



## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ Порошковой проволокой (Обзор)

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **В. Н. ШЛЕПАКОВ**, **С. Ю. МАКСИМОВ**, доктора техн. наук,  
**И. А. РЯБЦЕВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Обобщены результаты работ, выполненных Институтом электросварки им. Е. О. Патона в области сварки и наплавки порошковой проволокой.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка, наплавка, низколегированные стали, порошковая проволока, производство порошковой проволоки

Порошковая проволока является высокопроизводительным электродным материалом, позволяющим решать широкий круг задач, связанных с изготовлением сварных конструкций на современном уровне.

В начале 1950-х годов И. И. Фрумин предложил применять порошковую проволоку для автоматической наплавки под флюсом валков прокатных станов [1]. Было организовано производство наплавочной порошковой проволоки на Магнитогорском метизно-металлургическом заводе.

Идея использования порошковой проволоки в качестве сварочного материала оказалась весьма плодотворной. Во второй половине XX в. проводили исследования электрофизических, металлургических и технологических процессов сварки и наплавки порошковой проволокой. В результате разработано большое количество различных типов порошковых проволок разного назначения, созданы и отлажены технологии сварки и наплавки, а также промышленное оборудование и технологии производства порошковых проволок. Созданы материалы для сварки и наплавки в защитных газах, материалы, не требующие дополнительной защиты (самозащитные порошковые проволоки), порошковые проволоки для подводной, дуговой (электрогазовой) и электрошлаковой сварки с принудительным формированием металла швов, а также для десульфурации и легирования металлических расплавов.

В настоящее время сварка и наплавка порошковой проволокой, широко применяемые во многих странах мира, являются наиболее перспективными дуговыми процессами для соединения металлов, восстановления изделий или придания им необходимых свойств.

В настоящей статье сделан обзор работ коллектива ИЭС им. Е. О. Патона в этой области.

**Развитие сварки порошковой проволокой.** Первые промышленные образцы порошковой проволоки разработаны и опробованы в производственных условиях в 1959–1961 гг. [2–4]. Их успешные испытания при сварке металлоконструкций различного назначения стали началом открытия нового эффективного направления в области механизации и автоматизации дуговой сварки.

С этого периода в ИЭС им. Е. О. Патона проведены комплексные исследования, результатом которых стало создание основ металлургии и технологии сварки порошковой проволокой, разработка новых материалов и способов сварки с их применением.

Исследования особенностей процессов тепло- и массообмена при нагреве и плавлении порошковых композиций, развития реакций при сварочных скоростях нагрева и плавления стальной оболочки и порошкового сердечника позволили определить кинетику протекания процессов и предложить способы регулирования плавления композиционного материала, развития реакций газовой окисления, комплексообразования, которые при дуговой сварке сопровождаются образованием взаимодействующих фаз (металлической, газовой, шлаковой) [5–7].

Значительный объем исследований, сочетающих расчетные, экспериментальные методы и математическое моделирование, посвящен изучению физико-металлургических процессов в системе металл–газ–шлак. На основании полученных результатов определены основные принципы построения композиций сердечника порошковой проволоки для сварки в защитных газах и без дополнительной защиты [8–10]. Установление закономерностей абсорбции и десорбции газов при дуговой сварке плавлением дало возможность с новых позиций трактовать механизм образования пористости. Исследование поведения водорода в



сталей позволило определить влияние на сопротивление охрупчиванию (замедленному разрушению) ряда факторов, включающих распределение водорода в металле, состав и структуру металла, напряжение, скорость деформаций и температуру [5, 11–13].

Разработка порошковых проволок для сварки металлоконструкций из сталей высокой прочности потребовала проведения углубленных исследований в области физического металловедения сварных соединений. В этих исследованиях, помимо современных экспериментальных методов (растровой электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа, количественного металлографического анализа и др.), широко использовали методы математического моделирования [14–17].

Проведенные исследования позволили получить новые данные о распределении элементов в металле сварного соединения, составе и распределении неметаллических включений, развить представления о влиянии состава и структуры металла на микромеханизмы разрушения и хладостойкость. В работах [14, 18] содержатся новые данные о влиянии легирования, модифицирования и комплексного микролегирования на формирование структурных составляющих металла шва и показатели механических свойств металла шва и сварного соединения.

Важные научные сведения, имеющие большое практическое значение, получены в результате исследований стабильности горения дуги, плавления и переноса электродного металла с использованием современных информационно-измерительных систем и компьютерной обработки данных о сварочном процессе [17, 19]. Исследования термодинамических свойств металла и шлака в процессе их плавления и кристаллизации послужили основой для регулирования и оптимизации технологических оперативных свойств порошковых проволок, используемых при сварке в различных пространственных положениях со свободным и принудительным формированием шва [20–22]. Разработана методика и проведены работы по оценке санитарно-гигиенических показателей сварки порошковыми проволоками с различными типами сердечника [23]. ИЭС им. Е. О. Патона при участии Министерства черной металлургии СССР создан национальный стандарт 26271 «Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей», введенный в действие в 1984 г. и действующий в настоящее время (в редакции 1992 г.) на территории стран СНГ [24]. Вопросам теории и практики сварки порошковой проволокой посвящены монографии [5, 25–30].

Приоритет ИЭС им. Е. О. Патона в разработке порошковых проволок, способов сварки с их ис-

пользованием и оборудования защищен более 100 патентами и авторскими свидетельствами.

**Сварка самозащитными порошковыми проволоками.** Условия применения порошковых проволок без дополнительной защиты от атмосферного воздуха определяют основные требования к их свойствам, в частности, к обеспечению газошлаковой защиты расплавленного металла и использованию металлургических средств связывания азота в устойчивые нитриды, получению благоприятных сварочно-технологических характеристик, обеспечению высокой сопротивляемости образованию трещин и пор, достаточной степени раскисления и легирования металла, что позволяет достичь требуемого уровня механических свойств металла шва и сварного соединения. Для нелегированных углеродистых сталей требуемый уровень свойств обеспечивается благодаря использованию трубчатых порошковых проволок с порошковым сердечником рутил-органического типа [3, 31]. Такие проволоки выпускают с 1959 г. и по настоящее время, их применяют преимущественно при ремонтно-восстановительной сварке и изготовлении простых металлоконструкций.

Трубчатые самозащитные проволоки с использованием нитридообразующих элементов в сердечнике (алюминия, титана, циркония) разработаны в 1960-е годы [3, 32]. С учетом специфики легирования их применение ограничивалось определенными классами сталей, что определялось разницей в химическом составе металла шва и основного металла и возможным неблагоприятным влиянием на свойства металла сварного соединения. Со временем композиции проволок с сердечником фторидного и фторидно-оксидного типов были усовершенствованы, что дало возможность получить высокие показатели механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей обычной и повышенной прочности.

Особое место среди самозащитных порошковых проволок занимают проволоки двухслойной конструкции, разработанные ИЭС им. Е. О. Патона [4, 33, 34]. Такие проволоки с сердечником преимущественно карбонатно-флюоритного типа обеспечивают надежную газошлаковую защиту расплавленного металла от воздуха и практически не имеют ограничений в выборе типа легирования металла шва. Их используют при изготовлении множества сварных металлоконструкций различного назначения из низкоуглеродистых и низколегированных сталей повышенной прочности.

Сварка самозащитными порошковыми проволоками массово начала применяться с 1960 г. прежде всего при изготовлении и монтаже строительных, технологических конструкций и оборудования. В дальнейшем область их применения расширилась и на другие отрасли промышлен-



ности и строительства. Механизированную сварку самозащитными порошковыми проволоками, как правило, выполняют полуавтоматами с модернизированным подающим механизмом (четырёх- или двухроликовым шестеренчатого типа). В монтажных полуавтоматах легкого типа используют проволоку диаметром от 1,6 до 2,0 мм, а в стационарных или полустационарных (подвесных) — диаметром от 2,4 до 3,0 мм.

**Сварка газозащитными порошковыми проволоками.** Развитие сварки газозащитными порошковыми проволоками произошло в условиях начала массового применения дуговой сварки кремнемарганцевой проволокой сплошного сечения типа Св-08Г2С и другими в углекислом газе, а позже в смесях газов. Условия их применения, требования к сварочному оборудованию, типоразмеры порошковых проволок диаметром от 1 до 2 мм не создавали трудностей в освоении механизированной сварки в промышленных условиях. Основные задачи, которые решали при разработке порошковых проволок, состояли в разработке типов сердечника, систем легирования применительно к классу свариваемых сталей для достижения лучших технологических и технико-экономических показателей, чем при использовании проволок сплошного сечения [26, 35–38]. Дополнительная обработка металла шлаком, регулирование сварочно-технологических свойств с помощью порошкового сердечника, дополнительный присадочный металл в виде металлических составляющих сердечника обеспечили такие преимущества в использовании газозащитных порошковых проволок по сравнению с проволоками сплошного сечения, как высокую стабильность процесса сварки, малые потери на разбрызгивание, существенное улучшение качества деформирования швов, высокие показатели механических свойств металла шва, в особенности пластических характеристик. Достигнутое повышение производительности труда составляет от 15 до 30 % [27, 39, 40].

В последнее десятилетие развитие автоматической и роботизированной сварки стимулировало разработку газозащитных порошковых проволок с металлическим сердечником (metal-core), содержание неметаллических материалов в сердечнике которых не превышает 1 %. Такие порошковые проволоки отличаются высокой скоростью и эффективностью плавления (на 30...40 % выше, чем при сварке проволокой сплошного сечения), благодаря их применению снижаются затраты электроэнергии за счет высокой доли присадочного электродного металла в порошковом сердечнике [23, 41, 42]. Отсутствие шлака на поверхности сварного шва позволяет производить многослойную сварку без очистки от шлака. Высокие оперативные свойства при сварке в газовых смесях достигаются за счет

мелкокапельного или струйного переноса электродного металла. Получен также высокий уровень показателей механических свойств (прочности и вязкопластичности).

Газозащитные порошковые проволоки применяют в большинстве отраслей промышленности, где сваривают металлоконструкции из углеродистых и низколегированных сталей повышенной и высокой прочности (в машиностроении, судостроении, энергетическом строительстве и др.).

**Специализированные способы сварки порошковой проволокой.** К специализированным относят способы автоматической сварки, требующие использования специальных сварочного оборудования, технологий и проволок, которые отличаются особыми свойствами в соответствии с требованиями, предъявляемыми к условиям сварки и качеству сварных соединений. В их число входят дуговая сварка с принудительным (электрогазовая) и полупринудительным формированием шва, автоматическая сварка кольцевых швов с подформовкой, сварка электрозаклепками и др. [5, 43].

Электродуговая сварка вертикальных стыковых соединений листовых конструкций (резервуаров, пролетных строений мостов, секций судов на стапеле, корпусов конверторов, доменных печей, силосных башен и др.) предусматривает выполнение процесса с одно- или двухсторонней формовкой поверхности шва с использованием подвижных (медного охлаждаемого ползуна) или неподвижных средств (керамической или медной охлаждаемой подкладки) [44, 45].

Сварка горизонтальных швов на вертикальной плоскости проводится с использованием подформовки боковой поверхности сварочной ванны специальным движущимся ползуном, обеспечивающим «полупринудительное» формирование шва и требуемую форму его поверхности [5, 45, 46]. Значительный объем сварочной ванны, необходимость получения специфических свойств шлака, образующего прослойку между ползуном и поверхностью шва, отсутствие последующей термообработки однопроходного шва потребовали создания специальных порошковых проволок. Для сварки в монтажных условиях при проектном положении конструкций разработаны самозащитные порошковые проволоки двухслойной конструкции [9, 46].

Существенным шагом в развитии сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва явилось создание способа сварки, оборудования и порошковых проволок для выполнения кольцевых швов стыковых соединений труб при строительстве магистральных трубопроводов большого диаметра [47–50]. При этом были решены задачи технологии сварки во всех пространственных положениях с обеспечением стабиль-

но высокого качества сварных соединений трубных сталей классов прочности от X50 до X80 [29, 51]. Оборудование и технология сварки обеспечивают непрерывный контроль за тепловложением и программное управление процессом сварки.

**Порошковые проволоки для подводной сварки.** Первая половина 1960-х годов характеризуется началом интенсивного освоения залежей нефти и газа в Сибири и строительством магистральных трубопроводов для транспортировки газа в Европейскую часть СССР и страны Европы. С учетом большого количества водных преград на пути прокладки трубопроводов и необходимостью обеспечения надежной эксплуатации последних возникла потребность в создании технологии ремонта с помощью подводной сварки. Применяемые для этой цели механическая сварка сплошной проволокой в защитных газах и ручная сварка требуемое качество сварных соединений не обеспечивали. По предложению Б. Е. Патона было решено использовать механизированную сварку порошковыми проволоками.

С 1965 г. в ИЭС им. Е. О. Патона проводятся фундаментальные исследования металлургических особенностей мокрой подводной сварки и физических характеристик дуги, горящей под водой. Результатом этих работ явилось создание в 1967 г. порошковой проволоки ППС-АН1 рутил-руднокислого типа для сварки нелегированных конструкционных сталей на глубинах до 20 м [52]. Металл швов, выполненных механизированной сваркой порошковой проволокой, по сравнению с ручной сваркой, характеризовался стойкостью против образования пор и имел повышенные механические свойства. Новый процесс позволил почти в 3 раза увеличить производительность сварки, обеспечить удобство и безопасность работы водолаза-сварщика, улучшить видимость зоны горения дуги.

В дальнейшем исследования были направлены на определение солености воды, глубины выполнения работ, поиск путей оптимизации газоплазменной составляющей шихты порошковой проволоки и систем легирования [53–61], в результате созданы порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей с пределом текучести до 400 МПа на глубинах до 30 м, обеспечивающие получение металла шва с требуемым уровнем механических свойств.

С начала 2000-х годов начали сваривать под водой элементы конструкций АЭС из нержавеющей сталей типа 18-10. Использование разработанных порошковых проволок способствовало получению сварных швов, которые по показателям механических свойств превосходили швы, выполненные на воздухе электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б, например ЦЛ-11 [62].

С 1972 г. в ИЭС им. Е. О. Патона проводятся работы по созданию технологии механизированной дуговой резки порошковой проволокой взамен ручной электрокислородной резки. Применение этого способа повысило производительность процесса и позволило отказаться от подачи кислорода в зону резки, что особо важно при выполнении работ во взрывоопасных условиях. Разработанные порошковые проволоки позволяют выполнять технологическую и разделительную резку низколегированных и нержавеющей сталей, алюминия, меди, титана и их сплавов толщиной до 40 мм на глубинах до 60 м [63, 64].

Практическое использование разработок ИЭС им. Е. О. Патона началось в 1969 г. при ремонте водовода диаметром 1020×12 мм из стали 09Г2, проложенного через р. Днепр на глубине 12 м [65]. В 1971 г. с помощью подводной сварки порошковой проволокой впервые выполнили ремонт подводной части корпуса среднего рыболовного траулера-рефрижератора [66]. Морским регистром СССР траулер был допущен к дальнейшему плаванию без постановки в док. Одним из примеров использования сварки порошковой проволокой в строительстве может являться соединение на плаву четырех секций плавучей платформы «Приразломная» длиной 126 м с общей длиной трехпроходного углового шва около 1800 м [67] и сварку подводной части опор Подольско-Воскресенского мостового перехода через р. Днепр в Киеве, общая длина трехпроходного углового шва составила около 5000 м.

Порошковые проволоки для резки применяли при выполнении работ по расчистке прибрежных акваторий от затонувших судов, демонтаже подводных опор стационарных оснований, проведении аварийно-спасательных операций. С их использованием произведены работы по подъему подводной лодки в районе г. Петропавловск-Камчатский [68], ремонт причальных стенок в Санкт-Петербурге, на о. Диксон и др.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона технология мокрой подводной сварки и резки порошковой проволокой успешно применяется при восстановлении трубопроводов с максимальным диаметром до 1020 мм и рабочим давлением до 5 МПа, ликвидации на плаву навигационных и коррозионных повреждений судов без последующей постановки их в док, ремонте элементов конструкций гидроэлектростанций, причальных стенок, морских платформ, проведении аварийно-спасательных операций и др.

Разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области подводной мокрой сварки порошковой проволокой защищены 10 патентами.

**Порошковые проволоки для электродуговой наплавки.** В настоящее время порошковые проволоки являются наиболее распространенным



электродным материалом для автоматической и механизированной электродуговой наплавки деталей машин и механизмов в различных отраслях промышленности. По сравнению с проволоками сплошного сечения порошковые проволоки обеспечивают значительно большие возможности для легирования наплавленного металла.

Первая порошковая проволока ПП-3Х2В8, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона, предназначалась для наплавки валков прокатных станков. Состав этой проволоки выбран столь удачно, что она до сих пор широко используется в промышленности под наименованием ПП-Нп-35В9Х3ГСФ.

Были исследованы сварочно-технологические свойства нового наплавочного электродного материала, разработаны режимы наплавки проволоками, обеспечивающие получение качественного наплавленного металла [1, 69]. Первые порошковые проволоки предназначались для наплавки под флюсом. В результате исследований взаимодействия расплава шлака с легирующими элементами [1, 69–73] установлена степень их окисления или восстановления из шлака, что позволило с достаточной степенью точности рассчитать состав шихты порошковых проволок для наплавки.

В работах [1, 74–77] исследован механизм образования кристаллизационных трещин при наплавке и сварке и предложены меры борьбы с ними. Установлено, что формирующиеся при наплавке высокоуглеродистых высокохромистых сталей ледебуритные легкоплавкие эвтектики при определенном содержании углерода могут залечивать несплошности, которые образуются при затвердевании таких сталей.

При наплавке деталей из низко- и высокоуглеродистых сталей практически постоянно приходится сталкиваться с проблемой появления холодных трещин. Наиболее распространенным способом борьбы с холодными трещинами является предварительный подогрев деталей перед наплавкой и отпуск после наплавки. Для наплавки таких деталей без или с минимальным подогревом в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны порошковые проволоки ПП-АН193, ПП-АН195, ПП-АН196 и ПП-АН202, обеспечивающие получение наплавленного металла с высокой трещиностойкостью [78].

Введение дополнительных минеральных и металлических компонентов в шихту порошковых проволок дало возможность бороться с таким дефектом наплавленного металла, как поры. Для предупреждения водородной пористости И. И. Фрумин предложил вводить в сердечник порошковой проволоки тетрафторид щелочных металлов.

Для механизированной дуговой наплавки открытой дугой в шихту порошковых проволок вводятся газо- и шлакообразующие компоненты и различные добавки, стабилизирующие процесс горения дуги и препятствующие образованию пор

в наплавленном металле. Создан ряд самозащитных порошковых проволок для наплавки различных износостойких сплавов [79, 80].

В ИЭС им. Е. О. Патона проводили исследования особенностей и характерных видов износа деталей различных машин и механизмов и разрабатывали соответствующие порошковые проволоки. Для наплавки прокатных валков и штампов различного назначения создана гамма порошковых проволок ПП-Нп-35В9Х3СФ, ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-АН132, ПП-АН140, ПП-АН147, ПП-АН148, применение которых позволяет многократно восстанавливать изношенные детали. Для восстановления и упрочнения деталей металлургического оборудования разработаны порошковые проволоки ПП-АН158, ПП-АН159 и ПП-АН174, обеспечивающие получение наплавленного металла типа высокохромистая нержавеющая сталь с различной твердостью и износостойкостью [81].

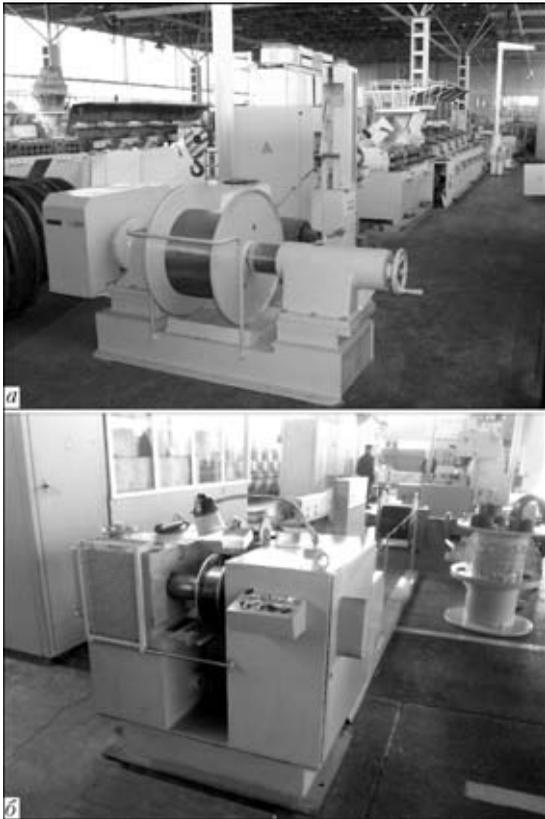
Для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного износа с ударной нагрузкой различной интенсивности, рекомендуются порошковые проволоки ПП-АН125, ПП-АН135, ПП-АН170, ПП-АН192, ПП-АН197 и ПП-АН105.

Для наплавки штоков шахтных гидрокрепей проходческих комбайнов, плунжеров гидропрессов и других подобных деталей при изготовлении и восстановлении разработана порошковая проволока ПП-АН165. Металл, наплавленный этой проволокой, отличается достаточно высокой коррозионной стойкостью в водно-солевых растворах и стойкостью против износа при трении металла по металлу. Применение наплавки позволяет исключить экологически вредную операцию — хромирование деталей.

Для наплавки валов, осей, крановых колес и других деталей, работающих в условиях трения металла по металлу без или с абразивной прослойкой, рекомендуется применять порошковые проволоки ПП-АН120, ПП-АН126, ПП-АН194 и ПП-АН198.

К настоящему времени в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны и производят порошковые проволоки для наплавки под флюсом, открытой дугой, а также в защитных газах деталей различных машин и механизмов, которые эксплуатируют в условиях практически всех известных видов изнашивания [82]. Оригинальные составы порошковых проволок для наплавки защищены пятью патентами.

**Создание производства порошковых проволок.** В 1950-е годы и начале 1960-х годов порошковые проволоки изготавливали на небольших участках, оборудованных при электродном производстве. Работы по проектированию и организации полномасштабного производства порошковой проволоки, а также разработке и реализации соответствующей промышленной технологии проводили в ИЭС им. Е. О. Патона с привлечением организаций и предприятий, имевших



Автоматизированная линия по изготовлению порошковой проволоки (формовка, заполнение, волочение) (а) и установка для намотки порошковой проволоки на каркасные катушки К-300 (BS-300) (б)

опыт в создании электродных производств, среди которых институты «Гипрометиз» (г. Ленинград), НИИМетиз (г. Магнитогорск), Алма-Атинский завод тяжелого машиностроения, организации и предприятия Минмонтажспецстроя и др. Главной организацией и координатором всех работ являлся ИЭС им. Е. О. Патона. Институтом выполнены исследования технологии изготовления порошковой проволоки различных видов. Изучение совместной деформации сплошных и сыпучих тел, силовых условий при различных схемах обработки и построение технологического процесса позволили создать научные и инженерные основы промышленной технологии изготовления. Разработаны конструкции агрегатов, устройств и приборов для оснащения технологических производственных линий, в частности формующих устройств, дозаторов шихты непрерывного действия, агрегатов обезжиривания, сварки и намотки стальной ленты, установок непрерывного съема проволоки, приборов контроля и мониторинга заполнения проволоки шихтой.

ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона разработал конструкции специализированных типов оборудования для формовки различных порошковых проволок, дозирующих устройств для заполнения стальной оболочки шихтой, устройств для непрерывного съема порошковой проволоки с воло-

кательных станков, установок и оснастки для обезжиривания холоднокатаной ленты, сварки лент, смесителей шихты и другого технологического оборудования. Пилотные образцы оборудования и головные промышленные установки изготавливал Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона. Разработки института передавали предприятиям-изготовителям оборудования. На Алма-Атинском заводе тяжелого машиностроения освоено промышленное производство комплектов технологических линий по изготовлению порошковых проволок, которыми оснащались строящиеся производства (Нижнеднепровское метизное производственное объединение, Череповецкий сталепрокатный завод, Днепропетровский завод сварочных материалов и др.). В 1978 г. работа сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона по созданию, организации массового производства и внедрению новых материалов (порошковых проволок) для механизированной сварки, обеспечивающих повышение производительности труда и качества сварных конструкций, была удостоена Государственной премии СССР. В авторский коллектив входили И. К. Походня, И. И. Фрумин, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер, а также сотрудники указанных выше организаций и заводов.

В 1978 г. в состав ИЭС им. Е. О. Патона был передан котельно-сварочный завод Минчермета УССР. За короткий срок завод существенно реконструировали и оснастили современным оборудованием. К настоящему времени Государственное предприятие «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» является ведущим в Украине по производству сварочных материалов — электродов, порошковых проволок (рисунок), сварочных флюсов.

Высокий уровень разработок сварочных порошковых проволок, технологий их изготовления и производственного оборудования получил признание во многих зарубежных странах. Передача документации, поставка оборудования и освоение технологий по разработкам ИЭС им. Е. О. Патона выполнены на основе лицензионных соглашений и контрактов с предприятиями Франции, ФРГ, США, КНР, Японии, Аргентины и др.

Вопросы теории и практики изготовления порошковых проволок обобщены в работе [83]. Приоритет разработок ИЭС им. Е. О. Патона в области технологий изготовления проволок и соответствующего оборудования защищен более чем 50 патентами.

1. Фрумин И. И. Легирование наплавленного металла при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1952. — № 1(22). — С. 3–19.
2. Походня И. К., Суптель А. М. Механизированная сварка открытой дугой порошковой проволокой // Там же. — 1959. — № 11. — С. 3–12.

3. Походня И. К., Шлепаков В. Н. Порошковая проволока с сердечником основного типа для полуавтоматической сварки открытой дугой // Там же. — 1961. — № 7. — С. 87–88.
4. Походня И. К. Состояние и перспективы развития способа механизированной сварки открытой дугой порошковой проволокой // Материалы III Сибир. науч.-техн. конф. по сварке, наплавке и газопламенной обработке металлов. — Красноярск, 1963. — С. 52–80.
5. Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 223 с.
6. Походня И. К., Шлепаков В. Н. Эффективность защиты металла при сварке порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1970. — № 2. — С. 10–12.
7. Shlepakov V. N., Suprun S. A., Kotel'chuk A. S. Kinetics of gas generation in flux-cored wire welding. — S. I., [1987]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1046–87).
8. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
9. Шлепаков В. Н. Кинетика процессов взаимодействия металла с газами при сварке порошковой проволокой // Проблемы сварки и специальной электротехнологии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 168–173.
10. О механизме образования пор в сварных швах / И. К. Походня, Л. И. Демченко, В. Н. Шлепаков и др. // Автомат. сварка. — 1978. — № 6. — С. 1–5.
11. Походня И. К., Демченко В. Ф., Демченко Л. И. Математическое моделирование поведения газов в сварных швах. — Киев: Наук. думка, 1979. — 54 с.
12. Шлепаков В. Н., Гиок С. П. Использование валиковой щелевой пробы для оценки стойкости против образования холодных трещин // Автомат. сварка. — 1987. — № 5. — С. 13–18.
13. Новый метод количественного определения чувствительности сталей к водородному охрупчиванию / И. К. Походня, В. И. Швачко, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // Физ.-хим. мех. материалов. — 1998. — № 4. — С. 79–84.
14. Шлепаков В. Н., Шевченко Г. А. Легирование сердечника порошковой проволоки при сварке сталей с различным уровнем прочности // Металлургические и технологические проблемы сварки порошковой проволокой: Докл. I Междунар. шк. стран-членов СЭВ «Сварка порошковой проволокой», София, апр. 1986. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 84–88.
15. Шлепаков В. Н., Котельчук А. С. Оценка структурного состава металла низколегированных швов, выполненных порошковой проволокой // Координационный центр стран-членов СЭВ по проблеме «Развитие научных основ и разработок новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создание эффективных сварочных материалов и оборудования». — 1989. — Вып. 1. — С. 7–10.
16. Shlepakov V. N., Kotelchuk A. S., Naumeiko S. M. Effect of nitride-forming elements on composition and structure of low-alloyed weld metal // The Paton Welding J. — 2000. — № 6. — С. 6–9.
17. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.; под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 221 с.
18. Влияние легирования на механические свойства сварных швов, выполненных порошковыми проволоками / И. К. Походня, Л. Н. Орлов, Г. А. Шевченко, В. Н. Шлепаков // Автомат. сварка. — 1985. — № 7. — С. 8–11.
19. Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Супрун С. А. Идентификация состава порошковых проволок по электрическим сигналам дуговой сварки // Там же. — 1999. — № 8. — С. 37–42.
20. Походня И. К., Шлепаков В. Н., Орлов Л. Н. Технологические свойства шлаков при дуговой сварке порошковой проволокой с принудительным формированием шва // Координационный центр стран-членов СЭВ по проблеме «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создание эффективных сварочных материалов и оборудования». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 94–97.
21. Шлепаков В. Н., Наумейко С. М. Влияние поверхностного натяжения солеоксидных сварочных шлаков на показатели сварочно-технологических свойств самозащитной порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 24–27.
22. Шлепаков В. Н., Билинец А. В. Порошковые проволоки с металлическим сердечником для сварки в защитных газах // Там же. — 2003. — № 3. — С. 53–54.
23. Методика первичной санитарно-гигиенической оценки порошковых проволок / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. А. Супрун и др. // Координационный центр стран-членов СЭВ по проблеме «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создание эффективных сварочных материалов и оборудования». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 28.
24. ГОСТ 26271–84. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия. — Введ. 07.09.84
25. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие газов с металлами / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, В. И. Швачко и др.; под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 2004. — 442 с.
26. Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. Электродуговая сварка порошковой проволокой. — М.: Машиностроение, 1973. — 38 с.
27. Сварка порошковой проволокой деталей и узлов строительных и дорожных машин / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков и др. — М., 1975. — 43 с. — (Сер. V «Технология, экономика, организация производства» / ЦНИИТЭстроймаш).
28. 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.
29. Дуговая сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов / И. К. Походня, М. З. Шейкин, В. Н. Шлепаков и др. — М.: Недра, 1987. — 189 с.
30. Pokhodnya I. K., Shlepakov V. N. Welding with flux-cored wire / Ed. B. E. Paton. — S. I.: Harwood acad. publ., 1995. — 73 p. — (Welding and Surfacing Rev.; Vol. 4, pt 4).
31. Суптель А. М., Походня И. К. Порошковые проволоки рутилового типа для сварки открытой дугой: Инструктивные материалы по применению. — Киев: О-во «Знание», 1969. — 31 с. — (Семинар «Сварочные порошковые проволоки»).
32. Походня И. К., Шлепаков В. Н. Порошковая проволока ПП-АН3 для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей на повышенных токах // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 61–65.
33. Походня И. К., Шлепаков В. Н. Порошковая проволока для сварки открытой дугой малоуглеродистых и низколегированных сталей // Свароч. пр-во. — 1967. — № 2. — С. 21–22.
34. Походня И. К., Шлепаков В. Н. Порошковые проволоки карбонатно-флюоритного типа для сварки открытой дугой: инструкт. материалы. — Киев: О-во «Знание» УССР, 1969. — 45 с. — (Семинар «Сварочные порошковые проволоки»).
35. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой и перспективы ее развития // Свароч. пр-во. — 1967. — № 11. — С. 43–45.
36. Походня И. К., Шлепаков В. Н., Супрун С. А. Порошковая проволока ПП-АН9 с улучшенными гигиеническими характеристиками // Там же. — 1973. — № 1. — С. 48–49.
37. Порошковая проволока ПП-АН54 для сварки высокопрочных низколегированных сталей / И. К. Походня, Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко и др. — Киев, 1984. — 4 с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 58/1461).

38. Влияние состава сердечника порошковой проволоки и защитного газа на стабильность процесса дуговой сварки / В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко, А. В. Билинец // Автомат. сварка. — № 6. — 2005. — С. 18–22.
39. Походня И. К., Головка В. Н. Высокопроизводительная порошковая проволока для сварки в углекислом газе // Там же. — 1974. — № 7. — С. 66–70.
40. Особенности процесса сварки порошковой проволокой в углекислом газе / И. К. Походня, В. Н. Головка, С. А. Супрун, В. Н. Шлепаков // Координационный центр стран-членов СЭВ по проблеме «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки различных материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создание эффективных сварочных материалов и оборудования». — Киев, 1978. — Вып. 1. — С. 109–116.
41. Основы построения композиций порошковых проволок с высокой производительностью сварки / В. Н. Шлепаков, Ю. А. Гаврилюк, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко // Сб. докл. V Междунар. конф. «Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкуренентоспособность», Артемовск, 7–11 июня 2010. — Киев, 2010. — С. 172–178.
42. Shlepakov V. N., Gavriulyuk Yu. A., Kotelchuk A. S. State-of-the-art of development and application of flux-cored wires for welding of carbon and low-alloyed steels // The Paton Welding J. — 2010. — № 3. — P. 35–42.
43. Дуговая сварка вертикальных швов с принудительным формированием / И. К. Походня, В. Я. Дубовецкий, В. Н. Шлепаков и др. // Автомат. сварка. — 1966. — № 11. — С. 67–70.
44. Автоматическая сварка вертикальных швов технологических металлоконструкций АЭС самозащитной порошковой проволокой / И. К. Походня, Б. Ф. Лебедев, В. Н. Шлепаков и др. // Энергомашиностроение. — 1981. — № 5. — С. 34–36.
45. Перспективы применения в судостроении сварки самозащитной порошковой проволокой / И. К. Походня, С. А. Супрун, А. И. Казацкий, В. В. Кухаренко // Судостроение. — 1987. — № 5. — С. 24–26.
46. Estimating of the characteristics of flux-cored wire welding under the wind flow effect / V. N. Shlepakov, S. A. Suprun, A. S. Kotelchuk // Proc. of Intern. conf. «Welding under extreme conditions», Helsinki, Finland, Sept. 4, 1989. — Oxford, New York: Pergamon press, 1990. — P. 171–179.
47. Hochleistungsschweissen von Vertikalnahten mit Zwangsformung / I. K. Pochodnja, V. N. Shlepakov, W. M. Pjuschchenko, A. S. Kotelchuk // Sondertagung «Schweissen in Schiff- und Metallbau» mit Vorkolloquium, Rostok, Mai 4–5, 1995. — Duesseldorf: DVS, 1995. — 23 S.
48. Resource-saving technology of automatic welding of main pipelines with flux-cored wire and at forced weld formation / I. K. Pokhodnya, V. N. Shlepakov, V. Ya. Dubovetsky et al. — S. 1., [1983]. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XI-412–83).
49. Shlepakov V. N. Flux-cored wire automatic electric arc welding of position butt joints of pipelines // Proc. of the Intern. conf. on welding of pipelines, Istanbul, May 12–13, 1998. — Istanbul, 1998. — P. 1–8.
50. Автоматическая сварка неповоротных стыков труб большого диаметра самозащитной порошковой проволокой / Б. Е. Патон, И. К. Походня, В. Я. Дубовецкий и др. // Стр-во трубопроводов. — 1981. — № 2. — С. 22–24.
51. Resources-saving technology of position automatic flux-cored wire welding of gas pipelines with a forced weld formation / I. K. Pokhodnya, V. N. Shlepakov, V. Ya. Dubovetsky et al. // Welding in energy related projects: Proc. of the Intern. conf. held in Toronto, Sept. 20–21, 1983. — Toronto, 1983. — P. 133–139.
52. Савич И. М. Подводная сварка порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1969. — № 10. — С. 70.
53. Кононенко В. Я. Влияние углерода, кремния и марганца на технологические свойства и ударную вязкость металла шва, сваренного под водой // Подводная сварка и резка металлов / Под ред. А. Е. Асниса. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 59–76.
54. Аснис А. Е., Игнатушенко А. А., Дьяченко Ю. В. Способ снижения содержания водорода в ЗТВ при механизированной подводной сварке // Автомат. сварка. — 1983. — № 8. — С. 1–4.
55. Ignatushenko A. A., Denisenko A. V., Djachenko Yu. V. Mechanized underwater welding using austenitic consumables // Underwater welding. — Oxford: Pergamon press, 1983. — P. 227–236.
56. Савич И. М., Кононенко В. Я., Гусаченко А. И. Структура металла шва и околошовной зоны при сварке в воде различной солиности // Автомат. сварка. — 1984. — № 4. — С. 50–52.
57. Гусаченко А. И., Кононенко В. Я. Автоматическая сварка под водой низколегированных сталей порошковой проволокой // Там же. — 1989. — № 7. — С. 32–34.
58. Грецкий Ю. Я., Максимов С. Ю. Влияние никеля на структуру и свойства швов при подводной сварке порошковой проволокой // Там же. — 1995. — № 8. — С. 56–57.
59. Yushchenko K. A., Gretsii Yu. Ya., Maksimov S. Yu. Study of physico-metallurgical peculiarities of wet arc welding of structural steels // Underwater wet welding and cutting. — S. 1.: Woodhead publ. Ltd., 1998. — P. 6–29.
60. Структура и свойства металла, наплавленного под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой / С. Ю. Максимов, И. М. Савич, С. М. Захаров и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 19–22.
61. Грецкий Ю. Я., Максимов С. Ю. Повышение устойчивости дуги, горящей в воде, при сварке порошковой проволокой // Там же. — 2004. — № 2. — С. 11–15.
62. Самозахисний порошок дріт для підводного зварювання високолегованих сталей типу 12Х18Н10Т / К. А. Ющенко, Ю. М. Каховський, Г. В. Фадеева та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин: Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / Наук. керівник — академік Б. Е. Патон. — К.: Ін-т електростроїварки ім. Е. О. Патона НАН України, 2006. — С. 532–538.
63. Данченко М. Е., Савич И. М., Нефедов Ю. Н. Подводная дуговая резка порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1988. — № 4. — С. 59–61.
64. Грецкий Ю. Я., Нефедов Ю. Н. Технология механизированной подводной дуговой резки порошковой проволокой углеродистых и легированных сталей. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1993. — 24 с.
65. Кононенко В. Я., Рыбченко А. Г. Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов // Автомат. сварка. — 1994. — № 9/10. — С. 29–32.
66. Кононенко В. Я., Грицай П. М., Семенкин В. И. Применение мокрой механизированной сварки при ремонте корпусов судов // Там же. — 1994. — № 12. — С. 35–38.
67. Кононенко В. Я. Применение технологии механизированной подводной сварки при строительстве МЛСП «Приразломная» // Там же. — 2005. — № 12. — С. 53.
68. Савич И. М., Максимов С. Ю. Применение механизированной резки при подъеме подводной лодки // Там же. — 2001. — № 2. — С. 59–60.
69. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
70. Подгаецкий В. В. Реакции в атмосфере дуги при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1953. — № 1. — С. 10–17.
71. Походня И. К. Взаимодействие шлака и металла при дуговой и электрошлаковой наплавке высокохромистых ледебуритных сталей // Там же. — 1955. — № 5. — С. 33–46.
72. Низкокремнистые флюсы для автоматической сварки и наплавки / И. И. Фрумин, Д. М. Рабкин, В. В. Подгаецкий и др. // Там же. — 1956. — № 1. — С. 3–20.
73. Фрумин И. И. О достижимости равновесия между шлаком и металлом при сварке и наплавке // Там же. — 1958. — № 1. — С. 3–13.



74. Фрумин И. И. О механизме возникновения кристаллизационных трещин при сварке и наплавке // Там же. — 1957. — № 1. — С. 4–8.
75. Походня И. К. О влиянии скорости охлаждения на образование кристаллизационных трещин // Там же. — 1955. — № 6. — С. 64–73.
76. Походня И. К. О влиянии химического состава железомуглеродистых сплавов на образование кристаллизационных трещин // Там же. — 1956. — № 6. — С. 55–63.
77. Походня И. К. Горячие (кристаллизационные) трещины при наплавке высокоуглеродистых высокохромистых ледебуритных сталей // Горячие трещины в сварных соединениях, слитках и отливках. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — С. 68–91.
78. Кондратьев И. А., Рябцев И. А., Черняк Я. П. Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситностареющей стали // Автомат. сварка. — 2006. — № 4. — С. 50–53.
79. Юзвенко Ю. А. Порошковые проволоки для наплавки // Там же. — 1972. — № 5. — С. 67–71.
80. Юзвенко Ю. А., Кирилюк Г. А. Наплавка порошковой проволокой. — М.: Машиностроение, 1973. — 45 с.
81. Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Екотехнологія, 1999. — 62 с.
82. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
83. Производство порошковой проволоки: Учеб. пособие для вузов / И. К. Походня, В. Ф. Альтер, В. Н. Шлепаков и др. — Киев: Виц. шк., 1980. — 231 с.

The paper summarizes the results of the work performed by PWI in the field of flux-cored wire welding and surfacing.

Поступила в редакцию 12.07.2010

**Вышел в свет очередной выпуск журнала  
weld+vision № 25 (октябрь 2010 г.)  
на русском языке  
(издатель — «Фрониус Украина»)**



### Содержание

<b>От редактора</b> .....	3-6
От быстрых успехов к долгосрочным результатам	
<b>Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы</b> .....	7-11
Фирма «Fronius» работает на долгосрочную перспективу	
Усовершенствованный процесс СМТ — СМТ Advanced: повышение производительности наплавки на 60 %	
<b>Виртуальное обучение в области сварки</b>	
<b>Кратко и по существу</b> .....	12-13
<b>Новости от «Fronius»</b>	
<b>Инновации</b> .....	14-15
Оптимизированные процессы обещают огромную потенциальную экономию	
<b>Практические примеры</b> .....	16-19
«TimeTwin Digital» вдвое сокращает время сварки	
Мебельная фирма «Embru» получает прибыль благодаря сварке	
<b>О фирме</b> .....	20-21
Мечта, обретающая форму	
<b>Информация для путешественников</b> .....	22-23
Другой взгляд на Париж	

**Бесплатную подписку можно оформить  
в редакции журнала «Автоматическая сварка».  
Контактный тел./факс: 528-34-84**