

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ СВАРОЧНЫЙ ПРОЦЕСС. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ (Обзор)

Б.Е. Патон, К.А. Ющенко, С.М. Козулин, И.И. Лычко

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Изложены результаты аналитического обзора исследований и промышленного применения электрошлаковой сварки и наплавки в Украине, а также зарубежных странах с начала XXI века. Анализ показал, что объем применения электрошлаковой сварки металла большой толщины (более 100 мм) в разных отраслях промышленности заметно уменьшился, однако в последние годы отмечается устойчивый рост ее применения в строительстве мостов, высотных зданий, судостроении, а также при ремонте крупных деталей машин на месте их эксплуатации. Новые стали, малочувствительные к росту зерна в зоне термического влияния, позволили расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых с применением электрошлаковой сварки. Существенно увеличился объем применения электрошлаковой наплавки ленточным электродом для антикоррозионных покрытий в сосудах высокого давления, сепараторах, парогенераторах, компрессорах и другом оборудовании, которое эксплуатируется в нефтегазовой, энергетической, металлургической, целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Библиогр. 51, рис. 5.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, электрошлаковая наплавка, сварочное оборудование, технология, проволочный электрод, плавящийся мундштук, ленточный электрод, удельная погонная энергия, сталь, тепловложение, зона термического влияния, ударная вязкость

Электрошлаковый сварочный процесс в Украине. Семьдесят лет назад [1] в Институте электросварки (г. Киев) для сварки вертикальных стыковых соединений кожухов доменных печей, впервые в мировой практике был разработан и успешно реализован новый способ электрической сварки плавлением, получивший название электрошлаковая сварка (ЭШС). Этот способ отличался целым рядом технических и технологических преимуществ относительно существующих промышленных способов сварки плавлением [2].

Феномен появления, развития и последующего применения способов ЭШС и электрошлаковой наплавки (ЭШН) в промышленно-развитых странах можно объяснить высоким потенциалом процесса [3, 4] для развития экономики. Успешному его применению способствовало сотрудничество Института с ведущими промышленными предприятиями СССР, СЭВ, а также многими зарубежными фирмами [2, 5].

На пороге XXI века высокий научно-технический уровень существующих способов, сварочного оборудования, оснастки и технологий ЭШС и ЭШН в сварочном производстве различных отраслей машиностроения и строительстве позволяли успешно решать важные задачи. Например, разработка техники и технологии ЭШС плавящимся мундштуком конструкций из нержавеющей стали типа 18-8; исследование и разработка технологии и техники ЭШС сталей применительно к элементам сверхпроводящих магнитных систем

термоядерного реактора «ITER»; разработка технологии и техники ЭШС неповоротных стыков титановых кольцевых заготовок диаметром 1000 мм с толщиной стенки 100 мм; сварка электродом большого сечения меди с хромоциркониевой бронзой применительно к изготовлению мощных токоподводов системы питания термоядерной установки «Токамак» и др. [3, 4, 6].

Тенденции развития ЭШС за 10...15 лет, начиная с 1990 г. и анализ информации (около 3000 наименований из 37 стран) [3] позволили определить и систематизировать основные направления:

- создание низколегированных сталей с хорошей свариваемостью, сварные соединения которых в толщинах до 200 мм имеют требуемые свойства без последующей термообработки;
- совершенствование и создание новых присадочных материалов для сварки;
- применение новых низколегированных сталей (до 30...40 % от общего объема материалов), используемых в конструкциях, выполняемых ЭШС;
- разработка требований к качеству металла и исходным заготовкам большой толщины (до 3000 мм) из легированных сталей повышенной прочности;
- совершенствование техники и технологии ЭШС кольцевых стыков, преимущественно для крупных заготовок диаметром свыше 2500 мм;
- исследование и разработка новых типов сварных соединений при снижении удельных затрат на единицу продукции;

- разработка приемов и способов получения неразъемных соединений компактного сечения с применением электрошлакового процесса и жидкого присадочного металла.

Прогнозные оценки на будущее сварочного производства предусматривали, прежде всего, создание и применение нового поколения сварочного оборудования с программным управлением технологическим процессом ЭШС. Причем, при внедрении нового сварочного оборудования целесообразен максимально возможный уровень механизации и автоматизации сборочных и вспомогательных операций, так как они составляют до 50...70 % от времени общего цикла изготовления сварной металлоконструкции [3].

Для реализации технологий ЭШС и ЭШН крупногабаритных, нетранспортабельных металлоконструкций в монтажных условиях создавали мобильные группы, оснащенные необходимым комплектом оборудования, включая средства местной термообработки.

В сварочном производстве машиностроительных отраслей и строительстве наибольшее применение получили два способа: электрошлаковая сварка проволочным электродом (ЭШС ПЭ) и плавящимся мундштуком (ЭШС ПМ). Ими выполняются основные виды соединений (стыковые, угловые, тавровые) и типы швов (прямолинейные, кольцевые, переменного профиля). Для этих спо-

собов в ИЭС им. Е. О. Патона создан целый ряд сварочных аппаратов, среди которых серийно выпускаемые аппараты типа А-535, А-1304 и А-820К [2, 3].

В 1990 г. разработан новый аппарат для ЭШС проволочными электродами металла толщиной до 450 мм (взамен А-535), получивший индекс АШ-112 [3]. Для ЭШС стыков из низколегированных сталей типа 09Г2С толщиной 30...100 мм разработан монтажный аппарат нового поколения типа АД-381Ш (рис. 1) [7].

В 2004–2006 гг. для ЭШС неповоротных кольцевых швов крупногабаритных металлоконструкций диаметром 14000 мм и более создан двухэлектродный аппарат, не имеющий аналогов в мировой практике сварочного производства АШ 115 М (рис. 2) [8].

Для осуществления ЭШС ПМ разработаны аппараты типа АШ-110, АШ-113, и АШП113 М2 (рис. 3), обеспечивающие дублирование в процессе сварки практически всех элементов сварочной цепи (механические и электрические) [3, 9, 10]. Аппараты нового поколения модульного типа снабжены системами управления сварочным процессом и позволяют вести непрерывный мониторинг и паспортизацию параметров режима [11].

Развитие ЭШС в Украине и мировой практике продолжается как в отношении исследования собственно сварочного процесса, так и его промышленного использования.

Важным направлением развития электрошлакового процесса является регулирование ввода и распределения в зоне сварного соединения тепло-

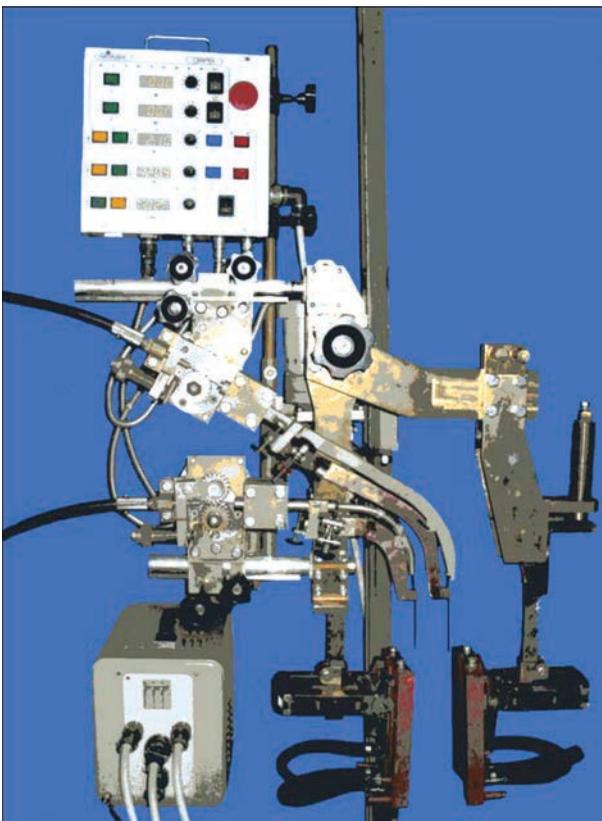


Рис. 1. Двухэлектродный аппарат АД-381Ш для ЭШС металла толщиной 30...100 мм



Рис. 2. Двухэлектродный аппарат АШ 115М2 для ЭШС неповоротных кольцевых и криволинейных стыков толщиной 40...200 мм

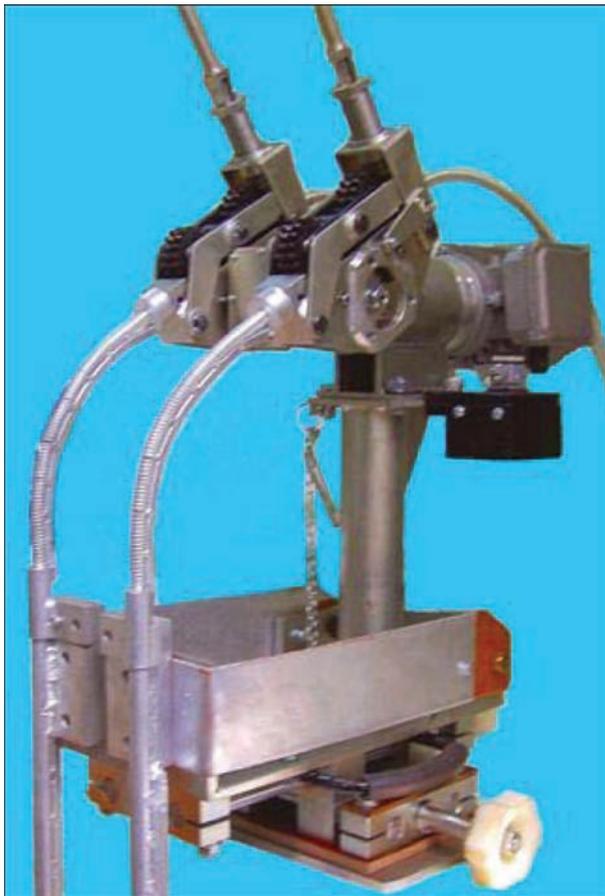


Рис. 3. Портативный двухэлектродный аппарат АПП 113М для ЭШС плавящимся мундштуком металла толщиной 40...120 мм

вой энергии для достижения термических циклов, не снижающих прочностные характеристики металла ЗТВ без последующей высокотемпературной обработки [12].

Использование конструкционных материалов повышенной прочности открывает возможности увеличения объемов применения ЭШС [13]. Эти стали малочувствительны к перегреву в зоне термического влияния (ЗТВ) [2, 14–16].

Изучением плавления электродного и основного металла в зоне сварки [17–19] установлено, что оплавление электрода в межэлектродном промежутке шлаковой ванны сопровождается образованием энергетического ядра с повышенной температурой. Размеры (объем) ядра циклически изменяются за счет поступления в него электродного металла. Соприкосновение ядра с зеркалом металлической ванны сопровождается электрогидродинамическим ударом, в результате которого металлическая ванна, принимая тепловую энергию ядра, смещается в сторону свариваемых кромок и их оплавляет. Показано, что размеры энергетического ядра, значения сварочного тока и формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. Каждый цикл завершается образованием «разряда» в ме-

таллическую ванну. На осциллограмме сварочного тока в момент такого «разряда» наблюдается пиковое возрастание тока в 3...5 раз [17, 18]. Если это будет подтверждено дальнейшими исследованиями, представится возможность определить оптимальные условия существования энергетического ядра и усовершенствовать систему управления процессом.

Высокий уровень служебных характеристик металла сварных соединений достигается при условии снижения тепловложения. Удельная погонная энергия электрошлакового сварочного процесса $E_{св}$ для большинства случаев ЭШС металла низколегированных сталей находится в диапазоне 104...208 кДж/см² [2].

При ЭШС проволочным электродом снижение $E_{св}$ ограничивается условиями сохранения устойчивости протекания самого процесса и удовлетворительного формирования шва.

Показано, что:

- при $E_{св} < 45,0$ кДж/см² достигаются качественные швы (без кристаллизационных трещин) для металла толщиной 30...60 мм одним электродом ($V_c = 3,0...5,0$ м/ч, V_e до 600 м/ч);

- в диапазоне $V_c = 1,0...3,0$ м/ч наблюдается снижение $E_{св}$ соответственно от 90 до 55 кДж/см². Причем, даже повышение V_c до 7...8 м/ч не позволяет снизить $E_{св}$ ниже 45 кДж/см²;

- ЭШС на форсированных режимах ($V_c > 4,0$ м/ч) возможно аппаратами нового поколения при полной автоматизации процесса;

- ЭШС на форсированных режимах рекомендуется выполнять в узком зазоре (24...18 мм) порошковой проволокой диаметром 2,6...1,8 мм, а также проволокой сплошного сечения диаметром 2,0...1,6 мм;

- металл сварного соединения, полученного при значениях $E_{св}$ (75...45 кДж/см²) ЭШС отличается более высоким качеством.

Снижение удельной погонной энергии $E_{св}$ (на 23 %) при ЭШС титана в узком зазоре (22 мм) приводит к уменьшению ширины ЗТВ и снижает вероятность протекания нежелательных структурных превращений в основном металле.

Заслуживают внимания работы, направленные на дальнейшее развитие и совершенствование техники и технологии ремонта крупных металлоконструкций непосредственно на месте эксплуатации. Разработаны процессы восстановления дефектов (преимущественно сквозных трещин), возникающих при эксплуатации крупногабаритных нетранспортабельных металлоконструкций методом многопроходной ЭШС плавящимся мундштуком [20, 21].

Разработаны технологии и техника восстановительного ремонта рабочих элементов быстроизна-

шивающихся деталей машин с использованием ЭШН, таких как зубья крупномодульных шестерен, тяжелые молотки угольных мельниц, стальные и чугунные валки горячей прокатки. Создано сварочное оборудование и выданы практические рекомендации по их применению [22, 23].

Предложен способ ЭШС или ЭШН коррозионноустойчивыми неподвижными плавящимися секционными электродами большого сечения в узком зазоре для прямолинейных и криволинейных стыковых соединений толстого металла [24]. В зоне сварки используются электрод большого сечения и проволочный электрод, которые питаются от различных источников. Такая схема осуществления сварочного процесса позволяет эффективно использовать преимущества и исключить недостатки указанных выше способов сварки [2]. Зазор между свариваемыми кромками и неподвижным секционным электродом составляет 1,5...3,0 мм и должен быть заполнен диэлектриком керамического типа. Оптимальным материалом изоляторов служат флюсы типа АН-9У или АН-45, наносимые на поверхность электродов в виде порошков, флюсо-бумаги или флюсо-картона с добавкой вяжущих материалов (3...8 % жидкого стекла). Исследования условий протекания ЭШС показали, что при узком зазоре и большом сечении неподвижного электрода область существования стабильного процесса сужается и смещается в сторону более низких напряжений на шлаковой ванне (для канонического способа $U_c = 52...40$ В; для данного способа $U_c = 40...25$ В). Эффективность использования нового способа будет обеспечиваться применением источни-



Рис. 4. Внешний вид установки ЭШС плавящимся мундштуком для соединения металла, свариваемое сечение которого может достигать размеров 4000×6000 мм. (Участок ЭШС больших толщин им. Г.З. Волошкевича на ПАО «НКМЗ», г. Краматорск)



Рис. 5. Сварная заготовка траверсы гидравлического пресса. Масса заготовки 150 т, сечение шва (показано стрелкой), выполненного ЭШС плавящимся мундштуком 2490×3860 мм

ков питания для неподвижных электродов с программным управлением основных параметров режима сварки (U_c, I_c, P_c) в заданных пределах как в ручном, так и в автоматическом цикле. Это обеспечивает уменьшение количества наплавленного металла; удовлетворительные условия образования шва при меньшей $E_{св}$. Происходит изменение распределения тепловой энергии по толщине свариваемых кромок, технологических возможностей получения сварных соединений, в том числе из разнородных материалов, при ремонтных работах по восстановлению крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения.

Широко применяется ЭШС проволочными электродами и плавящимся мундштуком для соединения металлов толщиной 30...100 мм [25, 26]. На ПАО «НКМЗ» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона создана уникальная установка для ЭШС ПМ (рис. 4) металла, свариваемое сечение которого может достигать размеров 4000×6000 мм [9]. В эксплуатацию установка была введена в 2002 г. Производственному участку, где функционирует установка, было присвоено имя д.т.н. Г. З. Волошкевича, внесшего наиболее весомый вклад в создание, развитие и внедрение ЭШС. За истекшие почти 20 лет на установке были сварены уникальные металлоконструкции [27] станин прокатных станков и другого оборудования тяжелого машиностроения (рис. 5).

Электрошлаковый сварочный процесс за рубежом. На крупных российских предприятиях к настоящему времени объем использования ЭШС

для изготовления традиционных изделий заметно уменьшился. Отмечен рост применения этого процесса в ремонтных целях, а также для соединения негабаритных деталей большой толщины в монтажных условиях. Изменилась номенклатура изделий, восстанавливаемых с помощью электрошлаковой наплавки (ЭШН) [28]. Известны примеры возрождения участков ЭШС на машиностроительных заводах. Например, в 2016 г. выросла потребность рынка в барабанах для модульных энергетических котлов и сосудов высокого давления (баллонах). В 2017 г. в ООО «Сибэнергомаш-БКЗ» на базе аппарата А-535 восстановлена установка для ЭШС кольцевых швов барабанов [29], которая позволяет выполнять швы диаметром до 2000 мм с толщиной стенок до 150 мм. Проведена ЭШС барабана котла БКЗ-160-100 ГМ мощностью 160 т пара в час, выполняются работы по изготовлению барабана для котла Е-550-13.8-560 КТ и сосудов высокого давления (баллоны гидравлического типа БГ-10000/32). Технология ЭШС сосудов успешно используется взамен многослойной автоматической сварки под флюсом.

В 2016 г. впервые в России и впервые на Южно-Уральском машиностроительном заводе с применением ЭШС изготовлен кислородный конвертер вместимостью 320 т жидкого металла для АО «ЕВРАЗ-ЗСМК» [30]. Освоена прогрессивная технология ЭШС металла больших толщин. Для выполнения прямолинейных швов используются аппараты А-535, а для ЭШС криволинейных неповоротных стыков толщиной 40...160 мм используют аппараты АШ-115М2, разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона [8].

В АО «Атоммаш» применяется технология электрошлаковой наплавки ленточным электродом, позволяющая существенно сократить время при наплавочных работах. На установке ЭШС выполняются швы длиной до 10000 мм и толщиной до 300 мм, в том числе для изготовления толсто-стенных сферических днищ. Выполняются исследования с целью повышения качества изделий АЭС с применением ЭШС из чистых сталей 10ГН2МФА и 15Х2НМФА [31].

В АО «Тяжмаш», ОАО «Уралмаш» и ОАО «Пензхиммаш» эксплуатируются установки с использованием аппаратов А-535 для ЭШС кольцевых и прямолинейных стыков толщиной до 350 мм. В ОАО «Тяжмехпресс» столы станин горячештамповочных прессов номинальной силой 165 МН массой 240 т изготавливают из литых деталей с использованием ЭШС ПМ толщин до 400 мм [32]. В ОАО «Уралхиммаш» при изготовлении днища и обечаек корпуса оборудования была впервые освоена и применена ЭШН лен-

точным электродом шириной 60 мм. Применение данного метода позволило значительно сократить трудоемкость за счет того, что наплавка выполнялась без переходного слоя в один слой. Применение данного способа позволило сократить расход сварочных материалов и повысить качество наплавленной поверхности. В ОАО «Балтийский завод» в результате совместных работ с ИЭС им. Е.О. Патона при сооружении баков для металловодной защиты освоена ЭШС полотнищ размером от 4000×9000 мм до 7000×9000 мм из стали 08Х18Н10Т толщиной 40...50 мм с использованием аппарата АД-381Ш. В ОАО «Волгоцеммаш» на базе аппаратов А-645, А-535 и А-433Р эксплуатируются три участка ЭШС, где осуществляют сварку рам щековых дробилок, бандажей цементных печей, подбандажных обечаек, крышек мельниц и др. толщиной 45...1200 мм [33]. ООО «Завод пневмотранспортного оборудования» совместно с ООО «Ремакс» использует ЭШС в точный размер бандажей вращающихся цементных и металлургических печей непосредственно на предприятии заказчика. Выполняются продольные стыки обечаек металла толщиной от 60 до 120 мм, ремонт эксплуатационных трещин многопроходной ЭШС в бандажах цементных печей без их демон- тажа [34].

На ремонтно-механических заводах Братского ЛПК, ОАО «Севервостокзолото» и ОАО «Якутголь» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона организованы участки восстановления с использованием ЭШН изношенных косозубых шестерен корообдирочных барабанов шведского производства, гребней грунтозацепов гусеничных тракторов «Комасу» и приводных шестерен механизма поворота платформы японских экскаваторов «Марион-204». Создание ремонтных участков позволило снизить закупки по импорту быстроизнашивающихся деталей.

Портал «наплавить.рф» демонстрирует электрошлаковую наплавку (ЭШН) в токоподводящем секционном кристаллизаторе штампов, пуансонов, рабочих торцов оправок трубопрошивного агрегата и других изделий диаметром до 100 мм. Установка для ЭШН в горизонтальном положении плоских поверхностей изделий позволяет формировать тонкий (от 3 мм) и широкий (до 55 мм) слой наплавленного металла при минимальной (от 1 мм) и равномерной глубине проплавления [35].

В западных странах наблюдается устойчивый рост объема исследований и применения ЭШС и ЭШН в различных отраслях промышленности.

В США способ ЭШС плавящимся мундштуком в узкий зазор был использован для изготовления двадцати сварных швов в опорной башне строя-

щегося моста в Сан-Франциско/Окленд [36]. Длина каждого однопроходного шва составляла 10 м, толщина стыков — 100 и 60 мм. При этом применяли пять типов разделки кромок. Технология ЭШС (оборудование и обучение) была предоставлена «Electroslag Systems (EST & D)» Портленд, штат Орегон, в рамках сотрудничества с Университетом Портленда и компанией «American Bridge». После сварки осуществляли ультразвуковой и рентгеновский контроль сварных соединений. Общее время сварки всех стыков составило два месяца. Использование ЭШС позволило значительно сократить сроки и трудоемкость сварочных работ, так как по предварительным расчетам общее время сварки стыков при дуговом способе составляет шесть месяцев. В 2013 г. был проведен повторный ультразвуковой контроль качества 200 м сварных швов.

Согласно материалам обзорной статьи [37] последняя модификация ЭШС в узкий зазор (ESW-NG) в настоящее время признана в США пригодной AASHTO для сварки обычных типов мостовых сталей и включена в код сварки мостов (AWS D1.5: 2010 с). Ведутся работы по включению сварки ESW-NG в код структурной сварки AWS D1.8 – сейсмическое приложение. Показано, что процесс ЭШС в узкий зазор устойчив как при постоянном, так и при переменном токе с квадратной синусоидой. Подразделение Linde Union Carbide и компания Hobart Brothers запатентовали две конструкции плавящихся мундштуков и метод ЭШС колеблющимся плавящимся мундштуком. Плоские пластины плавящихся мундштуков, имеющие канал для прохождения сварочной проволоки, которыми заменили мундштуки круглого сечения, позволили уменьшить зазор с 32 до 19 мм. Способ ESW-NG рассчитан для использования при монтаже на месте сооружения стальной конструкции. Он особенно приемлем для сварки тяжелых фланцев большой длины W-образных форм, стыки которых имеют отклонение от вертикали 45-50 град. Для сварки тяжелой колонны с использованием электродуговой сварки под флюсом требуется 30 ч или более. Для сравнения, для сварки обоих фланцев любой толщины, используя ESW-NG, требуется около 30 мин. Таким образом, авторы обзора [37] резюмируют следующее. ЭШС больше не рассматривается как единственный вариант для соединения толстых пластин в цеховых условиях. Он может использоваться и быть экономически выгодным в монтажных условиях при сварке ребер жесткости и опорных плит с фланцами стальных профилей, а также при соединении диафрагм к внутренним стенкам коробчатых колонн. Современные достижения в области ЭШС,

воплощенные в ESW-NG, используются на строительных площадках крупных высотных зданий и в строительстве мостов. ESW-NG зарекомендовал себя как наиболее экономичный метод для многих соединений, в том числе производства сварных швов большой толщины в стальных мостах и зданиях.

Фирма «Arcmatic Welding Systems» (США) специализируется на модульных системах с компьютерным программируемым управлением процесса сварки, специально разработанным для ЭШС толстых пластин [38]. Предлагаются портативные системы для ЭШС плавящимся мундштуком с ручным управлением консолью, на которой закреплены каналы подачи электродной проволоки, силовые кабели и шланги подачи охлаждающей воды. Применяют также установки на базе двухпозиционного манипулятора, обеспечивающие быструю (5 мин) ее переналадку с дугового метода сварки на ЭШС металла толщиной до 300 мм. Указанное оборудование предлагается для изготовления ветровых башен, морских платформ, тяжелых сосудов под давлением, балок и колонн из конструкционной стали, мостовых балок и других конструкций. Наибольшее применение установки находят при ЭШС ПМ диафрагм строительных колонн.

Советом по исследованиям транспорта (TRB) Национальной академии США проведены исследования по сварке железнодорожных рельсов с использованием ЭШС. Сравнение и анализ с ЭШС показали, что термитная сварка рельсов — процесс менее капиталоемкий, менее дорогой, более портативный, но сварные швы низкого качества. Средняя стоимость выполненных термитных швов составляет 350 дол. США для каждого стыка. Соединения, полученные другими способами сварки, более дороги, порядка 500 дол. США каждый. Контактная сварка очень капиталоемкая и, следовательно, дорогостоящая, требует использования поездов для транспортировки рельсосварочных машин. Предполагается, что ЭШС займет позицию между двумя указанными, будет сопоставима по качеству и стоимости (около 250 дол.).

Типичные области применения электрошлаковой сварки в Японии в XX веке включали следующие объекты: соединение больших отливок, ребра жесткости верхней палубы судов, продольные сварные швы в цилиндрических сосудах под давлением, корпуса доменных и кислородных печей. Однако низкая ударная вязкость металла ЗТВ сварного шва явилась самым большим препятствием для увеличения использования ЭШС в Японии. Для расширения номенклатуры изделий, изготавливаемых с применением ЭШС, вы-

полнены исследования с целью увеличения ударной вязкости металла ЗТВ [39, 40], за счет стали, малочувствительной к росту зерна в ЗТВ [15, 16]. С целью увеличения объема применения ЭШС сталей, имеющих предел прочности на разрыв 490...590 МПа, Nippon Steel Corporation разработала новую технологию повышения ударной вязкости металла ЗТВ, которая называется Super High HAZ Toughness Technology с тонкой микроструктурой (HTUFF®). Это технология, при которой термически стабильные оксиды и сульфиды, содержащие Mg и Ca, диспергированы в стали в виде мелких частиц, рост γ -зерен в металле ЗТВ вблизи линии сварки сварного соединения существенно задерживается мелкими частицами, и в результате реализуется эффект измельчения зерна и достигается ударная вязкость в металле ЗТВ по Шарпи при $0^\circ\text{C} \geq 70$ Дж. Металл толщиной 60 и 80 мм в соответствии с разработанной технологией широко используется при изготовлении с использованием ЭШС шельфовых конструкций, труб, зданий и гражданском строительстве. Общая масса использованной для ЭШС стали составила порядка 280 000 т [16]. С начала XXI века в японском судостроении резко возросло производство крупных морских контейнеровозов, грузочные люки которых необходимо изготавливать из стальных листов толщиной 70...100 мм [41]. Для выполнения однопроходной сварки стали такой толщины с использованием способов сварки с большим тепловложением (дуговая сварка с принудительным формированием и ЭШС) разработана технология производства стали ТМСП, включающая контролируемую прокатку и термическую обработку в интервале температур $A_{c1}-A_{c3}$. Технология позволяет заметно повысить прочность и ударную вязкость путем измельчения зерна с образованием бейнита или мартенсита с добавлением микролегирующих элементов, таких как титан и ниобий. Разработаны высокопрочные стали с пределом текучести 390 и 460 Н/мм², при ЭШС которых исключается образование грубой структуры в металле ЗТВ. Стали, созданные с применением технологий ТМСП и HTUFF, применяются при изготовлении танкеров, сухогрузов, судов для транспортировки сжиженного нефтяного и природного газа, что позволило снизить массу судов и повысить эффективность перевозок.

В последние годы в Канаде разработан процесс ЭШС алюминиевых шин [42]. Компания CANMEC (провинция Квебек) приобрела разработки фирмы Linde по применению технологии ЭШС для сварки алюминия толщиной 50 мм. Для сварки шин толщиной 275 мм компания CANMEC совместно с CQRDA (Квебекский центр исследо-

ваний и разработок по алюминию) и Национальным исследовательским советом Канады (NRC) разработали новые аппараты, обеспечивающие подачу трех-, ... пятиэлектродных проволок и технологию ЭШС. Новую технологию применили при строительстве алюминиевого завода (346 000 т/г) в Исландии. Алюминиевые шины были заварены ЭШС в 4 раза быстрее по сравнению с традиционным методом сварки (дуговой метод «шахматной пластины»). Швы обеспечили высокое качество сварных соединений, электропроводимость шин в зоне шва была увеличена на 20 % минимум. За счет полного провара кромок снижены электрические потери.

Китайские предприятия предлагают приобрести аппараты и установки консольного и порталного типа для ЭШС проволочными электродами и плавящимся мундштуком, а также флюс HJ431 [43]. Указанное оборудование предназначено для ЭШС крышек корпусов строительных балок и поперечных перегородок колонн. Толщина свариваемых стыков в основном составляет 16...65 мм. Исследовательская группа Хунаньской провинциальной академии строительства провела обширный анализ свариваемости высокопрочной арматуры HRB400 как теоретически, так и экспериментально. Применяется ЭШС арматуры из упрочненной стали марки 20MnSiV [44]. Тайваньская фирма Kingarc Autoweld демонстрирует упрощенный аппарат для ЭШС плавящимся трубчатым мундштуком диафрагм строительных колонн.

В Турции опубликована статья «Электрошлаковый сварочный процесс и его применение», где описана история создания и развития ЭШС в развитых странах [45]. Там же изложен турецкий опыт применения ЭШС и перспективы ее применения. В настоящее время с помощью ЭШС осуществляют сварку кольцевых стыков прессов, печей, корпусов двигателей, колес для асфальтовых машин. Сваривают стыки судовых пластин и отливок деталей толщиной 13...400 мм на химических, нефтяных, морских и энергетических установках. Приведены примеры применения ЭШС низколегированных углеродистых сталей: сосуды под давлением, цистерны, котлы, компрессоры, мосты, топливозаправщики с двойной стенкой корпуса. В Турции используют ЭШС в качестве способа сварки, который обеспечивает более эффективные результаты по сравнению с традиционными методами. Наиболее часто используются диаметры электродных проволок 2,4 и 3,2 мм. Кроме того, также успешно применяют проволоки диаметром от 1,6 до 4,0 мм. Используют катушки для электродных проволок двух типов: малые для

намотки 27 кг и большие для 270 кг проволоки. Планируется применение ЭШС для изготовления ядерных реакторов, строительства промышленных зданий, топливных баков с двойными стенками и других конструкций.

В Италии используют ЭШС тремя проволочными электродами для соединения низкоуглеродистых стальных пластин толщиной от 25 до 300 мм в вертикальном или близком к вертикальному положении [46].

Австрийская фирма «Voestalpine Böhler Welding» предлагает оборудование, технологию и сварочные материалы для электрошлаковой облицовки (ESSC) ленточным электродом шириной 15...120 мм [47]. Показаны преимущества этого процесса по сравнению с электродуговой наплавкой ленточным электродом под флюсом. Например, производительность ЭШН достигает 23 кг/ч, а электродуговой — не более 14 кг/ч. Разбавление наплавленного металла основным не превышает 7 %. При электродуговой наплавке оно достигает 18 %. Отмечается, что благодаря электромагнитному управлению процессом формирования наплавленного металла, при ЭШН лентой обеспечивается идеально ровная наружная поверхность наплавленного металла и качественное перекрытие слоев. Приведены примеры ЭШН ленточным электродом нелегированных, низколегированных, мартенситных, нержавеющей сталей, никелевых сплавов, а также сплавов кобальта и меди. В нефтяной и газовой промышленности ЭШН ленточным электродом применяется для создания антикоррозионных покрытий большой площади в таком оборудовании, как сосуды под давлением, сепараторные сосуды и сепараторы высокого давления. Электрошлаковая облицовка также широко используется для наплавки внутренней поверхности труб, клапанов для транспортировки нефти и газа. В химической и целлюлозно-бумажной промышленности этот процесс нашел свое применение в оборудовании, подверженном воздействию коррозионных сред, высоких давлений и температур. Наиболее эффективно процесс используется для антикоррозионной наплавки сосудов, резервуаров, клапанов, насосов, компрессоров, барабанов для производства бумаги, мешалок и т. д. В энергетической промышленности ЭШН ленточным электродом применяют для облицовки внутренних поверхностей реакторных сосудов, парогенераторов и т. д. В Бельгии, Германии [48], Индии [49] и Польше [50] процесс ЭШН ленточным электродом нашел свое применение в аналогичных отраслях промышленности взамен газопламенной наплавки и плакирования лентой под флюсом. Фирма ЭСАБ (Швеция) применяет ЭШН

ленточным электродом (ширина 60...90 мм, толщина 0,5 мм) для антикоррозионной наплавки сталей 316L или 347 — на углеродистую сталь [51]. ЭШН нержавеющей и никелевых слоев применяется для ремонта прокорродированного оборудования и улучшения коррозионных свойств новых конструкций. В Норвегии применяют ЭШН лентой для облицовки внутренних поверхностей металлургических труб CLAD диаметром до 254 мм и длиной до 12,5 м. Типичные размеры ленточных электродов составляют 15/20/30×0,5 мм, из сплавов инконель 625, 825, 316. Производительность наплавки в зависимости от размера ленты достигает 12...24 кг/ч.

В Эстонии в результате совместных работ с ИЭС им. Е.О. Патона на базе концерна «Эстонсланец» организован участок восстановления изношенных зубьев крупномодульных вал-шестерен привода поворота платформы шагающих экскаваторов ЭШ 15/90 и ЭШ 10/70 с использованием ЭШН. Вал-шестерни, восстановленные без последующей механической обработки эвольвентных профилей, успешно эксплуатируются в разрезах Нарвский и Айду.

Выводы

1. За истекший период с начала XXI века в Украине и за рубежом заметно уменьшился объем использования ЭШС при изготовлении и ремонте изделий толщиной более 100 мм, тем не менее в последние годы отмечается устойчивый рост объемов ее применения для соединения металла толщиной 30...100 мм.

2. Создана гамма нового сварочного оборудования, отличающегося высокой надежностью выполнения ЭШС и обеспечивающая непрерывный мониторинг и паспортизацию основных параметров режима. Разработаны новые технологии, позволившие расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых с применением ЭШС и ЭШН. В настоящее время наибольшее распространение получили методы ЭШС трубчатым плавящимся мундштуком (диафрагмы, ребра жесткости, элементы усиления и др. строительных колонн, мостов), а также методы ЭШН электродной лентой и плавящимся мундштуком (создание защитных покрытий, восстановление изношенных деталей машин и др.).

3. В ближайшие 5–10 лет ожидаются: расширение объемов ЭШС проволочным электродом, а также трубчатым плавящимся мундштуком в узком зазоре при производстве крупногабаритных конструкций (в первую очередь строительных) из металла с пониженной чувствительностью к перегреву в ЗТВ, выполняемых в цеховых и монтажных

условиях; получение крупных лито-сварных, прокато-сварных и сварно-кованых заготовок для потребностей тяжелого машиностроения с размерами поперечного сечения до 4000×6000 мм, которые можно осуществлять по технологии ЭШС плавящимся мундштуком, успешно применяемой на ПАО «НКМЗ»; расширение областей применения процесса ЭШН ленточным электродом для создания антикоррозионных покрытий большой площади для сосудов и сепараторов высокого давления, резервуаров, клапанов, насосов, компрессоров, парогенераторов, труб, эксплуатируемых в нефтяной, газовой, энергетической, химической и других отраслях промышленности; увеличение объемов применения технологий восстановительного ремонта металлоконструкций и быстроизнашивающихся деталей машин на основе использования ЭШС проволочными электродами, многопроходной ЭШС и новых методов ЭШН.

Список литературы

1. Волошкевич Г.З. (1956) *Способ электрической сварки плавлением*. А. с. 104248 СССР, МПК 21 В 29/13.
2. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
3. Сушук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. (1990) *Технология и оборудование для электрошлаковой сварки*. Киев, ИЭС.
4. Патон Б.Е., Дудко Д.А., Ющенко К.А. и др. (1997) Электрошлаковая сварка: основные итоги, задачи и перспективы развития. *Автоматическая сварка*, **5**, 32–42.
5. Медовар Б.И., Цикуленко А.К., Богаченко А.Г., Литвинчук В.М. (1982) *Электрошлаковая технология за рубежом*. Киев, Наукова думка.
6. Лычко И.И., Сушук-Слюсаренко И.И., Ющенко К.А., Блинов В.А. (1999) Особенности ЭШС толстостенных протяженных стыков из стали типа 18-8. *Автоматическая сварка*, **9**, 61–65.
7. Ланкин Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) Опыт применения электрошлаковой сварки при монтаже металлургического оборудования. *Сварочное производство*, **6**, 32–36.
8. Жук Г.В., Семененко А.В., Великий С.И. и др. (2016) Установка АШ115М2 для электрошлаковой сварки вертикальных, наклонных и криволинейных стыковых соединений. *Автоматическая сварка*, **10**, 47–49.
9. Невидомский В.А., Гулида В.П., Ющенко К.А. и др. (2002) Новая установка для ЭШС больших толщин на АО «НКМЗ». *Там же*, **2**, 50–52.
10. Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. и др. (2012) Портативный аппарат для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком. *Там же*, **8**, 48–49.
11. Ланкин Ю.Н. (2007) Компьютерная система контроля технологических параметров ЭШС. *Там же*, **5**, 33–40.
12. Патон Б.Е., Дудко Д.А., Пальти А.М. и др. (1999) Электрошлаковая сварка (перспективы развития). *Там же*, **9**, 4–6.
13. Егорова С.В., Стеренбоген Ю.А., Юрчишин А.В. и др. (1980) Новые конструкционные стали, не требующие нормализации после электрошлаковой сварки. *Там же*, **6**, 44–47.
14. Синюк А.Г., Демченко Ю.В., Проскудин В.Н. и др. (2015) Обоснование экономической эффективности применения различных способов сварки и сталей для ремонта кожуха доменной печи № 4 ПАО № МК «Азовсталь». *Сварщик*, **4**, 18–21.
15. Akihiko Kojima, Akihito Kiyose, Ryuji Uemori et al. (2004). Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles. *Nippon Steel Technical Report*, 90, July 1–6.
16. Akihiko Kojima, Ken-Ichi Yoshii, Tomohiko Hada (2014) Development of High HAZ Toughness Steel Plates for Box Columns with High Heat Input Welding. *Nippon Steel Technical Report No*, 90 July 39–49.
17. Патон Б.Е., Лычко И.И., Ющенко К.А. и др. (2013) Плавление электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Автоматическая сварка*, **7**, 33–40.
18. Лычко И.И., Ющенко К.А., Супрун С.А., Козулин С.М. (2019) Особенности плавления электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Там же*, **3**, 12–17.
19. Ланкин Ю.Н., Суший Л.Ф. (2009) Электропроводность шлаковой ванны при электрошлаковой сварке проволочным электродом. *Там же*, **12**, 47–49.
20. Ланкин Ю.Н., Тюкалов В.Г., Москаленко А.А. (2004) Применение электрошлаковой сварки при ремонте корпуса доменной печи на ОАО «КГМК Криворожсталь». *Там же*, **5**, 30–32.
21. Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И., Козулин М.Г. (2014) Соединение металла большой толщины многопроходной электрошлаковой сваркой. *Там же*, **9**, 32–36.
22. Козулин С.М., Лычко И.И., Подыма Г.С. (2008) Электрошлаковая наплавка зубьев вал-шестерни вращающейся обжиговой печи. *Там же*, **5**, 38–41.
23. Кусков Ю.М. (1999) Наплавка в токоведущем кристаллизаторе – перспективное направление развития электрошлаковой технологии. *Там же*, **9**, 76–80.
24. Патон Б.Е., Ющенко К.А., Лычко И.И. (2003) *Способ электрошлакового зварювання чи наплавлення*. Україна, Пат. 68576 А.
25. Ланкин Ю.Н., Демченко Ю.В., Москаленко А.А. и др. (2019) Электрошлаковая сварка заготовки корпуса тягового электродвигателя на ЧАО НПО «Днепропресс». *Сварщик*, **3**, 28–29.
26. Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. и др. (2018) Применение электрошлаковой сварки в строительстве. *Автоматическая сварка*, **9**, 29–34.
27. Шаповалов К.П., Белинский В.А., Мерзляков А.Е. и др. (2016) Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины пресса. *Там же*, **8**, 43–46.
28. Зорин И.В., Соколов Г.Н., Цурихин С.Н. и др. (2005) Восстановление рабочих поверхностей деталей и инструмента сборочно-сварочной оснастки электрошлаковым способом композиционными жаропрочными материалами. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, **5**, 17–20.
29. <http://www.energyland.info/analytic-show-165713>. (Сделано в СССР: электрошлаковая сварка толстостенных сосудов возрождена «Сибэнергомаш-БКЗ») 24.11.2017. Интернет-портал сообщества ТЭК.
30. 24ri.ru/down/open/tehnologicheskij-proryv-v-proizvodstvenno-konverterov-na-juzhuralmashe.html. 16.07.2016.
31. Подрезов Н.Н. (2017) *Разработка технологических основ электрошлаковой сварки чистых корпусных сталей АЭС*: автореф. дис. ... канд. техн. наук.
32. Мерабишвили М.О. (2013) ОАО «Тяжмехпресс» – лидер по выпуску кузнечно-прессового оборудования. *Заготовительные производства в машиностроении*, **10**, 15–18.
33. Козулин М.Г. (1999) ЭШС в цементном машиностроении. *Автоматическая сварка*, **9**, 55–60.
34. <http://www.zpto-ilt.ru/service>.
35. <http://naplavka34.ru>.
36. Turpin, B., Danks D., Callaghan I., Wood W. (2012) Narrow gap electrosag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24-31.
37. Janice J., Chambers, Brett R. Manning. (2016) Electrosag welding: From Shop to Field. *STRUCTURE magazine*, February, 20–23.
38. https://www.arcmatic.com/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=124.
39. Kitani Y., Ikeda R., Ono M. et al. (2013) Improvement of weld metal toughness in high heat input electro-slag welding of low carbon steel. *Welding in the World*, February.

40. Takahiko Suzuki, Takumi Ishii (2017) Guidebook for Preventing Brittle Fractures of Inner Diaphragm Electro-slag Welds. *Steel Construction Today & Tomorrow*, **52**, 9–12.
41. Ryuji Uemori, Masaaki Fujioka, Takehiro Inoue, Masanori Minagawa et al. (2012). Steels for Marine Transportation and Construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, November, 37–46.
42. (2015) Electroslag Welding (ESW): A new option for smelters to weld aluminum bus bars. Bertrand Leroux. Canmec Inc, 1750 La Grande, Chicoutimi, Quebec, G7K 1H7, Canada. Light Metals, Margaret Hyland (ed.). TMS (*The Minerals, Metals & Materials Society*).
43. www.hwayuan.com.
44. Xu C., Chen Y. и Liu Y. (2003). *Исследование и применение высокопрочного арматурного стержня – симпозиум Vanitec*, Ханчжоу, Китай, октябрь 2003 г., 106–109.
45. Kaluç E., Taban E., Dhooge A. (2006) Elektrocruruf Kayanak Yöntemi ve Endüstriyel Uygulamaları (Electroslag Welding Process And Industrial Applications). *Metal Dünyası*, Ocak 2006 Sayı: 152. Yıl:13, Sayfa 100–104.
46. www.steelmeccald.it/eng/products.
47. www.voestalpine.com/welding.
48. https://www.haane.de/.
49. Takare Niraj S., Ram Yadav (2014) Electroslag strip cladding process. Mechanical Engineering/SSJCET College, India. International OPEN ACCESS Journal of Modern Engineering Research (IJMER).
50. www.oerlikon-welding.com.
51. https://www.offshore-mag.com.

References

1. Voloshkevich, G.Z. (1956) *Method of electric fusion welding. USSR author's cert.* 104248, Int. Cl. 21 B 29/13 [in Russian].
2. (1980) *Electroslag welding and surfacing. Ed. by B.E. Paton.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (1990) *Technology and equipment for electroslag welding.* Kiev, PWI [in Russian].
4. Paton, B.E., Dudko, D.A., Yushchenko, K.A. et al. (1997) Electroslag welding: Main results and prospects of development. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 32-42 [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Bogachenko, A.G., Litvinchuk, V.M. (1982) *Electroslag technology abroad.* Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Lychko, I.I., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Yushchenko, K.A., Blinov, V.A. (1999) Peculiarities of ESW of thick-wall extended butt joints from steel of 18-8 type. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 61-65 [in Russian].
7. Lankin, Yu.N., Moskalenko, A.A., Tyukalov, V.G. et al. (2008) Experience of application of electroslag welding in mounting of metallurgical equipment. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 32-36 [in Russian].
8. Zhuk, G.V., Semenenko, A.V., Lychko, I.I. et al. (2016) Ash115M2 machine for electroslag welding of vertical, inclined and curvilinear butt joints. *The Paton Welding J.*, **10**, 44-45.
9. Nevidomsky, V.A., Krasilnikov, S.G., Panin, A.D. et al. (2002) New machine for electroslag welding of large parts at JSC «NKMBF». *Ibid.*, **2**, 49-51.
10. Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. et al. (2012) Portable apparatus for consumable-nozzle electroslag welding. *Ibid.*, **8**, 45-46.
11. Lankin, Yu.N. (2007) Computer system of monitoring the technological parameters of ESW. *Ibid.*, **5**, 48-50.
12. Paton, B.E., Dudko, D.A., Palti, A.M. et al. (1999) Electroslag welding (Prospects of development). *Avtomatich. Svarka*, **9**, 4-6 [in Russian].
13. Egorova, S.V., Sterenbogen, Yu.A., Yurchishin, A.V. et al. (1980) New structural steels not requiring normalizing after electroslag welding. *Ibid.*, **6**, 44-47 [in Russian].
14. Sineok, A.G., Demchenko, Yu.V., Proskudin, V.N. et al. (2015) Substantiation of economic efficiency for application of different methods of welding and steels for repair of blast-furnace jacket No. 4 of PJSC «Azovstal Iron and Steel Works». *Svarshchik*, **4**, 18-21 [in Russian].
15. Akihiko Kojima, Akihito Kiyose, Ryuji Uemori et al. (2004) Super high HAZ toughness technology with fine microstructure imparted by fine particles. *Nippon Steel Technical Report*, No. 90, July 1-6.
16. Kojima, Ken-Ichi Yoshii, Tomohiko Hada (2014) Development of high HAZ toughness steel plates for box columns with high heat input welding. *Nippon Steel Technical Report*, No. 90, July 39-49.
17. Paton, B.E., Lychko, I.I., Yushchenko, K.A. et al. (2013) Melting of electrode and base metal in electroslag welding. *The Paton Welding J.*, **7**, 31-38.
18. Lychko, I.I., Yushchenko, K.A., Suprun, S.A., Kozulin, S.M. (2019) Peculiarities of electrode and base metal melting in electroslag welding. *Ibid.*, **3**, 6-10.
19. Lankin, Yu.N., Sushy, L.F. (2009) Electrical conductivity of slag pool in electroslag welding with wire electrode. *Ibid.*, **12**, 37-38.
20. Lankin, Yu.N., Tyukalov, V.G., Moskalenko, A.A. et al. (2004) Application of electroslag welding in repair of blast furnace body at OJSC «KGMK Krivorozhstal». *Ibid.*, **5**, 26-28.
21. Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (2014) Joining of thick metal by multipass electroslag welding. *Ibid.*, **9**, 30-33.
22. Kozulin, S.M., Lychko, I.I., Podyma, G.S. (2008) Electroslag surfacing of rotating kiln gear shaft teeth. *Ibid.*, **5**, 31-34.
23. Kuskov, Yu.M. (1999) Surfacing in current-conducting mould – perspective direction for development of electroslag technology. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 76-80 [in Russian].
24. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Lychko, I.I. (2003) *Method of electroslag welding or surfacing.* Ukraine Pat. 68576A [in Ukrainian].
25. Lankin, Yu.N., Demchenko, Yu.V., Moskalenko, A.A. et al. (2019) Electroslag welding of billet of body of traction electric motor at PJSC NPO «Dneprogress». *Svarshchik*, **3**, 28-29 [in Russian].
26. Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. et al. (2018) Application of welding in construction. *The Paton Welding J.*, **9**, 23-27.
27. Shapovalov, K.P., Belinsky, V.A., Merzlyakov, A.E. et al. (2016) Electroslag welding of large-sized press frame. *Ibid.*, **8**, 36-39.
28. Zorin, I.V., Sokolov, G.N., Tsurikhin, S.N. et al. (2005) Restoration of working surfaces of parts and assembly-welding tooling by electroslag method using composite heat-resistant materials. *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii*, **5**, 17-20 [in Russian].
29. (2017) Made in USSR: Electroslag welding of thick-wall vessels is renewed at Sibenergomash-BKZ. TEK Community. <http://www.energyland.info/analytic-show-165713>.
30. (2016) 24ri.ru/down/open/tehnologicheskij-proryv-v-proizvodstve-konverterov-na-juzhuralmashe.html.
31. Podrezov, N.N. *Development of technological bases of electroslag welding of pure vessel steels for NPP.* In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree [in Russian].
32. Merabishvili, M.O. (2013) LLC «Tyazhmekhpess» is a leader on manufacturing of press-forging equipment. *Zagotovitelnye Proizvodstva v Mashinostroenii*, **10**, 15-18 [in Russian].
33. Kozulin, M.G. (1999) ESW in cement engineering. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 55-60 [in Russian].
34. <http://www.zpto-tlt.ru/service>.
35. <http://naplavka34.ru>.
36. Turpin, B., Danks D., Callaghan I., Wood W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San-Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24-31.
37. Janice, J., Chambers, Brett R. Manning (2016) Electroslag welding: From shop to field. *Structure Magazine*, February, 20-23.
38. https://www.arcmatic.com/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=124.

39. Kitani, Y., Ikeda, R., Ono, M. et al. (2013) Improvement of weld metal toughness in high heat input electro-slag welding of low carbon steel. *Welding in the World*, February.
40. Takahiko Suzuki, Takumi Ishii (2017) Guidebook for preventing brittle fractures of inner diaphragm electroslag welds. *Steel Construction Today and Tomorrow*, **52**, 9-12.
41. Ryuji Uemori, Nasaaki Fujioka, Takehiro Inoue, Masanori Minagawa et al. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, No. 101, November, 37-46.
42. Leroux, B. (2015) Electroslag welding (ESW): *A new option for smelters to weld aluminum bus bars*. Ed. by M. Hyland. The Minerals, Metals & Materials Society, Canada.
43. www.hwayuan.com.
44. Xu, C., Chen, Y., Liu, Y. (2003) Study and application of high-strength reinforcing bar. In: *Proc. of Vanitec Symp. (China, Hangzhou, October 2003)*, 106-109.
45. Kaluc, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Electroslag welding process and industrial applications. *Metal Duniyasi*, **152**(13), 100-104.
46. www.steelmecsalid.it>eng>products.
47. www.voestalpine.com/welding.
48. https://www.haane.de/.
49. Takare Niraj S., Ram Yadav (2014) Electroslag strip cladding process. Mechanical Engineering/SSJCET College, India. International OPEN ACCESS Journal of Modern Engineering Research (IJMER).
50. www.oerlikon-welding.com.
51. https://www.offshore-mag.com.

ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ПРОЦЕС. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ (Огляд)

Б.Є. Патон, К. А. Ющенко, С. М. Козулін, І. І. Личко

ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Е - mail: office@paton.kiev.ua

Викладені результати аналітичного огляду досліджень і промислового застосування електрошлакового зварювання і наплавлення в Україні, а також зарубіжних країнах з початку ХХІ століття. Аналіз показав, що об'єм застосування електрошлакового зварювання металу в галузях промисловості помітно зменшився, проте останніми роками відзначається стійке зростання її застосування у будівництві мостів, висотних будівель, суднобудуванні, а також при ремонті великих деталей машин на місці їх експлуатації. Розроблені малочутливі до зростання зерна в ЗТВ сталі дозволили значно розширити номенклатуру виробів, що виготовляються із застосуванням електрошлакового зварювання. Істотно збільшився об'єм застосування ЕШН стрічковим електродом для антикорозійних покриттів в посудинах високого тиску, сепараторах, парогенераторах і іншому устаткуванні, яке експлуатується в нафтогазовій, енергетичній, металургійній, целюлозно-паперовій і хімічній промисловості. Бібліопр. 51, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, електрошлакове наплавлення, технологія, дротяний електрод, плавкий мундштук, стрічковий електрод, питома погонна енергія, сталь, тепловкладення, зона термічного впливу, ударна в'язкість

ELECTROSLAG WELDING PROCESS: ANALYSIS OF STATE AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT (Review)

B.E. Paton, K.A. Yushchenko, S.M. Kozulin, I.I. Lychko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymir Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper provides the results of analytical review of researches and commercial application of electroslag welding and surfacing in Ukraine as well as foreign countries from the beginning of XXI century. The analysis showed that volume of application of electroslag welding of large thickness metal (more than 100 mm) in different branches of industry noticeably reduced, however, stable growth of its application in the recent years is noted in construction of bridge and high-rise buildings, ship building as well as repair of large parts of machines on-site. New steels have low sensitivity to grain growth in a heat affected zone, allowed expanding range of products made by electroslag welding. There is a considerable increase of volume of application of electroslag surfacing with strip electrode for anticorrosion coatings in pressure vessels, separators, steam generators, compressors and other equipment, being operated in oil and gas, power, metallurgical, paper-and-pulp and chemical industries. 51 Ref., 5 Fig.

Keywords: electroslag welding, electroslag surfacing, welding equipment, technology, wire electrode, consumable nozzle, strip electrode, specific rate of energy input, steel, heat input, heat affected zone, impact toughness

Поступила в редакцію 19.07.2019

Міжнародна конференція «ТИТАН 2020: Виробництво та застосування»

1–3 червня 2020 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
тел. 38044 200-82-77, journal@paton.kiev.ua