверхности металлоконструкций) одновременно протекает как минимум два процесса: химические коррозионные реакции между кислотами, содержащимися в конденсированной капле, и металлом со всей поверхностью их контакта. Именно это вызывает активное коррозионное разрушение металла; в местах выхода дислокаций на поверхность (чаще всего в зоне большеугольных границ зерен) деструкция металла более интенсивная. Возможно локальное растворение металла с последующим выкрашиванием целых блоков металла, содержащих до нескольких сотен (тысяч) зерен;

в местах выхода дислокаций на поверхность зафиксирован структурно-деформационный эффект, обнаруженный сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. Он заключается во взаимодействии дислокаций металла с молекулами вещества среды, контактирующей с металлом. В результате дисло-

кации металла во время деформации поатомно расщепляют молекулы среды (газовой, жидкой, твердотельной), сорбируют освобожденные благодаря этому процессу атомы как квази-ионы и транспортируют их в глубину;

в результате продолжительной эксплуатации под действием знакопеременных напряжений, структурно-деформационного эффекта и взаимодействия поверхности металла лопаток турбины с паром и конденсатом происходит постепенное изменение химического состава сначала приповерхностного слоя, а потом и всего объема металла. В результате первично гомогенный металл лопатки с постоянным и однородным химическим составом становится гетерогенным. Мигрируют и перераспределяются между телом зерна и его границами не только химические элементы внедрения (водород, кислород, углерод, азот), но и легирующие элементы (марганец, хром, никель и др.). Возникают локальные зоны другого химического состава, а, следовательно, и с иными механическими свойствами, что, в конечном итоге, вызывает разрушение металла лопатки паровой турбины;

с появлением в металле неметаллических включений при эксплуатации происходит постепенная деградация его механических свойств;

обнаружено существование, по крайней мере, двух механизмов формирования трещин в металле — при относительно небольших (до 200...250 °С) и повышенных (до 500 °С) температурах, дано их описание;

металл труб практически всех элементов пароводяного тракта блочного котла тепловой электростанции, труб нефте- и газопровода, строительных конструкций, пешеходного моста, емкости нефтехранилища, работавших длительное время в контакте с агрессивной средой, содержащей воду или ее пары, кислоты и т.п., насыщается водородом в количествах, достаточных для водородного охрупчивания. Это приводит к изменению степени химической неоднородности стали, уменьшению ее прочности и ухудшению других механических свойств.

Таким образом, при продолжительной (до 45 лет) эксплуатации на металл действует целый ряд факторов, отрицательно влияющих на его служебные характеристики. Наибольший вклад в этот процесс вносит действие различных видов нагрузок, температур и контакт со средой, что способствует постепенному формированию в металле на мезо- и микроуровнях химической, а затем и физической неоднородности, ухудшению служебных характеристик, формированию благоприятных условий для зарождения и роста сначала деформационных, а потом и деформационно-коррозионных трещин, язв, каверн, вплоть до разрушения металла.



Тема 1.6.1.22.13 «Усовершенствование методики эксперимента, исследование физико-химических процессов и изучение их влияния на структурно-фазовый состав и свойства при формировании слитков, сварных соединений и покрытий»

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

Выполняли комплекс аналитических, материаловедческих и технологических работ. Использовали методы химического атомно-абсорбционного, кулонометрического, эмиссионно-спектрального, рентгеновского микроспектрального анализа. Металлографические исследования выполняли с привлечением световой, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, оже- и масс-спектрометрии. При исследовании фаз и фазовых преобразований использовали методы рентгеновской дифракции, рентгеноструктурный, дифференциальный термический анализ и дилатометрию.

В технологических работах применяли индукционную, электро- и плазменно-дуговую плавку, диффузную и ударную сварку в вакууме. В работах, выполняемых вместе с технологическими отделами, использовали разные способы сварки, наплавки и напыления. Работы по теме выполняли по одиннадцати разделам.

Раздел 1. «Исследование кинетики транспорта азота в системе газ–шлак–жидкий металл при использовании разных источников нагрева». Разработана методика и проведены исследования азотопроницаемости оксидных и фторидных шлаков различного состава при разных способах плавки. По кинетическим зависимостям рассчитаны коэффициенты массопереноса азота. Наибольшей скорости переноса достигают при дуговом плавлении. Определены главные положения механизма поведения азота в системе газ–шлак–жидкий металл. Увеличивая основность шлаков и содержание оксидов кальция, алюминия, марганца и титана, а также фтористого кальция, можно легировать азотом металл и защищать его от азота.

Раздел 2. «Разработка литейной технологии изготовления медно-алюминиевых переходников, делающей невозможным образование на границе интерметаллидных соединений и легкоплавкой эвтектики». Исследовано взаимодействие меди и алюминия при температуре до 660 °С. В качестве барьерной прослойки выбрали никель и исследовали электропроводность данного соединения.

Разработана литейная технология изготовления высокоамперных медно-алюминиевых переходников, проведено их испытание в условиях, приближенных к производству предприятия «Украинский графит».

Раздел 3. «Изучение особенности структуры и свойств нанокристаллических порошков и полученных из них газотермических покрытий разного наз-

начения». В качестве объектов исследования выбраны следующие три группы материалов:

порошки и покрытия из гидроксипатита (ГА) — биокерамического материала, широко используемого в ортопедии;

порошки и плазменные покрытия из сплава системы Al–Cu–Fe, состоящие из смеси кристаллических (β , θ и др.) и квазикристаллических (ψ) фаз;

композиционные порошки из нанокристаллической матрицы (феррохрома) и упрочняющей фазы (ультрадисперсных частиц карбонитрида титана — TiCN), а также плазменные покрытия из этих порошков.

Для получения порошков, содержащих компоненты с квазикристаллической или нанокристаллической структурой (второй и третьей групп), впервые применен способ механохимического синтеза (МХС).

Микроплазменное напыление позволило путем формирования градиентных покрытий с ГА обеспечить высокую прочность сцепления с металлической основой (имплантантом), с одной стороны, и необходимую биосовместимость с живой костной тканью, с другой.

Установлено, что плазменные покрытия из порошков Fe–Cr–TiCN, полученные способом МХС, отличаются низкой пористостью, высокой твердостью, отсутствием трещин и отслоений на границе с основой. Покрытия имеют высокую коррозионную стойкость.

Сравнение результатов испытаний покрытий системы Al–Cu–Fe из порошков, изготовленных способом МХС, с покрытиями того же состава из порошков, полученных путем распыления расплава аргоном, показало, что они превосходят последние как по коррозионной стойкости (в 1,5... 10,0 раз в зависимости от состава коррозионной среды), так и по износостойкости в условиях газообразного изнашивания при всех углах атаки (при 90° почти на порядок).

Выполненный цикл исследований свидетельствует о перспективности применения способа МХС с целью получения порошков для газотермического напыления покрытий с более высокими служебными характеристиками благодаря наличию в их структуре квази- и нанокристаллических фаз, в сравнении с покрытиями из порошков того же состава, изготовленных традиционными способами.

Раздел 4. «Исследование механизма и кинетики структурных превращений в сварных швах низко-



легированных сталей с ультранизким содержанием углерода и определение условий оптимизации механических свойств». Изучен механизм и кинетика распада аустенита в металле низколегированных швов. Установлено, что в швах, кроме обычных ферритно-перлитных структур, формируются необычные морфологические образования феррита, которые кристаллизуются в виде дендритных форм или «конгломератов» кристаллов неправильной формы, отделенных друг от друга выделениями МАК-фазы.

Установлено, что нестабильность высоких значений вязкости металла швов низколегированных сталей при низких температурах связана с наличием как МАК-фазы, так и пластинчатых форм феррита.

Для получения стабильно высоких значений свойств прочности и пластичности металла швов необходимо, чтобы объемная часть МАК-фазы в его структуре не превышала 5...6 % при минимальном содержании феррита с благоустроенной второй фазой и приблизительно 60 % игольчатого феррита.

Раздел 5. «Исследование формирования метастабильных структур в многослойных наплавках дисперсионно-твердеющих и мартенситно-стареющих сталей, позволяющих повысить эксплуатационные свойства». Изучен механизм вторичного твердения и особенности структуры наплавленного металла дисперсионно-твердеющих сталей системы Fe-C-Ni-Cr-Si-Al-Cu. Установлено, что путем подбора состава наплавки и режимов отпуска можно получить износостойкую наплавку с высокой твердостью.

Исследована структурная неоднородность и твердость наплавки мартенситно-стареющих сталей. Определены оптимальные режимы, обеспечивающие наилучшее формирование металла наплавки, минимальное количество неметаллических включений и равномерное распределение твердости после старения при использовании порошковой проволоки ПП-НпОП9. Такие режимы обеспечивают высокий уровень теплостойкости металла наплавки рабочих поверхностей штампового инструмента.

Раздел 6. «Определение способов и эффективности улучшения структуры и свойств металла сварных соединений путем регулирования термического цикла и послесварочной термической обработки сталей типа 30ХГСА». В результате комплексного исследования установлено, что из всех параметров термического цикла дуговой обработки температура нагрева оказывает наибольшее влияние на улучшение структуры и свойств металла сварного соединения. Существенное снижение твердости, повышение ударной вязкости и стойкости против образования трещин в сварном соединении стали 30ХГСА достигается при параметрах дуговой сварки, обеспечивающих нагрев металла ЗТВ и шва до температуры отпуска и межкритического интервала. Эффективность дуговой обработки усиливается при увеличении ее кратности.

Раздел 7. «Исследование физико-химических закономерностей взаимодействия приконтактных

объемов металла при разных термомеханических условиях сварки давлением одно- и разнородных металлов».

Разработаны технологические процессы сварки давлением в вакууме композитных материалов на основе дисперсно-упрочненных сплавов алюминия 1013 и 1501 с 4 % углерода и сплава АМг5 с 23 % карбида кремния. Качественные сварные соединения могут быть получены благодаря интенсивной пластической деформации в стыке мягкой промежуточной прослойки из алюминия, при сварке композитных материалов, легированных магнием и марганцем путем укрепления промежуточной прослойки из алюминия за счет диффузии магния и марганца из матрицы. Прочность соединений соответствует прочности основного металла.

Исследованы процессы возгонки металлов в условиях автовакуума. Установлено, что в замкнутых герметичных объемах при нагревании происходит возгонка меди с образованием конденсата на поверхностях молибдена, хрома, ниобия и стали 12Х18Н10Т. Показано, что процессы возгонки металлов в зоне контакта целесообразно использовать в технологических процессах сварки как одно-, так и разнородных металлов.

Проведен сравнительный анализ особенностей формирования и легирования соединений из трубных сталей, выполненных при различных скоростях деформации и способах сварки (ударной сваркой в вакууме, контактной стыковой сваркой, сопротивлением и оплавлением). Показано, что существование пласта жидкого металла в стыке обуславливает при осадке развитие широкой зоны объемного взаимодействия, минимальное искривление сточной структуры и незначительное снижение плотности металла в зоне соединения.

Раздел 8. «Изучение влияния термических циклов сварки и внешней нагрузки на структурно-фазовые изменения и свойства стыковых сварных соединений закаливаемых сталей для повышения их трудоспособности в условиях эксплуатации». На всех структурных уровнях (от зеренного до дислокационного) изучены изменения структурного и фазового составов сварных соединений закаливаемых высокопрочных низкоуглеродистых сталей типа 17Х2М и высокоуглеродистых сталей типа 30Н14МДФ в зависимости от скорости охлаждения при сварке (от 2,5 до 20 °С/с), режимов сварки, состава наплавленного металла (феррито-перлитный, аустенито-ферритный, мартенсито-бейнитный) и последующего внешнего нагружения.

Выполнены аналитические оценки влияния структурных факторов на показатели прочности и вязкости в зоне термического влияния.

Построены прогнозные номограммы, отображающие возможный путь повышения механических свойств в зависимости от структурно-фазового состава металла сварных соединений.

Результаты исследований позволяют выбрать для стали 17Х2Г режимы сварки, обеспечивающие



высокий уровень служебных свойств и сопротивления хрупкому и замедленному разрушению при температуре минус 40 °С.

Для соединений ЗН4МДФ наиболее значительных показателей прочности и вязкости можно достичь при высоких скоростях охлаждения и использовании проволоки Св-08Х20Н9Г7Т и Св-10ХН2ГСМФТЮ.

Установлены критические уровни внутренних напряжений и иницирующие их структурные составляющие, при которых снижается порог склонности металла ЗТВ к образованию холодных трещин.

Раздел 9. «Изучение влияния и определение качественного и количественного содержания модификаторов на формирование литой структуры и химической микронеоднородности (ХМН) в алюминиевых сплавах, оптимальных для обеспечения необходимых свойств металла сварного шва». Проведенные исследования позволили определить закономерности образования ХМН распространения легирующих и модифицирующих элементов в структурных составляющих литого металла и металла сварных швов алюминиевых сплавов разных систем в зависимости от температуры начала их кристаллизации.

Установлено оптимальный, экономически оправданный, состав модифицирующей добавки (0,3 % Si и 0,2 % Zr), улучшающий прочностные характеристики сплавов. Результаты исследований позволяют рекомендовать технологам использовать при сварке проволоки с оптимальным составом легирующих и модифицирующих элементов для составов конкретной системы легирования с учетом значительного повышения погонной энергии сварки, способствующей увеличению ХМН в металле швов и ухудшению их прочностных свойств.

Раздел 10. «Разработка некоторых специальных методик анализа для обеспечения контроля химического состава в литках и металле сварных швов». Разработаны методики пламенно-фотометрического определения щелочных металлов лития, натрия и калия и атомно-абсорбционного выявления малых примесей меди, магния, марганца, никеля.

Показана возможность одновременного определения легирующих и примесных элементов в молибдене электронно-лучевого переплава методом эмиссионного спектрального анализа на металлических образцах.

Отработаны методические процедуры локального послыйного количественного эмиссионного спектрального анализа наплавов и металла сварных соединений сталей с использованием вакуумных спектрометров, а также воздушных квантометров, обо-

рудованных усовершенствованными источниками возбуждения света.

Разработаны методики определения особонизких концентраций кислорода, азота и водорода в сплавах на основе титана, циркония и молибдена способами восстановительной плавки на анализаторах фирмы «ЛЕСО», для чего изготовлены стандартные образцы предприятия.

Раздел 11. «Исследование распределения электрического потенциала вдоль столба дуги дуготрона с оксидным катодом». Разработано и изготовлено оборудование для исследования столба дуги нерасходуемыми электродами способом вращающихся зондов. Экспериментальные исследования позволили определить градиент потенциала столба дуги, уменьшающейся по мере отдаления от катода. В основной части дуги значение градиента обратно пропорционально току, что связано с увеличением диаметра токопроводной части столба дуги, согласно теории канального построения дуги.

Получены теоретические и экспериментальные данные, необходимые при создании оксидных катодов нового типа для энерго- и ресурсосберегающих технологий электродуговой обработки токопроводных материалов.

В ходе выполнения работы по теме получены следующие практические результаты. Изучена кинетика и обоснован механизм транспорта азота из газовой фазы через шлаки в металл. Разработаны новые аналитические методики для химического, спектрального анализов легирующих и примесных элементов, а также анализа газов в молибдене и его сплавах.

Разработаны основы повышения механических и эксплуатационных свойств сварных соединений и защитных покрытий путем оптимизации структурно-фазового и химического составов сварных швов, наплавов и покрытий при электродуговой сварке теплостойких сталей и низколегированных высокопрочных закаливающихся сталей, стойких против хрупкого разрушения; при электродуговой и электронно-лучевой сварке высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных скандием и цирконием; при наплавке дисперсионно-твердеющих и мартенситно-стареющих сталей; при диффузионной сварке алюминиевых композитов. Созданы технологические основы изготовления нового типа оксидных термохимических катодов для дуготронов и медно-алюминиевых высокоамперных контактных переходников.

По теме напечатано одна монография, 60 статей, докладов и тезисов докладов.



Тема 1.6.1.34.33 «Разработка системы расчетных алгоритмов и компьютерных программ для прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений и узлов современных ответственных конструкций, срок эксплуатации которых близок к проектному»

Руководитель акад. НАН Украины В. И. Махненко

Ответственные исполнители: канд. физ.-мат. наук Е. А. Великоиваненко,

канд. техн. наук О. В. Махненко, д-р техн. наук О. Г. Касаткин

В отделе № 34 «Математические методы исследования физико-химических процессов» по бюджетной тематике в период 2003–2006 гг. выполнено пять научно-технических работ.

В основу разработки положена концепция соответствия назначению, предусматривающая построение алгоритмов прогнозирования с использованием исходных данных, полученных при очередной технической диагностике состояния конструкции, относительно геометрических дефектов несплошности, утонения и т. п. соответствующих сварных соединений (узлов), а также относительно возможной деградации механических свойств материала, определяющих сопротивление деформированию и разрушению в характерных условиях работы конструкции, в том числе включая нерелаксированные остаточные напряжения.

В рамках этого подхода разработана система расчетных алгоритмов и компьютерных программ для решения типовых задач, выполнены конкретные исследования для ряда характерных случаев по запросам промышленности:

исследование остаточных напряжений при стыковой контактной сварке оплавлением стыков разнородных железнодорожных рельсов с позиций совершенствования технологии сварки рельсовых пе-

реходов из стали типа 110Г13Л с основными рельсами из стали типа Р65;

определение допустимых размеров непроплавов в угловых швах рамы ветроэнергетических установок мощностью 2500 кВт для немецкой фирмы «Nordex» при заданном спектре переменных нагрузок на базе $2 \cdot 10^8$ циклов. (Работу выполняли по заказу «Азовмаш»);

исследование вероятности образования ламелярных трещин при варке обечаек люков из стали 09Г2С в корпус резервуара РВС-75000 м³ (г. Броды). (Работу выполняли по заказу SNGS «Engineering»);

исследование причин разрушения стоек траверсы разливочного стенда МНЛЗ №2 на Нижне-Тавгильском металлургическом комбинате в 2004 г. (Работу выполняли по заказу ОМЗ «Уралмаш»).

Результаты этой работы указали на большой интерес к использованию средств математического моделирования и современных информационных технологий для прогнозирования качества (прочностных свойств) сварных соединений различных конструкционных материалов, поэтому следующая научно-исследовательская работа была направлена на повышение эффективности создания новых технологических решений.

Тема 1.6.1.34.14 «Использование средств математического моделирования и современных информационных технологий для повышения прочности, надежности и долговечности сварных соединений различных конструкционных материалов»

Руководитель акад. НАН Украины В. И. Махненко

Ответственные исполнители: канд. физ.-мат. наук Е. А. Великоиваненко,

д-р техн. наук В. Ф. Демченко

Работа состоит из трех разделов.

Первый связан с созданием более совершенных математических моделей для исследования сложных термомеханических процессов при сварочном нагреве, в частности учитывающих анизотропию свойств материала при сварочном нагреве элементов из монокристаллических материалов. Например, при ремонте сваркой лопаток газовых турбин из монокристалла никелевого сплава ЖС-32 показано, что риск образования горячих трещин в темпера-

турном интервале 800...1050 °С (ТИХ-II) значительно зависит от ориентации оси шва по отношению к основным кристаллографическим осям монокристалла.

Другой пример использования такого нового математического моделирования термомеханических процессов при сварке закаливающихся сталей позволил установить причину появления продольных «подваликовых» холодных трещин. Показано, что неодновременность мартенситных превращений



по длине сварного шва является причиной появления довольно существенных временных пиков поперечных напряжений либо напряжений по толщине в зоне сварки, что обуславливает возникновение продольных подваликовых трещин. Указаны пути предупреждения их образования.

Второй раздел отчета посвящен развитию методов прогнозирования химического состава–микроструктуры–механических свойств сварных соединений современных конструкционных сталей с целью резкого сокращения объема экспериментальных исследований на образцах (макетах) соединений при поиске рациональных решений по условиям, режимам сварки, выбору присадочных материалов для дуговой сварки.

Для этих целей создана компьютерная система Arc Weld Sys, признанная на ряде предприятий, в частности на ОАО «Уралмашзавод» в 2005 г. при обосновании применения уменьшенных углов разделки кромок стыковых, тавровых и угловых соединений при дуговой сварке тонкой проволокой

в смеси газов (по сравнению с рекомендациями ГОСТ 14771–76).

Такое обоснование потребовало рассмотрения целого ряда вариантов сочетания основного, присадочных материалов и режимов сварки с позиции влияния углов разделки кромок на микроструктуру, свойства, угловые деформации и поперечную усадку. Использование системы Arc Weld Sys позволило существенно сократить объем экспериментальных исследований, роль которых, по сути, свелась к валидации расчетных данных.

Третий раздел содержит результаты, связанные с разработкой современных информационных систем, способствующих повышению прочности и надежности сварных соединений. Отличительной особенностью таких систем является то, что для получения необходимой информации здесь, наряду с традиционным путем использования соответствующих баз данных, широко применяют методы математического моделирования.

Тема 1.6.1.34.32 «Исследование методом математического моделирования физико-металлургических процессов в сварочной ванне применительно к технологии дуговой сварки и наплавки современных материалов. Создание системы информационного обеспечения для проектирования»

Руководитель акад. НАН Украины В. И. Махненко

Ответственные исполнители: д-р техн. наук В. Ф. Демченко,
канд. техн. наук А. Б. Лесной, инж. С. С. Козлитина

Разработана математическая модель формирования сварного шва относительно общего случая неполного проплавления при произвольном расположении шва в пространстве, учитывающая деформацию свободной поверхности сварочной ванны, трехмерное поле температур в свариваемом изделии, испарение металла с поверхности ванны, электромагнитные процессы в сварочной ванне, а также наличие не-

равновесной двухфазной зоны при кристаллизации сплавов.

Модель эффективно использовали при исследовании условий формирования швов при сварке ТИГ и АТИГ, обосновании механизма образования слоистой кристаллизации сварочной ванны, а также повышенной глубины проплавления при сварке АТИГ.

Проект 34.38 «Разработка унифицированных методов и процедуры оценки состояния и риска нарушения целостности сварных конструкций объектов повышенной опасности на территории Украины с учетом специфики характерных отраслей (атомной и тепловой энергетики, трубопроводного транспорта и т.д.)»

Руководитель акад. НАН Украины В. И. Махненко

Ответственные исполнители: канд. физ.-мат. наук Е. А. Великоиваненко,
кандидаты технических наук И. Ю. Романова, В. М. Шекера, Г. Ю. Сапрыкина

Работа состоит из четырех разделов.

В первом разделе выполнено обобщение современных подходов относительно процедуры определения ресурса, соответствующих расчетных кодов и мониторинга нагруженности.

Во втором разделе рассмотрены вопросы схематизации обнаруженных дефектов несплошности, расчетов коэффициентов интенсивности напряжений и σ_{ref} , ответственных за хрупко-вязкое разрушение в зоне трещинообразных дефектов.



В *третьем разделе* изложены вопросы определения степени деградации материала сварных соединений и узлов при технической диагностике.

Заключительный *четвертый раздел* связан с решением конкретных задач по прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений (узлов) характерных технических объектов — оценкой остаточного ресурса сварных соединений

трубопроводов первого контура АЭС типа РБМК-1000; обоснованием уровня допускаемого давления воздуха при контроле герметичности теплообменных труб и сварных соединений, их приварки к коллектору парогенераторов ПГВ-1000 М; продлением срока безопасной эксплуатации участков магистральных трубопроводов путем ремонта сваркой дефектов на действующем трубопроводе и т. п.

Проект 34.39 «Расчетно-экспериментальные исследования остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов и оборудования АЭС, обоснование их безопасной эксплуатации после ремонта. Оценка остаточных напряжений в сварных соединениях корпуса реактора и остаточного ресурса корпуса на разных стадиях эксплуатации»

Руководитель канд. физ.-мат. наук Е. А. Великоиваненко

Ответственные исполнители: акад. НАН Украины В. И. Махненко,

кандидаты техн. наук В. М. Шекера, О. В. Махненко

Работа состоит из трех разделов, в которых рассмотрены следующие основные вопросы:

существующие методы (экспериментальные и расчетные) определения остаточных напряжений в зоне сварных соединений трубопроводов и оборудования относительно объектов атомной энергетики;

методы оценки влияния остаточных напряжений на несущую способность и ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений трубопроводов и оборудования относительно объектов атомной энергетики;

рекомендации относительно расчетно-экспериментальной методики определения остаточных напряжений;

формулирование условий рациональных режимов локальной термообработки после ремонта сваркой трубопроводов и оборудования;

разработка расчетных алгоритмов для выбора энергетических и геометрических параметров локальных нагревателей;

численные исследования, связанные с выбором рациональных режимов локальной термообработки трубопроводов из стали 10ГН2МФА после ремонта с помощью сварки;

исследование остаточных напряжений в зоне сварных соединений № 3 и 4 корпусов реакторов ВВЭР-1000 при возможной вариации режимов печного высокого отпуска;

исследование влияния вариации режимов высокого отпуска корпусов ВВЭР-1000 на сопротивление радиационному охрупчиванию металла сварных швов при аварийных ситуациях, связанных с «термошоком».

Тема 58/32 «Разработка технологии производства крупногабаритных слитков многокомпонентных сплавов в электронно-лучевых установках»

Научный руководитель д-р техн. наук Н. П. Тригуб

Ответственные исполнители: д-р техн. наук Г. В. Жук, канд. техн. наук В. А. Березос,

А. И. Тищенко, Ю. Т. Ищук, А. Ю. Северин

Среди новых отраслей промышленности, получивших широкое развитие в современном машиностроении, производство титановых сплавов занимает особое место. В настоящее время слитки титановых сплавов получают способами ВДП, ЭЛП, ПДП,

ИПСК, ЭШП. Наиболее распространена технология ВДП. ЭЛП с промежуточной емкостью является самой перспективной с точки зрения рафинирования металла и удаления неметаллических включений высокой и низкой плотности.



Анализ структуры себестоимости и издержек производства на единицу продукции позволяет рекомендовать следующие пути снижения себестоимости титановых слитков: удешевление основных сырьевых материалов в результате использования недробленых губчатых блоков и губки низших сортов; сокращение отходов при механической обработке за счет увеличения размеров слитка (как диаметра, так и длины); получение товарных слитков за один переплав.

Объектом исследования были тепловые процессы при формировании крупногабаритного слитка, процессы рафинирования и удаления включений из титановых сплавов способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ), механические свойства, структура слитков большого диаметра и полуфабрикатов титановых сплавов.

Установлено, что процесс ЭЛПЕ является эффективным способом получения бездефектных слитков титана и его сплавов с высокой долей использования отходов и несортированной губки. Механизм удаления дефектов при ЭЛПЕ заключается в растворении включений с низкой плотностью LDI и осаждении включений с высокой плотностью HDI.

Установлено, что для слитков диаметром 600...1200 мм при рабочих значениях производительности плавки 113...916 кг/ч глубина жидкой ванны не превышает 1/2 диаметра слитка, что зна-

чительно меньше, чем при традиционных способах переплава, и с точки зрения теории кристаллизации является удовлетворительным результатом.

Разработан способ плавления губчатого титана в виде блока крицы электронным лучом, позволяющий уменьшить потери титана на 10...15 %, по сравнению с плавкой дробленой губки фракцией 12...70 мм.

По разработанной технологии выплавки крупногабаритных слитков титана на промышленной многоцелевой электронно-лучевой установке УЭ5810 получены за один переплав слитки диаметром 830 мм массой до 10 т. Распределение элементов в выплавленных слитках соответствует стандартам (отсутствуют несплошности, неметаллические включения размером более 1 мм, а также плотные скопления более мелких включений).

В результате проведенных исследований разработана технология получения крупногабаритных слитков в электронно-лучевых установках с промежуточной емкостью, оборудование для ее реализации, установлены оптимальные технологические параметры изготовления слитков большого диаметра из сплавов на основе титана из первичной шихты в виде недробленых блоков губчатого титана.

Область их применения — специальная металлургия, в частности производство крупногабаритных слитков из титановых сплавов в электронно-лучевых установках.

Тема 58/4 «Разработка и исследование многокомпонентных титановых сплавов из первичной шихты и технологии их получения способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью»

Научный руководитель д-р техн. наук Н. П. Тригуб

Ответственные исполнители: д-р техн. наук Г. В. Жук, канд. техн. наук В. А. Березос,

А. И. Тищенко, Ю. Т. Ищук, А. Ю. Северин

Высокая удельная прочность и коррозионная стойкость титана обуславливают все более широкое применение изделий из титановых сплавов в авиа-, ракетно- и судостроении, химическом и энергетическом машиностроении, а также в производстве медицинского оборудования и спортивного инвентаря.

При выплавке слитков титана в последние годы все больше применяют технологию электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Среди современных способов специальной металлургии электронно-лучевая плавка является наиболее эффективным с точки зрения качества слитков способом вакуумной металлургии, позволяющим практически полностью обеспечивать удаление включений высокой и низкой плотности. Однако при выплавке слитков титановых сплавов способом ЭЛПЕ возникает проблема получения металла заданного химического состава. Это вызвано тем, что

при ЭЛПЕ легирующие элементы алюминий, хром, марганец и др. с упругостью пара, превышающей таковую титана, испаряются интенсивнее, чем при традиционном ВДП. И в первую очередь это касается алюминия, поскольку он является легирующим элементом практически всех титановых сплавов.

Объектом исследования были тепловые процессы при формировании слитка многокомпонентного титанового сплава, процессы рафинирования и удаления включений из многокомпонентных титановых сплавов, разработка технологии ЭЛПЕ слитков многокомпонентных титановых сплавов из первичной шихты.

Разработана математическая модель процессов испарения элементов в вакууме, позволяющая прогнозировать химический состав выплавляемых слитков титановых сплавов, которая может быть исполь-



зована для производства слитков с гарантированным химическим составом.

Создана термическая математическая модель тепловых процессов, происходящих в кристаллизаторе во время формирования слитков-слябов способом ЭЛПЕ, позволяющая вычислять распределение температур в слитке ЭЛПЕ в любой момент, а следовательно, форму и глубину металлической ванны. Установлена зависимость глубины жидкой ванны и зоны двухфазного состояния от производительности процесса плавки.

Определена зависимость структуры слитков от скорости охлаждения расплава $v_{\text{охл}}$. Установлено, что для слитков-слябов Ti-6Al-4V $v_{\text{охл}} = 1 \text{ K/c}$ является критической при переходе от столбчатой к равноосной структуре слитков.

Создана электронно-лучевая установка УЭ5812 промышленного типа. В конструкции УЭ5812 штокковые механизмы подачи сырья на плавку и для вытягивания слитка замены цепными, что позволи-

ло увеличить массу выплавляемых слитков в два раза при сохранении габаритов установки.

Разработана технология электронно-лучевой выплавки многокомпонентных сплавов титана BT6, BT22, T110 из чистых компонентов, создано специализированное оборудование для реализации указанной технологии, что позволило организовать в Украине конкурентоспособное производство высококачественных слитков титановых сплавов как круглого, так и прямоугольного сечений.

Комплексные исследовательские работы по изготовлению полуфабрикатов в виде прутков, поковок, штамповок и труб из слитков титановых сплавов показали, что свойства полуфабрикатов, изготовленных из слитков, выплавленных по разработанной технологии ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым авиационной промышленностью к качеству титановых сплавов. Область применения — производство слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевых установках из первичной шихты.

Тема 1.6.1.73.10 «Исследование физико-металлургических процессов формирования нанокристаллической структуры покрытий, разработка способов получения и составов покрытий с нанокристаллической фазой»

Научный руководитель д-р техн. наук Ю. С. Борисов

Ответственные исполнители: д-р техн. наук Е. А. Астахов,

канд. техн. наук М. В. Кузнецов, С. Г. Войнарович

Одним из путей получения на поверхности слоев из материалов, характеризующихся повышенными твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, является получение покрытий с нанокристаллической структурой.

Цель настоящей работы заключается в разработке составов и технологий получения покрытий с нанокристаллической структурой способами ГТН и магнетронного распыления.

Анализ современного состояния технологий ГТН наноструктурных покрытий показал, что основные принципы формирования нанокристаллических фаз в этих условиях заключаются или в сохранении наноразмерной фазы в напыляемом нанокompозитном порошке (путем управления степенью нагрева его частиц), или в формировании наноструктурных фаз при затвердевании расплава частицы в результате торможения роста зерна (композиции из несмешивающихся расплавов), или в формировании нанокристаллической структуры при термообработке напыленных покрытий с метастабильными фазами (аморфные, пересыщенные твердые растворы и

т. п.). В связи с этим для выполнения работы выбраны следующие способы получения покрытий с нанокристаллической фазой: термообработка покрытий, содержащих аморфную фазу; напыление нанокompозитных порошков, полученных путем механического легирования; напыление покрытий с использованием суспензий наноструктурных порошков, а также магнетронное напыление покрытий.

Проведен расчетно-теоретический анализ особенностей процесса ГТН нанокompозитных порошков, разработана методика определения области параметров ГТН нанокompозитных порошков, где исключается возможность плавления наноструктурного компонента.

С целью обеспечения технологии ГТН покрытий порошками, содержащими нанокристаллическую фазу, разработаны способы получения композиционных порошков системы Fe-Cr-TiCN с включениями ультрадисперсного TiCN размером примерно 10... 20 нм путем спекания-дробления и механического легирования. Показано, что в процессе механического легирования происходит измельчение



как FeCr-матрицы, так и TiCN, размеры области когерентного рассеивания достигают соответственно 32 и 7 нм.

В качестве объекта исследования при изучении процесса формирования нанокристаллической фазы путем кристаллизации аморфной фазы выбраны детонационные и плазменные покрытия, полученные при напылении порошка аморфизирующегося сплава Fe80B20. Термообработку напыленных покрытий проводили при температурах 200... 650 °С в течение 30 мин.

Изучение структуры покрытий методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что в результате их термической обработки при 330... 400 °С в течение 0,5 ч за счет распада аморфной фазы в их структуре происходит образование наноразмерных (10... 20 нм) кристаллических включений боридов железа.

Данные микроидентирования покрытий показали, что экстремальные значения микротвердости, модуля Юнга, коэффициента пластичности и предела текучести, зафиксированные после термообработки, соответствуют температуре, при которой вследствие распада аморфной фазы произошло образование в структуре нанодисперсных включений. Аналогично происходит и изменение абразивной износостойкости покрытий. Максимальный уровень износостойкости превышает таковой исходного аморфизированного детонационного покрытия в 2,5... 3,0 раза и достигается для нанокompозитной структуры с твердостью 11,6 ГПа, сформированной в условиях термообработки при 330 °С. Повышение температуры термообработки способствует дальнейшему распаду аморфной фазы и коагуляции зеренной структуры, в результате чего износостойкость уменьшается.

Один из современных способов ГТН покрытий с нанокристаллической структурой заключается в использовании для напыления суспензий порошков нанокристаллических материалов. Исследованы различные системы плазменного напыления покрытий из суспензий.

Освоены методики приготовления и способы повышения стойкости суспензий наноразмерных материалов для ГТН. Получены спиртовые и водные суспензии, содержащие ультрадисперсный порошок карбонитрида титана и нанодисперсный гидроксидатит.

Показано преимущество использования в качестве дисперсионной среды этанола. Проведены эксперименты по плазменному напылению покрытий из данных суспензий с формированием покрытий толщиной 10... 100 мкм.

Исследован процесс магнетронного напыления покрытия из церия, сплавов Zr-Co и Zr-Ti-Ni на поверхность образцов из нержавеющей стали толщиной 0,5 и 0,18 мм и проволоку диаметром 0,3 и 0,5 мм.

Установлено, что покрытия Zr-Ti-Ni имеют ячеисто-столбчатую структуру, соответствующую первой зоне модели Мовчана-Демчишина с размером ячеек около 100 нм. Лучшее адгезионно-прочное покрытие получено при плотности тока ионной очистки 3 мА/см², удельной мощности разряда 20,7 Вт/см², скорости напыления 0,36 мкм/мин, напряжении смещения 100 В. Толщина покрытий составляет 2,5... 15,0 мкм.

Исследования механических свойств покрытия Zr-Ti-Ni толщиной 2... 5 мкм методом микроидентирования показали возможность изменения микротвердости, модуля Юнга и коэффициента пластичности покрытия путем регулирования скорости напыления и напряжения смещения.

Биомедицинские испытания «in-vivo» образцов из стали X18H10T с магнетронным нанокристаллическим покрытием Zr Ti Ni показали, что они по показателям биосовместимости превосходят нержавеющую сталь X18H9 в 4 и более раз.

В результате исследований установлены условия формирования покрытий с нанокристаллическими фазами при газотермическом и магнетронном напылении, разработаны практические подходы к созданию технологий нанесения покрытий с нанокристаллическими фазами, предназначенных для повышения износостойкости деталей и узлов, работающих в условиях авиационной, металлургической и нефтегазовой промышленности, автомобиле- и судостроения, энергетики и других отраслей, а также повышения биосовместимости и надежности эндопротезов, стентов и других изделий медицинского назначения.

Натурные испытания партий деталей с газотермическими покрытиями из аморфизирующегося сплава Fe-B, структура которых в результате термообработки содержит нанокристаллическую фазу, показали повышение их износостойкости в 2,0... 2,4 раза.