

СОВРЕМЕННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

В. Н. ШЛЕПАКОВ, А. С. КОТЕЛЬЧУК, Ю. А. ГАВРИЛЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены особенности применения порошковых проволок для сварки металлоконструкций из низколегированных сталей повышенной и высокой прочности. Предложены пути решения существующих проблем в этой области. Описаны разработки порошковых проволок для этих целей, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы. Представлены направления повышения качества и эффективности сварки порошковой проволокой с использованием современного оборудования. Библиогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: электродуговая сварка, порошковая проволока, низколегированные стали высокой прочности, погонная энергия сварки, производительность плавления проволоки, автоматизация и управление процессом сварки

В мировой практике среди методов механизированной или автоматизированной электродуговой сварки плавлением наиболее распространенными является сварка в среде защитных газов проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой. Выбор рациональной технологии изготовления сварных конструкций включает учет таких факторов, как подготовка соединений под сварку, квалификацию производственного персонала, определение ведущего сварочного процесса, оборудования для его осуществления и типа сварочного материала, отвечающего требованиям международных, национальных и отраслевых стандартов. Номенклатура сварочных материалов и оборудования в последние годы существенно обновилась, что позволяет повысить уровень технологии сварки как с качественной, так и с экономической точек зрения.

В последнее двадцатилетие расширилось применение в производстве конструкционных сталей с повышенными эксплуатационными свойствами. Это предопределило необходимость разработки сварочных материалов нового поколения для сварки несущих конструкций с соответствующим повышением прочности и вязкопластических свойств, а также совершенствования технологических процессов изготовления и применения проволок для газозлектрической сварки [1–4].

Высокопрочные низколегированные стали с пределом текучести свыше 550 МПа, как правило, относятся по микроструктуре к ферритно-бейнитно-мартенситному или бейнитно-мартенситному классу с высокой чувствительностью к перегреву при сварке. Учитывая особенности применения сварочных порошковых проволок, требуется огра-

ничение тепловложения (погонной энергии) в свариваемое соединение. В зависимости от толщины свариваемого металла оно может составлять от 1,0 до 3,0 кДж/мм. Необходимость выполнения и температура предварительного подогрева соединения зависит от жесткости конструкции, состава и класса прочности стали, ожидаемого содержания диффузионного водорода в металле шва. Из условий необходимости строгого контроля тепловложения при сварке высокопрочных сталей рекомендуется применять проволоки сплошного сечения диаметром 0,8...1,2 мм, порошковые проволоки 1,0...1,4 мм в сочетании с защитным газом сниженной окислительной способности (смеси на основе аргона $Ar + CO_2$) [5].

При сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности расширилось применение порошковых проволок, имеющих высокую производительность плавления, технологическую пригодность к автоматизированным процессам с контролируемым тепловложением, обеспечивающим низкое содержание диффузионного водорода в металле шва для предупреждения образования холодных трещин, что потребовало существенного совершенствования технологий их производства.

Порошковые проволоки нового поколения для газозлектрической сварки. В последнее десятилетие Институт электросварки им. Е. О. Патона совместно с Государственным предприятием «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» провел комплекс работ по совершенствованию технологии и качества изготовления порошковой проволоки, позволивший существенно улучшить качество и характеристики

применяемости проволок в производственных условиях. Усовершенствования коснулись всех стадий технологического процесса изготовления. В числе основных следует отметить введение контролируемого расчета состава порошкового наполнителя по реальному составу сырьевых материалов с использованием специального программного обеспечения, постоянный контроль влажности шихт на всех стадиях изготовления, совершенствование процессов формовки и заполнения профиля порошком и редуцирования заготовки проволоки до готового размера с использованием двухстадийной технологии волочения. Введение в технологию изготовления указанных мероприятий позволило повысить точность заполнения и равномерность распределения наполнителя проволоки по всей ее длине, повысить характеристику подаваемости проволоки по трактам подающих механизмов сварочных полуавтоматов и автоматов, обеспечить надежность контакта проволоки с наконечником мундштука и точность подачи проволоки в зону плавления к месту сварки.

Повышение прочности (жесткости) оболочки проволоки за счет деформационного упрочнения при двухстадийном процессе волочения нивелируется использованием в качестве смазки кальциево-натриевых стеаратов и паст на стадии калибровки (которые позволяют получать тонкую электропроводящую защитную пленку на поверхности проволоки).

Реализована намотка проволоки на каркасные шпули или пластиковые катушки типов К300 и BS300 виток к витку и упаковкой в пленку или фольгу для предупреждения увлажнения сердечника проволоки в процессе хранения в соответствии с международными стандартами [6, 7]. Базовый диаметр порошковых проволок для сварки сталей повышенной и высокой прочности 1,2 мм.

Порошковые проволоки нового поколения малого диаметра разработаны с целью эффективного использования порошкового сердечника для повышения уровня их сварочно-технологических характеристик и производительности процесса при полуавтоматической и автоматической сварке. Наличие порошкового сердечника позволяет повысить плотность сварочного тока, что выражается в повышении скорости плавления, переходе на струйно-капельный и струйный перенос электродного металла, и позволяет обеспечить высокую стабильность технологического качества сварных швов.

Порошковая проволока с металлопорошковым типом сердечника марки ПП-АН61М для сварки сталей обычной и повышенной прочности выпускается в соответствии с классификацией по стандарту ДСТУ ISO 17632 [8]. Сварка выполняется с использованием защитной среды углекислого газа или смеси аргона с углекислым газом.

Порошковые проволоки, предназначенные для сварки конструкций из низколегированных высокопрочных сталей, включая термоупрочненные, с рутитовым и металлопорошковым типом сердечника, классифицируются по стандарту ДСТУ ISO 18276 [9]. Они обеспечивают высокие показатели прочности, пластичности и ударной вязкости свариваемых соединений при использовании защитной газовой смеси на основе аргона и углекислого газа. Области применения включают судостроительные конструкции, конструкции морских буровых платформ, конструкции тяжелого и транспортного машиностроения, изготавливаемые из сталей толщиной от 4 до 60 мм. Большая эффективность применения достигается при использовании источников питания и подающих механизмов с автоматическим управлением и обратной связью, которые позволяют оптимизировать параметры режима сварки, статические и динамические характеристики горения дуги. Высокая однородность сварных швов, глубокое и равномерное проплавление, минимальные потери электродного металла в сочетании с высокой производительностью плавления свидетельствуют о предпочтительности использования проволок такого типа для скоростной и автоматической сварки.

Порошковая проволока ПП-АН75 с рутитовым типом сердечника отличается высокими оперативными характеристиками при сварке в различных пространственных положениях. При использовании защитной газовой среды на основе смеси аргона с углекислым газом (M21 по стандарту ISO 14175 [5]), обеспечивает достижение струйного переноса электродного металла. Проволока предназначена для широкого применения при сварке соединений из низколегированных сталей повышенной прочности с временным сопротивлением разрыву до 590 МПа при толщине свариваемого металла более 4 мм. Равномерная форма и гладкая поверхность швов, минимальное разбрызгивание, легкая отделимость шлака и высокая производительность позволяют рекомендовать проволоку для сварки широкого круга металлоконструкций различного назначения.

Порошковая проволока ПП-АН76 с металлическим типом сердечника предназначена для полуавтоматической сварки низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, в том числе термоупрочненных. При этом обеспечивается высокая стойкость к образованию трещин и высокие показатели ударной вязкости при низких температурах. Для проволоки характерен устойчивый струйный перенос электродного металла. На поверхности шва образуются отдельные пятна шлака небольшой толщины, которые легко удаляются. При многослойной сварке поверхности швов не нуждаются в зачистке. Проволока рекомендуется

Таблица 1. Химический состав металла, наплавленного порошковыми проволоками различных типов*, мас. %

Марка и тип порошковой проволоки	C	Mn	Si	Ni	Mo	Zr
ПП-АН61М тип ISO 17632-A-T 50 2 1Ni М М 2 Н5	0,05...0,08	1,2...1,4	0,3...0,5	1,0...1,2	—	—
ПП-АН75 тип ISO 18276-A-T 62 2 Mn2.5NiMo Р М 2 Н5	0,05...0,09	1,4...1,6	0,3...0,6	2,4...2,7	0,10...0,15	0,007...0,010
ПП-АН76 тип ISO 18276-B-T 76 4 Т1 1 М А N4C1M2 Н5	0,04...0,07	1,7...1,9	0,4...0,6	2,2...2,6	0,10...0,20	0,005...0,007

* S и P не более 0,02 мас. %

Таблица 2. Механические свойства металла сварного шва и сварного соединения, выполненного порошковыми проволоками различных типов в смеси защитных газов на основе Ar M21

Марка и тип порошковой проволоки	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	Работа удара KV, Дж, при температуре испытания, °C	
				-30	-40
ПП-АН61М тип ISO 17632-A-T 50 2 1Ni М М 2 Н5	500...520	560...710	22...26	50...55*	52...60
ПП-АН75 тип ISO 18276-A-T 62 3 Mn2.5NiMo Р М 2 Н5	590...620	650...760	21...24	—	51...56
ПП-АН76 тип ISO 18276-B-T 76 4 Т1 1 М А N4C1M2 Н5	680...700	760...920	18...20	54...65	48...55

* При сварке в CO₂.

для сварки металлоконструкций, в том числе эксплуатируемых при низких температурах, в судостроении, а также при сооружении буровых платформ.

В табл. 1 и 2 приведены сведения соответственно о химическом составе наплавленного металла и показателях механических свойств металла шва и сварного соединения, выполненных порошковыми проволоками для сварки сталей повышенной и высокой прочности. При соблюдении правил хранения и применения порошковые проволоки обеспечивают содержание водорода в металле шва менее 5 мл/100 г согласно стандарту ANSI/AWS 4.3 [10].

Классификация порошковых проволок по механическим свойствам металла шва и сварного соединения во всех национальных стандартах подобна. Международные стандарты ISO 17632 [8] и ISO 18276 [9] предусматривают классификацию по гарантированным величинам границы текучести и минимальной температуре, при которой гарантируется величина работы удара на образцах с надрезом по Шарпи. Показатели прочности и ударной вязкости между собой жестко не связаны. Это позволяет классифицировать практически любые новые разработки по этим признакам. При этом во всех стандартах показатели механических свойств определяются на образцах из наплавленного металла шва (all weld metal). В табл. 1 и 2 приведены технические характеристики новых порошковых проволок, классифицированных в соответствии с требованиями международных стандартов.

Показатели производительности плавления проволок сплошного сечения ниже чем производительности сварки порошковыми проволоками, в частности, проволоками с металлпорошковым сердечником («metal-core»), что на практике может реализовываться повышением скорости выполнения сварных швов заданного размера.

Экспериментальное сопоставление показателей производительности по скорости выполнения угловых швов на аналогичных режимах проволокой сплошного сечения и порошковыми проволоками равных диаметров показывает, что при использовании порошковых проволок рутилового и металлпорошкового «metal-core» типов нового поколения время выполнения угловых швов равных калибров (4, 6 и 8 мм) сокращается на 15...30 %. При автоматическом процессе это преимущество возрастает, так как процесс сварки порошковой проволокой при струйном переносе металла менее чувствителен к изменению скорости сварки и обеспечивает стабильную форму провара и размер шва, гарантировано мягкий старт (рис. 1).

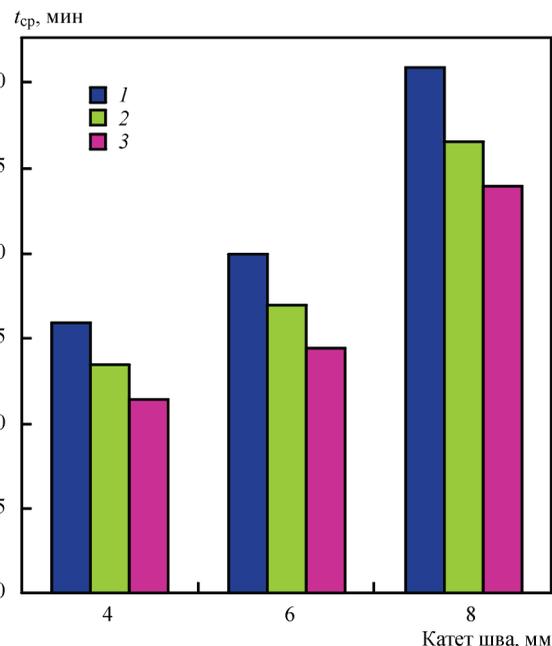


Рис. 1. Среднее время выполнения 1 м угловых швов различного катета проволокой сплошного сечения (1), порошковой проволокой с рутиловым типом сердечника (2) и металлпорошковой проволокой (3) диаметром 1,2 мм на сопоставимых режимах сварки ($U_d \sim 28...30$ В; $I_{св} \sim 290...320$ А)

Направления повышения качества и эффективности сварки порошковой проволокой с использованием современного оборудования. Значительное количество имеющихся на рынке современных источников питания сварочного тока построены по инверторной схеме [11–13]. При этом такие источники питания неразрывно привязаны к конкретному типу оборудования для подачи электродной проволоки. В простом варианте исполнения такой источник позволяет выполнять механизированную сварку плавящейся электродной проволокой в защитных газах низколегированных сталей обычной и высокой прочности.

Особенностью высокочастотных инверторов является высокая стабильность и качество сварки разных материалов в широком диапазоне толщины с минимальным разбрызгиванием металла. Такое оборудование обеспечивает высококачественную сварку порошковыми проволоками с сердечниками всех типов.

Основой системы управления служит интеллективный контроллер источника питания, объединенный с цифровым сигнальным процессором для ускорения обработки преобразованных аналоговых электрических сигналов сварочного процесса в цифровые данные. Эти два блока совместно осуществляют все функции мониторинга и регулирование сварочного процесса (настройку сварочного тока и напряжения дуги в режиме реального времени). В ходе сварочного процесса проводится непрерывное измерение фактических значений сварочных параметров и любое их изменение вызывает реакцию системы управления. Например, разработанные фирмой «Fronius» алгоритмы управления обеспечивают поддержку необходимых заданных значений при сварке широким спектром сварочных проволок. Благодаря этому обеспечивается высокая воспроизводимость процесса сварки с достижением отличных сварочных характеристик.

Результаты исследований показателей стабильности горения сварочной дуги на основе статистической обработки данных электрических сигналов, анализ формы кривых распределения вероятности значений сварочного тока и напряжения дуги, а также результаты статистической обработки данных электрических сигналов дуговой сварки показали существенные различия массопереноса электродного металла при использовании источников питания дуги инверторного типа в сравнении с традиционными. Практически во всех случаях процесс сварки с использованием инверторного источника питания характеризуется более высокими показателями стабильности.

При использовании инверторного источника питания реализуется управление переносом элек-



Рис. 2. Использование инверторных источников питания дуги с соответствующими подающими механизмами для сварки порошковыми проволоками

тродного металла, направленное на уменьшение размеров капель. При этом перенос электродного металла проходит без резких изменений и колебаний параметров процесса, при общем снижении энергозатрат.

В большой степени это проявляется при сварке порошковой проволокой с металлическим типом сердечника. В системе управления инверторного источника питания используется программное управление динамическими характеристиками процесса дуговой сварки в зависимости от типа проволоки. Регулирование параметров сварки возможно лишь в определенных программой пределах для каждого типа проволоки (рис. 2).

Некоторые компании продвигают технологии управления плавлением электродного металла, которые с помощью программирования необходимой реакции источника питания и подающего механизма на контролируемые изменения сварочного тока и напряжения дуги обеспечивают заданный модифицированный перенос электродного металла с короткими замыканиями при механизированной и автоматизированной сварке в защитных газах. Использование такого процесса управляемого плавления электродной проволоки позволяет уменьшить тепловложение на 5...20%, минимизировать разбрызгивание в сравнении с процессом со стандартным переносом электродного металла с короткими замыканиями. Отмеченные эффекты достигаются за счет поддержания оптимальных характеристик дуги и точного контроля сварочного тока во время всех фаз сварочного процесса [14].

Использование современного оборудования для полуавтоматической сварки с объективным контролем основных показателей процесса, как правило, является основным шагом к повышению показателей стабильности качества сварных конструкций (рис. 3). При полуавтоматической сварке это снижает влияние субъективного фак-

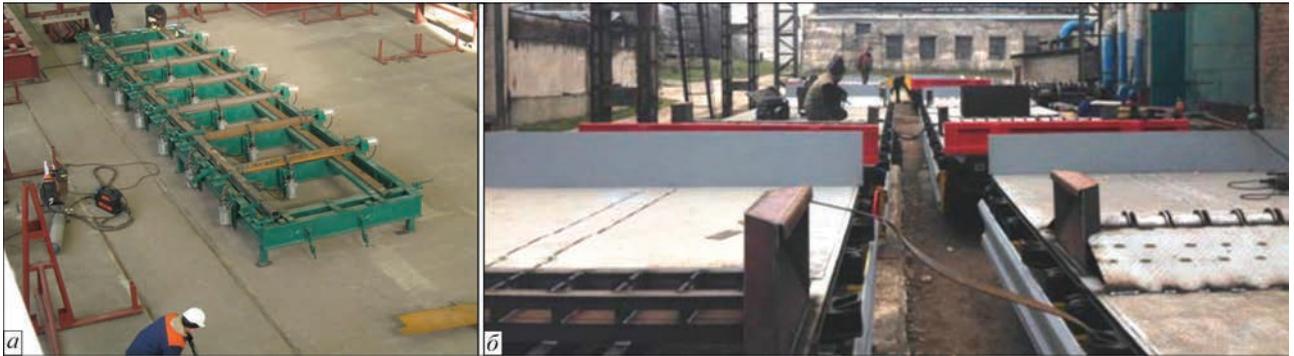


Рис. 3. Типичные объекты применения сварки порошковыми проволоками: а — сборка-сварка каркаса боковой стенки грузовых вагонов (ООО «Югпромтехмонтаж», г. Херсон) [15]; б — сварка металлоконструкций платформы для перевозки слябов, рельсов (ПАО «Верхнеднепровский машиностроительный завод»)

тора, связанного с квалификацией исполнителей, но не снимает задачи обеспечения безопасности персонала. Опыт автоматизации, касающийся сварочных технологий, свидетельствует о необходимости оптимизации и повышения качества всего комплекса технологии изготовления сварных конструкций, включая подготовку и сборку узлов и конструкций под сварку, определение ведущего сварочного процесса, выбора оборудования и материалов, а также подготовку квалифицированного персонала по управлению и методам контроля показателей качества согласно действующим международным стандартам.

Ориентация на применение процесса полуавтоматической и автоматической сварки газозащитной порошковой проволокой является одним из приоритетных направлений в мировой практике, в частности, в области судостроения, энергетического и тяжелого транспортного машиностроения, сооружения буровых платформ, строительства трубопроводов и других объектов.

Список литературы

- Irving B. (1995) The challenge of welding heat-treatable alloy steels. *Welding Journal*, 74(2), 43–48.
- Keehan E., Karlsson L., Andren H.-O., Bhadeshia H. K. D. H. (2006) New development with C-Mn-Ni high-strength steel weld metals. Part A – Microstructure. *Ibid.*, 85(9), 200–210.
- Adonyi Y. (2002) Welding process effects in hydrogen industrial cracking susceptibility of high-performance steels. *Ibid.*, 61–65.
- What is the difference between heat input and arc energy? <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-heat-input-and-arc-energy/>.
- ДСТУ EN ISO 14175:2014 *Матеріали зварювальні. Захисні гази для дугового зварювання та різання*.
- ДСТУ EN ISO 544:2015 *Матеріали зварювальні. Технічні умови постачання зварювальних присадних матеріалів. Тип продукції, розміри, допуски і маркування*.
- ДСТУ ISO 14344:2015 *Зварювання і споріднені процеси. Флюси і захисні гази для дугового зварювання. Настанови щодо постачання матеріалів*.
- ДСТУ EN ISO 17632:2015 *Матеріали зварювальні. Дріт порошковий для дугового зварювання нелегованих і дрібнозернистих сталей у захисному газі і без захисного газу. Класифікація*.
- ДСТУ EN ISO 18276:2015 *Матеріали зварювальні. Дріт порошковий для зварювання високоміцних сталей в захисних газах. Класифікація*.
- ANSI/AWS A4.3-93 (R2006) *An American National Standard. Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of Martensitic, Bainitic, and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding*.
- Рама Р. С. (2006) *Основы силовой электроники*. Пер. с англ. Масалова В. В. Москва, Техносфера.
- Малешин В. И. (2005) *Транзисторная преобразовательная техника*. Москва, Техносфера.
- Миронов С. (2003) Инверторные источники питания для дуговой сварки. *Сварочное производство*, 4, 41–43.
- (2007) *Источник питания МИГ/МАГ Транс Синерджи 4000/5000/2700. Руководство по эксплуатации*. Wels, Fronius International GmbH.
- Спроектирован и введен в эксплуатацию стенд сборки-сварки каркасов боковых стенок грузовых вагонов. http://uptm.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=17:sproektirovan-i-vveden-v-ekspluatatsiju-stend-sborki-svarki-karkasov-bokovyh-stenok-gruzovyh-vagonov&catid=1:novosti-kompanii&Itemid=18.

References

- Irving, B. (1995) The challenge of welding heat-treatable alloy steels. *Welding J.*, 74(2), 43-48.
- Keehan, E., Karlsson, L., Andren, H.O., Bhadeshia, H.K.D.H. (2006) New development with C-Mn-Ni high-strength steel weld metals. Pt. A. Microstructure. *Ibid.*, 85(9), 200-210.
- Adonyi, Y. (2002) Welding process effects in hydrogen industrial cracking susceptibility of high-performance steels. *Welding J.*, 61-65.
- What is the difference between heat input and arc energy? <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-heat-input-and-arc-energy/>.
- DSTU EN ISO 14175:2014: *Welding consumables. Shielding gases for arc welding and cutting* [in Ukrainian].
- DSTU EN ISO 544: 2015: *Welding consumables. Technical delivery conditions for filler materials. Type of product, dimensions, tolerances and markings* [in Ukrainian].
- DSTU ISO 14344:2015: *Welding and allied processes. Fluxes and shielding gases for arc welding. Guidelines for delivery of consumables* [in Ukrainian].
- DSTU EN ISO 17632:2015: *Welding consumables. Tubular cored electrodes for gas shielded and no-gas shielded metal arc welding of non-alloy and fine grain steels. Classification* [in Ukrainian].
- DSTU EN ISO 18276:2015: *Welding consumables. Tubular cored electrodes for gas-shielded metal arc welding of high strength steels. Classification* [in Ukrainian].
- ANSI/AWS A4.3-93 (R2006) *An American National Standard. Standard methods for determination of the diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced by arc welding*.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

11. Rama, R.S. (2006) *Principles of power electronics*. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
12. Maleshin, V.I. (2005) *Transystor conversion technique*. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
13. Mironov, S. (2003) Inverter power sources for arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, 4, 41-43 [in Russian].
14. (2007) Power source MIG/MAG Trans Sinergic 4000/5000/2700. *Operating instructions. List of spare parts*. Wels, Fronius Intern. GmbH [in Russian].
15. Designed and put into operation assembly-welding stand of side wall frameworks of freight cars. http://uptm.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=17:sproektirovan-i-vveden-v-ekspluatatsiju-stend-sborki-svarki-karkasov-bokovyh-stenok-gruzovyh-vagonov&catid=1:novosti-kompanii&Itemid=18.

В. М. Шлепаков, О. С. Котельчук, Ю. О. Гаврилюк

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

СУЧАСНІ ПОРОШКОВІ ДРОТИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ ТА ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ

Розглянуто особливості застосування порошкових дротів для зварювання металоконструкцій з низьколегованих сталей підвищеної та високої міцності. Запропоновано шляхи вирішення існуючих проблем в цій галузі. Описано розробки порошкових дротів для цих цілей, виконані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона в останні роки. Представлені напрямки підвищення яко-

сті та ефективності зварювання порошковим дротом з використанням сучасного обладнання. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: електродугове зварювання, порошковий дріт, низьколеговані сталі високої міцності, погонна енергія зварювання, продуктивність плавлення дроту, автоматизація та управління процесом зварювання

V. N. Shlepakov, A. S. Kotelchuk and Yu. A. Gavrilyuk

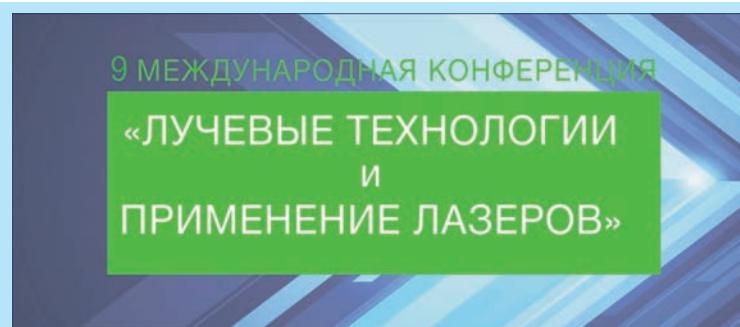
E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

CURRENT DIRECTIONS OF APPLICATION OF FLUX-CORED WIRE WELDING OF LOW-ALLOY INCREASED AND HIGH STRENGTH STEELS

A paper studies the peculiarities of application of flux-cored wires for welding of metal structures of low-alloy increased and high strength steel. The solutions of existing problems in this field were proposed. The flux-cored wires developed for this purpose at the E. O. Paton Electric Welding Institute in the recent years have been described. The ways of increase of quality and efficiency of flux-cored wire welding using current equipment are presented. 16 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electric arc welding, flux-cored wire, low-alloy high-strength steels, welding heat input, wire melting efficiency, automation and control of welding process

Поступила 17.10.2018



17 - 19 сентября 2018 г.

Учебный центр подготовки
руководителей Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,
г. Санкт-Петербург, Пушкин

Тематика конференции

1. Физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы.
2. Оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки.
3. Оборудование и технологии аддитивного производства.
4. Оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности.
5. Метрология, системы измерений и дефектоскопия.

Официальные языки конференции: английский, русский.

www.ilwt-stu.ru