



## ОТДЕЛУ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ — 50

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Бурное развитие машиностроения, строительства и других отраслей народного хозяйства СССР в послевоенные годы потребовало создания и исследования новых материалов для сварки конструкционных сталей различных классов. Необходимо было также создать новые промышленные производства покрытых электродов общего и специального назначения с улучшенными санитарно-гигиеническими свойствами.

Б. Е. Патон принял решение организовать на новом уровне исследования металлургических и электрофизических проблем дуговой сварки, разработку низкотоксичных электродов и технологии их промышленного производства. Для решения этих задач в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР в 1958 г. была организована новая лаборатория, руководство которой было поручено автору этой статьи.

В 1960-е годы в лаборатории был выполнен ряд исследований. Создан оригинальный метод скоростной рентгеновской киносъемки быстротекающих процессов, с помощью которого впервые получены достоверные данные о процессах плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке покрытыми электродами, под водой и под флюсом. Изучены закономерности кинетики плавления и переноса электродного металла, распределения температуры в каплях электродного металла, процессы теплообмена между дугой и расплавленным металлом на торце электрода, процессы абсорбции газов расплавленным металлом в условиях существования дугового разряда и закономерности распределения водорода и азота в сварочной ванне при непрерывном движении границы раздела жидкой фазы и кристаллизующегося металла.

Установлены закономерности влияния режимов сварки, плотности и полярности тока на температуру капель, времени взаимодействия капель с окружающей средой, влияния типа покрытия на процесс плавления и переноса металла при сварке покрытыми электродами. Определена вза-

имосвязь между плотностью и полярностью тока и температурой капель электродного металла, градиентом напряжения в столбе дуги и переносом электродного металла.

Установление закономерностей процессов абсорбции и десорбции газов позволило с новых позиций подойти к трактовке механизма образования пористости сварных швов (И. К. Походня, А. М. Суптель, И. Р. Явдошин, Г. Г. Корицкий, А. П. Пальцевич, В. Н. Горпенюк, Б. А. Костенко).

Результаты этих исследований изложены в монографии И. К. Походни «Газы в сварных швах», изданной в СССР в 1972 г., а позже переизданной в ЧССР и Китае. Они стали теоретической базой для создания многих марок прогрессивных низкотоксичных и высокопроизводительных сварочных электродов, характеризующихся благоприятными сварочно-технологическими свойствами, обеспечивающими резкое снижение выделения вредных веществ и хорошие механические свойства металла швов. Композиции покрытий электродов оригинальны, они защищены авторскими свидетельствами СССР и зарубежными патентами.

Для массового высокомеханизированного производства электродов необходимо было осуществить проектирование и строительство новых мощных цехов. На выполнение этой народнохозяйственной задачи отводились короткие сроки.

В 1962 г. в ИЭС им. Е. О. Патона было создано опытное производство сварочных материалов, деятельность которого позволила резко сократить время от возникновения научной идеи до ее широкого внедрения в практику (В. Л. Борисюк, Л. Ф. Белозеров).

В июне 1962 г. электродная лаборатория была преобразована в отдел исследований физико-химических процессов в сварочной дуге, деятельность которого высоко оценена как в СССР, так и за рубежом.

В ИЭС им. Е. О. Патона А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин, А. М. Бейниш провели исследования по совершенствованию технологий изготовления электродов. Эта работа была выполнена в сотрудничестве с ГИПРОМЕТИЗом, «Промсталь-



конструкцией», Институтами гигиены труда и профзаболеваний Москвы и Киева, Институтом металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, а также НИИМЕТИЗом, ЦНИИТМАШем, «Прометеем», Московскими электродным и опытным сварочными заводами, Магнитогорским метизно-металлургическим заводом, Днепропетровскими заводами «Красный Профинтерн», металлоизделий (впоследствии «Днепромметиз»), Одесским, Череповецким и Орловским сталепрокатными заводами, Артемовским заводом «Победа труда», Сулинским металлургическим заводом, Гомельским заводом пусковых двигателей и многими другими. Благодаря объединению усилий ученых-сварщиков и металлургов, проектировщиков и производственников удалось в короткие сроки решить важную народнохозяйственную задачу — обеспечить страну первоклассными низкотоксичными электродами.

В 1971 г. работа «Коренное улучшение условий труда и повышение производительности при сварке покрытыми электродами и их производстве» удостоена Государственной премии СССР. Среди лауреатов — сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона И. К. Походня (руководитель), А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин, А. М. Бейниш.

Б. Е. Патон предложил использовать для механизации сварки на монтаже порошковую проволоку. В 1959 г. был разработан промышленный образец порошковой проволоки, не требующей дополнительной защиты расплавленного металла (И. К. Походня, А. М. Суптель).

И. К. Походня совместно с А. М. Суптелем, В. Н. Шлепаковым изучили особенности тепло- и массообмена, твердофазного взаимодействия составляющих сердечника порошковой проволоки при нагреве, разработали методы регулирования скоростей плавления оболочки и сердечника

проволоки, предложили методы предупреждения пористости швов. Была изучена кинетика плавления и переноса электродного металла, установлены особенности окислительно-восстановительных реакций взаимодействия между металлом, шлаком и газовой фазой, предложены методы управления этими процессами, обеспечивающие удаление продуктов реакций из сварочной ванны, оптимальное легирование металлической матрицы, высокую сопротивляемость сварных соединений зарождению и распространению трещин. В результате проведенных исследований создан ряд самозащитных порошковых проволок различного назначения, характеризующихся оригинальными композициями и конструкциями оболочки.

Разработка самозащитных порошковых проволок явилась новым шагом в технике и технологии сварочного производства. Их применение позволило решить проблему механизации сварочных процессов на монтаже, в открытых цехах, в полевых условиях, на стапелях. Морские регистры Lloyd Register of Shipping (Великобритания), Bureau Veritas (Франция), American Bureau of Shipping (США), Germanischer Lloyd (ФРГ), Речной и Морской регистры СССР разрешили применение этих проволок при изготовлении ответственных корпусных конструкций морских и речных судов, что повысило производительность сварки. Порошковые проволоки двухслойной конструкции удостоены Золотой медали на выставке «Сварка-75» в Брно (ЧССР).

В начале 1950-х годов И. К. Походня предложил использовать наплавку порошковой проволокой в углекислом газе. И. К. Походня совместно с В. Н. Шлепаковым, С. А. Супруном, В. Н. Головки, Ю. А. Гаврилюком, Л. Н. Орловым, Г. А. Шевченко, А. С. Котельчуком, В. Н. Упырем, А. А. Голякевичем и В. Н. Игнатуком создали

гамму газозащитных порошковых проволок общего и специального назначения, которые широко применяются в промышленности. Это направление, получившее большое развитие в мировой сварочной науке и технике, является одним из ведущих направлений повышения производительности труда и улучшения качества сварных соединений.

Создание способов сварки порошковой проволокой потребовало разработки специальной сварочной аппаратуры, источников питания, а также технологии сварки. Необходимо было также разработать высокопроизводительные технологию и оборудование для изготовления порошковой проволоки, организовать серийное производство этого оборудования, спроектировать и организовать современное высокомеханизированное про-



Разработчики низкотоксичных электродов массового применения (слева направо: И. К. Походня, А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин)



изводство порошковой проволоки. А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер, П. А. Косенко, П. И. Рак, И. П. Каплиенко исследовали технологические особенности изготовления порошковой проволоки: совместную пластическую деформацию сплошных и сыпучих тел, силовые условия их обработки, процессы профилирования композитных материалов сложных сечений, непрерывное дозирование многокомпонентных порошкообразных смесей. Эти работы были положены в основу создания современной промышленной технологии изготовления порошковых проволок, разработки конструкции оригинальных высокопроизводительных агрегатов для одновременного профилирования ленты и дозирования порошкообразной шихты. Приоритет наших ученых в этой области защищен авторскими свидетельствами СССР, Болгарии и ЧССР, патентами США, ФРГ, Великобритании, Франции, Италии, Австрии, Швейцарии, ГДР, ВНР и других стран. ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и Алма-Атинским заводом тяжелого машиностроения создано высокопроизводительное оборудование для изготовления порошковых проволок различной конструкции. Организовано серийное производство этого оборудования.

Спроектированы и построены высокомеханизированные цеха по производству порошковой проволоки в Украине и России. Отечественные технологические линии, оборудование, ноу-хау поставлены фирмам США, ФРГ, Франции, Японии, ЧССР, ВНР, НРБ, Аргентины, Китая.

Авторскому коллективу в составе И. К. Походни (руководитель), И. И. Фрумина, А. М. Суптеля, В. Н. Шлепакова, В. Ф. Альтера и сотрудников ряда других организаций в 1978 г. была присуждена Государственная премия СССР «За создание, организацию массового производства и внедрение новых материалов (порошковых проволок) для механизированной сварки, обеспечивающих повышение производительности труда и качества сварных конструкций».

Результаты исследований обобщены в монографиях «Сварка порошковой проволокой» и «Производство порошковой проволоки». Первая из них издана также в ЧССР.

В 1965 г. под руководством Б. Е. Патона начались работы по созданию способов, оборудования для сварки в космических условиях. Сотрудники отдела А. Е. Марченко, Ю. Д. Морозов, В. И. Пономарев принимали активное участие в выполнении комплексных исследований поведения жидкого металла при дуговой сварке в условиях изменяющейся гравитации и особенностей дугового разряда между плавящимися электродами в вакууме. Был разработан оригинальный спо-



Лауреаты Государственной премии СССР — создатели порошковых проволок (слева направо: И. И. Фрумин, А. М. Суптель, И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер)

соб дуговой сварки в вакууме и невесомости. Испытание этого способа вошло в программу первого в мире технологического эксперимента — сварки в космосе, осуществленной в 1969 г. летчиком-космонавтом В. Н. Кубасовым на космическом корабле «Союз-6». Результаты исследований опубликованы в сборниках «Космическое материаловедение и технологии» (1977) и «Космос: технологии, материаловедение, конструкции» (2000).

Исследования основных закономерностей формирования металла шва, легирования, кристаллизации сварочной ванны в условиях искусственного охлаждения поверхности шва и изменяющегося пространственного положения ванны, выполненные В. Н. Шлепаковым, В. Н. Игнатуком, Ю. А. Гаврилюком, С. П. Гиюком, С. Ю. Юзвенко, позволили создать прогрессивную технологию, оборудование для дуговой сварки неповоротных стыков труб с использованием самозащитной порошковой проволоки. Принудительное формирование сварного шва дало возможность повысить производительность работ по сравнению с ручной дуговой сваркой в 3–6 раз. Были разработаны системы легирования металла шва, созданы новые порошковые проволоки, определены оптимальные параметры процесса сварки, обеспечивающие получение высоких механических свойств сварных соединений труб, используемых для сооружения магистральных трубопроводов, а также внедрена промышленная технология и освоено производство сварочной порошковой проволоки для трубопроводного строительства.

ИЭС им. Е. О. Патона, ОКТБ ИЭС, Каховский завод электросварочного оборудования создали специализированный комплекс оборудования «Стык» для сварки неповоротных стыков труб диаметром 1220...1420 мм. Технология автоматической сварки трубопроводов с применением комплексов «Стык» широко использовалась при строительстве ряда магистральных газопроводов. Способ сварки, оборудование, присадочные материалы защищены авторскими свидетельствами СССР



и патентами США, Канады, ФРГ, Франции, Японии, Великобритании и других стран.

В 1983 г. за работу «Комплекс исследований, проектно-конструкторских и технологических работ по созданию и внедрению прогрессивной технологии дуговой сварки и оборудования (комплекс «Стык») для технического перевооружения сварочного производства при сооружении магистральных трубопроводов» присуждена Премия Совета Министров СССР. В коллективе авторов — сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона И. К. Походня (руководитель), В. Е. Патон, В. Я. Дубовецкий, В. Н. Шлепаков, А. Н. Кутовой, В. Н. Головки, В. А. Титаренко, П. А. Косенко, В. А. Котов, В. К. Сирик. В 1985 г. эта работа удостоена Золотой медали на Лейпцигской ярмарке.

В 1978 г. в состав ИЭС им. Е. О. Патона вошел сварочно-электродный завод Министерства черной металлургии УССР. За короткий срок завод был реконструирован, оснащен новым современным оборудованием. На нем было организовано новое производство электродов, порошковых проволок, сварочных флюсов, наплавочных материалов, улучшилось качество продукции. Деятельность опытного завода сварочных материалов, возглавляемого более 33 лет П. А. Косенко, способствовала продвижению на рынок новых разработок института. Коллектив завода стабильно работает, совершенствует производство, активно занимается улучшением качества продукции, поддерживает постоянные творческие связи с сотрудниками отдела. Продукция завода заслужила всеобщее признание инженеров-производственников, сварщиков.

Опытное производство сварочных материалов института реорганизовано в Научно-инженерный центр материалов для сварки и наплавки. Руководит им сотрудник отдела А. С. Бибикив. Центр составляет опытные партии сварочных материалов промышленным предприятиям и стройкам Украины и стран СНГ, что позволяет проводить маркетинг новых разработок института и организовывать их производство в промышленных масштабах. Большую помощь в этой работе оказывает ассоциация «Электрод» (П. В. Игнатченко).

Дальнейшее развитие получили работы по созданию перспективных сварочных материалов — агломерированных флюсов для автоматической сварки. Д. М. Кушнерев, В. В. Головки и С. Д. Устинов исследовали металлургические особенности сварки под керамическими флюсами и пути снижения содержания вредных примесей в сварных швах, выявили эффективность модифицирования и микролегирования наплавленного металла с помощью этих флюсов. Эти исследования дали возможность создать новые флюсы алюминатно-рутилового, алюминатно-основного типов, характеризующиеся хорошими технологическими

свойствами и обеспечивающие высокие механические характеристики металла швов. Они одобрены Морским регистром СССР для использования при изготовлении ответственных судовых конструкций.

Работы последнего десятилетия обобщены в докторской диссертации В. В. Головки «Взаимодействие металла со шлаком при сварке под агломерированными флюсами низколегированных сталей», успешно защищенной в 2006 г.

В 1970-х годах в отделе было предложено использовать порошковые проволоки для внепечной обработки металлических расплавов. Созданы новые типы металлок, содержащие высокоактивные элементы для микролегирования, модифицирования и десульфурации сталей и чугунов. В. Ф. Альтером, П. А. Косенко, П. И. Раком и В. А. Савенко разработаны технология, оборудование для изготовления порошковых проволок большого диаметра. Эти работы получили дальнейшее развитие в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича АН УССР, Донецком НИИ черной металлургии, на заводе «Универсальное оборудование» и других предприятиях. В настоящее время метод инжекционной металлургии широко применяется на металлургических заводах Украины и России. С его помощью обработаны десятки миллионов тонн стальных расплавов.

За разработку теоретических основ, широкое внедрение способа повышения свойств конструкционных сталей микролегированием порошковыми проволоками с высокоактивными элементами авторский коллектив в составе И. К. Походни, Л. А. Позняка, А. И. Троцана и других ученых и производственников в 1999 г. удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники.

Для работ отдела характерно использование современных физических методов исследований, а также математического моделирования. При исследовании физико-химических, металлургических и электрофизических процессов дуговой сварки в отделе широко применяются рентгеновские флуоресцентный и дифракционный анализы, растровая электронная микроскопия, локальный рентгеноспектральный анализ, масс-спектрометрия вторичных ионов, газовая хроматография, скоростная рентгеновская и оптическая киносъемка, многоканальный анализ электрических характеристик дугового разряда и сварочных цепей. С помощью методов рентгеноспектрального анализа, растровой электронной микроскопии, масс-спектрометрии вторичных ионов исследованы особенности механизма образования прочного сцепления шлака с металлом при сварке и предложены пути улучшения отделимости шлаковой корки (И. К. Походня, В. И. Карманов, В. Г. Устинов, В. Г. Войткевич).



Получены новые данные о распределении элементов в сварном соединении, составе неметаллических включений, ликвационных явлениях в сварных швах.

А. Е. Марченко, Н. В. Скорина и М. Ф. Гнатенко провели реологические исследования многокомпонентных систем электродных покрытий. Были предложены пути интенсификации изготовления, опрессовки обмазочных масс, повышения надежности технологии производства электродов, разработаны новые приборы для контроля обмазочных масс.



Ознакомление управляющего директора DVS Д. фон Хофе с работами отдела (1992 г.)

Большое внимание уделяется повышению качества сварочных материалов. Создаются автоматические аналитические системы для элементного анализа шихт электродов, порошковых проволок, агломерированных флюсов (В. И. Карманов, В. Г. Войткевич, В. В. Загородний, С. С. Пономарев, С. И. Селиверстенко).

Предложены новые методы анализа диффузионного водорода в сварных швах, которые позволили существенно повысить точность и экспрессность анализа. Они стандартизованы в СССР, включены в национальные стандарты США и Японии (А. П. Пальцевич).

В. Г. Устиновым разработана методика количественного определения содержания азота в системах железо-азот, железо-азот-титан, железо-азот-алюминий, позволяющая определять азот, который находится в твердом растворе и нитридных включениях. Предложена оригинальная методика электронно-микроскопических исследований неэлектропроводных материалов. Создана масс-спектрометрическая установка с двойной фокусировкой для изучения жидких металлов, установка для масс-спектральных исследований термоионной эмиссии сварочных материалов.

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и Институте ядерных исследований АН УССР созданы информационно-измерительные системы, предназначенные для статистического анализа электрических и временных параметров процессов дуговой сварки, исследования, контроля технологических свойств сварочных материалов и источников питания (И. К. Походня, Р. Г. Офенгенден).

В. Н. Горпенюком, С. С. Миличенко, В. Е. Пономаревым, Л. В. Стародубцевым, В. И. Швачко, И. Р. Явдоциным, В. Н. Шлепаковым разработаны высокопроизводительные методики определения стабильности дуг переменного тока и переноса электродного металла. Реализация этих методик на информационно-измерительных системах позволила сократить время обработки экспериментальных данных. Получена статистически досто-

верная информация о влиянии рода, полярности и силы тока, состава электродного покрытия на стабильность дуги переменного тока и перенос электродного металла.

Результаты исследований обобщены в монографии «Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов», изданной в 1990 г. Эта монография, удостоенная Премии им. Е. О. Патона НАН Украины (1996), получила мировое признание, была переведена на английский язык и издана в Кембридже (Великобритания).

Фундаментальные исследования механизмов испарения электродного металла, повторного зажигания дуги, взаимосвязи стабильности дуги, характера переноса электродного металла с составом электрода и режимом сварки были положены в основу создания низкотоксичных универсальных и высокопроизводительных электродов (И. Р. Явдоцин, А. Е. Марченко, В. М. Бейниш, Н. В. Скорина, В. Н. Горпенюк, Г. Е. Коляда, Б. В. Юрлов, А. В. Булаг, Г. Г. Корицкий, А. А. Алексеев, С. С. Миличенко, А. С. Бибикив).

Созданы новые компьютерные системы, усовершенствованы методики исследований (А. С. Котельчук, В. Н. Шлепаков, Л. А. Тараборкин, С. А. Супрун).

В отделе широко используется математическое моделирование металлургических процессов дуговой сварки.

В 1978 г. на конгресс Международного института сварки автором совместно с В. Ф. Демченко и Л. И. Демченко был представлен доклад «Математическое моделирование поведения газов в сварных швах», который в 1979 г. вышел отдельным изданием в издательстве «Наукова думка». В отделе были выполнены исследования особенностей роста газового пузырька в кристаллизующейся сварочной ванне, взаимодействия расплавленного шлака с закристаллизовавшимся металлом, термодинамических свойств высокотем-



пературных процессов в системе металл–газ–шлак, кинетических свойств взаимодействий слабоионизированной плазмы с расплавленным металлом, прогнозирования структуры зоны термического влияния сварного соединения, а также кинетики твердофазного взаимодействия многокомпонентных систем и др. (В. И. Швачко, Л. А. Тараборкин, В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, И. И. Цыбулько, В. А. Павлык, О. В. Глущенко, О. М. Портнов, А. В. Игнатенко). Результаты исследований регулярно представляются на международных семинарах по математическому моделированию сварочных явлений «Numeric Analysis of Weldability», а также международных семинарах «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах».

В отделе продолжается поиск эффективных путей улучшения санитарно-гигиенических характеристик сварочных материалов. Сотрудниками отдела ИЭС им. Е. О. Патона (В. Г. Войткевич, И. Р. Явдошин, Е. Н. Оноприенко, В. И. Карманов), Института гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН Украины (Ю. И. Кундиев, И. Т. Брахнова, Л. Н. Горбань), Института фармакологии и токсикологии, Института физической химии им. Л. В. Писаржевского и других научных организаций проведен комплекс физико-химических и биологических исследований связи токсичности аэрозолей и состава сварочных материалов. Исследования структуры и фазового состава аэрозоля с использованием комплекса методов электронной и инфракрасной спектроскопии в сочетании с определением растворимости твердой составляющей сварочного аэрозоля и его биологической агрессивности позволили получить данные, необходимые для гигиенической оценки сварочных материалов. Разработаны методы экспресс-оценки токсичности сварочных аэрозолей, позволившие получить количественные показатели санитарно-гигиенических свойств сварочных материалов, а также выбирать те из них, которые имеют минимально вредный уровень воздействия на организм человека. Результаты исследований сварочных аэрозолей обобщены в монографии В. Г. Войткевича «Welding Fumes», изданной в 1995 г. в Англии, а также в докладе И. Р. Явдошина и И. К. Походни в 2002 г. на Международной научно-практической конференции «Защита окружающей среды в сварочном производстве» в Одессе. В последнее время с помощью рентген-электронной спектроскопии получены данные о наличии в аэрозоле четырехвалентного марганца  $Mn^{4+}$  и о дисперсности сварочных аэрозолей (И. Р. Явдошин, В. И. Карманов, И. П. Губеня).

Следует упомянуть исследования ликвации элементов в сварных швах и образование химической микронеоднородности, изучение условий

рационального легирования металла сварного шва и роли отдельных элементов (никеля, марганца, кремния, фосфора, меди, хрома, молибдена) в формировании структуры металла шва и изменении его хладостойкости (И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Б. В. Юрлов, А. А. Алексеев, В. В. Головкин, В. Н. Шлепаков, Г. А. Шевченко, Л. Н. Орлов, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко).

По-прежнему уделяется большое внимание исследованию проблемы газов в сварных швах.

Результаты этих исследований обобщены в монографии «Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами», изданной в 2004 г. издательством «Наукова думка» и удостоенной в 2006 г. Премии им. Н. Н. Доброхотова НАН Украины (И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич, В. И. Швачко, А. С. Котельчук).

При создании новых сварочных технологий и материалов учитываются последние достижения науки в смежных областях: физике плазмы, физике металлов, физике прочности, механике разрушения, металловедении, материаловедении и др. В качестве примера могут служить исследования по проблеме водорода в сварных соединениях.

При изучении образцов железа, насыщенных водородом, была обнаружена интенсивная эмиссия вторичных отрицательных ионов водорода. Этот эффект послужил основой для разработки новой модели водородного охрупчивания. В соответствии с ней атомарный водород, адсорбированный на поверхности железа в виде отрицательных ионов, изменяет энергетическое состояние субмикротрещины, которая возникает в дислокационном кластере во время деформации и в начальный период распространяется по классической схеме Гриффитса. Новая модель раскрывает физическую природу влияния водорода и позволяет объяснить качественно известные его особенности.

Новые представления о механизме влияния водорода позволили разработать методику экспериментального исследования чувствительности сталей к хрупкому разрушению в присутствии водорода.

Новая методика позволяет определять влияние таких факторов, как элементный состав и структура металла, значение напряжений, температура, скорость деформации, содержание и распределение водорода в металле.

Результаты комплексных исследований механизма обратимой водородной хрупкости металлов с ОЦК-решеткой обобщены в докторской диссертации В. И. Швачко и кандидатских диссертациях С. Н. Степанюка и А. В. Игнатенко.

Развитию исследований обратимой водородной хрупкости и механике образования индуцированных водородом трещин посвящены работы А. В. Игнатенко, В. С. Синюка, А. П. Пальцевича.



Разработана математическая модель переноса водорода краевыми дислокациями. Проанализировано влияние эффекта водородной локализации пластичности на взаимодействие дислокаций в железе. На основе дислокационной теории предложена физическая модель водородной хрупкости. Создана математическая модель зарождения и развития субмикродфекта в зерне металла с ОЦК-решеткой, содержащего водород. Созданы компьютерные программы и проведены расчеты влияния сложноподвижного состояния металла и эффекта водородной локализации пластичности. Установлена температурно-скоростная зависимость значения напряжения разрушения. Показано, что при прочих равных условиях уменьшение размеров зерна металла ведет к увеличению степени водородной хрупкости. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния образца с концентратором при трехточечном изгибе с учетом микродфектов. Наличие водорода в металле приводит к образованию микродфектов при меньшем значении локальной пластической деформации. На макроуровне это приводит к образованию трещины при меньшем прогибе образца. Предложена математическая модель, описывающая кинетику перераспределения водорода в сварном соединении с учетом энергетических ловушек. Выполнены исследования полей концентрации водорода в сварном соединении. Расчеты кинетики удаления остаточного водорода хорошо согласуются со спектрами термодесорбции водорода, полученными экспериментально (А. В. Игнатенко, В. С. Синюк, А. П. Пальцевич).

В отделе получили развитие исследования по управлению структурой и свойствами металла сварных швов с помощью мелкогазородных неметаллических включений (В. В. Головки).

Изучено влияние окислительного потенциала сварочных материалов на состав и структуру твердого раствора, количество и состав включений. Повышению доли игольчатого феррита в структуре швов способствуют включения, состоящие из оксидов титана, алюминия и марганца размером 0,3...0,8 мкм. Разработана математическая модель формирования неметаллических включений в металле сварных швов (Л. А. Тараборкин, В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко).

Исследования физико-химических свойств порошковых материалов и смесей, моделирующих сердечник порошковой проволоки, проведенные методами комплексного термического анализа и масс-спектропии газовой фазы при динамическом нагреве от 30 до 1500 °С, позволили установить температурные особенности протекания термохимических реакций, оценить степень их развития и тепловой баланс. Образование расплавов на стадии нагрева порошкового сердечника и выделение газообразных продуктов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SiF_4$ ) определяет защитные функции электродного материала и существенно влияет на ход реакций взаимодействия металла с газами на стадиях капли и ванны (В. Н. Шлепаков, С. А. Супрун, А. С. Котельчук).

Среди новых разработок отдела:

гамма универсальных электродов с хорошими сварочно-технологическими свойствами, а также ультранизководородные электроды для сварки высокопрочных низколегированных сталей (И. Р. Явдошин, Н. В. Скорина, П. А. Косенко, А. Е. Марченко, А. П. Пальцевич, О. И. Фольборт); современные универсальные порошковые проволоки малого диаметра (В. Н. Шлепаков, П. А. Косенко, Ю. А. Гаврилюк, В. Н. Игнатюк, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко);



Сотрудники отдела в неофициальной обстановке (2007 г.)



новые агломерированные флюсы (В. В. Голковко);

технология изготовления электродов с двухслойным покрытием (А. Е. Марченко);

новые низкотоксичные электроды с использованием комбинированных жидких стекол, содержащих литий (Н. В. Скорина, М. О. Киселев, И. П. Губеня).

Большой вклад в работу отдела вносят сотрудник и инженерно-технических служб (В. А. Савенко, В. С. Власенко, Н. А. Варивода, В. П. Писаренко, Ю. В. Гобарев, Н. К. Сурмило, И. Г. Проскурин, З. Г. Куприянова, Л. М. Скуратовская, Д. Ю. Саранова). Опыт, знания и умение их высоко ценит весь коллектив отдела.

На протяжении всего времени существования отдела большое внимание уделяется подбору талантливой молодежи. Среди сотрудников отдела — выпускники Киевского политехнического и Московского физико-технического институтов, Киевского университета им. Т. Г. Шевченко, Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, а также Донецкого, Запорожского и Приазовского технических университетов.

В отделе подготовлены 38 кандидатов наук, шесть из которых стали докторами наук. В настоящее время в отделе работают три доктора, 11 кандидатов наук и 15 инженерно-технических работников. Многие наши сотрудники стали руководителями предприятий, государственными служащими, преподают в вузах, работают на промышленных предприятиях. Некоторые занимают достойные позиции в зарубежных научных учреждениях.

Отдел исследований физико-химических процессов в сварочной дуге тесно сотрудничает с другими отделами ИЭС им. Е. О. Патона, возглавляемыми видными учеными: С. И. Кучуком-Яценко, К. А. Ющенко, В. И. Махненко, Л. М. Лобановым, Г. М. Григоренко, И. В. Кривцуном, В. И. Кирьяном, В. И. Галиничем, а также с Институтом проблем материаловедения, Институтом сверхтвердых материалов, Физико-технологическим институтом металлов и сплавов, Институтом черной металлургии, Физико-механическим институтом, НТК «Институт монокристаллов», Харьковским физико-техническим институтом, Институтом проблем прочности, Институтом металлофизики и Институтом ядерных исследований НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт», Национальным университетом им. Тараса Шевченко, многими вузами и НИИ США, ФРГ, Австрии, Китая, Словакии, Польши и др.

Отдел с момента его создания отличает тесная связь с производителями и потребителями сварочных материалов в нашей стране и за рубежом. Прог-

рессивные сварочные материалы и технологии, созданные в отделе, и сегодня применяются на предприятиях и стройках Украины, России, Беларуси, стран СНГ, в странах ближнего и дальнего зарубежья. Участие в проектировании оборудования, цехов и заводов для производства сварочных материалов, организация производства новых сырьевых материалов, организация конференций, школ, симпозиумов, консультаций, разработка прогнозов в области сварочных материалов и предложений по совершенствованию их производства — далеко не полный перечень работ отдела.

*Направления дальнейших исследований.* В первой половине XXI в. сталь останется основным конструкционным материалом. Опережающими темпами будут создаваться новые типы высокопрочных низколегированных сталей, в том числе с особо низким содержанием углерода, теплоустойчивых сталей, сталей для конструкций, работающих при низких климатических температурах, сталей для криогенной техники и высоколегированных различного назначения.

Дуговая сварка по-прежнему будет занимать важнейшее положение среди многочисленных способов сварки плавлением. Для создания новых сварочных материалов необходимы оптимизация систем легирования металла шва, поиск путей снижения содержания водорода, азота, серы, фосфора и других вредных примесей в металле шва.

Будут совершенствоваться сварочно-технологические свойства материалов, методы снижения пористости, предупреждения трещин, улучшения провара, формы швов, отделимости шлаковой корки, повышения стабильности горения дуги, снижения разбрызгивания и выделений сварочных аэрозолей.

Дальнейшее развитие получают физическое и математическое моделирование процессов дуговой сварки. Будут созданы компьютеризированные банки данных и банки знаний, экспертные системы по сварочным материалам различного назначения. Большое внимание необходимо уделить совершенствованию оборудования и технологии производства сварочных материалов, изысканию сырьевых материалов стабильного качества, автоматизации аналитического контроля и технологического сопровождения производства.

Для выполнения этих задач особенно необходимы высококвалифицированные специалисты с глубокими знаниями теории сварочных процессов, физики, химии, а также специалисты в области информационных технологий. Решение этих задач будет способствовать развитию производства сварных конструкций и сварочных материалов нового поколения.