

МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

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

Приведен обзор результатов исследований по проблемам металлургии дуговой сварки конструкционных сталей и разработке сварочных материалов в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Изложены вопросы, касающиеся стабильности дуги и переноса электродного металла, испарения металла и шлака, образования сварочных аэрозолей, взаимодействия металла с газами, а также проблемы пористости, моделирования взаимодействия в многокомпонентных системах металл–газ, металл–газ–шлак, образования химической неоднородности, кристаллизационных трещин, неметаллических включений в сварных швах. Выполнены исследования систем легирования и прогнозирование микроструктуры металла шва, освещена проблема образования в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей индуцированных водородом холодных трещин. Показаны достижения института в разработке новых сварочных материалов и намечены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: металлургия дуговой сварки, конструкционные стали, сварочные материалы, сварной шов, стабильность дуги, сварочный аэрозоль, взаимодействие металла с газами, пористость, неметаллические включения, системы легирования, прогнозирования микроструктуры, индуцированные водородом холодные трещины

На протяжении всей многолетней истории становления и развития Института электросварки им. Е. О. Патона исследованиям и разработке сварочных материалов, созданию промышленной технологии и организации их производства уделяется постоянное и неослабное внимание.

Разработка покрытых электродов для ручной дуговой сварки началась в институте с 1935 г. Были исследованы процессы стабилизации дуги и созданы электроды со стабилизирующим тонким покрытием для сварки на постоянном и переменном токе, что позволило повысить производительность сварки по сравнению с электродами с меловым покрытием. Результаты довоенных исследований института в этом направлении обобщены в работах [1–3]. Уже в первые годы существования ИЭС им. Е. О. Патона механизация сварки считалась важнейшей его задачей.

В 1939–1940 гг. под руководством Е. О. Патона разработан способ автоматической сварки под флюсом [4]. Первый плавящийся флюс АН-1 создан в 1940 г. [5]. Он использовался в сочетании с кремнемарганцевой проволокой. Производство такого флюса было организовано на заводе «Пролетарий» в г. Донбассе. В 1941 г. создан высокомарганцевый флюс АН-Л.

Значительное развитие автоматическая сварка под флюсом получила в годы Великой Отечественной войны. Под руководством Е. О. Патона были разработаны новые сварочные материалы (флюсы АН-2, АША и АШМА, а также соответ-

ствующие электродные проволоки) и технологии автоматической сварки броневой стали, позволившие создать поточное производство бронекорпусов танков, авиабомб, артиллерийских систем.

Наряду с большой и напряженной работой на оборонных заводах коллектив института продолжал проводить научные исследования. В 1942 г. В. И. Дятлов обнаружил явление саморегулирования плавления электрода при электродуговой сварке под флюсом [6]. Результаты исследований этого явления Б. Е. Патонем совместно с А. М. Макарой, П. И. Севбо, М. Н. Сидоренко позволили создать портативный, простой и надежный сварочный автомат и использовать простейшие источники питания переменного тока.

Благодаря автоматизации процесса сварки стало возможным резко увеличить объем выпуска танков и повысить качество сварных соединений.

Б. Е. Патон в годы войны и первые послевоенные годы выполнил ряд важных исследований сварки под флюсом [7–17], посвященных изучению процессов нагрева и плавления электрода, размеров электродных капель, устойчивости горения дуги, саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом. Были исследованы статические свойства автоматов для сварки под флюсом, предложена методика анализа работы автоматов по статическим вольт-амперным характеристикам. Б. Е. Патон показал, что оптимальными свойствами отличается автомат с постоянной скоростью подачи проволоки, укомплектованный источниками питания с быстродействующим регулятором напряжения. Этот вывод послужил основой развития оборудования для механизированной сварки под флюсом и в защитных газах.

В послевоенные годы Е. О. Патон организовал проведение исследований электрических, тепловых и металлургических особенностей процесса сварки под флюсом, результаты которых были

опубликованы в монографиях, изданных в 1946 и 1953 гг. [18, 19]. Отдельные главы этих монографий посвящены исследованиям электрических процессов при сварке под флюсом, принципам действия сварочных головок, регулированию процесса сварки под флюсом [20–22]. Особенности тепловых и металлургических процессов при сварке под флюсом, способы эффективной защиты зоны сварки от воздуха, взаимодействие металла с газами и шлаком, способы регулирования химического состава и свойств металла шва, образование неметаллических включений, металлургические системы флюсов и электродных проволок, современные флюсы для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей и технологии их промышленного производства освещены в отдельных главах этих монографий.

В последующих работах ИЭС им. Е. О. Патона большое внимание уделялось исследованиям металлургических процессов сварки под флюсом — образованию пор, горячих трещин и неметаллических включений, определению температуры сварочной ванны, изучению характеристик сварочных дуг, измерению температуры и определению составов газов, окружающих дугу, исследованию поверхностных свойств сварочных флюсов и шлаков [23–39].

При высокой температуре столба дуги основные реакции должны протекать с большими скоростями, обеспечивающими термодинамическое равновесие [28]. Это положение использовано при расчете реакций в атмосфере дуг при сварке под флюсом [29]. Предполагалось, что температура сварочной ванны и удельное теплосодержание металла в ней являются функцией теплофизических свойств металла, что подтверждено в работах [30, 31]. Исследования металлургических процессов сварки и наплавки под флюсом и разработка сварочных и наплавочных материалов успешно продолжались и в последующие годы [39–54]; их результаты обобщены в монографиях [34–38, 40, 42, 44, 48, 52, 53].

Бурное развитие машиностроения, строительства и других отраслей народного хозяйства СССР в послевоенные годы потребовало создания и исследования новых способов сварки конструкционных сталей различных классов плавящимся электродом в защитных газах и их смесях с использованием проволок сплошного сечения и порошковых. Необходимо было создать промышленное производство покрытых электродов общего и специального назначения. Возник вопрос улучшения условий труда сварщиков с помощью разработки низкотоксичных электродов.

Б. Е. Патон инициировал исследования, необходимые для решения этих задач. Потребовалось углубление знаний, касающихся процессов, происходящих в сварочной дуге, особенностей плавления

и переноса электродного металла, процессов испарения металла и шлака и образования сварочных аэрозолей. Следовало изучить процессы взаимодействия в системах металл–газ, металл–газ–шлак, образования пористости в сварных швах, легирования металла шва и управление его структурой, массопереноса водорода в сварных соединениях и образования индуцированных водородом холодных трещин (ИВХТ). Ниже изложены наиболее важные результаты этих исследований.

Стабильность горения дуги и перенос электродного металла. Стабильность горения дуги и перенос электродного металла в значительной мере определяются электрофизическими характеристиками дугового разряда, связанными с составом и массой покрытия (флюса, проволоки), режимом сварки, видом тока [55–62].

В реальных сварочных дугах первостепенное значение приобретают эмиссионные характеристики электродных покрытий и шлаков. Покрытия (шлаки), интенсивно эмитирующие электроны, обеспечивают более высокую стабильность дуги и устойчивое повторное зажигание дуги переменного тока при низких значениях напряжения зажигания [58, 60, 61].

Эмиссия положительных ионов необходима для поддержания электропроводности в приэлектродных областях и компенсации объемного отрицательного заряда у поверхности катода. Благодаря компенсации в поддержании электрического разряда могут участвовать термоэлектроны. Электроотрицательные элементы, которые введены в состав сварочных материалов (например фтор, кислород и др.), вызывают снижение напряженности электрического поля у катода. При этом напряженность поля в анодной области и падение анодного напряжения возрастают, что приводит к увеличению глубины провара сварки на токе при прямой полярности [129].

Электроотрицательные элементы в атмосфере дуги вызывают также сильное контрагирование столба дугового разряда. Оценки, произведенные на основе представлений о локальном термодинамическом равновесии в столбе дуги и канальной модели столба, показали, что снижение температуры на периферии токопроводящего канала должно приводить к обогащению этой области отрицательными ионами. Изменение размеров столба дуги путем введения электроотрицательных элементов в состав сварочных материалов — эффективный путь управления параметрами сварочного процесса.

Перенос электродного металла, особенно если он сопровождается короткими замыканиями дугового промежутка, оказывает значительное влияние на стабильность горения дуги. Для оценки стабильности дуги и переноса электродного металла разработаны статистические методы [61].

Дуга переменного тока горит стабильно, если обеспечивается ее надежное повторное зажигание [13, 15, 16, 20, 25, 26, 62].

Особенности переноса электродного металла при различных способах дуговой сварки изучались многими учеными [11, 12, 16, 39, 52, 55–58, 60, 61, 71, 72, 121 и др.]. Разработана теория переноса электродного металла и проведен анализ сил, действующих на каплю электродного металла [39, 58, 60]. Предложены критерии оценки переноса электродного металла и стабильности горения дуги [58]. Установлена связь между этими критериями и технологическими характеристиками сварочных материалов.

Использование информационно-измерительных систем (ИИС) [59] позволило автоматизировать сбор и накопление информации, произвести ее математическую обработку в реальном масштабе времени, многократно увеличить объем получаемой информации и одновременно сократить продолжительность ее обработки.

Накоплен большой экспериментальный материал, касающийся стабильности дуги и переноса металла [60, 61]. Исследован ряд систем шлаков, установлены композиции шлаков, обеспечивающие одинаковую стабильность, что позволяет при разработке электродных покрытий, флюсов, порошковых проволок, не прибегая к экспериментам, прогнозировать стабильность дуги [131–133].

Повысить ее стабильность можно вводя в состав покрытия (флюса) электроположительные элементы или низшие оксиды металлов с переменной валентностью, вывода фториды в наружный слой покрытий, снижая активность SiO_2 в шлаке и увеличивая массу покрытия.

Введение легионизирующих элементов в покрытие, сердечник порошковой проволоки, флюс приводит к повышению концентрации положительных ионов в периферийной области дуги и уменьшению ее контрагирования вследствие компенсации действия отрицательных ионов, а также к снижению работы выхода электронов из катода. В этом случае необходимую плотность тока электронов, выходящих из катода, можно достичь при меньших значениях напряженности электрического поля у катода.

Статистический подход, реализуемый с помощью ИИС, позволяет в реальном масштабе времени дать вероятностную оценку влияния различных факторов (состава сварочных материалов, режимов сварки, вида тока и полярности) на образование пористости в сварных швах, вызванной удлинением дуги, а также оценить влияние индуктивности сварочного контура и формы внешней характеристики источника питания, исполнительных механизмов автоматов и полуавтоматов на перенос металла и стабильность процесса сварки.

Испарение металла и шлака, образование аэрозолей. Одним из путей улучшения условий труда сварщиков является создание низкотоксичных сварочных материалов. Твердая составляющая сварочного аэрозоля (ТССА) образуется при конденсации паров металлов и шлака. Условия испарения металла и шлака оказывают решающее влияние на состав аэрозоля. Температура капли, ее удельная поверхность и скорость перехода марганца из объема капли к ее поверхности определяют концентрацию марганца в аэрозоле [63–68].

Удлинение дуги, увеличение удельной поверхности испарения при измельчении капель ведет к более интенсивному испарению марганца. Основным источником поступления марганца и железа в сварочный аэрозоль является металлический расплав [94]. Наличие на его поверхности пленки шлака препятствует испарению железа и марганца. Интенсивность испарения марганца из расплавленного шлака увеличивается с ростом основности и содержания в нем оксидов марганца [64]. Увеличение основности сварочных шлаков способствует интенсификации испарения соединений калия, натрия, магния и кальция, при этом значительно возрастают валовые выделения ТССА. Для их уменьшения рекомендуется увеличивать в шлаках содержание структурообразующих анионов кремния, титана, алюминия и снижать содержание катионов-модификаторов — калия, натрия, магния [65].

В настоящее время предельно допустимая концентрация элементов в воздухе рабочей зоны установлена из предположения, что сварочный аэрозоль представляет собой сумму простых оксидов и соединений элементов. Однако такое представление неверно. Например, марганец и железо могут входить в состав различных соединений: марганец в виде MnFe_2O_4 , MnOSiO_2 , MnF_2 и др.; железо в виде Fe_2O_3 , MnFe_2O_4 , K_3FeF_6 и др. [66]. Токсичность в значительной мере зависит от валентности марганца и хрома в составе аэрозолей, а именно, чем больше их валентность, тем выше токсичность ТССА.

Частицы сварочного аэрозоля имеют сложную морфологию и состоят из ядра и оболочки. В состав ядра входят в основном комплексные соединения железа и марганца типа шпинелей, а в состав оболочки — сложные силикаты, фториды. Такое строение частиц характерно для всех сварочных материалов (проволок сплошного сечения, порошковых проволок, электродов) [66]. Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [67, 68]. Уменьшить валовые выделения сварочных аэрозолей можно за счет обеспечения контроля за следующими факторами: поддержкой номинального напряжения сварочной дуги; улучшением шлаковой защиты металла; уменьшением основности шлака; снижением содержания летучих элементов

и их соединений в шлаковом расплаве (фтора, калия, натрия); использованием инверторных источников питания, которые ограничивают рост тока при коротком замыкании и снижают температуру капель.

Взаимодействие металла с газами, пористость. Эти процессы изучены в работах [19, 23, 27, 29, 34, 40, 41, 44–46, 53, 69–76, 79–91, 81, 83, 87, 88 и др.] и обобщены в работе [121]. Поглощение газов расплавленным металлом определяется в основном составом атмосферы дуги, наличием защитного слоя шлака и его свойствами, температурой металла, кинетикой плавления электрода и переноса металла. Изучен механизм абсорбции газов металлом при дуговой сварке. Показано, что повышение содержания газов в металле сварного шва при сварке на токе при прямой полярности связано с более низкой температурой капель [44]. При обратной полярности температура капель более высокая, увеличивается испарение их металла, снижается парциальное давление газов на границе металл–газ [16, 44, 121–125]. Важное значение имеет растворимость газов в металлах и ее температурная зависимость. Обзор исследований растворимости азота и водорода в металлах и сплавах приведен в работах [79, 126].

Вид температурной зависимости определяется состоянием атмосферы, с которой контактирует газ. При контакте с обычной атмосферой в условиях термодинамического равновесия максимальное содержание водорода имеет место при 2600 К, а при нагреве до более высокой температуры оно снижается из-за интенсивного испарения металла [126]. Как показали расчеты [122–125], при контакте железа с водородсодержащей плазмой массовая доля водорода с повышением температуры монотонно снижается. Это связано, по-видимому, с тем, что при абсорбции газов из обычной атмосферы лимитирующим звеном является диссоциация молекул газа у поверхности металла. В процессе абсорбции из плазмы дугового разряда степень диссоциации определяется температурой дуги, которая слабо зависит от температуры поверхности металла [121].

Расчеты показали, что в большей части сечения столба дуги HF и OH полностью диссоциированы. При снижении температуры дуги эффективность связывания водорода фтором или кислородом возрастает, поскольку при равном давлении HF и OH имеют одинаковую степень диссоциации при температурах, различающихся примерно на 1000 К [121, 123, 130].

Растворению водорода в металле капель и сварочной ванны препятствует связывание его фтором. Наличие HF в атмосфере дуги подтверждено экспериментально [75]. Связывание фтора в атмосфере дуги в соединения со щелочноземельными металлами снижает возможность образова-

ния HF и способствует повышению содержания водорода в металле шва [29, 34, 41]. Введение в покрытие электрода, в керамический флюс и сердечник порошковой проволоки карбонатов или высших оксидов марганца и железа либо кислорода в смесь газов приводит к снижению парциального давления водорода в атмосфере дуги и содержания водорода в металле шва [23, 29, 34, 40, 41, 44, 46, 69, 76, 79, 84, 90, 98, 121].

Для предупреждения поглощения азота создается надежная газовая и шлаковая защита расплавленного металла капли и ванны. Процесс взаимодействия металла с азотом в условиях сварки рассмотрен в работах [78–81]. Выявлено, что шлаковый расплав оказывает существенное диффузионное сопротивление поглощению азота из газовой фазы металлом. Выделение газа из шлакового расплава повышает эффективность защиты расплавленного металла от контакта с атмосферой.

Обеспечение газослаковой защиты расплавленного металла при сварке открытой дугой с использованием электродов и порошковых проволок зависит от кинетики диссоциации газообразующих компонентов покрытия сердечника, объема и поверхностных свойств шлакового расплава. Разработаны расчетно-экспериментальный метод прогнозирования процесса выделения газа из сердечника при высокой скорости нагрева [79] и физическая модель взаимодействия металла с газами [80, 81]. Установлено, что условия кристаллизации сварочной ванны оказывают большое влияние на конечное содержание газов в металле шва [44, 82].

Характер перераспределения водорода между сварочной ванной и закристаллизовавшимся металлом определяется в основном скоростью кристаллизации. При скорости кристаллизации ванны, характерной для основных процессов дуговой сварки, диффузионные процессы в значительной мере подавляются, в металле шва фиксируется содержание водорода, близкое к его среднему содержанию в сварочной ванне. Азот является менее диффузионно-подвижным элементом, чем водород, поэтому его диффузионное перераспределение в процессе кристаллизации сварочной ванны еще менее вероятно.

Увеличение скорости кристаллизации ванны приводит к перераспределению водорода в металле наплавки; увеличивается содержание остаточного водорода, удерживаемого металлом, и снижается массовая доля диффузионного водорода. Это объясняется изменениями структуры металла, степени напряженности решетки и появлением развитой сетки дислокаций [44, 69].

Водород в сварных швах находится в пересыщенном твердом растворе, включениях и вакансиях. Проведены исследования закономерности диффузии водорода в сварных швах. Выявлено, что водород отличается аномально высокой диф-

фузионной подвижностью в металле, по сравнению с другими примесями внедрения. Экспериментальное определение концентрационного поля водорода в сварных швах сопряжено со значительными методическими трудностями [82]. В последнее время получили развитие численные методы, для реализации которых необходима надежная информация о температурно-концентрационных зависимостях параметров диффузии водорода в различных зонах сварного соединения. Использование хроматографического метода [83, 84] позволило разработать методику расчетно-экспериментального способа определения коэффициента диффузии водорода в сварных швах и сталях при 20...200 °С [85]. Получены новые данные о влиянии легирования металла шва марганцем, никелем, молибденом, хромом на диффузионную подвижность водорода [91]. Изучено влияние напряжений и деформаций на водородопроницаемость и диффузию водорода в металле [86].

Большая диффузионная подвижность водорода в металле шва, выполненном высокоосновными сварочными материалами, в сравнении с рутитовыми материалами, связана с меньшим количеством «ловушек», удерживающих водород [127, 128].

Важнейшей проблемой дуговой сварки является предупреждение пористости швов. Изучены составы газов, выделяющихся из сварочной ванны при сварке стали под флюсом, и их влияние на пористость швов. Показано, что помимо оксида углерода, появление пор может вызывать выделение водорода и азота из кристаллизующегося металла. Определен состав газов и оценено давление водорода в порах [87, 88], изучена кинетика зарождения и роста пузырьков газа в сварочной ванне [44, 82, 121].

Выявлено, что вероятность образования зародышей пор будет большей для газа, с которым металл имеет меньшее межфазное натяжение $\sigma_{м-г}$ на границе металл-газ. Увеличение здесь межфазного натяжения и ухудшение смачиваемости подложки металлом способствуют образованию устойчивых газовых зародышей. С этим, по-видимому, связан и тот факт, что хорошо раскисленный металл сварочной ванны, по сравнению с плохо раскисленным, способен удерживать меньше газов [44]. Отсутствие заметного пересыщения говорит о гетерогенном механизме образования пор в сварных швах. Причиной пористости при сварке электродами с рутитовым и руднокислым покрытиями и порошковыми проволоками подобного типа является в основном выделение водорода [44, 69, 72], который диффундирует в газовый пузырек из жидкого и закристаллизовавшегося металла. Введение раскислителей в покрытие и сварочную ванну тормозит десорбцию водорода из ванны и удлиняет процесс дегазации. Эффективным средством борьбы с по-

ристостью в этом случае является интенсификация процесса газовой выделения [44, 69]. Вязкость сварочного шлака существенного влияния на стойкость швов против образования пор не оказывает [34, 40]. Предупреждение вызванной водородом пористости достигается за счет снижения содержания водорода в покрытии (флюсе) путем высокотемпературной прокатки, изъятия из покрытия веществ, содержащих кристаллизационную влагу, выбора композиций покрытия (флюса), обеспечивающих связывание водорода в дуге фтором либо снижением его парциального давления, улучшения защитных свойств шлаков, увеличения массы покрытия, использования двухслойной конструкции электродного покрытия или порошковой проволоки [44, 52, 70, 121].

Моделирование взаимодействия в многокомпонентных системах металл-газ, металл-газ-шлак. Разработана физическая модель газонасыщения поверхностного слоя металла, находящегося в контакте с низкотемпературной слабоионизированной плазмой. Модель построена на основании кинетической теории газов и учитывает движение ионов, атомов и молекул в объеме плазмы, абсорбцию и десорбцию газа на поверхности металла, взаимодействие сорбционного и десорбционного потоков газа у металлической поверхности, а также диффузионный перенос растворенного вещества в металлическом расплаве.

На основе физической модели создана математическая модель, которая позволяет рассчитывать параметры процесса поглощения газов в металле в зависимости от характеристик плазмы, длительности нагрева, парциального давления примеси в газе, температуры и других факторов. Для решения системы уравнений массопереноса использовали численные методы. С целью выявления особенностей поглощения азота и водорода железом из плазмы, содержащей в качестве примеси азот или водород, проведены расчеты. Активизация молекул азота и водорода в плазме (возбуждение, диссоциация, ионизация) качественно изменяет кинетику поглощения их расплавом, по сравнению с равновесными условиями: скорость растворения увеличивается на несколько порядков, она экспоненциально зависит от температуры плазмы, а линейно — от парциального давления водорода [121–125].

Разработан алгоритм термодинамического описания высокотемпературных процессов в многокомпонентных гетерофазных системах металл-газ-шлак. Создана компьютерная программа, предназначенная для численной оценки влияния температуры, давления и исходного элементного состава системы на равновесный состав взаимодействующих фаз. При этом учитываются множество химических реакций, происходящих между большим количеством химических сое-

динений, входящих в состав реагирующих фаз, а также при испарении, конденсации, диссоциации и др. [90].

Термодинамический анализ путей снижения содержания водорода в жидкой стали при изменении составов шлаковой и газовой фаз в условиях сварки в углекислом газе выявил, что эффективным способом снижения содержания водорода в жидком металле является введение в газовую фазу SiF_4 (на практике этого можно добиться введением в покрытие электродов и сердечник порошковой проволоки кремнефторидов), а увеличение окислительного потенциала газовой и шлаковой фаз не приводит к существенному уменьшению массовой доли водорода в жидком металле.

Термодинамический подход был использован при создании самозащитных порошковых проволок на основе оксифторидных систем [92]. Защита расплавленного металла от абсорбции азота воздуха достигается путем окисления магния и алюминия в сердечнике проволоки и обменных реакций оксидов с фторидами.

Результаты многолетних исследований процессов взаимодействия металла с газами и образования пористости в сварных швах обобщены в монографиях [29, 34, 40, 44, 121].

Химическая неоднородность, кристаллизационные трещины. Важное значение для разработки совершенных сварочных материалов и эффективной технологии сварки имели исследования первичной кристаллизации и микроскопической неоднородности металла сварных швов [100–108]. Были изучены закономерности ликвации элементов в металле сварных швов на сталях, получены систематические количественные данные о влиянии углерода, марганца, серы и кремния на дендритную, зональную и слоистую ликвацию марганца, кремния и серы в сварных швах [109–115]. Предложены пути снижения дендритной ликвации серы. Определено, что степень вредного влияния segregирующих примесей серы и фосфора на низкотемпературную хрупкость металла шва в основном зависит не от их общего содержания, а от степени сегрегации фосфора в зеренной структуре, размера, формы и характера распределения сульфидных включений [48, 77, 111, 112, 115].

Разработаны способы повышения хладостойкости сварных швов. Необходимо максимально ограничить сегрегацию фосфора в зерне аустенита за счет управления его перераспределением в первичной структуре (дополнительным микролегированием); уменьшить количество и размер окисьюсульфидов в центре аустенитного зерна за счет уменьшения в металле сварных швов содержания кислорода. Исходя из применяемой системы легирования и системы раскисления следует разграничивать примеси по степени их отрицатель-

ного влияния на хладостойкость. При использовании систем легирования, содержащих никель или хром, основное внимание надо обратить на содержание фосфора; в случае повышенного содержания кислорода примесь серы нежелательна.

Для исследования ликвационных процессов, происходящих в сварочной ванне и сварных швах, предложен новый метод оценки химической неоднородности металла швов [113]. По данным рентгеновского микроанализа строятся карты распределения концентраций отдельных элементов. Статистическая обработка информации, представленной на концентрационных картах, позволяет установить параметры химической неоднородности. С использованием этого метода изучена система легирования Ni–Mn, а также установлена оптимальное содержание этих элементов в металле сварных швов.

Неметаллические включения. Закономерности окислительно-восстановительных реакций обуславливаются физико-химическими свойствами покрытий (флюсов), их окислительным потенциалом и основностью образующегося шлака, показателями плавления и переноса электродного металла, закономерностями диффузионной кинетики, определяющими лимитирующие звенья протекания реакции. Суммарная скорость окислительно-восстановительных реакций ограничивается скоростью диффузионного транспорта реагентов к межфазной поверхности. На этой основе построены расчетные схемы окисления или восстановления элемента при сварке [36]. Продуктами окислительно-восстановительных реакций являются неметаллические включения эндогенного типа, которые образуются в металле сварочной ванны и шва.

Особенности протекания окислительно-восстановительных реакций марганца и кремния в зависимости от состава электродного покрытия и их влияние на содержание, состав, форму, дисперсность неметаллических включений и механические свойства металла швов описаны в работах [36, 40, 94, 95]. В [40, 69, 96, 97] показана отрицательная роль кремневосстановительного процесса в снижении показателя пластичности и ударной вязкости металла швов. Определено оптимальное содержание кремния, обеспечивающее максимальную структурную и химическую однородность сварных швов [95].

Включения могут служить зародышами игольчатого феррита, значительная доля которого в структуре шва обычно связывается с высокой ударной вязкостью. Наличие низших оксидов титана и алюминия на поверхности включений способствует зарождению феррита. Как показали результаты исследований [163], вокруг включений типа алюмосиликатов или оксидов титана, имеющих слоистое строение, образуется область с

повышенной дислокационной плотностью ($\rho = 1 \cdot 10^{12} \dots 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), что приводит к фрагментации формирующейся структуры на стадии инкубационного периода ее зарождения — участки с низкой плотностью дислокации ($\rho = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) разделяются областями, имеющими значительную ($\rho = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) плотностью дислокаций. В таких зонах первичного зерна образуется структура типа игольчатого феррита. Мелкодисперсные включения гомогенного состава и крупные включения типа силикатов марганца окружены твердым раствором со значительно меньшей плотностью дислокаций ($\rho < 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). В этом случае в пределах первичного зерна образуется полигональный феррит. Установлено, что для формирования сварных швов с высоким уровнем вязкости необходимо соблюдать определенный баланс между содержанием кислорода и раскислителей в металле швов [164].

На основе термодинамических расчетов проанализированы различные способы удаления серы из жидкого железа [98]. Определено, что наиболее эффективно это осуществлять используя шлаки с высокой сульфидной емкостью. Исследования кинетики процесса перехода серы из металла в шлак показали, что при сварке можно создать такие условия, при которых имеет место глубокая десульфурация металла даже в течение короткого по сравнению с длительностью существования сварочной ванны, промежутка времени. Эксперименты, проведенные на опытных образцах порошковых проволок, подтвердили правильность таких теоретических выводов.

Пока не существует общепризнанного мнения о механизме влияния включений на процесс структурообразования. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования роли включений в зарождении и эпитаксиальном росте феррита на некоторых кристаллографических плоскостях с малым несоответствием параметров решетки поверхности включений и феррита; разработка методов обеспечения оптимального размера включений, постоянного требуемого содержания алюминия и титана в металле швов; оптимального содержания кислорода и раскислителей; углубленное изучение механизма зарождения неметаллических включений (физические и математические модели этого процесса); дальнейшие исследования физико-химического строения шлаковых системы с точки зрения их влияния на образование зародышей включений и роли включений размером порядка 10 мкм в формировании структуры сварных швов [99]; разработка металлургических методов связывания сульфидов марганца и в целом серы в соединения, резко отличающихся параметрами решетки от феррита.

Исследование систем легирования и прогнозирование микроструктуры металла шва.

Изучению взаимосвязи между составом, структурой и механическими свойствами металла сварных швов и соединений в последние годы уделяется много внимания. Это вызвано необходимостью создания материалов для сварки низколегированных высокопрочных сталей. Проведены исследования этой взаимосвязи на примере многослойных сварных швов, в которых можно выделить три характерные структурные зоны — крупного, мелкого зерна и столбчатой структуры. В системах легирования Ni–Mn, используемых в сварных швах конструкций, работающих при низких температурах, повышение хладостойкости металла швов достигается за счет формирования игольчатого феррита, увеличения доли остаточного аустенита, уменьшения доли карбидов, устранения перлита, измельчения частиц второй фазы в зоне столбчатой структуры термообработанных валиков, уменьшения относительной площади зоны крупного зерна до 10...15 % и формирования в ней зернистого бейнита [116]. Такая структура достигается благодаря легированию металла шва никелем и марганцем, мас. %: 0,5...0,7 Mn; 3,0...3,2 Ni или 1,1...1,3 Mn; 2,1...2,3 Ni. При этом зона столбчатой структуры представляет собой игольчатый феррит, а вторая фаза представлена островками остаточного аустенита и небольшим количеством мелких карбидов.

Применение высокопрочных сталей для изготовления сварных конструкций, работающих в экстремальных условиях, потребовало оптимизации микроструктуры и механических свойств металла шва. Содержание легирующих и микролегирующих элементов (марганца, никеля, молибдена, хрома, бора, магния) изменяли в широком диапазоне с целью получения металла шва, имеющего предел текучести от 450 до 900 МПа.

Установлено, что показатели механических свойств металла шва определяются несколькими факторами: количественным соотношением феррита игольчатого, зернограничного и со второй фазой; дисперсностью второй фазы, ее типом и морфологией, неоднородностью распределения ее частиц; микронеоднородностью распределения легирующих и примесных элементов. Требуемые прочность и ударная вязкость металла многослойного сварного шва с пределом текучести до 600 МПа достигается при содержании игольчатого феррита не менее 70...80 об. % и наличии равномерно распределенных островков второй фазы с мартенситно-аустенитной структурой в зоне столбчатой структуры системы легирования Mn–Ni и Mn–Ni–Mo (до 0,2 мас. % Mo). В случае системы легирования Mn–Ni–Mo (предел текучести металла до 800 МПа) повышение прочностных характеристик многослойного шва при сохра-

нении высокой хладостойкости происходит за счет увеличения объемной доли равноосной второй фазы (островки с мартенситно-бейнитно-аустенитной структурой) и равномерно распределенных дисперсных карбидов. При этом необходимо обеспечить постоянное содержание игольчатого феррита.

Микролегирование магнием и бором повышает ударную вязкость металла шва за счет изменения дисперсности второй фазы, а также степени химической микронеоднородности по никелю и марганцу. Эффект микролегирования объясняется снижением температуры превращения аустенита и повышением его устойчивости. При системе легирования Mn–Ni–Mo–Cr микролегирование бором и магнием неэффективно.

В последние годы все больше внимание уделяется управлению структурой и свойствами металла шва путем изменения кислородного потенциала флюсов [136]. Изучено влияние этого показателя на степень легирования твердого раствора марганцем и титаном [134, 135, 137, 138], а также на содержание углерода.

Экспериментальные исследования систем легирования металла шва длительны и трудоемки, поэтому целесообразно проводить расчет и прогнозирование микроструктуры металла сварного шва [117, 118]. Основой расчетов послужила предложенная в работе [119] физическая модель формирования микроструктуры низкоуглеродистого низколегированного металла. Модель позволяет учесть пути формирования микроструктуры: прорастание иголок-пластин видманштеттового феррита через весь поперечник зерна и «накалывание» иголок-пластин в результате их взаимодействия с игольчатым ферритом, зарождающимся на распределенных в теле зерна аустенита включениях.

Скорость роста различных модификаций феррита находят из расчетных термокинетических диаграмм, с их помощью определяют и температурно-временные диапазоны, в пределах которых происходит указанный рост.

Разработанная компьютерная программа [120] по заданному химическому составу металла шва позволяет рассчитывать изотермические диаграммы распада аустенита и путем наложения кривой термического цикла на эту диаграмму определять температуру начала распада аустенита в условиях непрерывного охлаждения, что позволяет рассчитывать объемные доли различных микроструктурных составляющих. Результаты расчетов используются для изучения влияния параметров сварочного процесса, химического состава металла шва, размеров первичного аустенитного зерна на соотношение микроструктурных составляющих металла шва.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных показало, что вычислительный

метод позволяет оценивать структурные изменения, связанные с влиянием условий кристаллизации химическим составом металла шва и другими факторами. Использование установок «Glebe» дает возможность успешно сочетать экспериментальное изучение и математическое моделирование превращения аустенита в сварном шве, выполненном на низколегированных сталях [139].

ИБХТ в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей. В ИЭС им. Е. О. Патона в течение многих лет проводятся исследования механизма образования холодных трещин, в том числе ИБХТ. Исследованы кинетика распределения водорода в сварных соединениях, влияние концентраторов напряжений, механизмов замедленного разрушения и водородного охрупчивания [144–152, 155–158], а также образования водородной хрупкости в металле с ОЦК-решеткой [140–142, 153, 154, 159–162].

Разработаны методы определения содержания диффузионного водорода, положенные в основу международного стандарта. Для оценки влияния условий деформирования и ловушек на характер массопереноса водорода проведены исследования диффузии и транспорта водорода в металлах, сварных швах и соединениях. Предложена гипотеза и разработана физическая модель водородного охрупчивания сталей и сварных швов; разработаны методики оценки влияния водорода, базирующиеся на современных представлениях металлофизики о механизме хрупкого разрушения сталей.

Обзор выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований по проблеме наличия водорода в сварных соединениях приведен в работах [121, 127, 128], анализируя которые можно сделать следующие выводы [121]:

1. Риск образования ИБХТ может быть оценен с помощью расчета углеродного эквивалента $C_{\text{экв}}$, характеризующего степень легирования стали. Многочисленные технологические пробы, достаточно хорошо отражающие поведение сталей при сварке, позволяют оценивать комплексное влияние факторов, обуславливающих образование трещин.
2. Чувствительность к образованию ИБХТ зависит от микроструктуры стали. Например, двойниковый мартенсит значительно более чувствителен к охрупчиванию, чем самоотпускающийся низкоуглеродный мартенсит.
3. Нормальная температура наиболее благоприятна для образования ИБХТ.
4. Холодное растрескивание зависит от скорости деформации сварного соединения: чем выше скорость нагружения, тем меньше охрупчивание.
5. Главным звеном механизма водородного охрупчивания является поведение зародышевой микротрещины, возникающей в процессе деформации, в присутствии водорода. Локализация отрицательного заряда на адсорбированных атомах

водорода приводит к снижению уровня нормального напряжения, необходимого для перехода микротрещины к автокаталитическому распространению в поле напряжений, что на макроуровне воспринимается как эффект охрупчивания.

6. Наиболее важными факторами являются эволюция дислокационной структуры при пластической деформации, а также свойства границ зерен, частиц второй фазы и неметаллических включений. Особая роль дислокаций в механизме водородной хрупкости обусловлена тем, что их перемещение является основным механизмом пластической деформации и одновременно наиболее эффективным способом транспортирования водорода в объеме металла [140–142].

7. Неметаллические включения в зависимости от их связи с матрицей могут действовать с самого начала деформирования как трещины, а хрупкие включения способны сами инициировать зарождение острых трещин.

8. Наличие водорода в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ) снижает удельную энергию поверхности субмикротрещины. Уменьшение напряжения хрупкого разрушения, инициируемого субмикротрещиной, возникающей по дислокационной схеме, пропорционально уменьшению удельной поверхностной энергии металла под влиянием водорода.

9. Образование холодных трещин при сварке конструкционных сталей — процесс сложный и специфический, значительную роль в нем играет водород, находящийся в металле шва и ЗТВ. Понизить восприимчивость сварного соединения к холодному растрескиванию можно путем введения в металл шва ловушек водорода. Ими являются различные структурные дефекты такие, как вакансии, растворенные атомы, дислокации, границы зерен и фаз, микро- и макропоры, неметаллические включения, частицы второй фазы и др. Ловушками водорода могут быть мелкодисперсные равномерно распределенные в структуре стали неметаллические включения и остаточный аустенит.

Новые сварочные материалы. На базе многолетних исследований фундаментальных проблем металлургии дуговой сварки в ИЭС им. Е. О. Патона со времени его основания проводилась разработка сварочных материалов и технологий их производства. Созданы флюсы для сварки сталей различного назначения, низкотоксичные и высокопроизводительные электроды, порошковые проволоки для сварки в защитных газах и без дополнительной защиты зоны дуги (самозащитные). Организовано крупнейшее в мире промышленное производство сварочных материалов различного назначения. Характеристики этих материалов описаны в многочисленных каталогах и справочниках. Обобщенная информация о них приведена в работах [49, 121, 165–168].

Направления дальнейших исследований. В первой декаде 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 и других вредных примесей в металле шва с целью предупреждения образования трещин различных типов. Станут совершенствоваться сварочно-технологические свойства материалов для снижения пористости, предупреждения кристаллизационных 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 металлургических процессов дуговой сварки. Будут созданы компьютеризированные банки данных и банки знаний, экспертные системы по сварочным материалам различного назначения.

Особое 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-металлурги 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.

1. Дятлов В. И., Фрумин И. И. Виготовлення товстих електродних покриттів із синтетичних шлаків. — К.: Вид-во АН УРСР, 1938. — 90 с.
2. Дятлов В. И., Фрумин И. И., Слуцкая Т. М. Электроды Института электросварки АН УССР / Под ред. Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1941. — 136 с.
3. Кульчицкий Л. О. Энергетический баланс дуги при сварке металлургическими электродами. — Киев: Изд-во АН УССР, 1941. — 85 с.
4. Патон Е. О. Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса. — Свердловск: Машгиз, 1942. — 208 с.
5. Сварка в СССР. — В 2 т. — М.: Наука, 1981. — Т. 1. — 532 с; Т. 2. — 493 с.
6. Дятлов В. И. Новый принцип построения сварочных автоматов // Вест. машиностроения. — 1943. — № 9. — С. 8–14.

7. Патон Б. Е., Макара А. М. Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса. — Киев: Ин-т электросварки АН УССР, 1944. — 92 с.
8. Патон Б. Е., Макара А. М. Экспериментальное исследование процесса автосварки под флюсом при различных способах питания дуги // Автоген. дело. — 1945. — № 5/6. — С. 1–8.
9. Патон Б. Е., Макара А. М. Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса // Сборник, посвященный семидесятилетию со дня рождения и пятидесятилетию научной деятельности Героя Социалистического Труда действительного члена АН УССР Евгения Оскаровича Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1946. — С. 56–129.
10. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Автоматическое регулирование мощности сварочной дуги // Сборник трудов по автоматической сварке под флюсом. — Киев: Изд-во АН УССР, 1948. — С. 260–277.
11. Патон Б. Е. Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом // Тр. по автоматической сварке под флюсом. — 1948. — Сб. 3. — С. 13–28.
12. Патон Б. Е. Процесс плавления электрода при автоматической сварке под флюсом // Там же. — 1949. — Сб. 4. — С. 22–38.
13. Патон Б. Е. Об оценке стабилизирующих свойств флюса для автоматической сварки // Автомат. сварка. — 1950. — № 2. — С. 85–89.
14. Патон Б. Е. О размере электродных капель при сварке под флюсом // Там же. — 1950. — № 4. — С. 44–48.
15. Патон Б. Е. О напряжении холостого хода трансформаторов для электродуговой сварки // Там же. — № 1. — С. 60–77.
16. Патон Б. Е. Устойчивость горения дуги в сварочной цепи, содержащей индуктивность с насыщенным стальным магнитопроводом // Там же. — 1951. — № 2. — С. 56–63.
17. Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Там же. — 1952. — № 1. — С. 38–45.
18. Автоматическая сварка под флюсом / Под ред. Е. О. Патона, В. В. Шеверницкого, Б. И. Медовара. — Киев: Машгиз, 1948. — 344 с.
19. Автоматическая электродуговая сварка / Под ред. Е. О. Патона. — М.; Киев: Машгиз, 1953. — 396 с.
20. Патон Б. Е., Остапенко Н. Г. Электрические процессы при сварке под флюсом // Автоматическая сварка под флюсом / Под ред. Е. О. Патона, В. В. Шеверницкого, Б. И. Медовара. — Киев: Машгиз, 1948. — С. 8–22.
21. Патон Б. Е. Принципы действия сварочных головок // Там же. — С. 217–240.
22. Регулирование процесса сварки под флюсом // Автоматическая электродуговая сварка / Под ред. Е. О. Патона. — М.; Киев: Машгиз, 1953. — С. 270–288.
23. Кирдо И. В. О составе газов, окружающих дугу, при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1950. — № 1. — С. 50–59.
24. Рабкин Д. М., Фрумин И. И. Причины образования горящих трещин в сварных швах // Там же. — № 2. — С. 3–43.
25. Остапенко Н. Г. Экспериментальное исследование сварочной дуги, горящей под флюсом // Сб. тр. по автоматической сварке под флюсом. — 1950. — № 5. — С. 29–53.
26. Рабкин Д. М. Энергетическое исследование приэлектродных областей мощной сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1951. — № 2 (17). — С. 3–25.
27. Кирдо И. В. Измерение температуры мощной сварочной дуги, горящей под флюсом // Юбилейный сборник, посвященный 80-летию Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 269–284.
28. Дятлов В. И. Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом // Там же. — С. 269–284.
29. Подгаецкий В. В. Реакции в атмосфере дуги при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1953. — № 1. — С. 10–18.
30. Фрумин И. И., Походня И. К. Исследование температуры сварочной ванны // Там же. — 1955. — № 4. — С. 13–30.
31. Походня И. К., Фрумин И. И. О температуре сварочной ванны // Там же. — № 5. — С. 14–24.
32. Подгаецкий В. В., Рабкин Д. М. Флюсы для автоматической и полуавтоматической сварки. — Киев: Изд-во АН УССР, 1954. — 56 с.
33. Низкокремнистые флюсы для автоматической сварки и наплавки / И. И. Фрумин, Д. М. Рабкин, В. В. Подгаецкий и др. // Автомат. сварка. — 1956. — № 1. — С. 3–20.
34. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
35. Підгаєцький В. В. Флюсы для механізованого електрозварювання. — К.: Держтехвидав УРСР, 1961. — 135 с.
36. Подгаецкий В. В. Неметаллические включения в сварных швах. — Киев: Машгиз, 1962. — 85 с.
37. Подгаецкий В. В. Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1964. — 76 с.
38. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки. — Киев: Гостехиздат УССР, 1961. — 263 с.
39. Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке // Новые проблемы сварочной техники. — Киев: Наук. думка, 1964. — 167 с.
40. Підгаєцький В. В. Пори, включення і тріщини в зварних швах. — К.: Техніка, 1970. — 236 с.
41. Подгаецкий В. В. Процессы образования неметаллических и газовых включений в сварных швах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1969. — 30 с.
42. Якобашвили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков. — Киев: Техніка, 1970. — 208 с.
43. Григоренко Г. М. К вопросу образования пор в сварных швах // Автомат. сварка. — 1970. — № 10. — С. 13–17.
44. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
45. Галинич В. И. Некоторые особенности взаимодействия металла, шлака и газа при электродуговой сварке под флюсом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1971. — 16 с.
46. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
47. Мусияченко В. Ф. Основы металлургии и технологии сварки высокопрочных низколегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 1976. — 52 с.
48. Подгаецкий В. В., Парфессо Г. И. Трещины сульфидного происхождения при сварке стали. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
49. Подгаецкий В. В. Флюсы для сварки и спецэлектрометаллургии // Сварка и специальная электрометаллургия / Под ред. Е. О. Патона. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 188–200.
50. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 252 с.
51. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Применение флюсов АН-17М и АН-43 для сварки сталей повышенной и высокой прочности // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 49–53.
52. Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 223 с.
53. Лакомский В. И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах. — Киев: Наук. думка, 1992. — 231 с.
54. Походня И. К. Металлургия дуговой сварки сталей и сварочные материалы // Сварка и специальная электрометаллургия / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 168–187.
55. Патон Б. Е., Потатьевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
56. Патон Б. Е., Шейко П. П. Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом // Там же. — 1965. — № 5. — С. 1–7.

57. Патон Б. Е., Шейко П. П., Пацуля М. П. Автоматическое управление переносом металла при импульсно-дуговой сварке // Там же. — 1971. — № 9. — С. 1–3.
58. Критерии оценки стабильности дуговой сварки на постоянном токе / И. К. Походня, И. И. Заруба, В. Е. Пономарев и др. // Там же. — 1989. — № 8. — С. 1–4.
59. Информационно-измерительная система для исследования технологических свойств сварочных материалов, оборудования и процессов сварки / И. К. Походня, Р. Г. Оффенгенден, В. Н. Горпенюк и др. // Там же. — 1979. — № 10. — С. 67–68.
60. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавные электродов / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 222 с.
61. Статистическая оценка переноса металла и стабильности сварочной дуги: Метод. рекомендации / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, В. Е. Пономарев и др. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — 30 с.
62. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 336 с.
63. Об испарении марганца при сварке стали / И. К. Походня, В. И. Швачко, И. Р. Явдошин, С. С. Пономарев // Автомат. сварка. — 1982. — № 11. — С. 24–26.
64. Источники поступления марганца и железа в сварочный аэрозоль / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. В. Булат, В. И. Швачко // Там же. — 1981. — № 3. — С. 37–29.
65. Особенности испарения натрия, калия, магния, кальция из сварочных шлаков, содержащих двуокись титана / И. К. Походня, А. В. Булат, И. Р. Явдошин и др. // Там же. — 1986. — № 3. — С. 27–29.
66. Войткевич В. Г., Сенкевич А. И. Изучение неоднородности состава частиц сварочной пыли методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Там же. — 1987. — № 3. — С. 34–38.
67. *Voitkevich V. Welding fumes (formation, properties and biological effects)*. — Cambridge: Abington Publishing, 1995. — 12 p.
68. Явдошин И. Р., Походня И. К. Образование сварочного аэрозоля при дуговой сварке плавлением и его гигиеническая оценка // Тр. 1-й Междунар. конф. «Защита окружающей среды в сварочном производстве», Одесса, 11–13 сент. 2002 г. — Одесса: Астропринт, 2002. — С. 38–56.
69. Явдошин И. Р. Исследование и разработка универсальных электродов с рутиловым покрытием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1969. — 21 с.
70. Шлепаков В. Н. Исследование и разработка порошковых проволок карбонатно-флюоритного типа для сварки открытой дугой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1969. — 25 с.
71. Марченко А. Е. Исследование плавения и взаимодействия металла с газами при сварке высокопроизводительными электродами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1964. — 16 с.
72. Сутель А. М. Исследование способа сварки открытой дугой порошковой проволокой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1967. — 18 с.
73. Лакомский В. И., Торхов Г. Ф. О поглощении азота из плазмы жидким металлом // Докл. АН СССР. — 1968. — 83, № 1. — С. 87–89.
74. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М. Азот и водород в жидких металлах и сплавах. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1984. — 280 с.
75. Походня И. К., Швачко В. И. Образование фтористого водорода в дуговом разряде // Автомат. сварка. — 1981. — № 2. — С. 11–13.
76. Кушнерев Д. М. Некоторые особенности процессов в газовой фазе при сварке под керамическим флюсом // Свароч. пр-во. — 1959. — № 2. — С. 15–18.
77. Повышение стойкости металла шва против образования горячих трещин при сварке электродами с рутиловым покрытием / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. В. Булат, Г. А. Миронов // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 23–25.
78. Касаткин Б. С, Мусияченко В. Ф. Применение флюсов АН-17М и АН-43 для сварки сталей повышенной и высокой прочности // Там же. — С. 49–53.
79. Шлепаков В. Н., Супрун С. А., Котельчук А. С. Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информ. материалы СЭВ. — 1986. — Вып. 1. — С. 19.
80. Шлепаков В. Н. Взаимодействие азота с расплавленным металлом в условиях сварки порошковой проволокой // Металлургические и технологические проблемы сварки порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 51.
81. Шлепаков В. Н. Металлургия и технология дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей самозащитной порошковой проволокой. — Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1988. — 35 с.
82. Походня И. К., Демченко В. Ф., Демченко Л. И. Математическое моделирование поведения газов в сварных швах. — Киев: Наук. думка, 1979. — 54 с.
83. Походня И. К., Пальцевич А. П. Хроматографический метод определения количества диффузионного водорода в сварных швах // Автомат. сварка. — 1980. — № 1. — С. 37–39.
84. Пальцевич А. П. Разработка методов снижения содержания водорода в сварных швах при создании новых покрытых электродов и порошковых проволок основного вида: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1988. — 16 с.
85. *Untersuchung des Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff in deformierten Stahl und in Schweissguten aus basischen und rutilumhüllten Elektroden / U. Dilthey, S. Trube, I. K. Pochodnya, V. A. Pavlik / Schweissen und Schneiden.* — 1992. — № 12. — S. 668–671.
86. Походня И. К., Павлык В. А., Швачко В. И. Влияние термообработки и деформации на диффузию водорода и водородопроницаемость стали типа 10ХНЗДМ // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Металлургия сварки и сварочные материалы», 1–2 июня 1993 г., г. Санкт-Петербург. — С.-Пб: Изд-во Санкт-Петербург. техн. ун-та, 1993. — С. 158–160.
87. Походня И. К., Пальцевич А. П. Определение состава и количества газов в порах сварных швов // Автомат. сварка. — 1973. — № 6. — С. 18–19.
88. Походня И. К., Демченко Л. И. Расчетная оценка давления водорода в порах при охлаждении сварных швов // Там же. — 1978. — № 3. — С. 27–29.
89. Корицкий Г. Г. Исследование и разработка высокопроизводительных электродов карбонатно-флюоритного типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1969. — 16 с.
90. Походня И. К., Цыбулько И. И., Орлов Л. Н. Влияние состава шлака на содержание водорода в жидком металле при сварке в CO₂ // Автомат. сварка. — 1993. — № 11. — С. 8–14.
91. *Pavlyk V. A. The computerized analysis of hydrogen mass transfer in welds and steel // Mathematic modeling of weld phenomena 2.* — Cambridge: The Institute of Materials, 1995. — P. 186–203.
92. Гаврилюк Ю. А. Разработка порошковой проволоки для сварки неповоротных стыков труб магистральных трубопроводов из сталей с $\sigma_B = 650...750$ МПа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1989. — 16 с.
93. Изучение поведения диффузионного водорода в металле шва методами математического моделирования / И. К. Походня, Л. А. Тараборкин, В. Н. Упырь, А. П. Пальцевич // Информ. материалы СЭВ. — 1988. — Вып. 2. — С. 20–23.
94. Походня И. К., Головки В. Н. Роль стадий капли и ванны в окислении марганца и кремния при сварке в углекислом газе порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1974. — № 10. — С. 5–6.
95. Влияние кремния на структуру и хладостойкость металла швов при сварке низколегированных сталей высокопроизводительными электродами с покрытием основного вида / И. К. Походня, Б. В. Юрлов, Г. А. Шевченко, И. Р. Явдошин // Там же. — 1987. — № 2. — С. 1–6.
96. Прогнозирование химического состава металла, наплавленного электродами с рутиловым и ильменитовым пок-

- рытиями / И. К. Походня, Г. Е. Коляда, И. Р. Явдошин, О. Г. Касаткин // Там же. — 1976. — № 7. — С. 1–4.
97. Влияние степени окисленности на особенности структуры и механические свойства металла шва, выполненного электродами с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И. К. Походня, Г. Е. Коляда, И. Р. Явдошин и др. // Там же. — 1982. — № 2. — С. 10–14.
98. *Tsibulko I. I.* Calculation of thermodynamic equilibrium in metallurgical system gas–slag–metal // Proc. of the 2nd Intern. seminar «Numeric Analysis of Weldability», May 10–12, 1993, Austria, Graz-Segau. — Graz-Segau, 1993. — P. 6.
99. *Свецинский В. Г., Римский С. Т., Петров Ю. Н.* Особенности тонкой структуры металла швов, сваренных в защитных газах // Автомат. сварка. — 1974. — № 8. — С. 5–8.
100. *Мовчан Б. А., Позняк Л. А.* Радиографическое исследование внутрикристаллической неоднородности серы и фосфора в сварных швах // Там же. — 1956. — № 4. — С. 76–87.
101. *Касаткин Б. С., Россошинский А. А.* О влиянии легирующих элементов на развитие химической неоднородности сварных швов // Там же. — № 6. — С. 104–108.
102. *Позняк Л. А.* О влиянии углерода на дендритную неоднородность распределения серы в сварных швах // Там же. — 1957. — № 1. — С. 1–7.
103. *Россошинский А. А., Касаткин Б. С.* Влияние некоторых легирующих элементов на химическую неоднородность и механические свойства сварных швов // Свароч. пр-во. — 1957. — № 5. — С. 1–6.
104. *Позняк Л. А.* Исследование влияния марганца на развитие ликвации серы в сварных швах углеродистых сталей // Автомат. сварка. — 1958. — № 1. — С. 80–86.
105. *Грабин В. Ф.* Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 415 с.
106. *Мовчан Б. А.* Микроскопическая неоднородность литых сплавов. — Киев: Гостехиздат УССР, 1962. — 340 с.
107. *Исследование* микроскопической химической неоднородности в сварных швах / А. М. Макара, И. Я. Дзыкович, Н. А. Мосендз, Т. Н. Гордань // Автомат. сварка. — 1956. — № 11. — С. 5–11.
108. *Стеренбоген Ю. А., Демченко В. Ф., Абдулах В. М.* Исследование процесса образования химической неоднородности при кристаллизации металла шва // Там же. — 1977. — № 2. — С. 5–8.
109. *Особенности* дендритной ликвации элементов в сварных швах на углеродистых сталях / И. К. Походня, А. В. Булат, С. С. Пономарев, И. Р. Явдошин // Там же. — 1982. — № 5. — С. 1–3.
110. *Исследование* слоистой и зональной ликвации серы в сварных швах на углеродистых сталях / И. К. Походня, А. В. Булат, С. С. Пономарев, И. Р. Явдошин // Там же. — 1985. — № 5. — С. 20–22.
111. *Влияние* фосфора на структуру и свойства металла швов при сварке низколегированных сталей / А. А. Алексеев, И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Ю. Д. Морозов // Там же. — 1989. — № 4. — С. 7–10.
112. *Влияние* серы на хладостойкость металла швов низкоуглеродистых сталей / И. Р. Явдошин, А. А. Алексеев, И. К. Походня, Ю. Д. Морозов // Там же. — 1987. — № 9. — С. 19–22.
113. *Pokhodnya I. K., Voitkevitch V. G.* Investigation into chemical heterogeneity of weld metal alloyed with nickel and manganese. — S. 1, [1988]. — 30 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IW II-A-751–88).
114. *Походня И. К., Корсун А. О., Мешков Ю. Я.* Влияние ликвации кремния и марганца на условия образования игольчатого феррита // Автомат. сварка. — 1986. — № 9. — С. 18–22.
115. *Походня И. К., Корсун А. О., Головки В. В.* К вопросу о механизме образования слоистой неоднородности в структуре металла шва // Информ. материалы СЭВ. — 1987. — Вып. 1. — С. 3–9.
116. *Алексеев А. А., Юрлов Б. В., Шевченко Г. А.* Влияние никеля и марганца на структуру и свойства металла многослойных швов // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 17–20.
117. *Котельчук А. С., Шлепаков В. Н.* Оценка структурного состава металла низколегированных швов, выполненных порошковой проволокой // Информ. материалы СЭВ. — 1989. — Вып. 1. — С. 7–10.
118. *Kotelchuk A. S., Gluschenko O. B.* Practical application of the published model for estimating of fractions of different microstructure components in one-pass weld metal // Mathematic modeling of weld phenomena 2. — Cambridge: The Institute of Materials, 1995. — P. 153–161.
119. *Bhadeshia H. K. D. H., Svensson L. E., Grefoft B.* A model for the development of microstructure in low-alloy steel (Fe–Mn–Si–C) weld deposits // Acta Metallurgica. — 1985. — 233, № 7. — P. 1271–1283.
120. *Котельчук О. С.* Розробка порошкового дроту для зварювання вертикальних стикових з'єднань низьколегованих сталей з примусовим формуванням швів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1999. — 20 с.
121. *Металлургия* дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич и др. / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 2004. — 441 с.
122. *Походня И. К., Швачко В. И., Портнов О. М.* Математическое моделирование абсорбции газов металлами в процессе сварки // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 13–17.
123. *Pokhodnya I. K., Portnov O. M., Shvachko V. I.* Computer modeling of hydrogen absorption by electrode metal drop under its intensive evaporation // Proc. of the 6th Seminar on the numeric analysis of weldability, Oct. 1–3, 2001, Graz-Segau. — Graz-Segau: Technical University, 2002. — P. 895–902.
124. *Походня И. К.* Математическое моделирование процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 3–10.
125. *Походня И. К., Портнов О. М.* Математическое моделирование абсорбции газов каплей электродного металла // Там же. — 2003. — № 6. — С. 5–8.
126. *Лакомский В. И.* Растворимость водорода в жидком железе до температуры кипения // Докл. АН СССР. — 1962. — 143, № 3. — С. 628–629.
127. *Pokhodnya I. K.* Hydrogen behavior in welded joints // Proc. of seminar «Hydrogen management in steel weldments», Oct. 23, 1996., Melbourne. — Melbourne: WTIA, 1996. — P. 51.
128. *Походня И. К.* Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство: XXI сторіччя. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–89.
129. *Pokhodnya I. K., Shvachko V. I.* Negative ions in arc discharge column. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 1991. — 13 p.
130. *Походня И. К., Швачко В. И., Уткин С. В.* Расчетная оценка поведения водорода в дуговом разряде // Автомат. сварка. — 1998. — № 9. — С. 4–7.
131. *Шлепаков В. Н.* Современные методы исследования, прогнозирования и оценки свойств сварочных порошковых проволок // Там же. — 2005. — № 9. — С. 12–14.
132. *Влияние* состава сердечника порошковой проволоки на стабильность процесса дуговой сварки / В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко, А. В. Билинец // Там же. — № 6. — С. 18–22.
133. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей // Там же. — 2005. — № 4. — С. 31–33.
134. *Влияние* микроструктурных факторов на склонность к хрупкому разрушению сварных швов с ультранизким содержанием углерода / Г. М. Григоренко, В. В. Головки, В. А. Костин, В. Ф. Грабин // Там же. — 2005. — № 2. — С. 3–11.
135. *Морфологические* особенности микроструктуры металла шва низколегированных сталей с ультранизким содержанием углерода / И. К. Походня, В. В. Головки, И. И. Алексеев, В. А. Костин // Там же. — 2004. — № 7. — С. 7–22.

136. Головки В. В. Влияние кислородного потенциала сварочных флюсов на легирование твердого раствора металла сварных швов // Там же. — 2006. — № 10. — С. 10–14.
137. Грабин В. Ф., Головки В. В. Влияние распределения марганца между структурными составляющими на свойства низколегированных швов // Там же. — 2007. — № 12. — С. 26–29.
138. Головки В. В., Грабин В. Ф. Влияние легирования высокопрочного металла шва титаном на его структуру и свойства // Там же. — 2008. — № 1. — С. 17–23.
139. Григоренко Г. М., Костин В. А., Орловский В. Ю. Современные возможности моделирования превращения аустенита в сварных швах низколегированных сталей // Там же. — № 3. — С. 31–34.
140. Швачко В. И., Игнатенко А. В. Модель транспортировки водорода дислокациями // Там же. — 2007. — № 2. — С. 27–30.
141. Игнатенко А. В. Математическая модель обратимой водородной хрупкости // Там же. — № 8. — С. 12–15.
142. Игнатенко А. В. Математическая модель переноса водорода краевой дислокацией // Там же. — № 9. — С. 29–33.
143. Макара А. М., Лакомский В. И., Жовницкий И. П. Исследование распределения водорода в сварных соединениях среднелегированных сталей с аустенитным и ферритным швами // Там же. — 1958. — № 11. — С. 23–29.
144. Макара А. М. Исследование природы холодных околошовных трещин при сварке закаливающихся сталей // Там же. — 1960. — № 2. — С. 9–33.
145. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Механизм образования интеркристаллитных холодных трещин в околошовной зоне сварного соединения закаливающихся сталей // Пробл. прочности. — 1974. — № 10. — С. 3–9.
146. Кинетика перераспределения диффузионного водорода между металлом сварного шва и основным металлом при дуговой сварке / И. К. Походня, Л. И. Демченко, А. П. Пальцевич, В. Г. Устинов // Автомат. сварка. — 1976. — № 8. — С. 1–5.
147. Касаткин Б. С., Бреднев В. И. Особенности механизма образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированных высокопрочных сталей // Там же. — 1985. — № 8. — С. 1–6, 18.
148. Влияние водорода на склонность к образованию трещин в ЗТВ с концентратором напряжений / Б. С. Касаткин, О. Д. Смиян, В. Е. Михайлов и др. // Там же. — 1986. — № 11. — С. 20–23.
149. Структура ЗТВ и имитация холодных трещин при сварке среднелегированной стали / Б. С. Касаткин, Г. Н. Стрижук, А. К. Царюк и др. // Там же. — 1990. — № 2. — С. 1–5.
150. Миходуй Л. И., Мельник И. С., Позняков В. Д. Стойкость против замедленного разрушения низколегированных сварных швов при сварке высокопрочных сталей с пределом текучести более 600 МПа // Там же. — № 2. — С. 14–20.
151. Мусияченко В. Ф., Миходуй Л. И. Водород при сварке высокопрочных сталей и его влияние на стойкость сварных соединений образованию холодных трещин // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 161–168.
152. Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Мельник И. С. Особенности замедленного разрушения стали 12ГН2МФАЮ с различной концентрацией примесей // Автомат. сварка. — 1991. — № 12. — С. 6–20.
153. О механизме влияния водорода на хрупкость металлов / И. К. Походня, В. И. Швачко, В. Н. Упырь и др. // Докл. АН СССР. — 1989. — 308, № 5. — С. 1131–1134.
154. Походня И. К., Швачко В. И. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 1997. — № 5. — С. 3–12.
155. Касаткин Б. С., Миходуй Л. И. Влияние неметаллических включений и водорода на замедленное разрушение сварных соединений легированных сталей // Там же. — 1991. — № 8. — С. 1–6.
156. Водородное охрупчивание и образование холодных трещин при сварке стали 25Х2НМФА / Б. С. Касаткин, Г. И. Стрижук, В. И. Бреднев, А. К. Царюк // Там же. — 1993. — № 8. — С. 3–10.
157. Касаткин О. Г. Особенности водородного охрупчивания высокопрочных сталей при сварке (Обзор) // Там же. — 1994. — № 1. — С. 3–7.
158. Царюк А. К., Бреднев В. И. Проблема предотвращения холодных трещин (Обзор) // Там же. — 1996. — № 1. — С. 36–40.
159. Pokhodnya I. K., Shvachko V. I. Effect of hydrogen on brittleness of structural steels and welds // Proc. of the 8th Intern. conf. on fracture, June 1993, Ukraine, Kiev. — Lviv: Physical and Mechanical Institute, 1993. — P. 585–586.
160. Shvachko V. I. Studies using negative secondary ion mass-spectrometry: hydrogen on iron surface // Surface Sci. — 1998. — 411. — P. L882–L887.
161. Швачко В. И. Оборотно воднева крихкість ОЦК-сплавів заліза — конструкційних сталей: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — Харків, 2002. — 35 с.
162. Степанюк С. М. Оборотно воднева крихкість при зварюванні високоміцних низьколегованих сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 2001. — 18 с.
163. Костин В. А. Влияние структурно-фазового состава металла сварных швов низколегированных сталей на стабильность их механических свойств при низких температурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2005. — 16 с.
164. Головки В. В. Взаимодействие металла со шлаком при сварке под агломерированными флюсами низколегированных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 2006. — 32 с.
165. Порошковые проволоки для электродуговой сварки: Каталог-справочник / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков и др. / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1980. — 180 с.
166. Походня И. К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Прогресивні матеріали і технології. — В 2 т. — К.: Академперіодика, 2003. — Т. 1. — С. 7–31.
167. Технологии. Материалы. Оборудование: Каталог / Сварка, резка, наплавка, пайка, нанесение покрытий / НАН Украины Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 2005. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2005. — 247 с.
168. Ігор Костянтинівич Походня — К.: Наук. думка, 2007. — 160 с. — (Бібліографії вчених України / НАН України).

Review is made of the results of investigations, carried out at the E.O. Paton Electric Welding Institute, on the problems of metallurgy of arc welding of structural steels and development of welding consumables. Problems of arc stability and electrode metal transfer, evaporation of metal and slag, formation of aerosols, interaction of metal with gases and problems of porosity, modeling of interaction in multi-component systems, such as metal-gas, metal-gas-slag, chemical inhomogeneity, crystalline cracks, non-metallic inclusions in welds are described. Investigations of systems of alloying and prediction of weld metal microstructure were made, problem of formation of hydrogen-induced cold cracks in welded joints of high-strength low-alloy steels is elucidated. The achievements of the Institute in the development of new welding consumables are shown and the trends of future research works are outlined.

Поступила в редакцию 02.06.2008