

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Главный редактор  
Б.Е. Патон**

*Ученые ИЭС им. Е.О. Патона*  
д.т.н. **С.И. Кучук-Яценко** (зам. гл. ред.),  
д.т.н. **В.Н. Липодаев** (зам. гл. ред.),  
д.т.н. **Ю.С. Борисов**,  
д.т.н. **Г.М. Григоренко**,  
к.ф.-м.н. **А.Т. Зельниченко**,  
д.т.н. **В.В. Кныш**,  
д.т.н. **И.В. Кривцун**, д.т.н. **Ю.Н. Ланкин**,  
д.т.н. **Л.М. Лобанов**,  
д.т.н. **В.Д. Позняков**,  
д.т.н. **И.А. Рябцев**, д.т.н. **К.А. Ющенко**  
**Т.В. Юштина** (отв. секр.)

*Ученые университетов Украины*  
д.т.н. **В.В. Дмитрик**, НТУ «ХПИ», Харьков,  
д.т.н. **В.В. Квасницкий**,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,  
к.т.н. **Е.П. Четверто**,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,  
д.т.н. **М.М. Студент**, Физ.-механ. ин-т  
им. Г.В. Карпенко НАНУ, Львов

*Зарубежные ученые*  
д.т.н. **Н.П. Алешин**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ  
д.т.н. **Гуань Цяо**  
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай  
д.х.н. **М. Зиниград**  
Ун-т Ариэля, Израиль  
д.т.н. **В.И. Лысак**  
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ  
д-р инж. **У. Райсген**  
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия  
д.т.н. **Я. Пилярчик**  
Ин-т сварки, Гливице, Польша  
д.т.н. **Г.А. Туричин**  
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Адрес редакции  
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ  
03150, Украина, Киев-150,  
ул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

Учредители  
Национальная академия наук Украины,  
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ,  
МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001  
ISSN 0005-111X  
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Рекомендовано к печати  
редакционной коллегией журнала

Журнал входит в перечень утвержденных  
Министерством образования и науки  
Украины изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная  
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

**СОДЕРЖАНИЕ**

Постоянная необходимость инноваций (интервью Б.Е. Патона для австрийского журнала «Perfect Welding») .....	3
60 лет первой в мире мобильной машине для контактной сварки рельсов в полевых условиях .....	5
Выдающийся ученый, инженер, педагог (к 125-летию академика К.К. Хренова) .....	9

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

<i>Лычко И.И., Ющенко К.А., Супрун С.А., Козулин С.М.</i> Особенности плавления электрода и основного металла при электрошлаковой сварке .....	12
<i>Скульский В.Ю., Моравецкий С.И., Нимко М.А., Пащенко Ю.Г., Кантор А.Г., Дмитрик В.В.</i> Влияние повторного нагрева при многопроходной сварке под флюсом на сопротивление сварных соединений роторной стали замедленному разрушению .....	18
<i>Рябцев И.А., Бабинец А.А., Лентюгов И.П., Турык Э.В.</i> Влияние скорости подачи электродной проволоки на проплавление основного металла при дуговой наплавке .....	23
<i>Полишко А.А., Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Антипин Е.В., Дидковский А.В., Туник А.Ю.</i> Свариваемость высокоуглеродистой стали электрошлакового перепла- ва при контактной стыковой сварке .....	29

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

<i>Кусков Ю.М.</i> Применение порошковых проволок при нап- лавке, переплаве и в металлургии (Обзор) .....	38
<i>Коленич Ф., Ковач Л., Секерка Р., Фарагула П.</i> Про- мышленные электронно-лучевые сварочные уста- новки модульной конструкции .....	47
<i>Ткач П.Н., Молтасов А.В., Ткач И.Г., Прокопчук С.Н.</i> Методы определения локальных напряжений в сварных соединениях труб (Обзор) .....	55
<i>Лобанов Л.М., Махлин Н.М., Водолазский В.Е., Попов В.Е., Муценко Л.П.</i> Новое оборудование для подготовки к сварке неповоротных стыков трубопроводов АЭС .....	64

**ХРОНИКА**

Зимний съезд Международного института сварки .....	68
--	----

# Автоматичне Зварювання

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б.Є. Патон**

Editor-in-Chief **B.E. Paton**

## ЗМІСТ

## CONTENTS

Постійна необхідність інновацій (інтерв'ю Б.Є. Патона для австрійського журналу «Perfect Welding») .....	3
60 років першої в світі мобільної машини для контактного зварювання рейок в польових умовах .....	5
Видатний вчений, інженер, педагог (до 125-річчя академіка К.К. Хренова) .....	9

Continuous need in innovations (interview with B.E. Paton for Austrian Journal «Perfect Welding») .....	3
60 years of the first in the world mobile machine for resistance welding of rails under field conditions .....	5
Prominent researcher, engineer, pedagogue (to 125 anniversary of academician K.K. Khrenov) .....	9

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Личко І.І., Ющенко К.А., Супрун С.О., Козулін С.М.</i> Особливості плавлення електрода та основного металу при електрошлаковому зварюванні .....	12
<i>Скульський В.Ю., Моравецький С.І., Німко М.О., Пащенко Ю.Г., Кантор О.Г., Дмитрик В.В.</i> Вплив повторного нагріву при багатопрхідному зварюванні під флюсом на опір зварних з'єднань роторної сталі уповільненому руйнуванню .....	18
<i>Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Турик Є.В.</i> Вплив швидкості подачі електродного дроту на проплавлення основного металу при дуговому наплавленні .....	23
<i>Полішко Г.О., Медовар Л.Б., Стопченко Г.П., Антипін Є.В., Дідковський О.В., Тунік А.Ю.</i> Зварюваність високовуглецевої сталі електрошлакового переплаву при контактному стиковому зварюванні .....	29

<i>Lychko I.I., Yushchenko K.A., Suprun S.A., Kozulin S.M.</i> Peculiarities of electrode and base metal melting in electroslag welding .....	12
<i>Skulsky V.Yu., Moravetsky S.I., Nimko M.A., Pashchenko Yu.G., Kantor A.G., Dmitrik V.V.</i> Effect of repeated heating in multi-pass submerged arc welding on resistance of welded joints of rotor steel to delayed fracture .....	18
<i>Ryabtsev I.A., Babinets A.A., Lentjugov I.P., Turyk E.V.</i> Influence of electrode wire feed rate on base metal penetration in arc surfacing .....	23
<i>Polishko A.A., Medovar L.B., Stovpchenko A.P., Antipin E.V., Didkovsky A.V., Tunik A.Yu.</i> Weldability of high-carbon steel of electroslag remelting in flash-butt welding .....	29

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

### INDUSTRIAL

<i>Кусков Ю.М.</i> Застосування порошкових дротів при наплавленні, переплавленні та в металургії (Огляд) .....	38
<i>Коленіч Ф., Ковач Л., Секерка Р., Фарагула П.</i> Промислові електронно-променеві зварювальні установки модульної конструкції .....	47
<i>Ткач П.М., Молтасов А.В., Ткач І.Г., Прокопчук С.М.</i> Методи визначення локальних напружень у зварних з'єднаннях труб (Огляд) .....	55
<i>Лобанов Л.М., Махлін Н.М., Водолазський В.Є., Попов В.Є., Муценко Л.П.</i> Нове обладнання для підготовки до зварювання неповоротних стиків трубопроводів АЕС .....	64

<i>Kuskov Yu.M.</i> Application of flux-cored wires at surfacing, remelting and in metallurgy .....	38
<i>Kolenic F., Kovac L., Sekerka R., Faragula P.</i> Modular Design of High Productivity Electron Beam Welding Machines .....	47
<i>Tkach P.N., Moltasov A.V., Tkach I.G., Prokopchuk S.N.</i> Methods for determination of local stresses in welded piped joints (Review) .....	55
<i>Lobanov L.M., Makhlin N.M., Vodolazskiy V.E., Popov V.E., Mutsenko L.P.</i> New equipment for preparation of stationary butts of npp for welding .....	64

### ХРОНІКА

### NEWS

Зимовий з'їзд Міжнародного інституту зварювання .....	68
---	----

Winter Congress of International Institute of Welding .....	68
---	----

Журнал «Автоматичне зварювання» видається англійською мовою під назвою «The Paton Welding Journal»

«Avtomaticheskaya Svarka» (Automatic Welding) journal is republished in English under the title «The Paton Welding Journal»

#### Адреса редакції

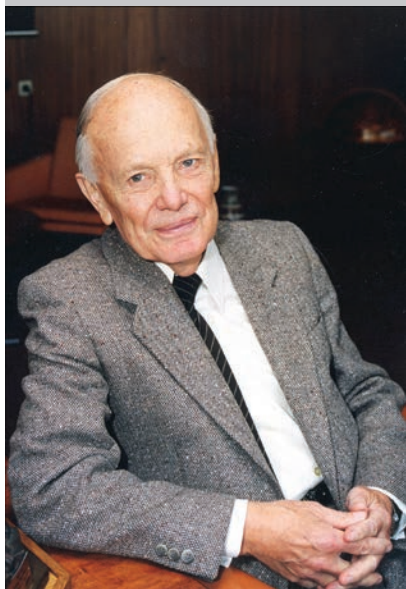
#### Address

03150, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11  
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-63-02  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine  
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-63-02  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

## ПОСТОЯННАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ ИННОВАЦИЙ (интервью Б.Е. Патона для австрийского журнала «Perfect Welding»)

*Отдавая должное мировой известности Института электросварки и его руководителю, австрийский журналист попросил ответить Б.Е. Патона на ряд вопросов, касающихся текущих проблем сварочных технологий, сварки ТИГ и цифровых источников сварочного тока.*



**Профессор Патон, Вы — сын основателя одного из самых авторитетных в мире институтов по технологиям сварки и посвятили свою жизнь исследованиям в этой области. Что Вас привлекает в сварке?**

Создание сварочных технологий требует глубоких исследований, результаты которых чрезвычайно полезны для общества. Электродуговая сварка исключительно важна для развития человечества. Я нахожу эту область знаний одновременно вдохновляющей и захватывающей.

**Какие Вы считаете наиболее важные разработки в области дуговой сварки за последние сто лет?**

Самые впечатляющие изменения в промышленности стали возможными благодаря разработке ручной дуговой сварки металла, дуговой сварки под флюсом, сварки вольфрамовым электродом в инертном газе. Эти сварочные процессы были разработаны в трудные времена в период Второй мировой войны. В настоящее время около двух третей стального проката в мире используется для производства сварных конструкций. В большинстве случаев дуговая сварка является единственным возможным и наиболее эффективным способом соединения.

**Какую Вы видите роль промышленности в развитии сварочных технологий?**

Промышленный спрос определил развитие сварочных процессов: в этом отношении ведущую роль сыграли необходимость автоматизации производственных процессов и разнообразие геометрических форм конструкций. В ответ на постоянно растущие требования промышленности, разработанные новые методы сварки позволили эффективно соединять разнообразные материалы, такие, например, как высоколегированные или высокопрочные стали и цветные сплавы, с различной толщиной материала. Для удовлетворения возрастающих требований промышленности были разработаны основы сварки на переменном токе, от импульсных процессов до самонастраивающихся современных управляемых процессов. В настоящее время промышленность требует разработки методов соединения комбинаций материалов, которые обеспечиваются в гибридных процессах сварки.

**Насколько важен «старый» процесс сварки ТИГ с точки зрения его промышленного применения?**

Сварка ТИГ остается самым лучшим вариантом во всех случаях, когда предъявляются высокие требования к качеству сварного шва — от нержавеющей стали до алюминиевых, титановых и никелевых сплавов. Использование импульсных дуг ТИГ с одновременным механическим управлением вольфрамовым электродом улучшает качество сварного соединения. Более того, новаторские разработки позволяют значительно повысить экономическую эффективность сварки ТИГ. Эти разработки включают использование активных веществ (активирующий флюс в процессе А-ТИГ), высокочастотную сварку ТИГ (высокочастотную импульсную) и использование инертного газа, добавляемого к активному газу.

Сварка ТИГ будет играть все более важную роль в получении соединений в будущем, особенно в производственном секторе, в частности, там, где используются роботы. Ключевой областью применения является однопроводная сварка более толстых металлов толщиной до десяти миллиметров и более. Орбитальная сварка ТИГ в узкий зазор также имеет большой потенциал для улучшения характеристик, например, при изготовлении трубопроводов или при соединении разнородных базовых материалов.

**В наши дни силовая электроника играет важную роль в сварочных технологиях. Как можно оценить влияние развития цифровых сварочных источников тока?**

Цифровой источник питания, вместе с его интеллектуальной схемой управления и сенсорным оборудованием, оказывает влияние на все отрасли промышленности, использующие сварочные технологии, такие как энергетика, автомобилестроение и судостроение. Эта технология существенно меняет требования к качеству сварных изделий. Адаптивное управление процессом в цифровых сварочных установках позволяет снизить остаточные сварочные напряжения и деформации компонентов. Это улучшает качество выпускаемой продукции.

Цифровые технологии также меняют повседневную жизнь пользователей: сварка все больше ассоциируется с IT-методами и приборами. Это отражено в обучении системных специалистов, технологов и операторов, — необходимо уделять больше внимания программным, аппаратным и IT-навыкам. Я считаю, что это также повысит интерес к сварочной профессии у молодого поколения.

**Тем не менее, в последние несколько лет молодых талантов в сварочных профессиях не хватало. Как еще можно привлечь молодежь к карьере в области сварочных технологий?**

Я думаю, что интересная практика и обучение играют ключевую роль. Более того, работодатели должны создавать условия, в которых молодежь может развиваться. По сути, люди стремятся к успеху — они продемонстрируют приверженность тем областям, в которых они могут добиться этого успеха.

**Что Вы считаете величайшими вызовами для технологии сварки нашего времени?**

Растет число конструкций и машин, которые достигли критического срока службы. Поэтому ремонтная сварка является важной темой, поскольку необходимо обеспечить надежную работу, например, в энергетических компаниях и транспортных компаниях, химической промышленности. Важно создать надежные методы оценки остаточного срока службы сварных конструкций. Сами конструкции также необходимо доработать, чтобы облегчить техническое обслуживание и ремонтные работы. Что касается различных и часто сложных условий, это требует дальнейшего развития сварочного оборудования, процессов и присадочных материалов. Это самая неотложная задача, которую специалисты по сварке должны будут решить в ближайшие годы.

**Итак, подрастающему поколению специалистов по сварке предстоит решать сложные задачи?**

Конечно. Но, на мой взгляд, красота сварки заключается именно в этой постоянной необходимости поиска принципиально новых решений и разработки новых технологий, материалов и конструкций.

#### ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА

*Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев, Украина, является одним из наиболее известных в мире исследовательских центров в области электросварки. Евгений Патон основал институт в 1934 г. в рамках Всеукраинской академии наук. Сейчас им руководит его сын, Борис Патон.*

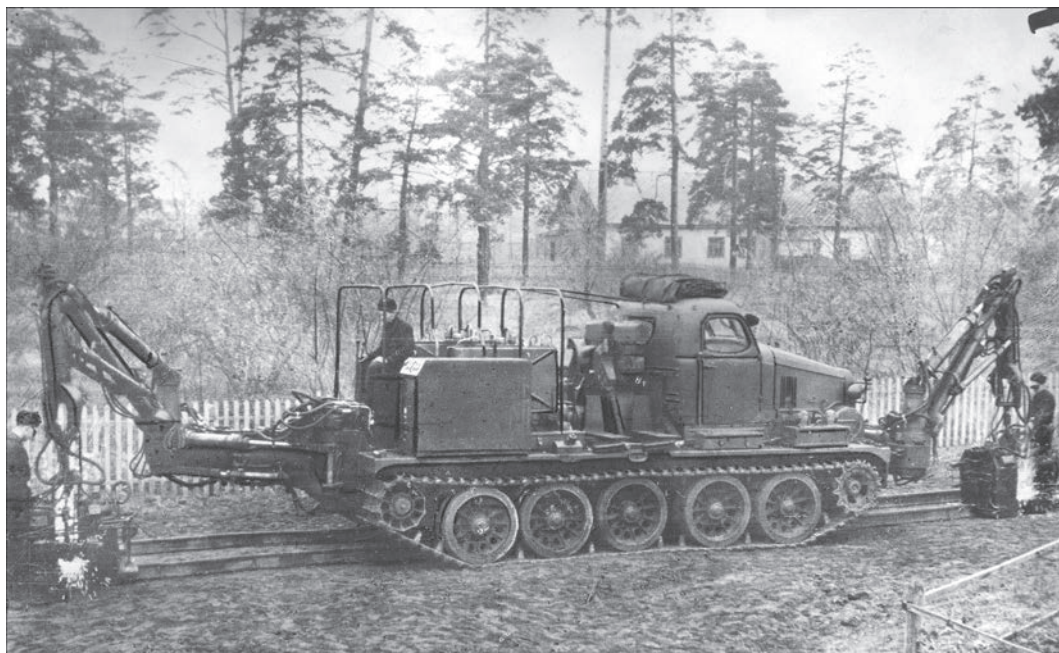


Перевод подготовлен редакцией журнала «Автоматическая сварка»

## 60 лет первой в мире мобильной машине для контактной сварки рельсов в полевых условиях

В послевоенные годы на значительной части территории бывшего СССР находились десятки тысяч километров железнодорожных путей, изуродованных войной и совершенно непригодных для какого-либо передвижения. Положение усугублялось также отсутствием в этот период производства новых рельсов. Выход был единственный — начать восстановление железнодорожных путей с использованием сохранившихся неповрежденными рельсов, чтобы возобновить по ним доставку необходимых грузов. При этом уже на этом этапе реконструкции ставилась задача перейти к наиболее прогрессивной технологии, а именно к получению бесстыковой рельсовой колеи (без двусторонних накладок), позволяющей развивать большие скорости движения и более надежные в обслуживании.

Первоочередной задачей явилось изыскание способа надежного неразъемного соединения концов рельсов. Известные в те годы способы сварки — термитная и электродуговая характеризовались очень низкой производительностью (1-2 стыка в час), требовали использования большого количества сварочных материалов и высококвалифицированных операторов. В то же время отмеченные способы сварки не обеспечивали механические свойства соединений, удовлетворяющие высоким требованиям к соединениям бесстыковых путей (близкие к свойствам основного металла рельсов).



Мобильный комплекс K355 во время испытаний на путях Киевской железной дороги (1960 г.)

Таким требованиям удовлетворяла контактная сварка рельсов, применяемая на заводах за рубежом, которые были оборудованы стационарными рельсосварочными машинами. На них сваривались рельсовые плети длиной 200...400 м, которые затем транспортировали к месту укладки специальными поездами. Такие машины потребляли мощность 400...500 кВ·А, а их масса превышала 200 т. Это обстоятельство позволяло их использование только в специализированных рельсосварочных цехах, имеющих достаточную мощность энергообеспечения (600...800 кВ·А). Создание таких предприятий на территории СССР в то время не представлялось возможным.

Перед Институтом электросварки в середине 1950-х годов была поставлена задача государственного значения — создать оборудование для контактной сварки рельсов непосредственно в пути при его реконструкции и ремонте. При этом процесс сварки должен был осуществляться полностью в автоматическом режиме и с учетом пониженных требований к точности обрезки торцов рельсов по сравнению с требованиями в условиях заводских цехов. Последнее обусловлено тем, что в полевых условиях использование оборудования для высокоточной обработки концов рельсов затруднительно.

---

Разработка новой технологии и оборудование для сварки рельсов в полевых условиях выполнялось в ИЭС комплексно. Наряду с изысканием технологии сварки, обеспечивающей требуемое качество соединений с минимальным потреблением энергии, разрабатывались системы управления, обеспечивающие ее стабильное воспроизводство независимо от изменения условий эксплуатации, а также оборудование, имеющее значительно меньшую массу и габариты. Разрабатываемое оборудование предполагалось использовать как инструмент, устанавливаемый на свариваемые рельсы. Было установлено, что значительное уменьшение мощности процесса сварки, потребляемой при контактной сварке рельсов, может быть достигнуто при использовании для основного нагрева мощности сварки непрерывным оплавлением вместо применявшегося нагрева сопротивлением в стационарных машинах цехов. Возбуждение непрерывным оплавлением при низких удельных мощностях стало возможным благодаря использованию регуляторов скорости оплавления и значительному снижению (в 2-3 раза) сопротивления сварочного контура машин.

Для получения требуемого нагрева при сварке впервые было предложено программное снижение напряжения при оплавлении. Такая технология, получившая название непрерывного оплавления с программным снижением напряжения, была положена в основу разработки режимов сварки различных типов рельсов. На все перечисленные новации были получены международные патенты в ведущих странах мира. С их использованием впервые в мире разработана мобильная сварочная машина К355 для сварки рельсов непрерывным оплавлением в полевых условиях. Она отличалась малой массой (2,3 т), позволяла использовать ее для установки на рельсы с помощью стандартных подъемных механизмов. Мощность сварочной машины составляла 150 кВт, для ее энергообеспечения достаточно было использовать стандартные дизельгенерирующие электростанции мощностью 200 кВт·А. Первые рельсосварочные машины устанавливались на вездеходы повышенной проходимости, оборудованные гидроподъемниками и использовались на экскаваторах. Энергоснабжение двух сварочных машин, работающих одновременно, осуществлялось от генератора, соединенного с валом отбора мощности вездехода. Несколько десятков таких передвижных сварочных комплексов успешно использовались для восстановления железнодорожных путей в труднодоступных участках дорог бывшего СССР.

По мере восстановления железных дорог основной объем сварочных работ был связан с их реконструкцией и укладкой новых секций рельсов со шпалами. Для этих целей были разработаны передвижные комплексы на базе самоходных железнодорожных платформ (ПРСМ) с порталными подъемными устройствами. Для повышения производительности предусматривалась одновременная сварка двух стыков отдельными машинами.

В 1960 г. по документации, разработанной ИЭС, машины К355 начал выпускать Каховский завод электросварочного оборудования (КЗЭСО). К середине 1960-х годов в СССР эксплуатировалось около сотни таких машин. Их конструкция непрерывно совершенствовалась с учетом запросов потребителей. С середины 1970-х годов начался экспорт таких машин в различные страны мира. Их закупали США, Великобритания, Австрия, Китай и другие страны. Всего, по данным КЗЭСО, 80 % мирового парка мобильных сварочных машин приходится на машины, изготовленные в Украине.

На современном этапе разработка новых типов сварочных машин в ИЭС продолжается. Это обусловлено тенденцией использования на железнодорожных путях высокопрочных рельсов нового поколения.

В последнее десятилетие продолжают разработки, направленные на совершенствование оборудования для сварки рельсов в полевых условиях. При этом учитываются реальные задания на использование таких машин в разных регионах мира.

Применение новой технологии сварки высокопрочных рельсов, совмещенной с их натяжением, потребовало создания новых поколений рельсосварочных машин, отличающихся значительно большими усилиями осадки, оснащенными встроенными механизмами для удаления усиления сварного шва в горячем состоянии. Перечисленные особенности новой технологии сварки высокопрочных рельсов и систем многофакторного регулирования были положены в основу создания нового поколения мобильных рельсосварочных машин. В них использованы современные системы вычислительной техники, быстродействующие гидроприводы и мощные системы электронного управления параметрами сварки. Такие машины позволяют выполнять сварку длинномерных рельсовых плетей, совмещенную с их натяжением.

Первая машина К921 для сварки рельсов пульсирующим оплавлением с натяжением



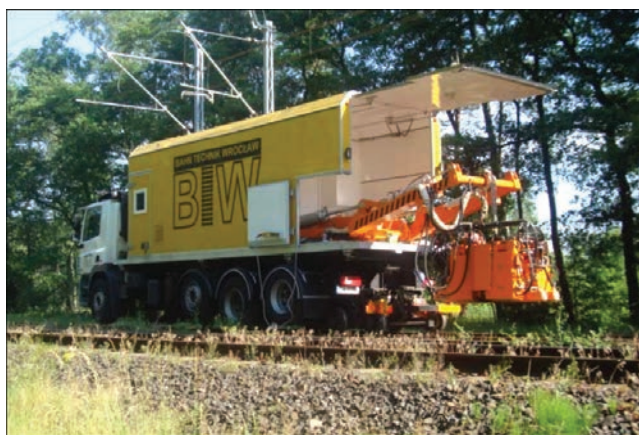
Передвижной рельсосварочный комплекс на железнодорожной платформе

была разработана в ИЭС в 2001 г. и была изготовлена КЗЭСО в кооперации с фирмой Norfolk Southern (США). Ее внедрение и доводка технологии сварки рельсов выполнялось с участием ИЭС на железных дорогах, принадлежащих этой фирме. Впервые в мировой практике была выполнена контактная сварка рельсовых плетей бесконечной длины, протяженностью до нескольких сотен километров, без болтовых соединений. По имеющимся данным общая протяженность сваренных фирмой бесстыковых путей бесконечной длины превышает 10 тыс. км.

В 2001-2005 гг. разработаны машины типа К920 и К922 двух модификаций. Параметры этих машин (усилия осадки, зажатия, габариты машины) оптимизированы с учетом применяемых технологий ремонта и строительства, а также имеющихся передвижных рельсосварочных комплексов. В частности, удалось значительно (в 1,5 раза) снизить массу и габариты машин по сравнению с первым опытно-промышленным образцом К921.

В 2010-2012 гг. в соответствии с лицензионным соглашением с фирмой Holland Company (США) ИЭС разработаны машины К930 и К945, которые имеют увеличенный ход подвижного зажима до 450 м при усилии осадки 120 т. Это позволяет сваривать длинномерные рельсовые плети большой длины при ре-





конструкции железнодорожных путей. Соответственно разработаны передвижные комплексы для работы с такими машинами. Минимизация массы и расширенные возможности привода осадки позволили создать высокоманевренные передвижные комплексы. Десять таких комплексов работает с 2014 г. на железных дорогах Великобритании. Они используют машины K945, разработанные в ИЭС и изготовленные на КЗЭСО.

Современные мобильные рельсосварочные комплексы, выпускаемые КЗЭСО, представляют собой самоходные установки, которые могут передвигаться на рельсовом ходу или на комбинированном ходу, позволяющим перемещаться как по рельсам, так и по шоссе и грунтовым дорогам.

На передвижных комплексах кроме рельсосварочных машин установлены дизель-генераторные установки мощностью 200-300 кВт, гидроподъемники, вспомогательное оборудование для подготовки рельсов под сварку, система неразрушающего контроля. Подобного типа мобильные комплексы, где используются машины K920, K922, K930, K950, применяются на железных дорогах Европы, фирмой Holland в США, фирмой Network Rail в Великобритании, в Китае, Австралии, Бразилии, Тайване, Малайзии, Индии, Турции, Саудовской Аравии и Таиланде.

Академик НАН Украины С. И. Кучук-Яценко



## ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, ИНЖЕНЕР, ПЕДАГОГ (к 125-летию академика К.К. Хренова)



Академик Константин Константинович Хренов родился 25 февраля 1894 г. в Боровске, Калужской губернии, в семье учителя. С 1905 г. Хреновы переезжают в Нижний Новгород, где в 1911 г. Константин заканчивает реальное училище. В том же году он поступает в Петербургский электротехнический институт. Одновременно начинает зарабатывать на жизнь и с 1915 г. устраивается на постоянную работу по проектированию гидроэлектростанций и химических заводов. Лекции ученых с мировым именем, занятия в хорошо оснащенных лабораториях и практическая работа — все это способствовало формированию высококвалифицированного инженера-электрика и электрохимика. В 1918 г. К.К. Хренов приезжает в Уфу, где заведует электростанцией, разрабатывает план электрификации Уфимской губернии. Одновременно он участвует в организации курсов техников, на базе которых впоследствии было создано высшее учебное заведение.

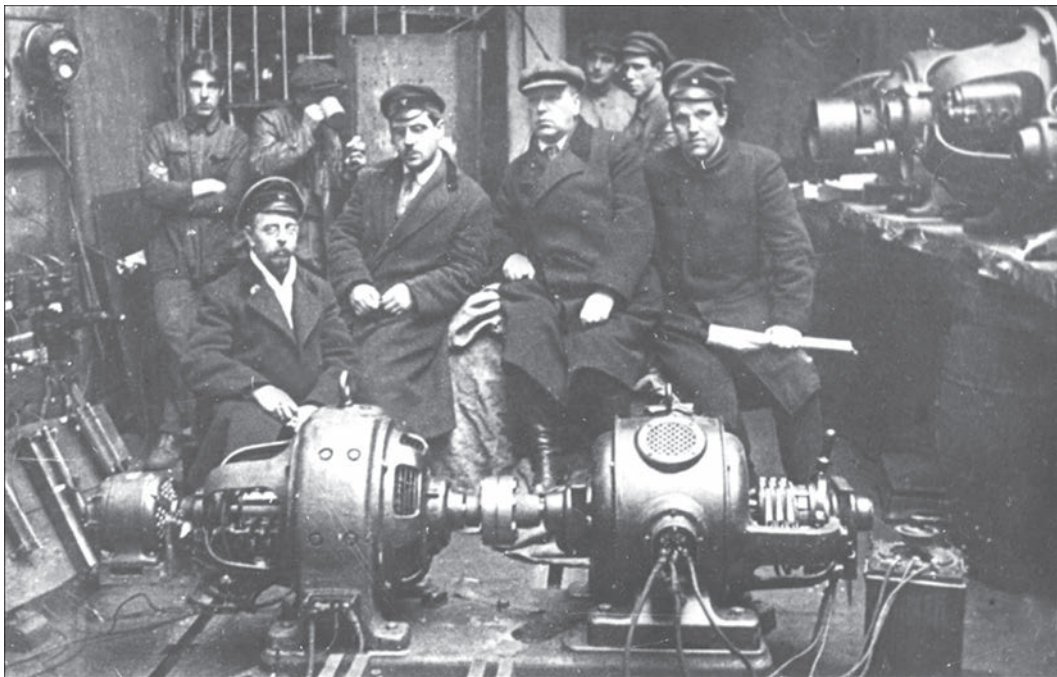
В конце 1921 г. Константин Константинович возвращается в Петроградский электротехнический институт на кафедру прикладной электрохимии. С середины 1923 г., не оставляя работы в институте, он начал работать в Электромашиностроительном тресте.

В эти годы начиналась эра интенсивного развития сварочного производства. В США, Германии, Бельгии, ряде других стран создавались исследовательские лаборатории, работали конструкторские группы, налаживалось производство сварочного оборудования. К.К. Хренов заинтересовался электросваркой и, начав с изучения зарубежного опыта, перешел к самостоятельным лабораторным исследованиям в Электротехническом институте и проектным работам в Элмаштресте. Одновременно К.К. Хренов и еще два молодых энергичных инженера — В.В. Никитин и А.Е. Алексеев организовали на Ленинградском заводе «Электрик» опытное производство сварочного генератора СМ-1 и трансформатора СТ-2. При активном участии Хренова завод был реконструирован и вскоре превратился из полукустарного предприятия в завод с годовым выпуском до 10 тыс. сварочных машин.

В 1925 г. Константина Константиновича переводят в Москву. Здесь продолжается его многоплановая работа по организации сварочного производства. Хренов принимает участие в проектировании Московского завода металлических электродов, пишет обзоры, учебные пособия. По методическим пособиям Хренова в стране за короткий срок были подготовлены сотни электросварщиков. В 1928 г. в Харькове, на Первом всеукраинском съезде сварщиков он сделал один из основных докладов. В Московском институте инженеров железнодорожного транспорта Хренов создал специальный курс сварки и сварочную лабораторию, положив начало самостоятельной кафедре. В 1930 г. Константин Константинович стал доцентом, в 1932 г. — профессором. К этому времени Хренов преподавал сварку еще в нескольких вузах, в том числе и в Московском автосварочном комбинате, где работали также В.П. Никитин и Г.А. Николаев.

Когда в 1932 г. автогенно-сварочный институт влился в МВТУ, К.К. Хренов перешел работать в это крупнейшее учебное заведение, руководил кафедрой технологии дуговой сварки, создал лабораторию. Здесь, а также в других лабораториях он возглавлял научные исследования по широкому спектру проблем, привлекая к научной работе преподавателей, аспирантов, студентов. Результаты научно-исследовательской работы легли в основу многих разделов формировавшейся сварочной науки.

В конце 1920–1930-х гг. К.К. Хреновым изучены процессы в сварочной дуге, влияние на свойства дуги магнитных полей, ряда химических элементов и состава обмазок, особенно технологии сварки цветных металлов, сварки дугой переменного тока и ряда других технологий. Для промышленности Хренов создает новый тип трансформаторов СТХ, совершенствует конструкцию контактных машин, дефектоскопов, разрабатывает составы электродных покрытий, термитных смесей и многое другое. К началу 1940-го им была разработана автоматическая сварка электродной проволокой под керамическим неплавленным флюсом. Эта технология получила широкое развитие в 1950–1960-х гг.



Возле первого в мире сварочного мотора-генератора. Крайний справа К.К. Хренов (1932 г.)

Особый интерес представляют работы К.К. Хренова по дуговой сварке и резке под водой. Ученому удалось добиться устойчивого горения дуги под водой, исследовать ее свойства, создать плавящиеся электроды со специальными покрытиями. В 1932 г. были проведены производственные испытания технологии и оборудования и началась подготовка подводных сварщиков. Впервые в мире сообщение о результатах подводной сварки появилось в 1934 г. в журнале «Сварщик», а уже в 1934 г. статью Хренова перепечатали американский и японский журналы. Технология сразу же нашла применение при подъеме судов, а в годы Второй мировой войны лаборатория Хренова и специальные отряды выполняли большой объем работ по ремонту кораблей, демонтажу разрушенных мостов и портовых сооружений. В 1946 г. за разработку методов подводной дуговой сварки и резки К.К. Хренову была присуждена Сталинская премия 2 степени.

В феврале 1945 г. К.К. Хренов был избран академиком АН УССР и начал работать в Институте электросварки; с 1947 г. он одновременно заведует кафедрой сварочного производства Киевского политехнического института, создает большую учебную лабораторию, где разворачиваются также и научно-исследовательские работы. С 1952 по 1963 гг.

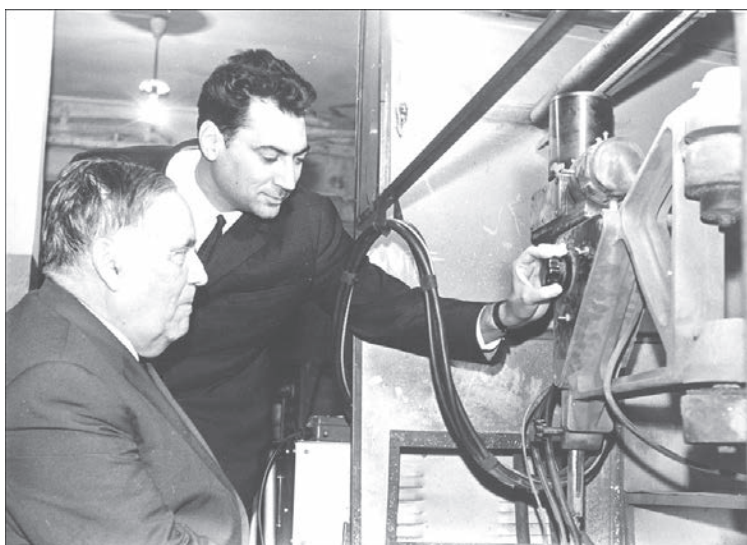


Делегаты конференции в Вене: К.К. Хренов второй справа в нижнем ряду (1958 г.)

Константин Константинович руководит лабораторией электротермии в Институте электротехники АН УССР. В 1953 г. К.К. Хренова избирают членом-корреспондентом АН СССР и с этого же года в течение 8 лет он является членом Президиума АН УССР. Много времени и энергии он уделяет оснащению институтов, подготовке молодых научных работников, повышению уровня и отдачи исследований. Более того, он активно занимается популяризацией научных достижений, выступает с докладами, руководит семинарами, участвует в работе редколлегии журналов «Сварочное производство», «Автоматическая сварка», «Наука і життя», энциклопедий, сборников и справочников. Энцикло-

педические знания Хренова ярко проявились при создании уникального терминологического словаря по сварке.

Со времени переезда в Киев Хренов издает несколько монографий, новые учебно-методические пособия, публикует результаты многочисленных исследований, получает авторские свидетельства. В 1950–1960-х гг. под его руководством выполнены работы, посвященные аргодуговой сварке, поверхностной дуговой закалке, газопрессовой сварке, применению ультразвука и магнитных полей при сварке. Продолжая исследования дугового разряда, Хренов и его сотрудники разработали технологию и создали



Испытание установки для точечной контактной сварки. К.К. Хренов и Э.М. Эсибян (1960 г.)

оборудование для плазменно-дуговой резки и сварки малоамперной дугой тонких металлов. Широкую известность получили работы по совершенствованию керамических флюсов. К.К. Хренов и М.М. Борт создали конструкции режущих сопел со сверхзвуковой скоростью истечения кислорода и добились высокого качества реза сталей толщиной до 2 м при низком давлении. Сконструированные в Киевском политехническом институте резаки сразу же нашли применение на машиностроительных и металлургических заводах.

Способ холодной сварки, разработанный Хреновым и его учениками, занял заметное место в промышленности, особенно электротехнической. Константин Константинович доказал, что практически все металлы, в том числе и сталь, поддаются холодной сварке. Созданная К.К. Хреновым и В.Э. Моравским конденсаторная сварка позволила решить проблемы изготовления микродеталей из металлов толщиной в десятые и сотые доли миллиметра. Новый способ и оборудование нашло применение в производстве радиоаппаратуры, в электронике и точной механике.

Созданный К.К. Хреновым отдел электротермии в 1963 г. вошел в Институт электро-сварки им. Е.О. Патона, где продолжались начатые ранее работы по холодной сварке, сварке металлов малой толщины (конденсаторной и импульсно-дуговой) и другие.

Известен большой интерес Хренова к истории техники. Еще в 1930-е годы он опубликовал статьи о Н.Н. Бенардосе и Н.Г. Славянове, позже вышли статьи по истории сварки в сборниках, книгах, а в 1958 г. он организовал Украинское отделение историков естествознания и техники, объединив сотни ученых, интересующихся историей. В этом направлении своей деятельности он достойно представлял Украину на всесоюзных и международных конгрессах.

До последних дней жизни Хренов продолжал активную научную деятельность, консультировал научных сотрудников и преподавателей вузов, писал статьи и мемуары. Последними из его работ были учебник по теории сварочных процессов, научно-популярная книга для молодежи и главы в большом коллективном труде по истории сварки. Всего им написано более 200 научных работ, получено несколько десятков патентов и авторских свидетельств. Тысячи инженеров-сварщиков слушали лекции Хренова, учились по его книгам в созданных им лабораториях. Многие известные ученые и организаторы производства являются его учениками.

Скончался Константин Константинович 11 октября 1984 г.

Почти семь десятилетий К.К. Хренов был в авангарде научно-технического прогресса одной из ведущих технологий современности. Его вклад в создание сварочной науки, в развитие сварочного производства, изобретения и разработки ряда способов сварки отмечены пятью орденами СССР, Сталинской премией 2 степени и премией Совета Министров СССР. Он был удостоен звания заслуженного деятеля науки и техники УССР. Имя этого выдающегося ученого и инженера всегда будет стоять одним из первых в истории сварки.

А.Н. Корниенко, д-р истор. наук

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

**И.И. Лычко, К.А. Ющенко, С.А. Супрун, С.М. Козулин**

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

Изложены результаты экспериментальных исследований связи процессов, протекающих в зоне плавления электродной проволоки, с электрическими параметрами режима электрошлаковой сварки. Методика выполнения экспериментов предусматривала электрошлаковую сварку образцов из стали 09Г2С толщиной 60 мм на режимах, идентичных режимам, при которых ранее выполняли фото- и киносъемку зоны сварки с применением оптически прозрачной среды. С использованием датчиков Холла, модуля АЦП E-140 и программного обеспечения «Power Graph» осуществляли высокоскоростную запись электрических параметров режима (10 тыс. записей в с). Одновременно проводили замеры температуры шлаковой ванны вблизи зоны плавления электродной проволоки. Выполняли анализ и сопоставление визуальных наблюдений зоны сварки через оптически прозрачную среду с характеристиками режима электрошлаковой сварки ( $U_c$ ,  $I_c$ ,  $V_{п.п.}$ ), в результате чего подтверждено циклическое существование в расплавленном шлаке между электродной проволокой и жидким металлом некоего ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом. Библиогр. 9, рис. 4.

*Ключевые слова:* электрошлаковая сварка, шлаковая ванна, межэлектродный промежуток, скоростная запись электрических параметров режима, активная зона, энергетическое ядро, «разряд», плавление и перенос жидкого металла, скоростная кино-, фотосъемка

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является одной из разновидностей сварки плавлением и основана на использовании тепловой энергии, выделяющейся при прохождении электрического тока через расплавленный флюс. Этот процесс имеет ряд специфических характеристик, которые определяют приоритетность и объемы его применения в различных отраслях народного хозяйства при сварке металла толщиной 40 мм и более за один проход [1].

Изучение физической природы ЭШС позволит не только повысить эффективность управления сварочным процессом для оптимизации размеров сварного шва и глубины проплавления основного металла, но и изыскать приемы снижения тепловложения в зоне сварки с целью сокращения объема последующей термической обработки металла сварного соединения, необходимой для восстановления высоких служебных характеристик сварной конструкции.

Поэтому изучение процессов, протекающих в межэлектродном промежутке при выполнении ЭШС, было всегда актуальным. Однако часто, в силу текущих запросов сварочного производства, указанное исследование уступало решению практических задач при разработке технологий сварки конкретных металлоконструкций тяжелого машиностроения, гидроэнергетики и других отраслей.

С начала разработки электрошлакового сварочного процесса исследователи стремились заглянуть в зону сварки. Первичные представления о процессах, происходящих в шлаковой ванне, были

получены с использованием приемов косвенного наблюдения и изложены в работах [2–6]. Первые сведения о форме плавящегося электрода и межэлектродного промежутка были получены Г. З. Волошкевичем [2, 3]. Однако в силу ряда технических причин, полученные результаты не позволили изучить динамику процессов, происходящих в межэлектродном промежутке.

Позднее авторам работ [7, 8] удалось более успешно осуществить прямое наблюдение процесса ЭШС и его скоростную киносъемку путем проведения специально подготовленных экспериментов с применением термостойкого стекла, которое было установлено вместо медного водоохлаждаемого ползуна.

Известно, что явления, наблюдаемые в зоне сварки, возникают в процессе преобразования электрической энергии в тепловую (электрические параметры режима сварки). Их характер зависит также от физико-химических свойств шлаковой ванны и электродного материала.

Согласно литературным данным [1–3, 9] нагрев и плавление проволочного электрода происходит в области активного контакта его поверхности, которая смачивается шлаком. Площадь этой поверхности переменная и зависит от параметров режима сварки (значения напряжения на шлаковой ванне, сварочного тока, диаметра и скорости подачи электрода, глубины шлаковой ванны и др.). Для установившихся процессов ЭШС, используемых на практике, площадь поверхно-

сти контакта может изменяться в широких пределах, например, для проволоки диаметром 3 мм — 14...110 мм<sup>2</sup> [9]. Расплавленный электродный металл проволоки стекает по ее боковой поверхности в промежутке между концом электрода и металлической ванной. В результате компьютерной обработки кадров кино съемки шлаковой ванны были выделены ее характерные участки: зона наиболее высоких температур, которая непосредственно контактирует с концом электрода, и зона, температура которой ниже, чем у указанной, но более высокая, чем у основного объема шлаковой ванны [9].

Результаты исследования через оптически прозрачную среду электрошлакового сварочного процесса проволочным электродом подтвердили известные основные определения физической сущности этого процесса [1], а также позволили развить представления о явлениях, имеющих место в активной зоне шлаковой ванны, от которых зависят плавление основного металла и формирование шва [9].

На основании прямых визуальных наблюдений зоны сварки показано существование в расплавленном шлаке между концом электродной проволоки и металлической ванной некоего энергетического ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом в зоне сварки.

При исследовании и анализе характеристик режима сварки зафиксированы:

- циклический (длительностью 0,3...0,6 с) характер изменения размеров этого ядра;
- возрастание до критического состояния энергетических характеристик ядра перед завершением цикла;
- показано, что понятие глубины металлической ванны, обычно определяемое по макрошлифам, не отвечает действительным ее мгновенным параметрам.

При этом высказано предположение, что «взрывное» изменение энергетических характеристик области между торцом электродной проволоки и металлической ванны перед завершением цикла происходит при образовании паров шлака. Эта область при переходе шлака из жидкого в парогазовое состояние за весьма короткое время увеличивается в объеме с ростом электропроводности и температуры пара шлака, достижением максимальной степени ионизации межэлектродного промежутка, возрастанием давления, что в совокупности приводит к взрывному завершению цикла.

При сокращении межэлектродного промежутка за счет испарения шлака возникает «разряд»\*, в объеме которого увеличивается давление и вы-

деление тепловой энергии. Давление «разряда» передается металлической ванне и всему объему шлака в импульсном режиме, посредством электрогидродинамических ударов, вызывающих в металлической и шлаковой ванне интенсивные тепловые потоки. Под действием этих потоков оплавляются свариваемые кромки и нагревается шлаковая ванна [9]. Приведенные результаты исследований были получены путем исследования визуальных явлений в шлаковой ванне без соответствующей записи электрических параметров режима сварки.

Цель настоящей работы состояла в изучении взаимосвязи между явлениями, визуально наблюдаемыми в зоне сварки, и основными электрическими параметрами режима сварочного процесса.

Методика выполнения экспериментальных работ:

1. С использованием аппарата А-535УХЛ4 и источника питания переменного тока ТШС 3000-3 выполняли ЭШС образцов из низколегированной стали 09Г2С толщиной 60 мм на режимах, идентичных тем, которые применялись в работе [8] ( $n = 2$ ,  $d_s = 3$  мм,  $h_{ш} = 45$  мм,  $V_{п.п} = 112$  и  $158$  м/ч,  $B = 27$  мм, флюс АН 8)\*\*;

2. В процессе сварки выполняли скоростную запись электрических параметров режима ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) с использованием датчиков Холла, модуля АЦП Е-140 и программного обеспечения «Power Graph»;

3. Численные значения электрических параметров сварочного процесса ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) фиксировались с частотой 10 тыс. записей в секунду (частота кино съемки составляла 100 кадров в секунду);

4. Одновременно с записью параметров режима выполняли замеры температуры шлаковой ванны с цифровой записью результатов. Термопару ВР 5/20, установленную в защитный термостойкий чехол, рабочий (погружаемый в шлаковую ванну) торец которого футеровали самоспекающейся графитной массой, погружали в шлаковую ванну на глубину 30 мм. Показания и запись потенциалов термопар в непрерывном режиме осуществляли с помощью цифрового вольтметра ВЦ 7-21 и видеокамеры. Так как известные приборы записи температуры весьма инерционны, предложенный прием позволил с более высоким разрешением зафиксировать изменения температуры во времени.

Схема электрических соединений при выполнении экспериментов с целью регистрации основ-

\* Для уточнения физической сущности термина «разряд» будут проведены дополнительные исследования.

\*\* В работе принимали участие Б. В. Цибуленко, В. Г. Ярмак, Г. С. Шульженко, Н. О. Червяков.

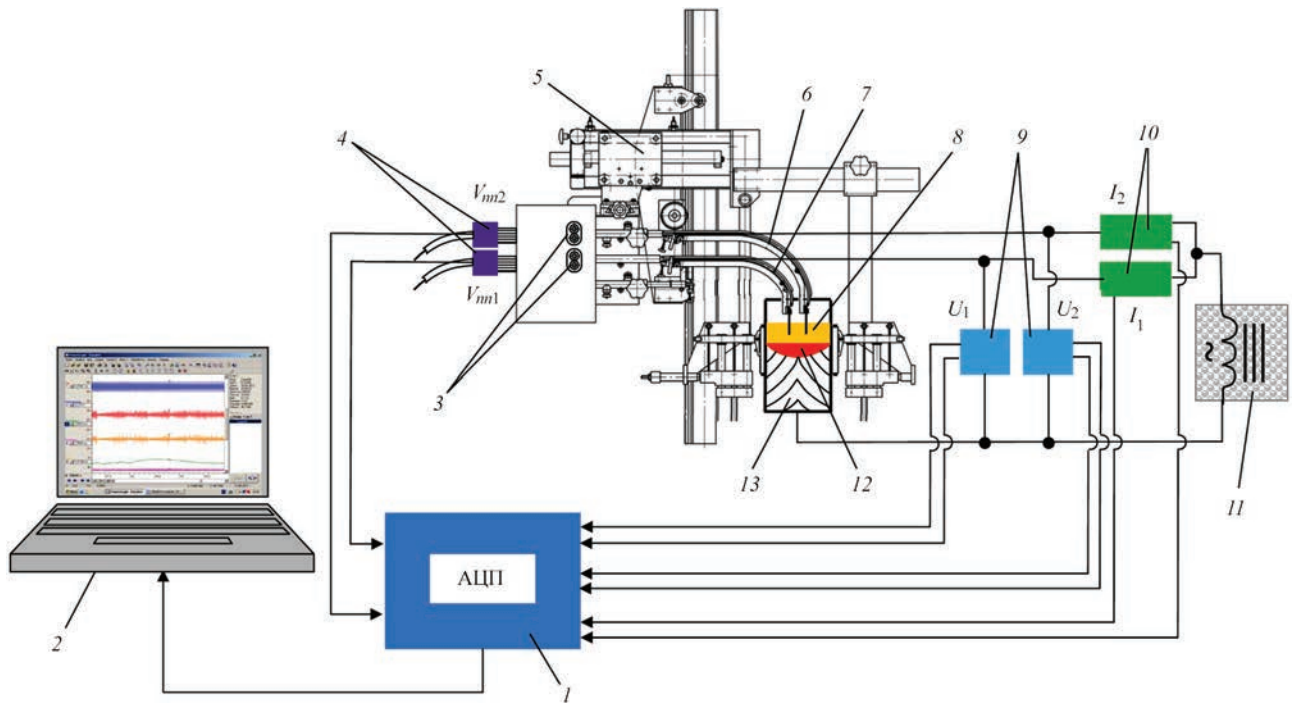


Рис. 1. Схема проведения высокоскоростной записи электрических параметров режима ЭШС: 1 — модуль АЦП Е-140; 2 — персональный компьютер; 3 — подающие ролики; 4 — датчики скорости подачи электродных проволок; 5 — сварочный аппарат А-535 УХЛ4; 6, 7 — верхний и нижний мундштуки; 8 — шлаковая ванна; 9 — датчики напряжения на мундштуках; 10 — датчики сварочного тока; 11 — источник питания; 12 — металлическая ванна; 13 — сварной шов

ных электрических параметров режима приведена на рис. 1.

Общий вид полученных осциллограмм основных электрических параметров режима сварки двумя электродными проволоками показан на рис. 2. Здесь представлен фрагмент скоростной записи сварочного тока, напряжения на шлаковой ванне и скорости подачи электродных проволок на обоих мундштуках (рис. 2, а).

В результате анализа и сопоставления визуальных эффектов киносъемки и записанных осциллограм электрических параметров режима на качественном уровне установлено следующее.

На осциллограммах установившегося режима ЭШС, как и на кадрах киносъемки, отчетливо зафиксирован циклический характер протекания сварочного процесса, который свойственен каждому из двух проволочных электродов и определяется динамикой плавления каждого электрода. При этом наблюдается некоторое смещение пиковых значений сварочного тока, несмотря на то, что оба электрода питаются от одного источника (рис. 2, а, б).

Показано, что размеры энергетического ядра, значения сварочного тока и формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. При этом на протяжении всего процесса ЭШС в межэлектродном промежутке наблюдаются два вида циклов различной продолжительности, завершающихся «разрядами», отличающимися своей интенсивностью (рис. 2). Каждый цикл завершается образованием «разряда» в ме-

таллическую ванну. После каждых 10...13 циклов продолжительностью 0,3...0,4 с, завершающихся «разрядами» сравнительно малой мощности в районе зеркала металлической ванны, наблюдаются циклы длительностью 0,5...0,7 с, завершающиеся «разрядами» большой мощности, при которых масса ядра достигает дна металлической ванны, что вызывает выплеск перегретого металла ванны на кромки основного металла с высокой скоростью (1,1...1,5 м/с).

Так, на участке протяженностью 3,5 с, отмечено 15...17 «разрядов» сравнительно малой мощности (рис. 2, а). Для начала цикла длительностью 0,4 с, завершающегося разрядом малой мощности, (рис. 2, б), характерны низкое значение сварочного тока, равное 312 А, и минимальный размер энергетического ядра. К моменту завершения «разряда» сварочный ток плавно возрастал до 622 А. Одновременно с ростом тока увеличивался размер энергетического ядра, которое смещалось к зеркалу металлической ванны. Напряжение на шлаковой ванне изменялось незначительно — в пределах 1,0...1,5 В.

На рис. 2, в приведен фрагмент осциллограммы, где интенсивность нарастания тока имела иной характер. Здесь цикл длительностью 0,5 с, завершающийся «разрядом» большой мощности, начинается при значении сварочного тока, равном 412 А, и заканчивается при значении 1580 А. При этом одновременно с ростом сварочного тока увеличивается площадь энергетического ядра от

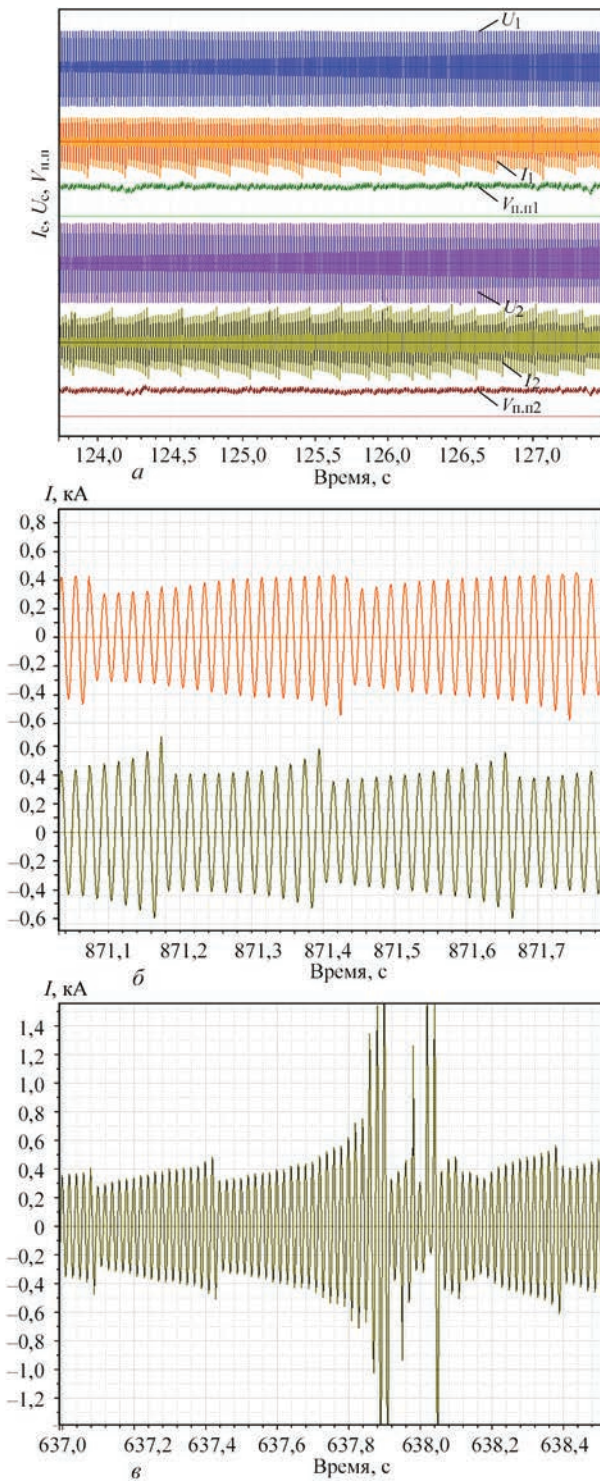


Рис. 2. Фрагменты записи осциллограмм параметров режима ЭШС ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{n.п}$ ) двумя электродами: *a* — общий вид процесса протяженностью 3,8 с; *б* — участок записи  $I_c$  в интервале 871,0...871,7 с; *в* — осциллограмма  $I_c$  на втором электроде в интервале 637,0...638,4 с

25 до 200 мм<sup>2</sup>. На участке резких пиков тока напряжение на шлаковой ванне уменьшается на 3,0...4,0 В.

Разрешающая способность использованной методики измерений электрических параметров режима обеспечила возможность зафиксировать изменения сварочного тока и напряжения, начи-

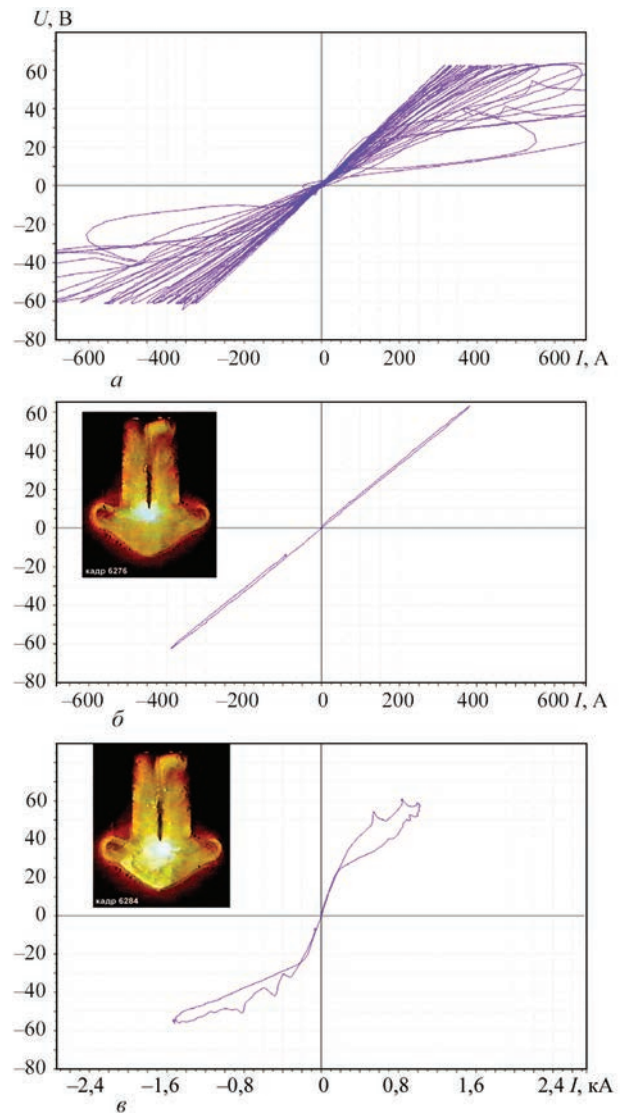


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика цикла длительностью 0,5 с на одном электроде и соответствующие фото зоны сварки: *a* — полного цикла (см. рис. 2, *в*); *б* — начало цикла (0,04 с); *в* — «разряд» в конце цикла (0,04 с)

ная с 0,001 с. Сопоставление осциллограмм сварочного тока с видеокадрами кино съемки в пределах одного цикла позволило проследить динамику формирования «разряда» от начала до конца его существования (рис. 3). Показано, что окончание существования «разряда» и переход его массы в виде электрогидродинамического удара в металлическую ванну характеризуется резким возрастанием сварочного тока (рис. 2, *в*) и тепловой энергии в межэлектродном промежутке.

Сопоставление динамики изменения формы металлической ванны с электрическими параметрами режима показало, что при завершении «разряда» большой мощности масса металлической ванны мгновенно перемещается вниз и достигнув ее дна движется вверх вдоль свариваемых кромок, оплавливая границы зерен основного металла.

Замеры температуры шлаковой ванны вблизи зоны плавления электрода показали, что ее изме-

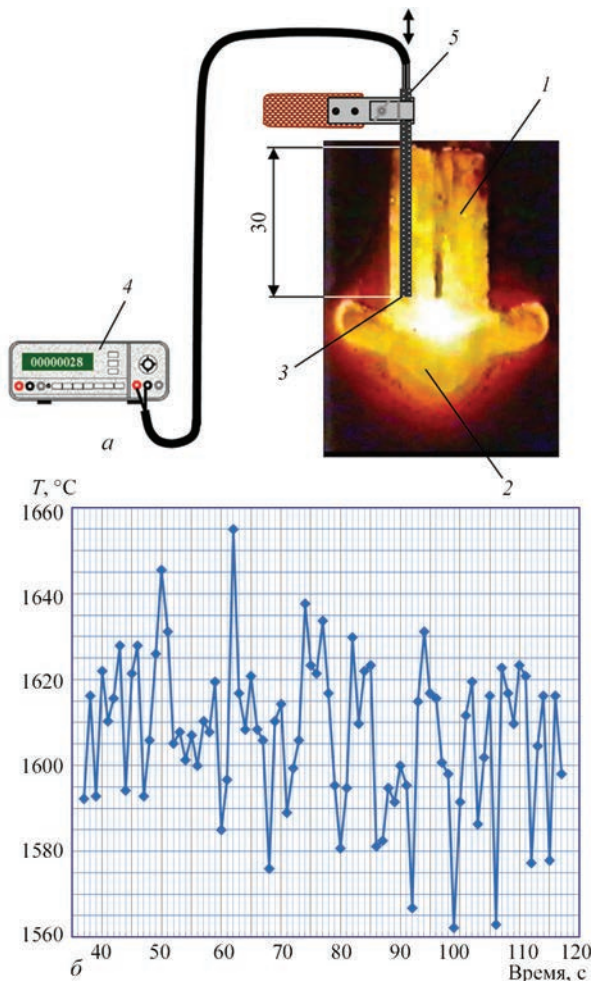


Рис. 4. Схема замеров температуры шлаковой ванны (а) (1 — шлаковая ванна; 2 — металлическая ванна; 3 — место заглубления термодпары; 4 — цифровой вольтметр; 5 — щуп с термодпарой в специальном защитном чехле) и фрагмент изменения ее температуры (б)

нение также носит циклический характер, однако прямой корреляции с циклическими изменениями сварочного тока и размерами ядра не установлено (рис. 4). При этом пики максимальной температуры шлаковой ванны наблюдаются после завершения 3...7 «разрядов» большой мощности. Несмотря на то, что недостаточная разрешающая способность применявшихся приборов не позволила установить корректную взаимосвязь результатов замеров температуры шлаковой ванны с частотой образования «разрядов», можно утверждать, что общая тенденция цикличности изменения температуры соблюдается.

**Выводы**

1. На основании анализа результатов прямых визуальных исследований зоны сварки через оптически прозрачную среду и осциллограмм параметров установившегося режима ЭШС ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) подтверждено существование в расплавленном шлаке между электродной проволокой и зеркалом металлической ванны некоего энергетического

ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом в зоне сварки.

2. Сопоставительный анализ на качественном уровне динамики изменения геометрических параметров зоны сварки и основных электрических параметров сварочного процесса показал, что размеры энергетического ядра в расплавленном шлаке, значение сварочного тока, количество разрядов и характер изменения формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. Причем каждый цикл завершается «разрядом» в металлическую ванну.

3. Для дальнейшего расширения представлений о процессах, протекающих в межэлектродном промежутке при ЭШС проволочным электродом и разработки приемов регулирования тепловложения в основной металл путем управления формой и интенсивностью «разрядов», а также условий существования энергетического ядра, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с обеспечением корректной синхронизации фиксируемых видеоэффектов зоны сварки с результатами регистрации электрических параметров режима.

**Список литературы**

1. Патон Б.Е. (ред.) (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Москва, Машиностроение.
2. Волошкевич Г.З. (1955) Рентгенографическое исследование плавания электрода и переноса металла. *Проблемы электродуговой и контактной сварки*. Москва, Машгиз, сс. 292–300.
3. Волошкевич Г.З. (1958) Плавнение электрода и перенос металла при электрошлаковой сварке. *Автоматическая сварка*, № 1, 14–21.
4. Ando A., Nakata S., Wada H. (1970) Studies on the electroslog welding (report 111). *J. Jap. Weld. Soc.*, 40, 11, 1104–1110.
5. Kaluç E., Taban E., Dhooge A. Elektrocuruf Kayanak Yöntemi ve Endüstriyel Uygulamaları (Electroslog Welding Process And Industrial Applications). *Metal Dünyasi, Ocak 2006 Sayı: 152. Yil: 13, Sayfa*, 100–104.
6. Brandt S.D., Liu S., Thomas R.D. (2012) Electroslog and electrogas welding. *AWS Welding handbook*, № 1, 365–379.
7. Kónigsmark J. (1970) Přímá pozorování elektrostruskového procesu při svařování drátovou elektrodou průměru 3,15 mm (Direct observation of electroslog process at welding with wire electrode with diameter of 3.15 mm). *ZVARANIE. XIX*, č. 9–10, 265–269.
8. Дудко Д.А., Волошкевич Г.З., Сушук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. (1971) Исследование электрошлакового процесса с помощью кино-, фотосъемки через прозрачную среду. *Автоматическая сварка*, 2, 15–17.
9. Патон Б.Е., Лычко И.И., Ющенко К.А. и др. (2013) Плавнение электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Там же*, 7, 33–40.

**References**

1. (1980) *Electroslog welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Voloshkevich, G.Z. (1955) X-ray investigation of electrode melting and metal transfer. In: *Problems of electric arc and resistance welding*. Moscow, Mashgiz, 292-300 [in Russian].
3. Voloshkevich, G.Z. (1958) Electrode melting and metal transfer in electroslog welding. *Avtomatich. Svarka*, № 1, 14-21 [in Russian].



4. Ando, A., Nakata, S., Wada, H. (1970) Studies on the electroslag welding (Report 111). *J. Jap. Weld. Soc.*, 40(11), 1104-1110.
5. Kaluc, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) *Electroslag welding process and industrial applications*. Metal Duniyasi, Ocak 2006 Sayi: 152, Yil: 13, Sayfa, 100-104 [in Turkish].
6. Brandi, S.D., Liu, S., Thomas, R.D. (2012) Electroslag and electrogas welding. *AWS Welding Handbook*, 6, 365-379.
7. Konigsmark, J. (1970) Direct observation of electroslag process at welding with wire electrode with diameter of 3.15 mm. *Zvaranie*, 19(9), 265-269 [in Slovak].
8. Dudko, D.A., Voloshkevich, G.Z., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (1971) Study of electroslag process using filming and photography through transparent medium. *Avtomatich. Svarka*, 2, 15-17 [in Russian].
9. 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.

## ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ТА ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

І.І. Личко, К.А. Ющенко, С.О. Супрун, С.М. Козулін

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

Викладено результати експериментальних досліджень зв'язку процесів, що протікають в зоні плавлення електродного дроту з електричними параметрами режиму електрошлакового зварювання. Методика виконання експериментів передбачала електрошлакове зварювання зразків зі сталі 09Г2С товщиною 60 мм на режимах, ідентичних режимам, при яких раніше виконували фото- та кінозйомку зони зварювання із застосуванням оптично прозорого середовища. З використанням датчиків Холла модуля АЦП E-140 і програмного забезпечення «Power Graph» здійснювали високошвидкісний запис електричних параметрів режиму (10 тис. записів в с). Одночасно проводили виміри температури шлакової ванни в районі зони плавлення електродного дроту. Виконували аналіз і зіставлення візуальних спостережень зони зварювання через оптично прозору середу з характеристиками режиму електрошлакового зварювання ( $U_c, I_c, V_{н.п}$ ), в результаті чого підтверджено циклічне існування в розплавленому шлаку між електродним дротом і рідким металом якогось ядра, що формується під дією електричного потенціалу між основним і електродним металом. Бібліогр. 9, рис. 4.

*Ключові слова:* електрошлакове зварювання, шлакова ванна, міжелектродний проміжок, швидкісний запис електричних параметрів режиму, активна зона, енергетичне ядро, «розряд», плавлення та перенесення рідкого металу, швидкісна кіно-, фотозйомка

## PECULIARITIES OF ELECTRODE AND BASE METAL MELTING IN ELECTROSLAG WELDING

I.I. Lychko, K.A. Yushchenko, S.A. Suprun, S.M. Kozulin

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of experimental studies of the connection between the processes proceeding in the electrode wire melting zone and electric parameters of the mode of electroslag welding are described. The experimental procedure envisaged electroslag welding of samples from 09G2S steel 60 mm thick in modes identical to those, used earlier for photographing and filming the welding zone through an optically transparent medium. Hall sensor, ATSP E-140 module and Power Graph software were applied for high-speed recording of electric parameters of the mode (10 thous. records per second). Measurements of slag pool temperature near the electrode wire melting zone were taken simultaneously. Analysis and comparison of visual observations of the welding zone through an optically transparent medium with the characteristics of electroslag welding mode ( $U_w, I_w, V_w$ ) were performed, confirming the cyclic existence of an energy nugget in the molten slag between the electrode wire and liquid metal, formed under the impact of electric potential between the base and electrode metal. 9 Ref., 4 Fig.

*Keywords:* electroslag welding, slag pool, interelectrode gap, high-speed recoding of electric parameters of the mode, active zone, energy nugget, plasma-type discharge, melting and transfer of liquid metal, high-speed photographing and filming

Поступила в редакцію 15.11.2018



**ООО «Фрониус Украина»  
проводит семинары:**

**15 мая 2019 г. — «Автоматизация сварочных процессов»**

**20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»**

**Контакты:** тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua

## ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОГО НАГРЕВА ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РОТОРНОЙ СТАЛИ ЗАМЕДЛЕННОМУ РАЗРУШЕНИЮ

**В.Ю. Скульский<sup>1</sup>, С.И. Моравецкий<sup>1</sup>, М.А. Нимко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пашенко<sup>2</sup>, А.Г. Кантор<sup>2</sup>, В.В. Дмитрик<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>АО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, просп. Московский, 199. E-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)

<sup>3</sup>НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2. E-mail: [svarka126@ukr.net](mailto:svarka126@ukr.net)

На примере соединений роторной стали типа 0,25C–2CrNiMoV, полученных сваркой под флюсом, с применением метода Имплант экспериментально изучено изменение сопротивления замедленному разрушению в зависимости от температуры предварительного подогрева и термического воздействия при наслоении новых валиков. Исследован характер изменения твердости в поперечном сечении закаливающейся стали с наплавкой, иллюстрирующий формирование участков закалки и отпуска под воздействием повторного сварочного нагрева. Используя в качестве количественного показателя критические напряжения, вызывающие замедленное разрушение, показано, что после повторных сварочных нагревов сопротивление трещинообразованию может возрасти приблизительно в 1,5...2,5 раза и более. В условиях сварки без предварительного подогрева повторные однократный и двухкратный циклы сварочного нагрева повышают стойкость против трещин до уровня, получаемого при сварке с подогревом до 150...200 °С. Библиогр. 9, рис. 4.

*Ключевые слова:* сталь теплоустойчивая роторная, сварка под флюсом, закалка, повторный сварочный нагрев, Имплант, сопротивление замедленному разрушению

Одним из достоинств автоматической сварки под флюсом является высокая производительность, что позволяет получать соединения металла повышенных сечений при уменьшенном количестве проходов. Увеличение производительности достигается за счет большей тепловой мощности сварочной дуги. Однако сварка на режимах с повышенной погонной энергией ведет к увеличению сварочных напряжений [1], что может отрицательно сказываться на работоспособности сварных соединений. Кроме того, сварочные напряжения являются фактором, провоцирующим развитие замедленного разрушения сварных соединений закаливающих сталей; в свою очередь чрезмерный разогрев ведет к нежелательным структурным изменениям, увеличению размера зерна в околошовной зоне, что также негативно сказывается на эксплуатационных свойствах, увеличивает вероятность замедленного разрушения и образования трещин повторного нагрева [2–5]. С целью снижения уровня остаточных напряжений следует ограничивать вклад тепла в зону соединения, а также ограничивать температуру предварительного подогрева [1, 2]. Применительно к сварным соединениям энергомашиностроительных сталей больших толщин, включая роторные конструкции, применяют многопроходную свар-

ку под флюсом в узкую разделку. Рациональная технологическая схема также предусматривает ограничение погонной энергии для получения оптимального сечения наплавляемых валиков, что обеспечивает качественное формирование сварного соединения и снижение уровня остаточных напряжений [5].

Таким образом, во многих случаях многопроходная сварка с ограничением параметров сварочного режима является более предпочтительной, что сказывается положительно как на снижении напряженно-деформированного состояния, так и на формировании однородной структуры и результирующих свойств. Проблема образования холодных трещин решается применением предварительного и сопутствующего сварке подогрева. Как показано в работе [6] на примере многопроходной ручной дуговой сварки покрытыми электродами, повторный нагрев, за счет воздействия на структурный и водородный факторы, позволяет значительно повысить сопротивление замедленному разрушению металла в ранее выполненных слоях. Это дает возможность несколько снизить температуру предварительного подогрева, делая процесс сварки более экономичным. Представляет интерес проверить возможность получения подобного эффекта в условиях автоматической сварки под флюсом.

Цель работы — оценка влияния повторного нагрева при сварке под флюсом на сопротивление закаливающейся стали образованию холодных трещин.

Исследования выполнены с использованием роторной стали типа 0,25С–2Cr–NiMoV. Испытания на склонность к образованию холодных трещин проведены по методу Имплант [3] с использованием образцов диаметром 8 мм со спиральным концентратором напряжений в рабочей части. Показателем стойкости против трещинообразования было минимальное (критическое) напряжение  $\sigma_{кр}$ , выше которого развивалось замедленное разрушение. Автоматическую сварку образцов — Имплант с опорной пластиной (из стали 20) и наложение технологических валиков выполняли проволокой с системой легирования 0,14С–Cr–2NiMo под агломерированным флюсом UV422ТТ основного типа (основность по Бонишевскому 2,5 для мас. %). Измерение температуры в ЗТВ образца проводили с помощью термопары, пропущенной в отверстие в торце пластины и приваренной к образцу с помощью конденсаторной машины [6, рис. 1]. Твердость измеряли по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 50 Н. Для определения концентрации диффузионного водорода  $[H]_{диф}$  в наплавленном металле ( $5,23 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$ ) применен спиртовой метод [7]; пробы металла получали путем наплавки валика на поверхность стали с просверленным отверстием — при смещении дуги в зону отверстия стекающий металл попадал в разъемную медную изложницу, в которой формировался «карандашный» образец для анализа. Повторный нагрев металла в области ранее наплавленного валика создавали, наплавляя один новый валик по центру первого (схема 1+1) или два частично перехлестывающихся валика, наложенных при смещении проволоки от зенита первого приблизительно на 1/4 его ширины (схема 1+2). При наплавке в качестве базового использовали следующий режим:  $I_{св} = 320...340 \text{ А}$ ,  $U = 35 \text{ В}$ ,  $V_{св} = 19 \text{ м/ч}$ ; там, где указано дополнительно, выполняли наплавку только валиков нового слоя на пониженном токе —  $I_{св} = 250...280 \text{ А}$ , напряжение и скорость оставались как и в базовом режиме. В экспериментах наплавку каждого из последующих валиков проводили после охлаждения металла с предыдущей наплавкой до температуры  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  и ниже; нагружение испытываемых соединений выполняли после их остывания до комнатной температуры (до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  соединения охлаждали на спокойном воздухе, после — ускорено с обдувом

воздухом). В отличие от рекомендованной ГОСТ 26388-84 температуры нагружения  $150...100 \text{ }^\circ\text{C}$ , выбранный подход обусловлен тем, что, как установлено экспериментально [8], в интервале  $120...100 \text{ }^\circ\text{C}$  соединения сталей с мартенситной и мартенситно-бейнитной структурой (типа испытуемой) проявляли нестабильность в сопротивлении замедленному разрушению, а в интервале  $100...80 \text{ }^\circ\text{C}$  — весьма высокую склонность к разрушению. Предполагая, что такая высокая чувствительность к факторам, вызывающим замедленное разрушение, и нестабильное поведение нагруженных сварных соединений при их остывании от  $150...100 \text{ }^\circ\text{C}$ , могут повлиять на точность результатов проводимых сравнительных исследований, принято решение нагружать соединения при комнатной температуре. При оценке влияния повторных нагревов на сопротивление трещинообразованию сварочные операции проводили без предварительного подогрева.

Установленный экспериментально характер изменения стойкости против замедленного разрушения изначально закаленного металла в ЗТВ после повторных циклов нагрева (рис. 1) согласуется с результатами аналогичных экспериментов при ручной дуговой сварке [6]. Исходя из изменений критических напряжений следует, что весьма эффективным является наложение двух последующих валиков (схема 1+2) — сопротивление трещинообразованию, по сравнению со сваркой одним валиком, увеличилось приблизительно в 2,5 раза; однократный нагрев дает промежуточный результат —  $\sigma_{кр}$  увеличилось в 1,6 раза. Еще больший эффект получен после повторного нагрева при выполнении второго и третьего валиков при снижении тока (на графике — схема 1+2, «пониженный режим»).

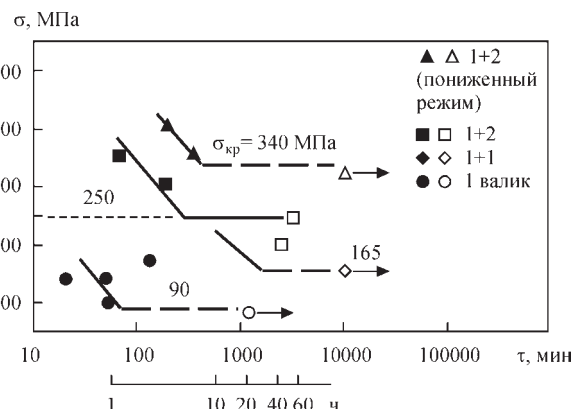


Рис. 1. Влияние повторного нагрева при автоматической сварке под флюсом (без предварительного подогрева) на склонность опытных соединений роторной стали типа 0,25С–2CrNiMoV к замедленному разрушению (темные и светлые значки — есть и нет разрушения, соответственно).  $[H]_{диф} = 5,23 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$

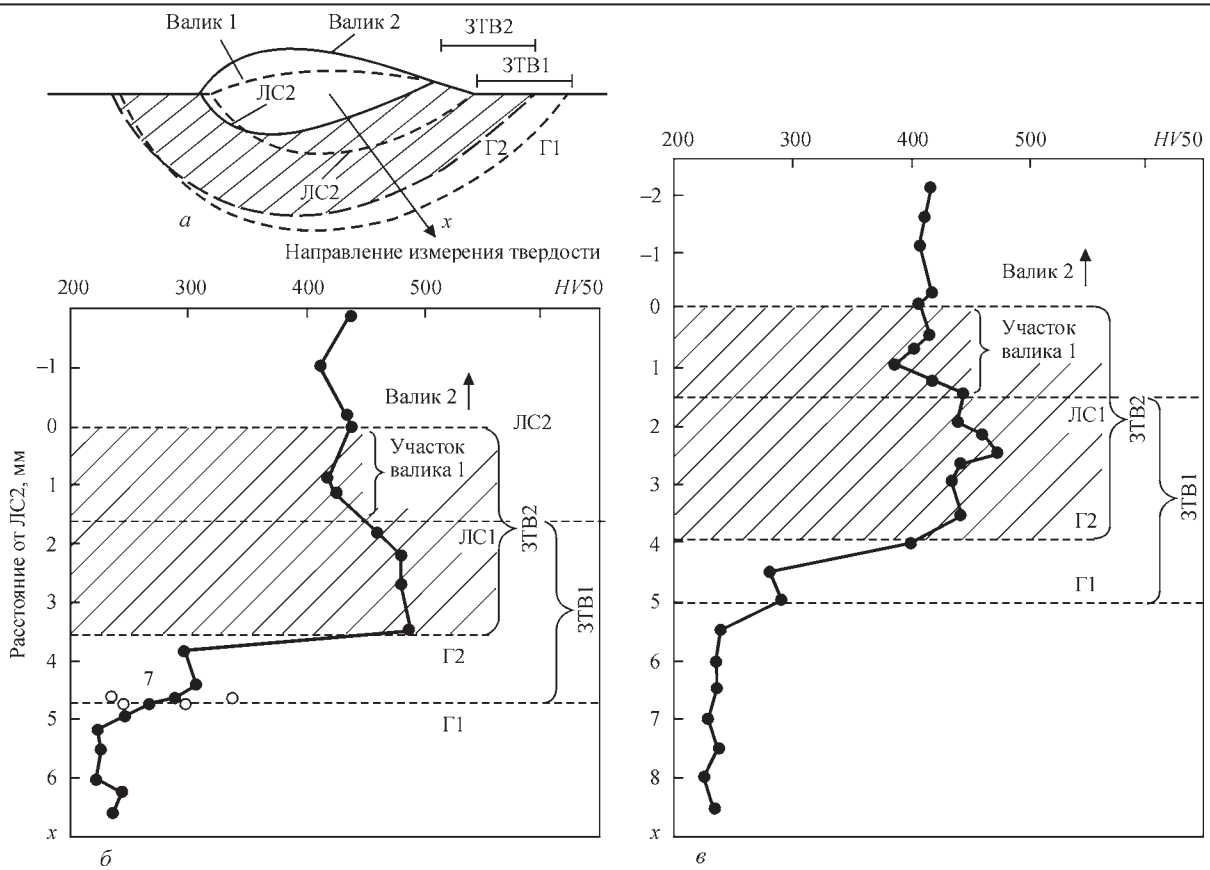


Рис. 2. Изменение твердости в различных зонах поперечного сечения металла с наплавкой двух валиков: *a* — схема наложения второго валика и направление измерения твердости; *b* — соответствующее схеме (*a*) распределение значений твердости при наплавке валиков на режиме с погонной энергией  $q/v = 13$  кДж/см ( $I_{св} = 200$  А,  $U_d = 43$  В,  $V_{св} = 19$  м/ч); *c* — профиль значений твердости при наплавке валиков на повышенном режиме —  $q/v = 16,23$  кДж/см ( $I_{св} = 250$  А,  $U_d = 43$  В,  $V_{св} = 19$  м/ч)

Изменение сопротивления трещинообразованию в определенной степени связано с геометрией поперечного сечения валиков, распределением температур и степенью отпуска закаленного участка в ЗТВ у исходного валика. При сварке на обычно используемых режимах наплавленные валки имеют вытянутую по ширине близкую к эллипсу форму. Как показали результаты изучения поперечных сечений валиков при автоматической наплавке под флюсом на поверхность стали (эксперименты выполнены с использованием стали X10CrMoVNb91), изменение погонной энергии за счет изменения силы тока в большей мере сказывается на увеличении ширины валиков и глубины проплавления, высота наплавки изменяется незначительно: например, при увеличении  $q/v$  от 14 до 20 кДж/см ширина, глубина проплавления и высота валика увеличились, соответственно, на 6,5; 1,8 и 1,0 мм. При наложении на неизменном сварочном режиме второго валика большая часть площади закаленного металла в ЗТВ у первого валика вновь подвергается закалке, что видно на схеме на рис. 2 (в данном случае второй валик выполнен с небольшим смещением от зенита первого; сокращениями обозначены: ЗТВ1, ЗТВ2

— участки закаленного металла, сформировавшиеся от нагревов при выполнении первого и второго валиков, очерченные граничными линиями Г1 и Г2; ЛС1, ЛС2 — соответствующие линии сплавления). На двух схемах изменения твердости видно, что выполнение новых валиков на меньшей (*b*) и большей (*c*) погонной энергии привело к падению твердости лишь на участках ЗТВ1 шириной около 1,0 мм при общей ширине ЗТВ1 для рассматриваемых вариантов приблизительно равной 3,0 и 3,5 мм. Естественно, что наложение только одного валика дает меньший отпускающий эффект, по сравнению с наложением двух, когда дополнительно металл в ЗТВ1 подвергается двукратному отпускающему нагреву (аналогичные результаты при ручной дуговой сварке получены в работе [6]). В свою очередь наложение двух новых валиков на пониженном токе за счет уменьшения глубины проплавления создает условие для воздействия отпускающих температур на большую площадь исходно закаленного металла в ЗТВ1. Результатом явилось повышение сопротивления замедленному разрушению, по сравнению с вариантом сварки одним валиком, приблизительно в 3,5 раза и, по сравнению со схемой 1+2, выполненной на ба-

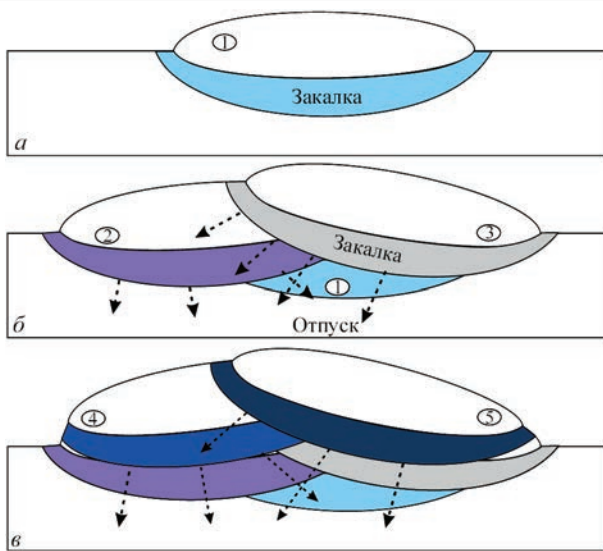


Рис. 3. Схема наложения валиков, формирование участков закалки (затененные области) и наложения температур отпуска (указаны стрелками): а — исходный валик; б, в — наложение двух слоев по два валика

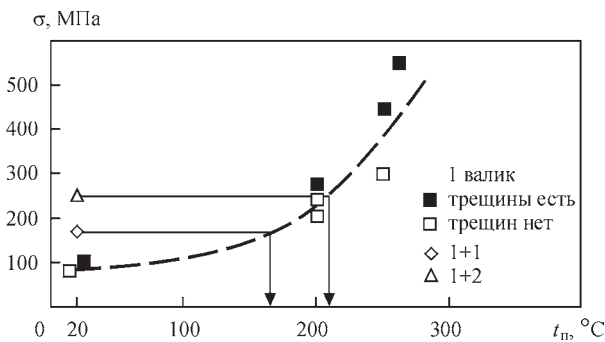


Рис. 4. Влияние температуры подогрева и условий сварки на сопротивление опытных соединений стали типа 0,25С–2CrNiMoV замедленному разрушению (20 °С — сварка без подогрева)

зовом режиме, — приблизительно в 1,5 раза. Подобный эффект следует ожидать при выполнении новых слоев наплавленных валиков, когда по мере удаления от исходного закаленного металла (в ЗТВ1) будет исключаться его повторная закалка при воздействии только температур отпускающего диапазона (рис. 3).

На рис. 4 представлено сопоставление критических напряжений, полученных при сварке без подогрева и с подогревом до температуры  $t_{п}$  250 °С. Данные показывают, что при сварке без подогрева двукратное термическое воздействие на закаленный металл в области первого прохода (схема 1+2) позволило достичь сопротивления трещинообразованию, эквивалентное сварке с подогревом приблизительно до 200 °С; однократный повторный нагрев (схема 1+1) также создал значительный положительный эффект, близкий к сварке с подогревом приблизительно до уровня 150 °С. На основании представленных выше результа-

тов, а также данных работы [6], можно полагать, что большее число последующих отпускающих циклов при многопроходной сварке под флюсом без подогрева должно обеспечивать еще больший эффект, сопоставимый со сваркой с подогревом до более высокой температуры. В то же время, как показано в работе [9] на примере сварных соединений теплоустойчивой стали 10CrMo9-10, предварительный подогрев при сварке под флюсом способствует снижению концентрации диффузионного водорода в зоне соединения. В этой связи повышение сопротивления замедленному разрушению при повторных циклах сварочного нагрева можно считать как следствие влияния на структурный и, в определенной степени, — на водородный факторы.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в условиях многопроходной сварки под флюсом закаливающихся сталей повторный сварочный нагрев существенно повышает стойкость сварных соединений замедленному разрушению, что проиллюстрировано увеличением критических напряжений, вызывающих трещинообразование, приблизительно в 1,5...2,5 раза и более в зависимости от количества циклов нагрева. Можно предположить, что с учетом положительного эффекта от повторных циклов термического воздействия возможно выполнение многопроходной сварки при пониженной температуре предварительного подогрева без риска ухудшения технологической прочности получаемых соединений.

### Список литературы

1. Лобанов Л.М., Миходуй Л.И., Пивторак В.А. и др. (1995). Влияние особенностей технологии сварки под флюсом на напряженное состояние сварных соединений высокопрочной стали. *Автоматическая сварка*, 9, 21–23.
2. Бурашенко И.А., Звездин Ю.И., Цуканов В.В. (1981) Обоснование температуры подогрева при сварке хромоникельмолибденованадиевых сталей мартенситного класса. *Там же*, 11, 16–20.
3. Новиков И.И. (1971) *Теория термической обработки*. Москва, Металлургия.
4. Скульский В.Ю. (2009) *Зварюваність теплостійких сталей для котлоагрегатів високим параметрів*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
5. Tsaryuk A.K., Skulsky V.Yu., Moravetsky S.I. (2016). Mechanized narrow-gap submerged arc welding of thick-walled cylindrical products. *Proceedings of the 2nd Medovar Memorial Symposium, June 7–10 2016, Kyiv, Ukraine*. Kyiv, Elmet-Roll.
6. Скульский В.Ю., Стрижиус Г.Н., Нимко М.А. и др. (2019) Сопротивление замедленному разрушению сварных соединений роторной стали 25Х2НМФА после повторного сварочного нагрева. *Автоматическая сварка*, 2, 9–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.02.01>
7. Козлов Р.А. (1986) *Сварка теплоустойчивых сталей*. Ленинград, Машиностроение.
8. Скульский В.Ю. (2009) Термокинетические особенности образования холодных трещин в сварных соединениях закаливающихся теплоустойчивых сталей. *Автоматическая сварка*, 3, 14–18.

9. Oring H., Shütz H., Klug P. (1996) Vorwärmen aus Sicht des Schweißgutes bei hoch- und warmfesten Schweißverbindungen. *Schweisstechnik*, **1**, 4–8.

References

1. Lobanov, L.M., Mikhoduj, L.I., Pivtorak, V.A. et al. (1995) Influence of peculiarities of submerged-arc welding technology on stress state of high-strength steel welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 21–23 [in Russian].  
 2. Burashenko, I.A., Zvezdin, Yu.I., Tsukanov, V.V. (1981) Substantiation of heating temperature in welding Cr-Ni-Mo-V steels of martensitic class. *Ib d.*, **11**, 16–20 [in Russian].  
 3. Novikov, I.I. (1971) *Theory of heat treatment*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].  
 4. Skulsky, V.Yu. (2009) *Weldability of heat-resistant steels for boiler units of high parameters*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].

5. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I. (2016) Mechanized narrow-gap submerged-arc welding of thick-walled cylindrical products. In: *Proc. of 2nd Medovar Memorium Symp. (June 7-10, 2016, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, Elmet-Roll.  
 6. Skulsky, V.Yu., Strizhius, G.N., Nimko, M.A. et al. (2019) Delayed fracture resistance of welded joints of rotor steel 25Kh2NMFA after welding reheating. *The Paton Welding J.*, **2**, 7–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2019.02.01>  
 7. Kozlov, R.A. (1986) *Welding of heat-resistant steels*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].  
 8. Skulsky, V.Yu. (2009) Thermokinetic peculiarities of formation of cold cracks in welded joints on hardening heat-resistant steels. *The Paton Welding J.*, **3**, 8–11.  
 9. Oring, H., Shuetz, H., Klug, P. (1996) Vorwaermen aus Sicht des Schweißgutes bei hoch- und warmfesten Schweißverbindungen. *Schweisstechnik*, **1**, 4–8 [in German].

ВПЛИВ ПОВТОРНОГО НАГРІВУ ПРИ БАГАТОПРОХІДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ НА ОПІР ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РОТОРНОЇ СТАЛІ УПОВІЛЬНЕНОМУ РУЙНУВАННЮ

В.Ю. Скульський<sup>1</sup>, С.І. Моравецький<sup>1</sup>, М.О. Німко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пашченко<sup>2</sup>, О.Г. Кантор<sup>2</sup>, В.В. Дмитрик<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)  
<sup>2</sup>АО «Турбоатом». 61037, м. Харків, просп. Московський, 199. E-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)  
<sup>3</sup>НТУ «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2. E-mail: [svarka126@ukr.net](mailto:svarka126@ukr.net)

На прикладі з'єднань роторної сталі типу 0,25С–2CrNiMoV, отриманих зварюванням під флюсом, із застосуванням методу Імплант експериментально вивчено зміну опору уповільненому руйнуванню в залежності від температури попереднього підігріву та термічної дії при нашаруванні нових валків. Досліджено характер зміни твердості в поперечному перерізі гартованої сталі з наплавленням, який ілюструє формування ділянок гартування та відпуску під впливом повторного зварювального нагріву. Використовуючи в якості кількісного показника критичні напруги, що викликають уповільнене руйнування, показано, що після повторних зварювальних нагрівів опір утворенню тріщин може зростати приблизно в 1,5...2,5 рази і більше. В умовах зварювання без попереднього підігріву повторні одноразовий і дворазовий цикли зварювального нагріву підвищують стійкість проти тріщин до рівня, одержуваного при зварюванні з підігрівом до 150...200 °С. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: сталь теплотривка роторна, зварювання під флюсом, гартування, повторний зварювальний нагрів, Імплант, опір уповільненому руйнуванню

EFFECT OF REPEATED HEATING IN MULTI-PASS SUBMERGED ARC WELDING ON RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF ROTOR STEEL TO DELAYED FRACTURE

V.Yu. Skulskyi<sup>1</sup>, S.I. Moravetskyi<sup>1</sup>, M.A. Nimko<sup>1</sup>, Yu.G. Pashchenko<sup>2</sup>, A.G. Kantor<sup>2</sup>, V.V. Dmytryk<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>JSC «Turboatom». 199 Moscow Ave., 61037, Kharkov, Ukraine. E-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)

<sup>3</sup>NTU «Kharkov Polytechnic Institute». 2 Kirpicheva Str., 61002, Kharkov, Ukraine

On the example of the 0.25C-2CrNiMoV rotary steel joints, produced by submerged arc welding using the Implant method, the change in resistance to delayed fracture depending on the temperature of preheating and thermal effect during deposition of new beads was experimentally studied. The nature of change in hardness in the cross-section of quenching steel with surfacing was investigated, which illustrates the formation of quenching and tempering areas under the influence of repeated welding heating. Using critical stresses as a quantitative indicator, causing a delayed fracture, it was shown that after repeated welding heating, the resistance to cracking can increase by about 1.5...2.5 times or more. In the conditions of welding without preheating, repeated one-time and two-time cycles of welding heating increase the resistance to cracks up to the level obtained during welding with preheating up to 150...200 °C. 9 Ref., 4 Fig.

Key words: heat-resistant rotary steel, submerged arc welding, quenching, repeated welding heating, Implant, resistance to delayed fracture

Поступила в редакцію 28.11.2018

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОПЛАВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

И.А. Рябцев<sup>1</sup>, А.А. Бабинец<sup>1</sup>, И.П. Лентюгов<sup>1</sup>, Э.В. Турык<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Институт сварки. г. Гливице, Польша. E-mail: Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl

Исследовано влияние скорости подачи электродной проволоки на проплавление основного металла и геометрические размеры наплавленных валиков при дуговой наплавке под флюсом. В экспериментах использовали четыре порошковые проволоки диаметром 1,2; 1,6; 1,8 и 2,0 мм. Регулирование скорости подачи осуществляли в диапазоне от минимального значения  $V_{\text{под. min}}$ , при котором возможен для данных условий стабильный процесс наплавки, и до максимального значения  $V_{\text{под. max}} = 450$  м/ч, которое определялось характеристиками используемой наплавочной установки. Установлено, что при наплавке с использованием высоких скоростей подачи проволоки, для каждого диаметра проволоки существует такое оптимальное соотношение величины скорости подачи и других параметров наплавки, при котором повышение этой скорости приводит к снижению глубины проплавления и доли основного металла в наплавленном при возрастающем токе наплавки. Результаты, полученные в данной работе, были успешно использованы при износостойкой дуговой наплавке стальных листов толщиной 3 мм, а также могут быть использованы при выборе режимов дуговой наплавки других деталей, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям их эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу и проплавлению основного металла. Библиогр. 10, табл. 4, рис. 5.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, режимы наплавки, скорость подачи электродной проволоки, проплавление основного металла, формирование наплавленного металла, порошковая проволока, наплавленный металл

Одной из основных характеристик различных способов наплавки является величина проплавления основного металла и, как следствие, доля основного металла в наплавленном металле (ДОМ). Как правило, при дуговой наплавке электродными проволоками доля основного металла в наплавленном металле колеблется в пределах 30...50 %, в результате, чтобы выйти на заданный химический состав наплавленного металла, необходимо наплавлять 4-5 слоев. Таким образом, уменьшение величины проплавления и ДОМ должно улучшать технико-экономические показатели процесса дуговой наплавки, и разработка мер по их снижению остается актуальной задачей [1].

Широко известно, что качество формирования наплавленного металла, его состав и структура, а также глубина проплавления основного металла и ДОМ, в основном, зависят от режимов наплавки [1-5]. К главным параметрам режима наплавки относят значение тока (скорость подачи электродной проволоки); полярность и род тока; напряжение дуги; скорость наплавки; диаметр (сечение) электродного материала; шаг наплавки; а при наплавке тел вращения — смещение с зенита или надира. Из них при разработке технологии дуговой наплавки конкретных деталей обычно задают величину тока и напряжения, скорость наплавки и диаметр (сечение) электродного материала [1, 5-8]. Такие параметры, как род и полярность тока,

величина вылета электродной проволоки и т. п. оказывают меньшее влияние на глубину проплавления и ДОМ, форму и размеры наплавленных валиков [6]. При этом, выбранный режим наплавки в первую очередь должен обеспечивать хорошее формирование наплавленного металла и минимальное, но достаточное проплавление основного металла или ранее наплавленного слоя [1].

Из упомянутых показателей режимов дуговой наплавки электродной проволокой на глубину проплавления основного металла и ДОМ наибольшее влияние оказывает ток наплавки. Увеличение силы тока приводит к резкому увеличению глубины проплавления и образованию высоких и узких валиков (рис. 1) [3]. При этом следует помнить о необходимом условии наплавки, а именно — поддержании устойчивого дугового процесса. Для этого скорость подачи электродной проволоки должна быть равна скорости ее плавления, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий или обрывов сварочной дуги [5, 7].

Ток наплавки тесно связан со скоростью подачи электродной проволоки, и с увеличением последней пропорционально растет ток наплавки. При неизменной скорости наплавки это ведет к увеличению количества наплавленного металла, попадающего на наплаваемую поверхность в единицу времени, что должно привести к изменению геометрических характеристик наплав-

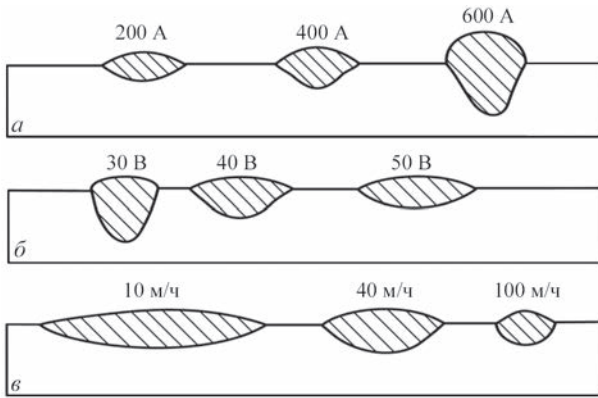


Рис. 1. Влияние параметров режима дуговой наплавки на форму валика [5]: *a* — ток; *б* — напряжение; *в* — скорость подаваемых валиков. В промышленной практике при дуговой наплавке различных деталей скорость подачи электродной проволоки обычно не превышает 200 м/ч, а подающие механизмы большинства существующих наплавочных установок и автоматов рассчитаны на этот показатель, не превышающий 450 м/ч [1].

Целью данной работы является изучение влияния скорости подачи электродной проволоки (тока наплавки) на глубину проплавления основного металла, ДОМ и формирование наплавленных валиков при дуговой наплавке.

Для исследования влияния скорости подачи проволоки на глубину проплавления основного металла при дуговой наплавке, была проведена серия экспериментов по наплавке одиночных валиков порошковыми проволоками диаметром 1,2; 1,6; 1,8 и 2,0 мм под флюсом. Регулирование скорости подачи осуществляли в диапазоне от минимального значения  $V_{\text{под, min}}$ , при котором для данных условий был возможен стабильный дуговой процесс, и до максимального значения  $V_{\text{под, max}} = 450$  м/ч, которое, как указывалось выше, определялось характеристиками используемой наплавочной установки У-653, укомплектованной источником питания ВДУ-506.

Наплавка всеми четырьмя порошковыми проволоками осуществлялась при постоянной скорости наплавки  $V_{\text{н}} = 27$  м/ч. Напряжение на дуге

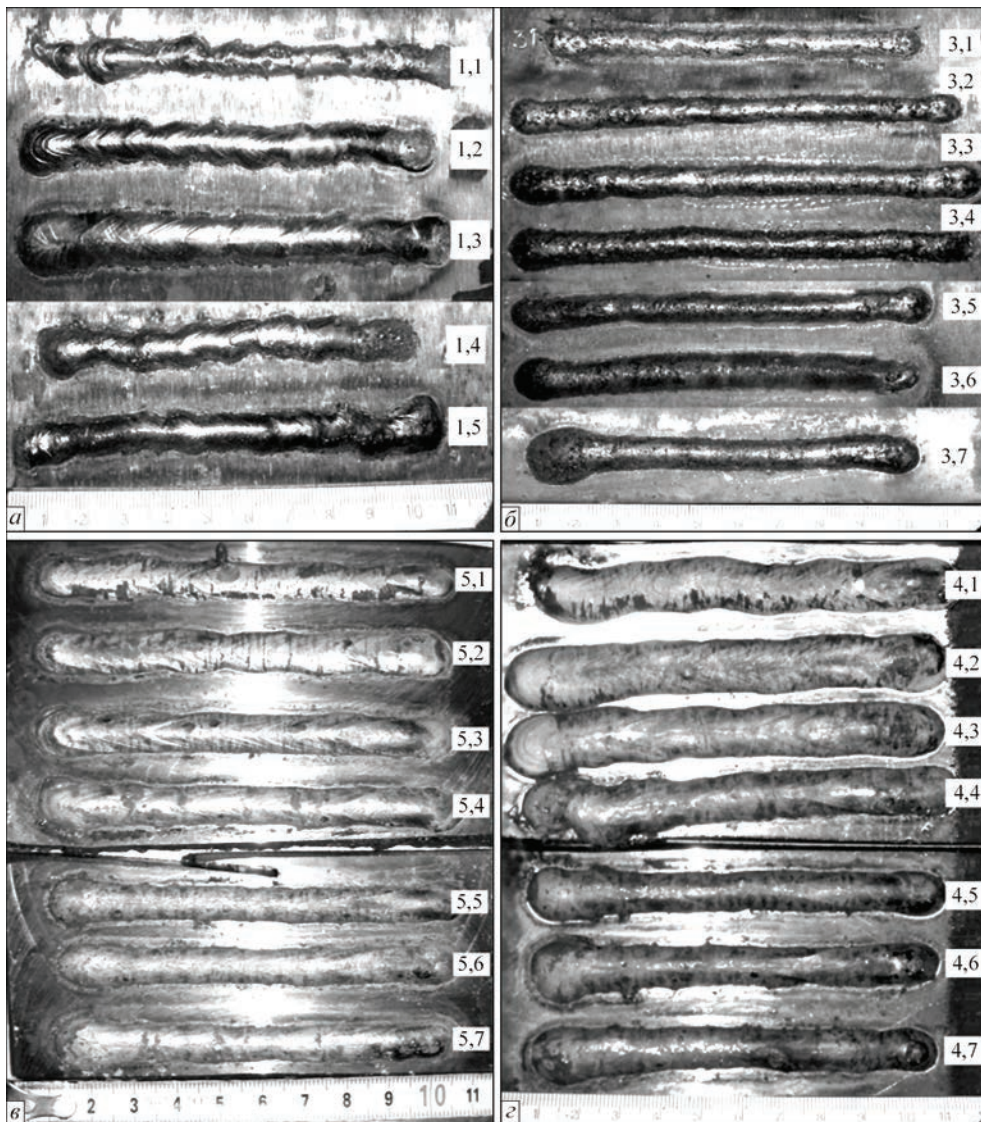


Рис. 2. Внешний вид образцов после наплавки проволоками диаметром: *a* — 1,2 мм; *б* — 1,6; *в* — 1,8; *г* — 2,0









также оставалось постоянным при наплавке проволокой одного диаметра: для проволоки диаметром 1,2 мм — 22 В; для проволоки диаметром 1,6 мм — 24 В и для проволок диаметром 1,8 и 2,0 мм — 26 В. Внешний вид образцов после наплавки приведен на рис. 2.

В процессе наплавки фиксировали значения скорости подачи проволоки и величину тока, которая ей соответствовала. Из наплавленных заготовок изготавливали поперечные макрошлифы, на которых проводили измерения ширины и высоты наплавленных валиков, глубины проплавления, а также рассчитывали ДОМ. Макрошлифы поперечных сечений наплавленных валиков и их размеры приведены в табл. 1–4.

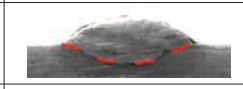
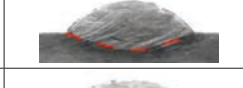
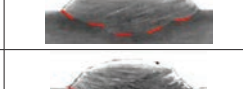
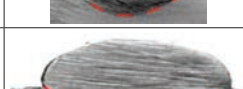

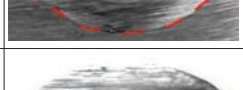
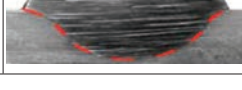
На основе полученных данных были построены зависимости влияния скорости подачи электродной проволоки на глубину проплавления основного металла (рис. 3) и ДОМ (рис. 4). Установлено, что с повышением скорости подачи электродной проволоки возрастает высота наплавленного валика, глубина проплавления, а также незначительно изменяется ширина валика (рис. 3, табл. 1–4). При этом с увеличением диаметра используемой порошковой проволоки эти зависимости усиливаются. Так, например, для проволоки диаметром 1,2 мм увеличение скорости подачи проволоки с 210 до 405 м/ч приводит к увеличению высоты валика в 1,3 раза, а для проволоки диаметром 2,0 мм этот же параметр в этом же диапазоне скоростей подачи возрастает в 2,4 раза, что связано с пропорциональным увеличением количества наплавляемого металла на единицу длины валика.

При постепенном повышении скорости подачи проволоки, а, следовательно, величины сварочного тока — от минимально возможного значения, при котором наблюдается стабильный процесс, до максимального значения, которое обеспечивается механизмом подачи установки, практически для всех диаметров исследуемых проволок отмечает-

**Таблица 1.** Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,2 мм

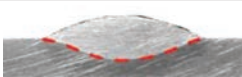
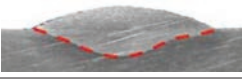
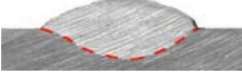
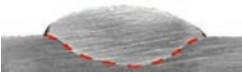
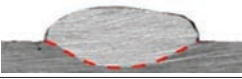


$V_{\text{под}}, \text{ м/ч}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	Размеры наплавленных валиков, мм			$\gamma_0, \%$	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
210	110	5,9	1,6	0,87	33	
260	130	7,6	1,7	0,91	34	
<b>310</b>	<b>150</b>	<b>7,8</b>	<b>1,9</b>	<b>0,68</b>	<b>32</b>	
360	160	7,9	1,9	0,92	31	
405	170	8,1	2,1	1,13	33	
450	190	8,5	2,2	1,17	31	

**Таблица 2.** Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,6 мм


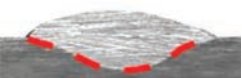
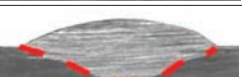



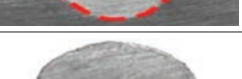
$V_{\text{под}}, \text{ м/ч}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	Размеры наплавленных валиков, мм			$\gamma_0, \%$	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	170	6,7	1,6	1,24	41	
210	190	7,1	2,1	1,45	38	
260	220	8,2	2,3	1,85	40	
310	260	7,8	2,5	2,49	46	
<b>360</b>	<b>300</b>	<b>7,4</b>	<b>3,6</b>	<b>2,21</b>	<b>53</b>	
405	320	9,9	3,5	3,04	40	
450	350	8,5	3,9	4,6	47	

ся некоторое снижение ДОМ (рис. 4). Это объясняется тем, что с увеличением силы тока и скорости подачи проволоки при неизменной скорости наплавки, скорость роста площади наплавленного металла значительно превышает скорость роста площади проплавления, и наплавленные валики получают «грибообразную» форму. Особенно это характерно при наплавке порошковыми проволоками диаметром 1,6 мм и более.

**Таблица 3.** Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,8 мм

$V_{\text{под}}$ , м/ч	$I_{\text{н}}$ , А	Размеры наплавленных валиков, мм			$\gamma_0$ , %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	200	9,9	1,7	1,74	48	
210	240	10,9	1,9	1,86	45	
260	280	9,9	3,2	3,04	45	
310	310	9,7	3,3	3,35	46	
360	330	9,3	3,6	2,99	38	
<b>405</b>	<b>Ø</b>	<b>9,3</b>	<b>3,7</b>	<b>2,70</b>	<b>38</b>	
450	390	8,7	3,8	3,74	39	

**Таблица 4.** Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 2,0 мм

$V_{\text{под}}$ , м/ч	$I_{\text{н}}$ , А	Размеры наплавленных валиков, мм			$\gamma_0$ , %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	250	11,7	1,7	1,94	51	
210	290	11,9	1,9	2,34	50	
260	320	12,0	2,3	2,57	48	
310	350	10,2	2,6	3,32	48	
360	380	8,8	3,7	3,4	42	
405	410	9,2	4,4	3,6	38	
<b>450</b>	<b>450</b>	<b>9,7</b>	<b>4,7</b>	<b>2,57</b>	<b>3</b>	

Вместе с тем также было установлено, что при наплавке проволокой каждого диаметра существует определенный диапазон, в котором пропорциональность влияния скорости подачи проволоки на глубину проплавления нарушается. В этом диапазоне с увеличением скорости подачи (при возрастающем токе) происходит снижение глубины

проплавления (рис. 3, заштрихованные области).

Наиболее существенно такая зависимость проявляется при наплавке проволокой диаметром 1,2 мм. В случае наплавки при скорости подачи электродной проволоки  $V_{\text{под}} = 310$  м/ч наблюдается не только снижение глубины проплавления на 25 % в сравнении с наплавкой при скорости подачи  $V_{\text{под}} = 260$  м/ч, но и минимальное значение проплавления (0,68 мм) для всего исследуемого диапазона скоростей подачи проволоки. Также для наплавки проволокой диаметром 1,2 мм при скорости ее подачи  $V_{\text{под}} = 310$  м/ч характерно снижение ДОМ с 34 до 29 %, что также является минимальным значением для всего исследуемого диапазона.

Было также отмечено, что чем больше диаметр проволоки, тем при большей скорости подачи наблюдается снижение глубины проплавления. Так, для диаметра 1,2 мм этот эффект проявляется при скорости подачи 310 м/ч; для диаметра 1,6 мм — при 360 м/ч; для диаметра 1,8 мм — при 405 м/ч; и для диаметра 2,0 мм — при скорости подачи 450 м/ч.

Однако при этом значения плотности тока  $J$ , при котором наблюдается это явление, для всех исследованных диаметров электродной проволоки находятся в довольно узком диапазоне: для диаметра 1,2 мм — плотность тока  $J = 136$  А/мм<sup>2</sup>, для диаметра 1,6 мм —  $J = 144$  А/мм<sup>2</sup>; для диаметра 1,8 мм —  $J = 142$  А/мм<sup>2</sup> и для диаметра 2,0 мм —  $J = 143$  А/мм<sup>2</sup>. Среднее значение плотности тока для всех диаметров составляет  $J \approx 140 \pm 4$  А/мм<sup>2</sup>. Очевидно, в этом случае устанавливается благоприятный тепловой баланс процесса

наплавки, при котором рост площади наплавленного металла выше, чем увеличение площади (глубины) проплавления. Результаты, полученные в данной работе, защищены патентом Украины [9].

Наплавка на повышенных скоростях подачи порошковой электродной проволоки была успеш-

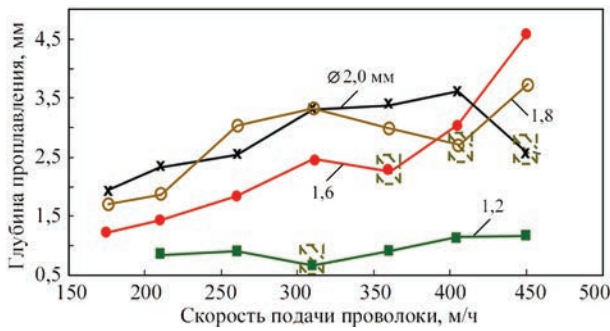


Рис. 3. Влияние скорости подачи проволоки на глубину проплавления: штриховкой выделена зона уменьшения глубины проплавления при возрастающем токе

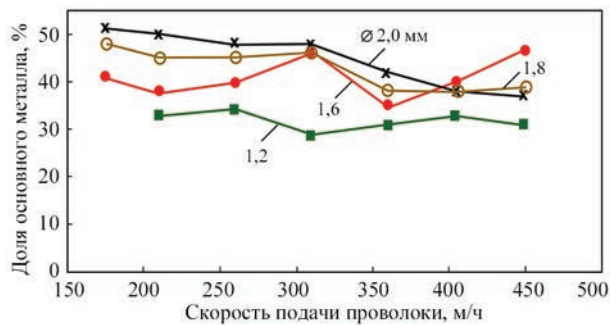


Рис. 4. Влияние скорости подачи электродной проволоки различных диаметров на ДОМ



Рис. 5. Внешний вид стального листа толщиной 3 мм, подготовленного под наплавку (а), и фрагмент наплавленного листа (б)

но применена при износостойкой дуговой наплавке стальных листов толщиной 3 мм. Известно [10], что одной из основных проблем при наплавке листов такой толщины является возможность появления прожогов в процессе наплавки.

Наплавку листов размерами 3×200×300 мм выполняли порошковой проволокой диаметром 1,2 мм под флюсом, на режиме:  $V_{\text{под}} = 310$  м/ч ( $I = 150$  А),  $U = 22$  В,  $V_n = 30$  м/ч, перекрытие соседних валиков  $\approx 50$  %. Для снижения деформации листов в процессе наплавки применялось приспособление с охлаждаемым медным столом, на котором листы закреплялись при помощи прижимных планок. Внешний вид листа, подготовленного под наплавку и закрепленного в приспособлении, приведен на рис. 5, а; а внешний вид фрагмента наплавленного листа — на рис. 5, б. Контроль подтвердил качественное формирование наплавленного металла и отсутствие дефектов наплавки в виде прожогов, пор, трещин и других дефектов.

### Выводы

1. При дуговой наплавке с использованием высоких скоростей подачи проволоки, для каждого диаметра проволоки существует такое оптимальное соотношение величины скорости подачи и других параметров наплавки, при котором ее повышение приводит к снижению глубины проплавления и ДОМ при возрастающем токе наплавки.

2. Значения плотности тока  $J$ , при котором наблюдается снижение глубины проплавления, для всех исследованных диаметров электродной проволоки находятся в узком диапазоне: для диаметра 1,2 мм —  $J = 136$  А/мм<sup>2</sup>; для диаметра 1,6 мм —  $J = 144$  А/мм<sup>2</sup>; для диаметра 1,8 мм —  $J = 142$  А/мм<sup>2</sup> и для диаметра 2,0 мм —  $J = 143$  А/мм<sup>2</sup>. Среднее значение плотности тока для всех диаметров составляет  $J \approx 140 \pm 4$  А/мм<sup>2</sup>. В этом случае устанавливается благоприятный тепловой баланс процесса наплавки, при котором рост площади наплавленного металла выше, чем увеличение площади (глубины) проплавления.

3. Результаты исследований были успешно использованы при разработке технологии износостойкой дуговой наплавки под флюсом стальных листов толщиной 3 мм. Контроль подтвердил качественное формирование наплавленного металла и отсутствие дефектов наплавки в виде прожогов, пор, трещин и других дефектов.

### Список литературы

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.
2. Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
3. Юзвенко Ю.А., Кирилук Г.А. (1973) *Наплавка порошковой проволокой*. Москва, Машиностроение.
4. Бабинцев А.А., Рябцев И.А., Панфилов А.И. и др. (2016) Влияние способов дуговой наплавки порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла. *Автоматическая сварка*, **11**, 20–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.08.01>
5. Фрумин И.И. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков, Металлургиздат.

6. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. (1977) *Технологии и оборудование сварки плавлением*. Москва, Машиностроение.
7. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П. (2003) *Восстановление деталей машин: Справочник*. Иванов В.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
8. Иванов В.П., Лаврова Е.В. (2016) Управление формированием зоны проплавления при электродуговой наплавке. *Автоматическая сварка*, **8**, 6–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.11.04>
9. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П. (2018) Спосіб електродугового наплавлення порошковим дротом під флюсом. Україна Пат. № 127598.
10. Бабінець А.А., Рябцев І.А. (2017) Порошковая проволока для износостойкой наплавки тонколистовых конструкций. *Автоматическая сварка*, **1**, 64–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.01.10>
3. Yuzvenko, Yu.A., Kirilyuk, G.A. (1973) *Flux-cored wire surfacing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.I. et al. (2016) Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding J.*, **11**, 17-22. <https://doi.org/10.15407/as2016.08.01>
5. Frumin, I.I. (1961) *Automatic electric arc surfacing*. Kharkov, Metallurgizdat [in Russian].
6. Akulov, A.I., Belchuk, G.A., Demyantsevich, V.P. (1977) *Technology and equipment of fusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Panteleenko, F.I., Lyalyakin, V.P., Ivanov, V.P. (2003) *Restoration of machine parts: Refer. Book*. Ed. by V.P. Ivanov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Ivanov, V.P., Lavrova, E.V. (2016) Controlling penetration zone formation in arc surfacing. *The Paton Welding J.*, **8**, 2-6. <https://doi.org/10.15407/as2016.11.04>
9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. (2018) Method of submerged-arc surfacing with flux-cored wire. Pat. 127598, Ukraine [in Ukrainian].
10. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2017) Flux-cored wire for wear-resistant surfacing of thin-sheet structures. *The Paton Welding J.*, **1**, 54-57. <https://doi.org/10.15407/as2017.01.10>

## References

1. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
2. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Flux-cored wire welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ

### НА ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

І.О. Рябцев<sup>1</sup>, А.А. Бабінець<sup>1</sup>, І.П. Лентюгов<sup>1</sup>, Є.В. Турик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут зварювання. м. Глівіце, Польща. E-mail: [Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl](mailto:Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl)

Досліджено вплив швидкості подачі електродного дроту на проплавлення основного металу і геометричні розміри наплавлених валиків при дуговому наплавленні під флюсом. В експериментах використовували чотири порошкові дроти діаметром 1,2; 1,6; 1,8 і 2,0 мм. Регулювання швидкості подачі здійснювали в діапазоні від мінімального значення  $V_{\text{под.мін}}$ , при якому можливий для даних умов стабільний процес наплавлення, і до максимального значення  $V_{\text{под.макс}} = 450$  м/г, яке визначалося характеристиками використовуваної наплавочної установки. Встановлено, що при наплавленні з використанням високих швидкостей подачі дроту, для кожного діаметра дроту існує таке оптимальне співвідношення величини швидкості подачі і інших параметрів наплавлення, при якому підвищення цієї швидкості призводить до зниження глибини проплавлення і частки основного металу в наплавленому при зростаючому струмі наплавлення. Результати, отримані в даній роботі, були успішно використані при зносостійкому дуговому наплавленні сталевих листів товщиною 3 мм, а також можуть бути використані при виборі режимів дугової наплавки інших деталей, які найбільшою мірою задовольняють умовам їх експлуатації та вимогам до наплавленого металу і проплавленню основного металу. Бібліогр. 10, табл. 4, рис. 5.

*Ключові слова:* дугова наплавка, режими наплавлення, швидкість подачі електродного дроту, проплавлення основного металу, формування наплавленого металу, порошковий дріт, наплавлений метал

## INFLUENCE OF ELECTRODE WIRE FEED RATE ON BASE METAL PENETRATION IN ARC SURFACING

I.A. Ryabtsev<sup>1</sup>, A.A. Babinets<sup>1</sup>, I.P. Lentyugov<sup>1</sup>, E.V. Turyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150 Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Institute of Welding, Gliwice, Poland: E-mail: [Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl](mailto:Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl)

Influence of electrode wire feed rate on base metal penetration and geometrical dimensions of deposited beads at submerged-arc surfacing was studied. Four flux-cored wires of 1.2; 1.6; 1.8 and 2.0 mm diameter were used in the experiments. Feed rate regulation was performed in the range from minimum value  $V_{f,\text{min}}$ , at which a stable surfacing process can be in place for these conditions, and up to maximum value  $V_{f,\text{max}} = 450$  m/h, which was determined by the characteristics of the used surfacing unit. It is found that at surfacing with high wire feed rates, there exists such an optimum ratio of feed rate and other surfacing parameters for each wire diameter, at which increase of this rate leads to reduction of penetration depth and share of base metal in the deposited metal at rising surfacing current. Results, obtained in this work, were successfully applied at wear-resistant arc surfacing of 3 mm steel sheets, and can also be used in selection of modes of arc surfacing of other parts, which to the greatest extent meet their operating conditions, and requirements to deposited metal and base metal penetration. 10 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* arc surfacing, surfacing modes, electrode wire feed rate, base metal penetration, deposited metal formation, flux-cored wire, deposited metal

Поступила в редакцію 28.12.2018

## СВАРИВАЕМОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

**А.А. Полишко, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Е.В. Антипин, А.В. Дидковский, А.Ю. Туник**  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследований структуры и свойств образцов лабораторной выплавки рельсового металла (в слабдеформированном и литом состоянии), полученного электрошлаковым переплавом после контактной стыковой сварки оплавлением. Исследования показали, что микроструктура металла шва и зоны термического влияния в обоих случаях отличается однородным плотным строением. Разрушение образцов происходило преимущественно в зоне термического влияния. Прочность сварных соединений из металла в литом состоянии ниже, чем слабдеформированного, что, по-видимому, обусловлено крупным зерном, размер которого может быть измельчен применением термической обработки. Рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и слабдеформированном состоянии имеет уровень механических свойств в диапазоне требований, предъявляемых к нетермоупрочненным рельсам К76 по ГОСТ Р 51045 и ДСТУ 4344, что открывает перспективы применения электрошлакового переплава для изготовления рельсов, в том числе и остряковых рельсов, применяемых в литом состоянии. Библиогр. 25, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, рельсовая сталь, электрошлаковый переплав, слабдеформированный и литой металл, сварной стык, металлографические исследования, механические свойства

Тенденцией развития железных дорог сегодня является повышение скорости движения, организация которого для пассажирских поездов потребовала изменений в техническом оснащении путей и технологиях производства и соединения рельсов [1]. На железных дорогах Украины для особо нагруженных участков железнодорожного пути в последнее время производится укладка высокопрочных рельсов нового поколения К76Ф (ДСТУ 4344:2004), 76Ф (ГОСТ Р 51045-97) и, не так давно, R350HT (EN 13674-1:2011+A1:2017) [2]. Все эти рельсы произведены в конвертерах с последующей внепечной обработкой и, далее, непрерывной разливкой и прокаткой стали. В силу отсутствия современного балко-рельсового стана на ПАО «МК «Азовсталь» (г. Мариуполь, «Метинвест») отечественные рельсы не во всем удовлетворяют современным требованиям (малая длина и невысокая стойкость, которая практически в два раза ниже, чем зарубежных образцов) [3, 4]. Импортные рельсы в среднем выстаивают в пути до замены прохождения по ним примерно 800...1000 млн брутто тонн грузов против 450...500 млн брутто тонн у отечественных [5].

Для уменьшения повреждений рельсов при их взаимодействии с колесами подвижного состава необходимо обеспечить высокую твердость, износостойкость, контактно-усталостную прочность металла головки, и, одновременно, пластичность, вязкость, стойкость к знакопеременным нагрузкам шейки и подошвы рельса [6].

С этой целью рельсовые стали проходят внепечную и вакуумную обработку, однако, несмотря на глубокую очистку стали, неметаллические включения (НВ) неблагоприятной морфологии часто являются причиной разрушения рельсов [7–9]. Так, исследованиями ВНИИЖТ [10, 11] установлено, что на вязкость разрушения, в первую очередь, влияют форма и размер включений, характер их и распределение в стали.

Исследователями ПАО «МК «Азовсталь» показано, что наиболее опасными являются остроугольные включения нитридов титана и подобные, а также крупные включения оксида алюминия и их скопления, которые являются продуктами раскисления и микролегирования рельсовой стали, что привело к смене технологии производства рельсов [12, 13].

Эффективным способом удаления НВ и изменения их морфологии на благоприятную является процесс электрошлакового переплава [14, 15]. На сегодня выполнен широкий комплекс исследований НВ в металле ЭШП, который показал, что при переплаве под фторидно-оксидными шлаками количество НВ в металле слитка значительно ниже, чем в исходном электроде за счет рафинирования металла от серы и ассимиляции их шлаком [16–18].

Известно, что современные рельсы изготавливают из непрерывно литых заготовок последующей прокаткой. Скорость разливки на МНЛЗ зависит от сечения заготовки и может достигать

Таблица 1. Сравнение методов сварки рельсов [23]

Способ сварки	Время сварки, мин	Оборудование		Навыки оператора	Качество сварного шва
		Начальные капиталовложения	Мобильность		
КСС	2...4	Большие	Низкая	Не требуются	Превосходное
Газопрессовая	5...7	Большие	Средняя	Требуются	Превосходное
Термитная	30	Небольшие	Высокая	Не требуются	Хорошее
Электродуговая	60	Небольшие	Высокая	Требуются	Хорошее

нескольких метров в минуту. Большая скорость разлива непрерывно литой заготовки приводит к образованию глубокой жидкой лунки, где подпитка усадки ограничена. Это приводит к возникновению дефектов сегрегации и пористости. Однако значительно уменьшить скорость разлива невозможно, так как мениск остывает и качество поверхности заготовки при этом ухудшается. Напротив, при электрошлаковом переплаве (ЭШП) можно получить очень плотную структуру металла, но производительность процесса ЭШП намного меньше и стоимость процесса при этом значительно выше, чем непрерывной разлива. Основываясь на мировом опыте использования ЭШП можно ожидать, что увеличение стоимости рельсов при их изготовлении методом ЭШП с расходуемыми электродами не будет превышать \$ 100...300 за тонну.

Работы по получению качественного рельсового металла методом ЭШП были начаты в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ совместно с ПАО «МК «Азовсталь» еще в 1980-х годах. Опытная партия рельсов из стали ЭШП прошла полномасштабные натурные испытания на экспериментальном кольце ВНИИЖТ радиусом 400 м по кривой, размещенном на шпалах из дерева, которые показали, что долговечность рельсов из стали, выполненных ЭШП, в 3,4...4,7 раза выше, чем сравнительных [19]. Однако в то время увеличение стоимости рельсов в 2 раза стало основным препятствием для использования ЭШП. Чтобы оценить преимущества металла, полученного ЭШП для различных ответственных назначений, нами проведены экспериментальные плавки [20, 21] и комплекс исследований качества металла темплетов в литом состоянии, после небольшой деформации и в сварных стыках.

Целью работы является оценка на основе комплекса исследований структуры и свойств образцов лабораторной выплавки возможности применения рельсового металла (в слабдеформированном и литом состоянии), полученного методом ЭШП, для рельсового пути, соединяемого контактной стыковой сваркой оплавлением.

**Сварка рельсов. Виды процессов.** Соединение рельсов в плети и затем в путь произво-

дят сваркой, чтобы уменьшить число стыков и достичь максимальной плавности хода. Более того, удар колеса при переходе через стык рельсов вызывает опережающий износ их концов. Авторы работы [22] показали, что на дорогах с преимущественно пассажирским движением поездов (SNCF, HSPC, NS, DB, EJR) число дефектов в сварных соединениях составляет от 5 до 30 % общего их количества, а на дорогах для грузовых перевозок (SPOORNET, НН1, НН2) и смешанных (BRANVERKET) большее количество дефектов наблюдается как раз в сварных соединениях (от 15 до 60 %). Поэтому необходимо уделять особое внимание качеству сварного шва.

Для соединения рельсов высокоскоростных и высоконагруженных магистралей в мире применяют четыре основные технологии сварки, которые обеспечивают безопасность и надежность рельсовых сварных соединений. Это контактная стыковая (КСС), газопрессовая, термитная и электродуговая сварка [23] (табл. 1).

Каждый из рассматриваемых способов сварки рельсов отличается собственными «плюсами» и «минусами». В Украине для сварки рельсовых сталей применяют в основном КСС, которая широко распространена и за рубежом, поскольку обеспечивает современные жесточайшие требования к бесстыковым железнодорожным путям.

**Методика изготовления образцов электрошлакового металла, их контактная стыковая сварка и металлографические исследования.** Металл для экспериментальной программы выплавляли традиционным электрошлаковым процессом в лабораторных условиях на печи вместимостью 3 т с вытяжкой слитка при скоростях вытяжки 20 и 40 мм/мин. В качестве расходуемого электрода использовали рельс К76Ф (содержание углерода до 0,82 %) промышленной выплавки (ДСТУ 4344:2004). Использовали шлак АНФ-28М состава, мас. %: 47 CaF<sub>2</sub>; 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 21 CaO; 11 MgO; 18 SiO<sub>2</sub>. Получили слитки ЭШП диаметром 180 мм, из которых вырезали темплеты для сварки в литом виде. Часть металла слитков ЭШП из рельсовой стали прокатали на полосу с нагревом заготовок до температуры 1050 °С. Степень деформации была 4:1, поскольку возмож-

ности лабораторного стана, на котором вели прокатку, ограничены.

Для сравнительной оценки качества сварных соединений рельсовой стали электрошлаковой выплавки на образцах (пластинах) площадью поперечного сечения 1020 мм<sup>2</sup> из литого и слабдеформированного металла КСС проводили по технологии непрерывного оплавления. Режим сварки выбирали в соответствии с параметрами, регламентирующимися в ТУ У 24.1-40075815-002:2016 для рельсов Р65 [24, 25]. В качестве основного параметра, определяющего энергозатраты, приняли длительность оплавления, которая для рельсов Р65 составляет 180 с.

Металлографические исследования проводили на микроскопе «Neophot-32», оснащенный приставкой для цифрового фотографирования «QuickPhoto». Полученные изображения обрабатывали программой «Atlas» при увеличениях 25 ... 500 раз в светлом поле. Для выявления микроструктуры шлифы травили в растворе 5 %-ой азотной кислоты.

Механические испытания литого и деформированного металла ЭШП рельсовой стали, а также их сварных соединений, проводили по стандартной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 6996-66 на статическое (кратковременное) растяжение на образцах типа Ми3 и Ми18 на машине MTS 318.25 (США) с обработкой в программном обеспечении TestWorks4

(MTS), обеспечивающем удовлетворительную точность результатов ( $\pm 0,5\%$ ).

**Исследования структуры и свойств литого и деформированного металла из слитка ЭШП.** Металл слитков рельсовой стали электрошлакового переплава имеет однородную плотную структуру. Каких-либо дефектов обнаружено не было. Размер перлитных зерен в слитке ЭШП со скоростью вытягивания 20 мм/мин составляет 100...120 мкм, субзерен 20...30 мкм, в то время как размер перлитных зерен в слитке, полученном при скорости вытяжки 40 мм/мин, достигает 80...100 мкм, субзерен 10...15 мкм. Таким образом, даже небольшое снижение скорости подачи металла при постепенном формировании слитка оказывает положительное влияние на его структуру. Повышается и плотность за счет улучшения подпитки усадки, что способствует избежанию центральной неоднородности слитка.

Металл обоих слитков ЭШП имеет типичную перлитную равномерную микроструктуру с тонкими lamелями цементита (рис. 1). Измерения межпластинчатого расстояния в перлите показали близкие результаты для металла обоих слитков (0,74 и 0,56 мкм для слитков со скоростью вытяжки 20 и 40 мм/мин соответственно). Дисперсность перлита в металле слитков после ЭШП меньше, нежели обычно наблюдаемая в образцах рельсовой стали после деформации и термической обработки (около 0,2 мкм), однако, следует учитывать,

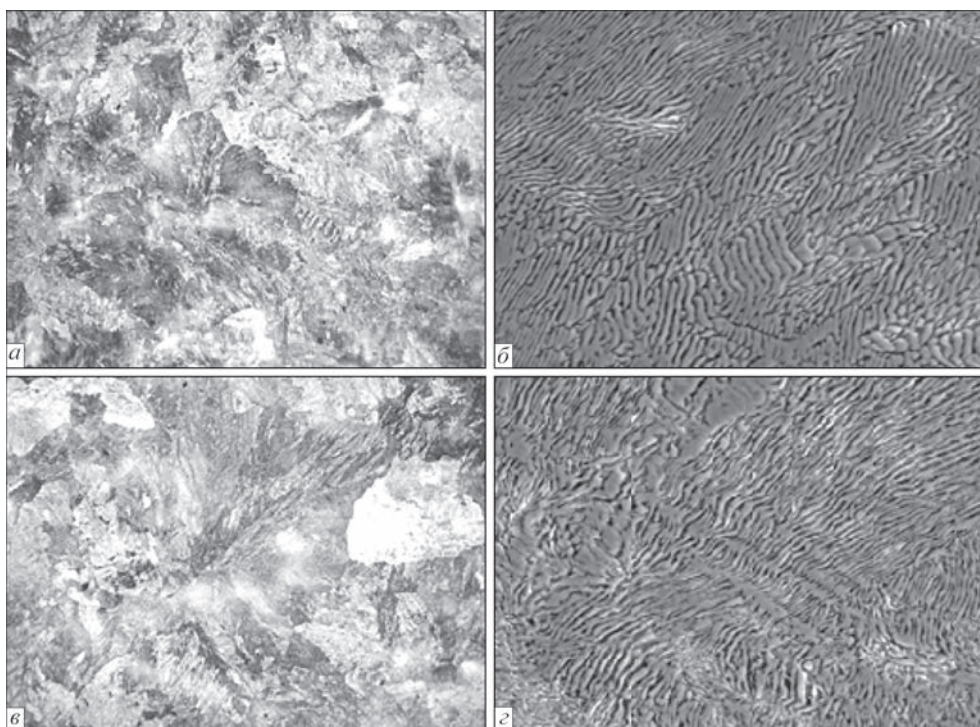


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 100$ ) оптическая (а, в) и СЭМ (б, г) образцов металла модельных слитков ЭШП, сформированных с разной скоростью вытяжки: а, б — 20 мм/мин; в, г — 40 мм/мин

Таблица 2. Химический состав рельсовой стали К76Ф до и после ЭШП

Марка	Стандарт	Содержание элементов, мас. %						
		C	Mn	Si	V	Al	P	S
К76Ф	ДСТУ 4344:2004	0,71...0,82	0,8...1,3	0,25...0,45	0,03...0,07	0,025	0,035	0,04
К76Ф	После ЭШП	0,76	0,93	0,11	0,05	0,020	0,035	0,020

что это литой металл без деформации и термической обработки.

Результаты спектрального химического анализа металла до и после электрошлакового переплава приведены в табл. 2 Анализ содержания элементов свидетельствует о соответствии марочному составу стали К76Ф согласно ДСТУ 4344:2004. Наблюдается снижение содержания кремния и серы.

Сварку темплетов из литой и слабдеформированной (далее — деформированной) рельсовой стали электрошлакового переплава выполнили на стационарной машине К1000 разработки ИЭС при одинаковых режимах. Сваренные стыки пластин длиной 350...400 мм после удаления грата разрезали на образцы для всесторонних металлографических исследований и механических испытаний с целью оценки качества полученных соединений.

Темплеты литого металла под сварку составляли таким образом, чтобы сварные соединения, выполненные КСС, формировались в продольном сечении модельных слитков ЭШП по двум вариантам направления роста кристаллов: по росту (сварной стык соединяет центральные части продольных темплетов) и с переворотом на 180° таким образом, чтобы стык соединял худшие зоны слитка ЭШП — головную и донные части. Сварку деформированного металла проводили вдоль направления прокатки. Общий вид сварного соединения представлен на рис. 2. На поверхности сварных стыков образовался грат шириной 13...15 мм, высотой 12...13 мм. Ширина зоны термического влияния сварного соединения достигает по 30 мм в каждую сторону.

Структура металла всех стыков из рельсовой стали, полученной ЭШП, ферритно-перлитная, с харак-

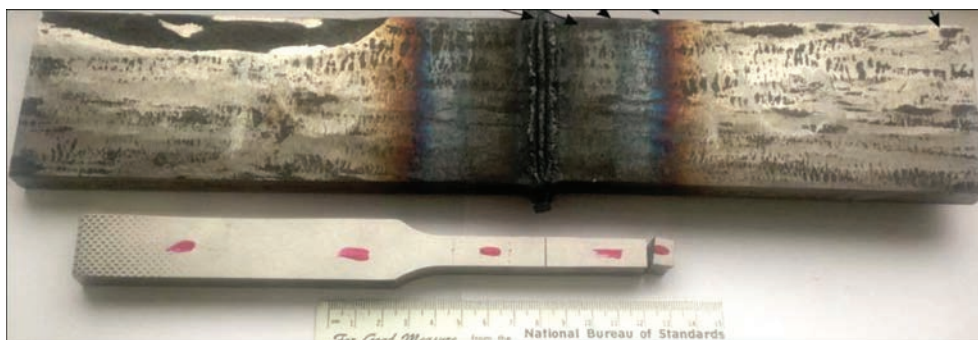


Рис. 2. Сварные стыки темплетов деформированного металла ЭШП

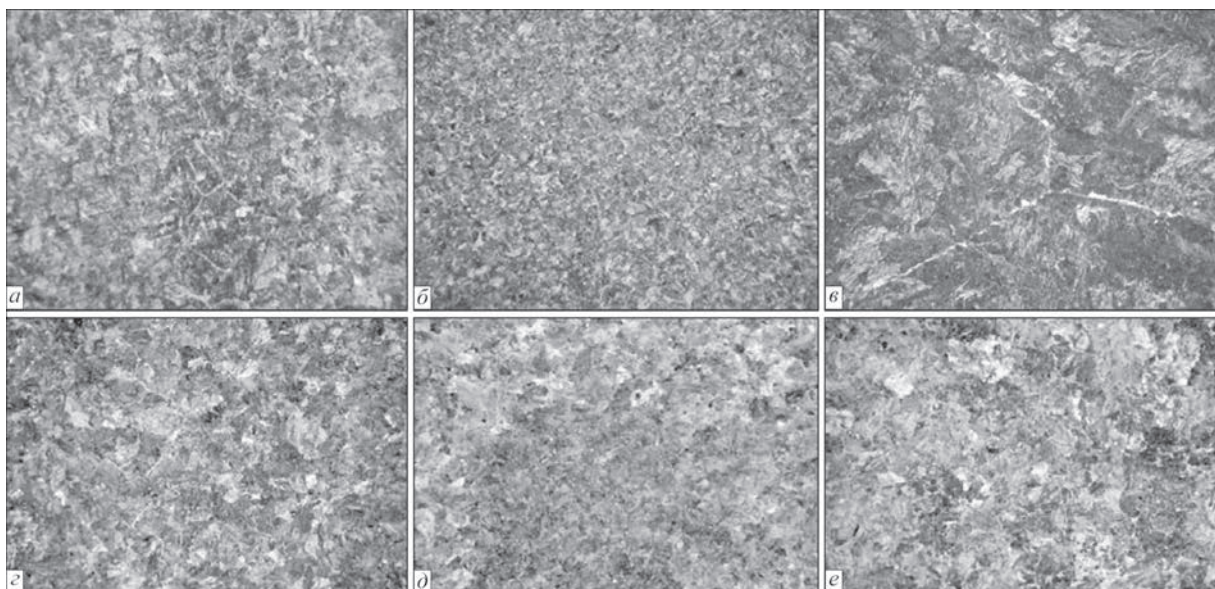


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) сварного соединения литого (а-в) и деформированного (г-е) металла рельсовой стали ЭШП: а, г — шов; б, д — ЗТВ; в, е — ОМ



**Таблица 3.** Механические свойства литого и деформированного металла рельсовой стали ЭШП до сварки и сварных соединений, выполненных КСС

Состояние металла		$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
До сварки	Литой	871...887	2...3
	Деформированный	954...959	4...5
После КСС	Литой	647...795	2...3
	Деформированный	989...995	4...5
ГОСТ Р 51045 – 97		780 (для нетермоупрочненных)	3

терными для сварных соединений зонами (рис. 3). Микроструктура сварных швов из литого и деформированного металла однородна и состоит из равноосных зерен примерно одинакового размера.

В металле швов наблюдается выделение цементита по границам зерен (рис. 3, а, з), которые более выражены для швов из литого металла. Это закономерно, поскольку характерная картина наблюдается и в структуре металла ЭШП — основной металл сварного соединения (рис. 3, в). В зоне термического влияния (ЗТВ) структура и литого, и деформированного металла практически идентична за счет рекристаллизации под воздействием температурного цикла сварки. В области ЗТВ, вследствие измельчения зерна, цементитные оторочки располагаются не по их контуру, а фрагментарно.

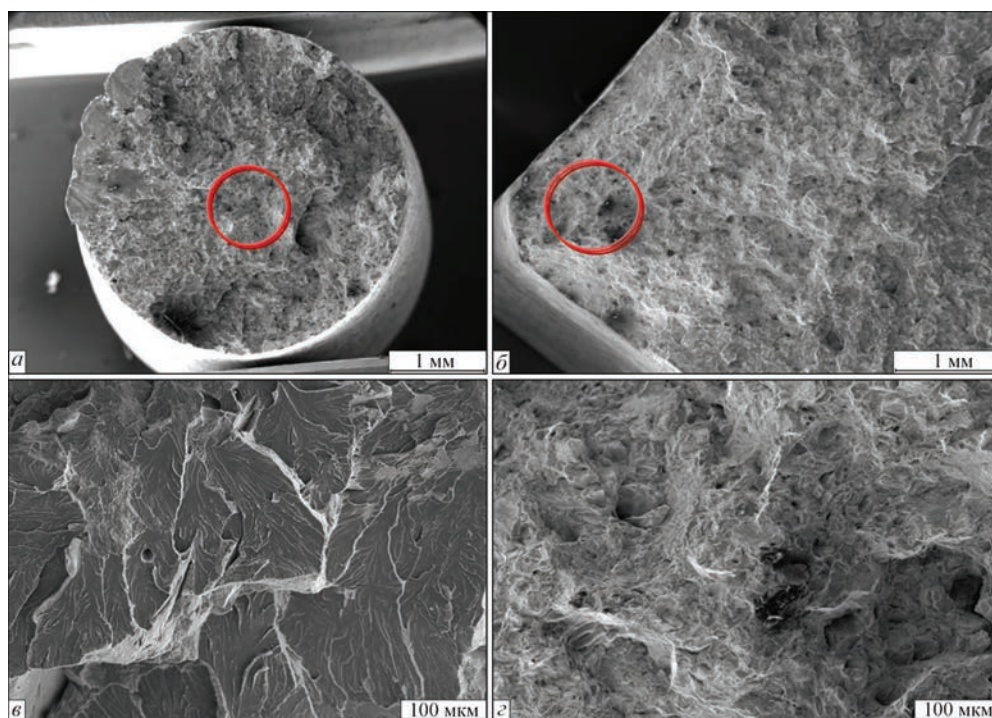
Во всех зонах сварного соединения оценили размер зерна литого металла ЭШП (при помощи компьютерной программы «Tescan»). Установлено, что в стыках из литых темплетов сред-

ний размер зерен составляет в основном металле 87 мкм, в ЗТВ 60 мкм, в шве 85 мкм, а в стыках из деформированного металла 54, 61 и 87 мкм, соответственно.

Результаты механических испытаний литого и деформированного металла ЭШП до сварки и сварных соединений, выполненных КСС, представлены в табл. 3.

Значение предела прочности для литого металла ЭШП в состоянии без термической обработки на 10 % ниже, как и его пластические свойства, что обусловлено напряженным состоянием металла в литом состоянии, которое может быть релаксировано термообработкой. В то же время в обоих случаях значения находятся в диапазоне требований, которые предъявляются нетермоупрочненным рельсам К76 в соответствии с ГОСТ Р 51045-97.

Оценка механических свойств сварных соединений металла рельсовой стали ЭШП, выполненных КСС, показала, что анизотропности металла слитка (голова–дно) не наблюдается (см. табл. 3). Разрушение образцов происходило в ЗТВ, но на некоторых образцах — по основному металлу, что связано, по нашему мнению, с наследственно крупным размером зерна в литом металле ЭШП. Уровень прочности стыков литого металла ЭШП в среднем на 27 % ниже, чем деформированного, ниже и пластичность. В то же время значительное измельчение структуры, наблюдаемое в металле ЗТВ, подтверждает необходимость применения



**Рис. 4.** Макро- (а, б) и микрофрактограммы (в, г) поверхностей изломов сварных соединений после механических испытаний литого (а, в) и деформированного (б, г) металла ЭШП

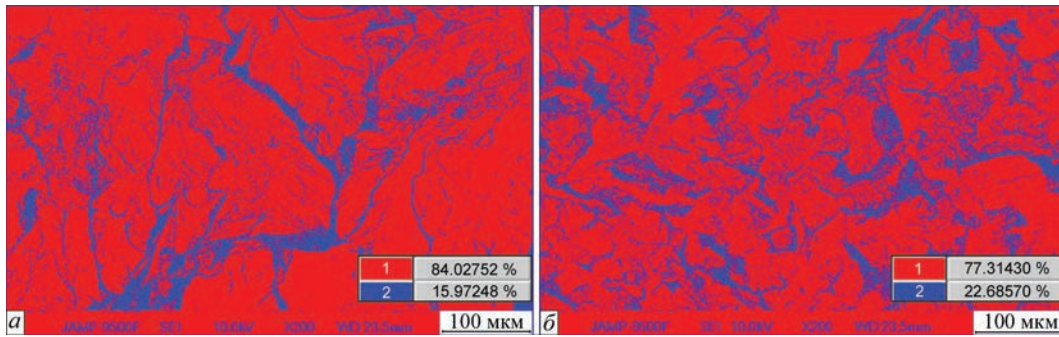


Рис. 5. Вязкая составляющая поверхности излома сварного соединения литого (а) и деформированного (б) металла рельсовой стали ЭШП: 1 — хрупкая составляющая; 2 — вязкая

термообработки для улучшения свойств литого металла ЭШП.

Разрушение стыков из темплетов КСС металла ЭШП после деформации происходило в металле ЗТВ на расстоянии 45...55 мм от линии сплавления (см. рис. 2). Прочность и показатель пластичности сварного соединения несколько выше, чем для исходного деформированного металла, выполненного ЭШП (табл. 3), что может быть обусловлено разным размером образцов и точностью измерений.

Фрактографический анализ поверхностей изломов показал смешанный характер разрушения по механизмам скола и смещения для всех исследованных вариантов. Разрушение начиналось по механизму растрескивания, а заканчивалось быстрым доломом, о чем свидетельствует наличие в участке долома вязкой составляющей (рис. 4, а, б). Основная часть поверхности излома представлена хрупкой составляющей, что характерно для высокопрочных

рельсовых сталей, причем размеры сколов в образце из литой стали крупнее, что отвечает большому размеру зерен.

С помощью компьютерной программы ImagePro оценили долю вязкой составляющей на поверхностях изломов сварных соединений литого и деформированного металла (рис. 5). Содержание вязкой составляющей в литом металле, выполненном ЭШП, достигает 18 %, в сварном соединении литого металла 16 %, а в деформированном металле 24 и 23 %, соответственно. Большее содержание вязкой составляющей в деформированном металле обусловлено измельчением зерна.

Вязкая составляющая отличается при осмотре поверхности по более темному серому цвету и матовой поверхности, но по своему химическому составу не отличается от хрупкой составляющей (рис. 6, 7).

На поверхности вязкой составляющей обнаружили включения сульфида марганца и оксида

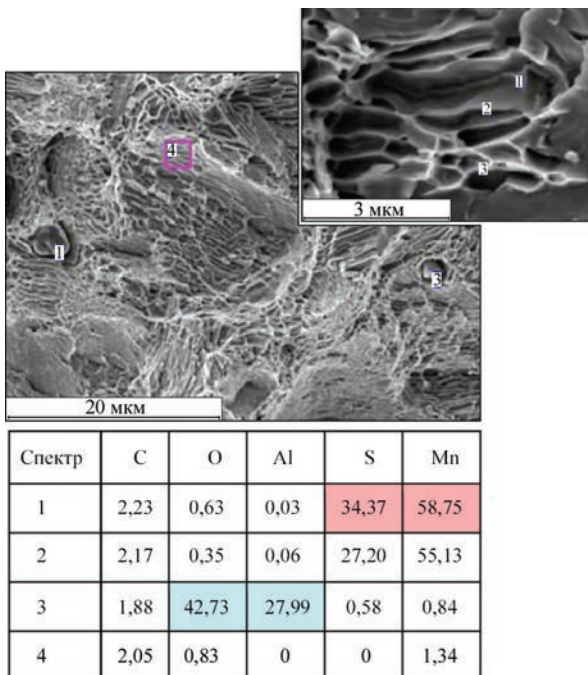


Рис. 6. Микрофрактограмма вязкой составляющей поверхности излома металла рельсовой стали ЭШП

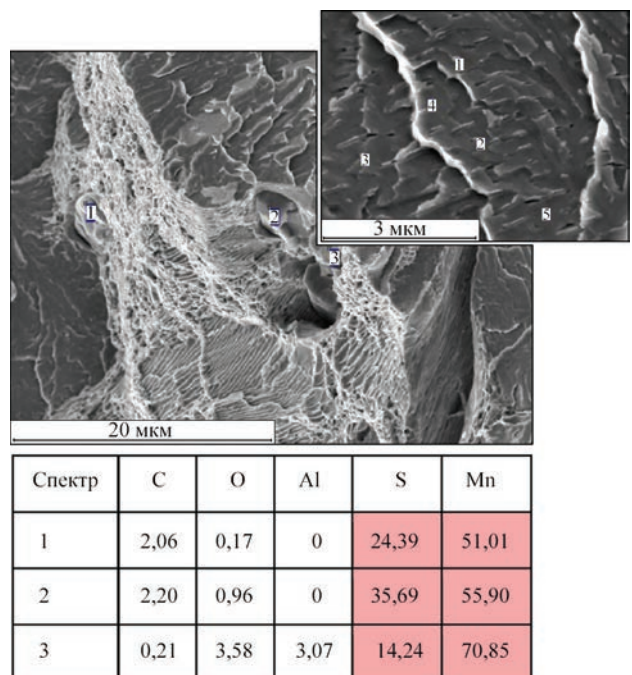


Рис. 7. Микрофрактограмма хрупкой составляющей поверхности излома металла рельсовой стали ЭШП

алюминия, а в хрупкой составляющей преимущественно включения сульфида марганца

Металлографическими исследованиями литого и деформированного металла, выполненного ЭШП, показано, что нагрев перед прокаткой и небольшое деформирование металла (степень деформации 4:1) обеспечивает уменьшение размера зерна в металле в 1,5 раза. В ЗТВ и металле шва стыков эта разница нивелируется. Однако большой размер зерна в рельсовой стали из электрошлакового слитка (в литом состоянии) ухудшает свойства сварного соединения, что может быть изменено применением термической обработки, разработке режимов которой будет посвящено отдельное исследование.

В заключение следует отметить, что рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и деформированном состоянии имеет плотную и однородную структуру с комплексом свойств в диапазоне требований, предъявляемых к нетермоупрочненным рельсам К76 по ГОСТ Р 51045 и ДСТУ 4344, что открывает перспективы применения ЭШП для изготовления рельсов, в том числе и остряковых рельсов, применяемых в литом состоянии.

Рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и слабо деформированном состоянии сваривается контактной стыковой сваркой оплавлением. Испытания металла стыков рельсовой стали лабораторной выплавки, сваренных контактной сваркой, показали, что микроструктура металла шва и зоны термического влияния в обоих случаях отличается однородным плотным строением. Разрушение образцов происходило преимущественно в ЗТВ. Прочность сварных соединений из металла в литом состоянии ниже, чем слабо деформированного, что, по-видимому, обусловлено крупным зерном, размер которого может быть уменьшен применением термической обработки.

### Список литературы

1. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И. и др. (2016) Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*, **5** 6, 7–16.
2. <https://mrpl.city/news/view/ukrzaliznytsya-perehodit-narelsy-vysshiej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalyu>
3. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полишко Г.О. та ін. (2018) Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 1. Сучасні умови експлуатації рейок і дефекти, що зменшують строк їх служби. *Современная электрометаллургия*, **1**, 3–7.
4. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полишко Г.О. та ін. (2018) Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізних колій. *Там же*, **2**, 28–36.
5. Пихтін Я., Левченко В., Іванисенко Л. та ін. (2009) Аналіз вимог національних стандартів до якості залізничних

рейок і результатів випробувань їх експлуатаційної стійкості. *Стандартизація, сертифікація, якість*, **4**, 24–30.

6. Рудюк А.С., Азаркевич А.А., Восковец Ю.А. и др. (2011) Дефектность рельсов на дорогах Украины. *Путь и путевое хозяйство*, **7**, 28–32.
7. Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Темлянец М.В. (2016) Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, **59**, **2**, 134–137.
8. Кучук-Яценко С.И., Швец В.И., Дидковский А.В., Антипин Е.В. (2016) Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*, **5** 6, 28–32.
9. Шур Е.А., Трушевский С.М. (2005) Влияние неметаллических включений на разрушение рельсов и рельсовой стали. *Неметаллические включения в рельсовой стали. Сб. науч. тр.* Екатеринбург, ГНЦ РФ ОАО «УИМ», с. 87.
10. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В. и др. (2015) Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости. *Вестник ВНИИЖТ*, **3**, 3–8.
11. Великанов А. В., Рейхарт В. А., Баулин И. С., Дьяконов В. Н. (1978) Статистическое обоснование допустимой нормы загрязненности рельсовой стали строчечными неметаллическими включениями. *Вестник ВНИИЖТ*, **8**, 50–51.
12. <https://cyberleninka.ru/article/v/rezervy-povysheniya-kachestva-relsov-sovershenstvovanie-tehnologii-mikrolegirovaniya-relsovoy-stali>
13. Троцан А.И., Каверинский В.В., Кошулэ И.М., Носоченко А.О. (2013) О факторах, влияющих на качество рельсовой стали и рельсов. *Металл и литье Украины*, **6**, 9–14.
14. (1981) *Электрошлаковый металл*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (редакторы). Киев, Наукова думка.
15. Hoyle G. (1983) *Electroslag Processes: Principles and Practice*. Elsevier Science Ltd.
16. Медовар Б.И., Емельяненко Ю.Г., Тихонов В.А. (1975) О механизме трансформации и удаления неметаллических включений в процессе ЭШП электродов большого сечения. *Рафинирующие переплавы*. Вып. 2. Киев, Наукова думка, сс. 73–81.
17. Жеребцов С.Н. (2004) Особенности очищения металла от неметаллических включений при электрошлаковом переплаве. *Омский научный вестник*, **1**, 75–77.
18. Полишко А.А., Саенко В.Я., Степанюк С.Н. и др. (2014) Поведение неметаллических включений в структуре литой электрошлаковой нержавеющей стали AISI типа 316. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–18.
19. Бешенцев А.В., Галушка А.А., Шур Е.А. (1992) О выборе технологической схемы производства рельсов ЭШП в условиях металлургического комбината «Азовсталь». *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 22–28.
20. Kayda P., Medovar L., Polishko G., Stovpchenko G. (2015) ESR Possibilities to improve railroad rail steel performance. *Proc. of 9th Intern. Conf. on CLEAN STEEL*, 8–10 Sept. 2015, Budapest, Hungary.
21. Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Кайда П.Н. и др. (2016) Новый подход к улучшению качества заготовки для производства высокопрочных рельсов. *Современная электрометаллургия*, **1**, 7–15.
22. Sawley K., Reiff R. (2000) Rail failure assessment for the office of the rail regulator. An assessment of railtrack's methods for managing broken and defective rails. P-00-070.
23. Saita K., Karimine K., Ueda M. et. al. (2013) Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 105.
24. Генкин И.З. (1951) Электроконтактная сварка рельсов. Москва, Трансжелдориздат. Технический справочник железнодорожника. *Путь и путевое хозяйство*, **5**, сс. 378–390.
25. Кучук-Яценко С.И., Лебедев В.К. (1976) *Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением*. Киев, Наукова думка.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, **5** 6, 4-12.
2. <https://mrpl.city/news/view/ukrzaliznytsya-perehodit-na-relsy-vysshhej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalyu>.
3. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels and solutions ESR (Review). Information 1. Operating conditions and defects observed. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 3-8 [in Russian].
4. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels, application of ESR (Review). Information 2. Requirements of standards to chemical composition of steel for railway rails of main-line tracks. *Ibid.*, **2**, 28-36 [in Russian].
5. Pykhtin, Ya., Levchenko, V., Ivanyenko, L. et al. (2009) Analysis of requirements of national standards on quality of railway rails and results of their service endurance. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist.*, **4**, 24-30 [in Ukrainian].
6. Rudyuk, A.S., Azarkevich, A.A., Voskovets, Yu.A. et al. (2011) Defectiveness of rails on Ukrainian railways. *Put i Putevoe Khozyajstvo*, **7**, 28-32 [in Russian].
7. Simachev, A.S., Oskolkova, T.N., Temlyantsev, M.V. (2016) Effect of nonmetallic inclusions of rail steel on high-temperature plasticity. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **59**(2), 134-137 [in Russian].
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V., Antipin, E.V. (2016) Effect of non-metallic inclusions of rail steel on welded joint formation. *The Paton Welding J.*, **5** 6, 24-28.
9. Shur, E.A., Trushevsky, S.M. (2005) Effect of nonmetallic inclusions on fracture of rails and rail steel. Nonmetallic inclusions in rail steel. In: *Transact. Ekaterinburg, UIM*, 87-90 [in Russian].
10. Shur, E.A., Borz, A.I., Sukhov, A.V. et al. (2015) Evolution of rail damageability by contact fatigue defects. *Vestnik VNIIZhT*, **3**, 3-8 [in Russian].
11. Velikanov, A.V., Rejkhart, V.A., Baulin, I.S., Dyakonov, V.N. (1978) Statistical justification of permissible contamination standard of rail steel by stringer nonmetallic inclusions. *Vestnik VNIIZhT*, **8**, 50-51 [in Russian].
12. <https://cyberleninka.ru/article/v/reservy-povysheniya-kachestva-relsov-sovershenstvovanie-tehnologii-mikrolegirovaniya-relsovoj-stali>
13. Trotsan, A.I., Kaverinsky, V.V., Koshule, I.M., Nosochenko, A.O. (2013) On factors influencing the quality of rail steel and rails. *Metall i Litio Ukrainy*, **6**, 9-14 [in Russian].
14. (1981) *Electroslag metal*. Ed. by B.E.Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
15. Hoyle, G. (1983) *Electroslag processes: Principles and practice*. Elsevier Science Ltd.
16. Medovar, B.I., Emelyanenko, Yu.G., Tikhonov, V.A. (1975) *On mechanism of transformation and removal of nonmetallic inclusions in ESR process of large-section electrodes. Refining remeltings. Issue 2*. Kiev, Naukova Dumka, 73-81 [in Russian].
17. Zherebtsov, S.N. (2004) Peculiarities of metal refining from nonmetallic inclusions in electroslag remelting. *Omsky Naychny Vestnik*, **1**, 75-77 [in Russian].
18. Polishko, A.A., Saenko, V.Ya., Stepanyuk, S.N. et al. (2014) Behavior of non-metallic inclusions in structure of cast electroslag stainless steel of AISI of 316 type. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **1**, 10-18 [in Russian].
19. Beshentsev, A.V., Galushka, A.A., Shur, E.A. (1992) On selection of technological scheme for manufacture of ESR rails in conditions of Metallurgical Combine Azovstal. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 22-28 [in Russian].
20. Kayda, P., Medovar, L., Polishko, G., Stovpchenko, G. (2015) ESR possibilities to improve railroad rail steel performance. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on Clean Steel (8-10 Sept. 2015, Budapest, Hungary)*.
21. Medovar, L.B., Stovpchenko, A.P., Kaida, P.N. et al. (2016) New approach to the improvement of quality of billets for manufacture of high-strength rails. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **1**, 7-15 [in Russian].
22. Sawley, K., Reiff, R. (2000) Rail failure assessment for the office of the rail regulator. An assessment of railtrack's methods for managing broken and defective rails. P-00-070.
23. Saita, K., Rarimine, K., Ueda, M. et al. (2013) Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 105.
24. Genkin, I.Z. (1951) Resistance welding of rails. Moscow, Transzheldorizdat. In: Techn. refer. book of railwayman. *Put i Putevoe Khozyajstvo*, **5**, 378-390 [in Russian].
25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Lebedev, V.K. (1976) Continuous flash-butt welding. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Г.О. Полішко, Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, Є.В. Антипин, О.В. Дідковський, А.Ю. Тунік

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

Представлені результати досліджень структури і властивостей зразків лабораторної виплавки рейкового металу (в слабдеформованому і литому стані), отриманого електрошлаковим переплавом після контактного стикового зварювання оплавленням. Дослідження показали, що мікроструктура металу шва і зони термічного впливу в обох випадках відрізняється однорідною щільною будовою. Руйнування зразків відбувалося переважно в зоні термічного впливу. Міцність зварних з'єднань з металу в литому стані нижче, ніж слабдеформованого, що на перший погляд обумовлено великим зерном, розмір якого може бути подрібнений застосуванням термічної обробки. Рейкова сталь електрошлакового переплаву в литому та слабдеформованому стані має рівень механічних властивостей в діапазоні вимог, що пред'являються до нетермозміцнених рейок К76 по ГОСТ Р 51045 і ДСТУ 4344, що відкриває перспективи застосування електрошлакового переплаву для виготовлення рейок, в тому числі і острякових рейок, застосовуваних в литому стані. Бібліогр. 25, табл. 3, рис. 7.

*Ключові слова:* контактне стикове зварювання, рейкова сталь, електрошлаковий переплав, слабдеформований і литий метал, зварувальний стик, металографічні дослідження, механічні властивості

WELDABILITY OF HIGH-CARBON STEEL OF ELECTROSLAG REMELTING  
IN FLASH-BUTT WELDING

G.O. Polishko, L.B. Medovar, G.P. Stovpchenko, Ye.V. Antipin, O.V. Didkovskiy and A.Yu. Tunik

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

E-mail:office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of a examination of structure and properties of the samples produced by laboratory melt of rail metal (in lightly deformed and cast state) obtained by electroslag remelting after flash-butt welding of rails. The examinations showed that microstructure of weld metal and heat-affected zone in both cases differs by homogeneous dense structure. Fracture of the samples took place mainly in the heat-affected zone. Strength of welded joints from metal in cast state is lower, than lightly deformed one, which is apparently caused by coarse grain, size of which can be refined using heat treatment. Rail steel of electroslag remelting in cast and lightly deformed state has a level of mechanical properties made to non-thermostrengthened rails K76 on GOST R 51045 and DSTU 4344 that reveals the perspectives of application of electroslag remelting for manufacture of rails, including rail tongue, applied in cast steel. 25 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

*Keywords: flash-butt welding, rail steel, electroslag remelting, lightly deformed and cast metal, welded joint, metallographic examinations, mechanical properties*

Поступила в редакцию 13.12.2018

SAVE THE DATE



THE 72<sup>ND</sup> IIW ANNUAL  
ASSEMBLY AND  
INTERNATIONAL  
CONFERENCE

Bratislava, Slovakia

7<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> July 2019

The annual event of the International  
Institute of Welding IIW 2019

[www.iiw2019.com](http://www.iiw2019.com)



The main topic of the International Conference:

**New Progressive Materials and Welding  
Methods in the Automotive Industry**

Hosted by



Conference Secretariat



## ПРИМЕНЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ПРИ НАПЛАВКЕ, ПЕРЕПЛАВЕ И В МЕТАЛЛУРГИИ (Обзор)

Ю.М. Кусков

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

Рассмотрены история появления порошковых проволок и их использование в качестве переплавляемого материала как в микрометаллургии (наплавка), так и в большой металлургии (электрошлаковый переплав и литейное производство). Показаны особенности технологических процессов с использованием порошковых проволок в каждой из рассмотренных отраслей. В настоящее время наиболее активно развиваются технологии, обеспечивающие повышение качества металла в литейном производстве. Перспективы использования порошковых проволок при наплавке с точки зрения улучшения технологии их производства и создания новых композиций наплавленного металла во многом уже исчерпаны. Определенные потенциальные возможности более широкого применения имеют технологии наплавки в токоподводящем кристаллизаторе, особенно в области получения композитных слоев. Электрошлаковый переплав металла, как и в годы своего развития, в основном, ориентирован на получение слитков большой массы и диаметра с использованием монолитных электродов большого сечения. Библиогр. 32, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* порошковая проволока, дуговая наплавка, электрошлаковый переплав, внепечная обработка

Порошковая проволока — конструкция в виде полой трубки, заполненной шихтой различной дисперсности и химического состава. В зависимости от поставленных задач она может изготавливаться разного диаметра и длины.

Применительно к сварке первым упоминанием о возможности использования порошковых проволок, по-видимому, следует считать предложения Н. Н. Бенардоса об изготовлении электродов различной конструкции, в том числе в виде «трубчатых электродов с сердцевинкой из разных порошков» [1]. Начало практического использования сварочных порошковых проволок относится примерно к 1930-м гг.

Распространению дуговой сварки и наплавки порошковыми проволоками в сравнении с цельнотянутыми способствовал ряд причин:

– необходимость выполнения сварки и наплавки высоколегированных и высокоуглеродистых сталей и сплавов, когда соответствующие легированные проволоки вообще не могут быть изготовлены или получаются слишком дорогими [1];

– использование самозащитных порошковых проволок позволяет осуществлять сварочный процесс без дополнительных расходов на защитные газы и флюс;

– наплавка, как и сварка, самозащитными порошковыми проволоками характеризуется простотой, маневренностью и низкой чувствительностью к изменению внешних условий сварки [2].

Тем не менее, в настоящее время в Украине доля порошковых проволок в структуре выпуска сварочных материалов (электроды, проволоки, флюсы) составляет всего около 2 % [3].

Такие низкие объемы производства порошковых проволок касаются именно проволок, предназначенных для выполнения сварочных работ. Для дуговой наплавки, как разновидности технологии сварки, их применение более значительно. Преимущественно это связано с необходимостью получения износостойкого наплавленного металла, эксплуатационные свойства которого улучшаются при его повышенном легировании. В этом случае, как было сказано выше, при изготовлении цельнотянутой проволоки возникают сложности как технологического, так и экономического порядка. Некоторые типы наплавочных порошковых проволок представлены в таблице [4].

Особенности производства и технические характеристики порошковой проволоки определяются в значительной мере конструкцией ее поперечного сечения [5]. Промышленное применение нашли конструкции типа трубчатой, с нахлестом, с загибом кромок, сложного сечения. Проволоки сложного сечения используются преимущественно как самозащитные. Трубчатая конструкция с нахлестом применяется чаще при изготовлении наплавочных проволок. Коэффициент заполнения (величина доли сердечника в проволоке) принято исчислять в процентах. Значения этого коэффициента для наплавочных проволок находятся в пределах 15...45 %.

При электрошлаковой сварке и наплавке в качестве электродного металла, как правило, используют проволоку сплошного сечения диаметром 3 мм. Хотя в некоторых случаях находят применение проволока и других диаметров (1...2 или 5...6 мм) [6]. Обычная сварочная аппаратура допускает подачу электродных проволок диаметром 3...5 мм. Тем не менее еще в начале активно-

го изучения и внедрения электрошлакового процесса в 1950-х гг. все же находились различные области применения наплавочных порошковых проволок. Эта тенденция ограниченного применения порошковых проволок сохранилась и в последующие годы, в основном, в 1970–1980-е гг. Наплавка порошковыми проволоками применялась при ремонте стальных валков [7], упрочнении кулачков трубообточных станков [8], прессового инструмента производства подшипников и различных деталей штампов [9, 10], молотков дробилок производства алюминия и калибров станов холодной прокатки труб [11], режущих кромок ножей резки горячего металла и носков оправок трубопрокатных агрегатов [12], уплотнительных поверхностей деталей запорной арматуры.

Некоторые технологии электрошлаковой наплавки (ЭШН) формально также можно рассматривать как использующие в качестве электродов порошковые проволоки любой конструкции. Так, например, для кольцевой наплавки прокатных валков предлагается применять порошковый электрод кольцевого сечения, в котором шихта заключена не в свернутой из ленты трубке, а между двумя концентрическими стальными кожухами [13]. По сути, такую конструкцию можно представить как непрерывный ряд плотно соприкасающихся между собой отдельных порошковых проволок.

Несмотря на представленные выше примеры применения порошковых проволок при электрошлаковой наплавке деталей различного назначения, следует отметить, что в настоящее время предпочтение отдается все же использованию цельнотянутых проволок [14]. По-видимому, это

связано, главным образом, с боязнью нарушения непрерывной подачи порошковых проволок, имеющих меньшую жесткость по сравнению с цельнотянутыми, через подающий механизм сварочного аппарата, особенно при выполнении длительных по времени наплавов, частичного высыпания шихты при некачественном изготовлении проволок. В определенной мере сказывается желание наплавщиков получать износостойкие слои с более равномерным распределением в наплавленном металле легирующих элементов и, соответственно, свойств. Это особенно важно для тех случаев, когда незначительный износ металла рабочего слоя оказывает большое влияние на работоспособность изделия (например, при трении металла по металлу). Такое представление сложилось на основании существующего мнения, что «при дуговой сварке и наплавке легированным электродом сплошного сечения достигается весьма высокая однородность». Однако исследования макронеоднородности металла, наплавленного порошковой проволокой электрошлаковым способом, показали, что в этом случае обеспечивается его «достаточная однородность».

Новые возможности применения при наплавке порошковых проволок появились в связи с разработкой в ИЭС им. Е.О. Патона устройства, представляющего собой секционный нерасходуемый электрод, названный разработчиками токоподводящий кристаллизатор (ТПК) [15]. Одним из достоинств этого устройства является открытое зеркало шлаковой ванны и возможность регулирования ее теплового состояния. Это позволяет использовать при наплавке как токоведущие, так

Порошковые проволоки для износостойкой наплавки

Тип наплавленного металла	Типичный химический состав наплавленного металла, мас. %							Твердость после наплавки HRC
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Остальные элементы	
Наплавка открытой дугой								
70X4M3Г4ФТР	0,7	3,5	0,5	4,0	-	3,0	1,0V; 0,7B; 0,1Ti	57...62
30X4B3M3ФС	0,35	0,6	0,9	3,8	2,8	2,8	0,5V	47...50
30X5Г2СМ	0,3	1,6	0,8	5,0	-	0,6	0,2Ti	50...56
90Г13Н4	0,9	13,0	0,5	-	-	-	4,0Ni	≤ 20
200ХГСП	2,1	1,1	0,9	0,4	-	-	0,8B 0,1T 0,17Al	48...56
80X20P3T	0,8	-	-	20,0	-	-	3,0B 0,6Ti	58...67
Наплавка под флюсом								
200X12M	1,8	0,6	0,6	12,0	-	0,8	-	40...44
10X17H9C6ГТ	0,1	1,8	5,5	17,6	-	-	9,2Ni; 0,15Ti	27...33
25X5ФМС	0,25	0,6	1,0	5,0	-	1,1	0,4V	42...46
35B9X3СФ	0,3	0,8	0,9	2,8	9,5	-	0,3 V	44...50
30X2H2Г	0,3	1,2	0,6	1,8	-	-	1,4Ni	42...48
100X4Г2АР	1,0	2,2	1,3	4,0	-	-	0,2N	55
Наплавка в среде углекислого газа								
80X12K4Ф3B2M2HP	0,8	-	-	12,0	2,0	2,0	4,0Co; 3,0V; 1,0Ni; 0,1B	57...60

и нетоковедущие порошковые проволоки. Перспективность использования ТПК при наплавке порошковыми проволоками подтверждена работами Волгоградского государственного технологического университета [16]. Причем в настоящее время основным направлением в этих работах является технология получения композитных слоев, при которой в рабочей зоне ТПК дополнительно располагается полый графитовый электрод (электроды) особой конструкции. Нетоковедущая композитная порошковая проволока подается в шлаковую ванну через его полость. По утверждению авторов наличие такого электрода позволяет создать в подэлектродном пространстве локальную зону повышенных температур, что способствует равномерному расплавлению входящих в состав порошковой проволоки металлической оболочки и наполнителя, в котором туго- и легкоплавкие компоненты содержатся в виде металлических порошков и проволок.

Аналогичные исследования выполняются и в ИЭС им. Е.О. Патона с целью получения наплавленных торцевых рабочих слоев быстроизнашивающихся изделий, например, оправок для производства труб. При этом можно обеспечивать минимальное и равномерное проплавление основного металла. На рис. 1 представлен макрошлиф заготовки, наплавленной в ТПК диаметром 85 мм с использованием нетоковедущей порошковой проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС диаметром 3 мм.\*

При ЭШН порошковыми проволоками (при любом способе наплавки) главным технологическим параметром, определяющим устойчивость электрошлакового процесса и глубину проплавления основного металла, является скорость подачи электрода [17]. Сама же скорость зависит от многих факторов: диаметра и состава порошковых проволок, химического состава шлака, температуры шлаковой ванны, электрического режима наплавки. Следует также отметить влияние способа наплавки на процесс плавления проволоки. В частности, при ЭШН с использованием ТПК в шлаковую ванну могут подаваться как бестоковые, так и электродные проволоки и, соответственно, условия их плавления будут отличаться. В практическом плане скорость подачи проволоки должна выбираться такой, чтобы обеспечивалось, с одной стороны, плавление в шлаке всех ее составляющих, а с другой, исключалось вхождение конца проволоки в металлическую ванну.

**Предшественником** способа электрошлакового переплава (ЭШП) является так называемый Келлог-процесс, предложенный в 1940 г. в США

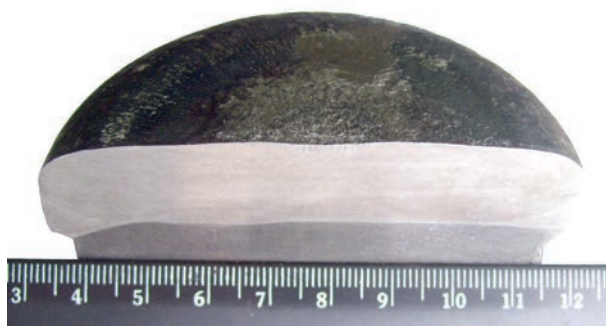


Рис. 1. Макрошлиф заготовки, наплавленной нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС диаметром 3 мм в ТПК диаметром 85 мм

Р.К. Гопкинсом (патент США № 2.191.479). Процесс осуществлялся путем дугового переплава под слоем шлака трубчатого электрода, внутрь которого вводились дозированные количества дискретной присадки в виде ферросплавов, лигатур и чистых металлов (рис. 2). По сути, трубчатый электрод являлся аналогом порошковой проволоки. Непосредственно сам ЭШП начинался с переплава обычных сварочных проволок с дополнительной подачей в шлаковую ванну шихтовых материалов. В 1955–1956 гг. работами Д.А. Дудко, И.К. Походни, Ю.А. Стеренбогена и др. была показана возможность ведения устойчивого электрошлакового процесса при использовании электродов сравнительно небольших сечений (30..50 мм), впоследствии — все больших (более 1000 мм). Переплав порошковых проволок применялся лишь в ряде случаев, например, для оценки возможности получения электрошлаковым способом металла различного химического состава, в частности, чугунов с целью дальнейшего использования полученных результатов для изготовления наплавочных порошковых проволок [18].

С некоторым допущением к процессам переплава порошковых проволок можно отнести технологии, в которых в шлаковой ванне расплавляются цельнотянутые электродные ленты (не свернутые в трубку) с дополнительной подачей на поверхность ленты дискретной присадки (шихты). При этом как сама лента, так и присадка должны быть изготовлены из магнитных материалов, обеспечивающих их магнитное сцепление и одновременное введение в шлаковую ванну.

К таким оригинальным технологиям ЭШП следует отнести технологию, предложенную в 1960-е гг. бельгийскими фирмами «Коккериль С.А.» и «Электротерм С.А.» (рис. 3). Основное техническое направление — получение крупных слитков круглого сечения из низколегированных сталей [19]. Для наплавки используют ленту сечением 75×2 мм и порошки с размером частиц 0,5...3,0 мм. Порошки можно получать либо мето-

\*В наплавках принимал участие канд. техн. наук Осин В.В.



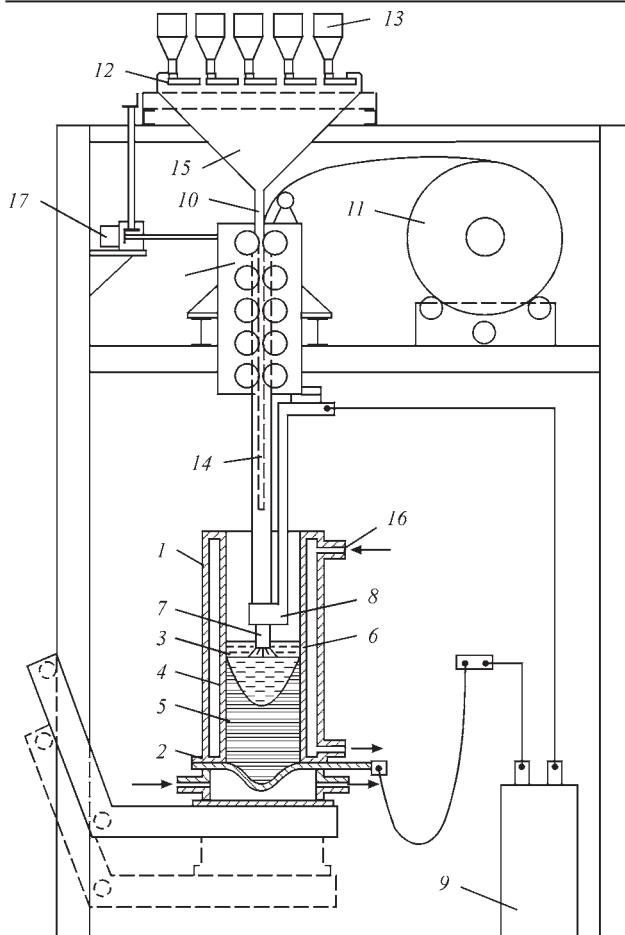


Рис. 2. Схема Келлог-процесса: 1 — кристаллизатор; 2 — поддон; 3 — жидкий шлак; 4 — жидкий металл; 5 — слиток; 6 — электрическая дуга; 7 — расходимый трубчатый электрод; 8 — токоподвод; 9 — источник тепла; 10 — трубоформирующее устройство; 11 — рулон ленты; 12 — дозирующие устройства; 13 — бункера дозаторов; 14 — ссыпная трубка; 15 — бункер; 16 — вход охлаждающей воды; 17 — моторный привод

дом восстановления оксидов требуемых металлов, либо путем распыления струи жидкого металла воздухом или водой. Соотношение масс переплавляемых лент и порошков составляет 30 и 70 %, соответственно.

Сравнение этой технологии переплава (процесс НЭШП — непрерывный электрошлаковый переплав порошков) с обычным ЭШП электродов большого сечения показывает следующие ее преимущества:

- повышенная производительность переплава;
- получение более плоской металлической ванны, что во многом определяет качество металла;
- снижаются затраты на получение переплавляемых материалов;
- возможность выплавки слитков практически любой длины.

Перспективность дальнейшего использования этой технологии авторы связывают также с тем, что, как показывает практика выплавки слитков массой 3 и 21 т, экономическая эффективность

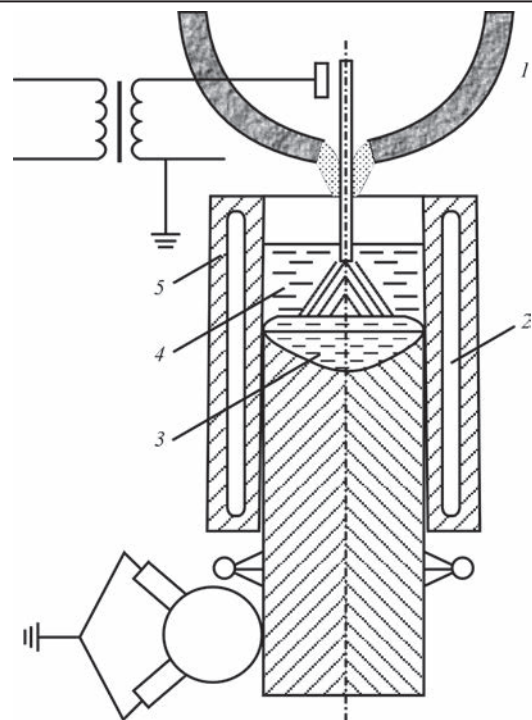


Рис. 3. Схема процесса НЭШП: 1 — питатель порошка; 2 — водяное охлаждение; 3 — жидкий металл; 4 — шлаковая ванна; 5 — кристаллизатор

процесса возрастает по мере увеличения массы получаемых слитков [20]. Поэтому реальной целью они считают достижение выплавки слитков массой 40...50 т и более.

Аналогичную технологию ЭШП с использованием лент и порошков применяет фирма «Электротерм корпорэйшн», США [21]. Основным продуктом переплава по данной технологии являются небольшие слитки из высоколегированных сталей, в частности, применяемых в США инструментальных сталей. Схема переплава представлена на рис. 3.

Данная технология переплава характеризуется некоторыми особенностями. Начало процесса осуществляют на затравке, переводя его из дугового в электрошлаковый за счет плавления ленты и создания достаточного объема шлака. После чего происходит непрерывная подача в шлаковую ванну ленты и порошка. Особые требования предъявляются к ленточным электродам и шихте. Размеры ленты подбираются с учетом ее полного расплавления в шлаке. Большое значение имеет вылет из токоподвода: в случае большого вылета лента может перегреваться (как и порошок) и терять свои магнитные свойства, что влияет на стабильность плавки и качество металла. При наличии в шихте немагнитных металлов, например, Cu, Cr, Ti или некоторых слабомагнитных ферросплавов могут возникать сложности в достаточном ее креплении на поверхности ленты. В этом случае необходимо обеспечить хорошее переме-

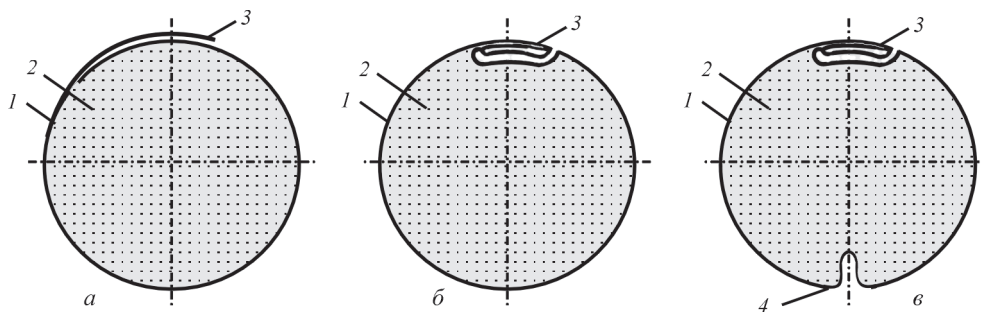


Рис. 4. Виды соединения порошковой проволоки: а — внахлест; б, в — с замковым соединением (1 — оболочка; 2 — наполнитель; 3 — замок; 4 — компенсатор)

шивание компонентов в смесителе, причем общее количество немагнитной фракции не должно превышать 7...10 %.

Имеются особенности и в технике переплава. Так, при получении слитков размером 100×100 мм ленты во время плавки совершает в шлаковой ванне возвратно-поступательное движение. Кроме того, ей придают колебания в плоскости, перпендикулярной ее поверхности.

**Современная** технология производства стали развивается в направлении использования основных металлургических агрегатов (дуговая печь, конвертер) только для расплавления твердой составляющей шихты и окисления углерода, кремния, марганца, т. е. получения полупродукта. Практически все операции по доведению расплава в соответствии с марочными нормами, требованиями по свойствам и в целом по качеству металла осуществляются процессами внепечного рафинирования.

Одним из самых современных и перспективных способов внепечной обработки является введение в жидкую сталь порошковой проволоки. По данным [22] в начале 1990-х гг. в мировой металлургической промышленности эксплуатировалось около 200 установок модифицирования порошковой проволокой. В связи с более высокой технико-экономической эффективностью обработки стали и чугуна порошковыми проволоками по сравнению с другими известными способами обработки жидкого металла тенденция использования в металлургии этой технологии все время возрастает [23].

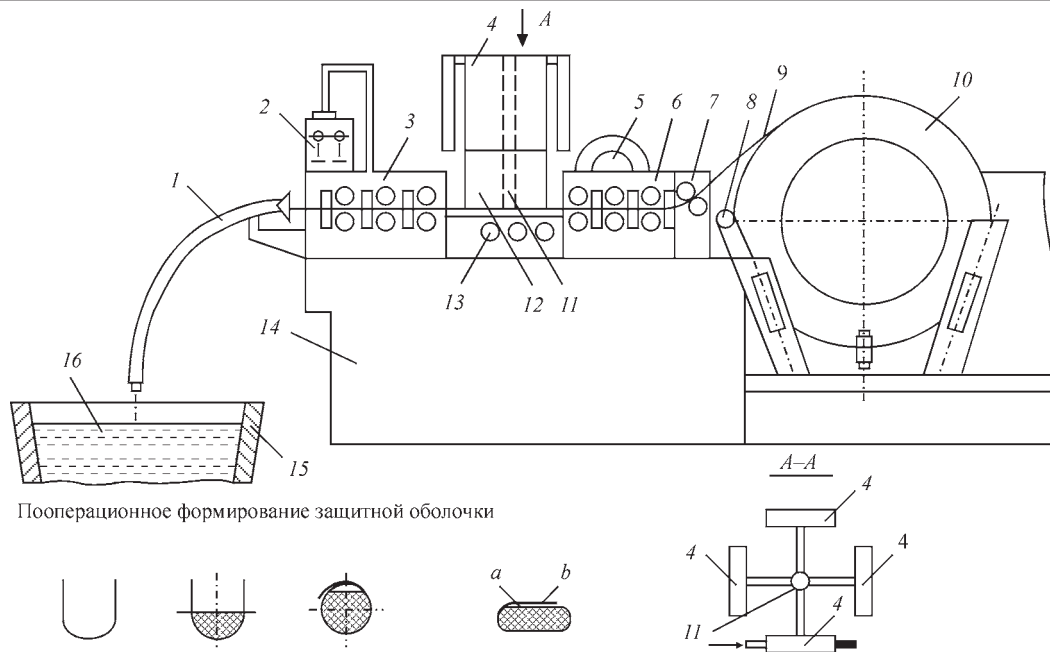
Начало применения порошковых проволок в металлургии было связано с широким использованием в сталеплавильном производстве кальция и кальцийсодержащих материалов, введение которых в жидкий металл в виде порошковой проволоки показало высокую эффективность рафинирования металла от вредных примесей и неметаллических включений. 30 июня 1988 г. в Великобритании (г. Глазго) состоялся первый международный симпозиум по обработке жидкого металла кальцием [24], на котором в качестве спонсора выступила фирма «Аффиваль» (Фран-

ция), наладившая производство порошковых проволок и устройств для их ввода в расплав.

В последующие годы, помимо «Аффиваль», и другие фирмы стали расширять возможности использования порошковых проволок как способа технологически удобного и экономически выгодного. При этом в качестве шихты порошковых проволок стали служить легирующие, микролегирующие, раскисляющие, рафинирующие и модифицирующие добавки [25]. Такими добавками стали элементы, характеризующиеся высоким средством к кислороду (Ca, Mg, Al, Ba, Ti, Si, Zr, Ce и др. РЗМ), малой плотностью (C, B, S, Ca, Al, Mg и др.), относительно низкими температурами плавления и кипения (Ca, Mg, S, Se и др.), высоким давлением пара и небольшой растворимостью в жидком металле (Ca, Mg и др.). В ряде случаев использование порошковых проволок является альтернативным способом введения в жидкий металл кальция и других элементов или химических соединений по сравнению с методом вдувания в него подобных компонентов в виде порошков [26, 27].

В бывшем Советском Союзе наиболее активную работу по совершенствованию элементов технологии производства проволок и способов ввода их в расплав вели академические институты ИПМ, ИЭС им. Е.О. Патона, ДонНИИЧЕРМЕТ. За период 1986–1991 гг. был пройден путь от выпуска опытно-промышленных партий проволок до их промышленного производства, а также специального оборудования для ввода проволок в жидкий металл на Донецкой производственно-внедренческой фирме «Металл» (с 1989 г. ОАО «Завод «Универсальное оборудование») [28]. В настоящее время порошковую проволоку производят еще около 20 предприятий бывших стран СНГ [29].

Используемая при данном способе внепечной обработки жидкого металла порошковая проволока представляет собой стальную (сталь 08Ю) оболочку толщиной 0,2...0,5 мм, заполненную порошкообразным материалом, и смотанную в бухту. Длина проволоки в бухте от 2000...4000 и



Пооперационное формирование защитной оболочки

Рис. 5. Технологический комплекс внепечной обработки расплавов с использованием порошковых проволок: 1 — направляющее устройство; 2 — пульт управления; 3 — формовочно-калибровочная клеть; 4 — система бункеров дозаторов; 5 — электромеханический групповой привод; 6 — формовочная клеть; 7 — направляющие ролики; 8, 9 — натяжное устройство; 10 — размотчик с намотанной лентой; 11 — поворотная турель; 12 — защитный кожух; 13 — поддерживающие ролики; 14 — рама; 15 — металлургическая емкость; 16 — расплав; *a, в* — перекрытие полков ленты

более метров. Диаметр проволоки 8...16 мм. На первом этапе освоения производства проволоки соединение кромок металлической оболочки осуществлялось «внахлест» (перекрытие 7...8 мм) с наличием продольного ребра жесткости (компенсатора). Такая проволока при подаче ее в жидкий металл часто раскрывалась, что приводило к высыпанию шихты. В дальнейшем порошковые проволоки стали производить с соединением кромок в «замок» с наличием или отсутствием компенсатора [29] (рис. 4). Имеются определенные требования и к порошкообразным реагентам. Они могут представлять собой металл, сплав или неметаллические включения, измельченные до определенного размера. Опытным путем установлено, что максимальная фракция частиц порошка не должна превышать 2,5 мм для проволоки диаметром 13 и 15 мм и 2 мм для проволоки диаметром 10 мм. С точки зрения плотного заполнения сечения порошкообразный материал должен содержать до 25 % пылевидной фракции (размер частиц менее 0,2 мм) [29].

Технологическая линия для производства порошковой проволоки включает ряд устройств, которые обеспечивают размотку рулонной ленты, формирование в ней желоба, ввод в него дозаторами шихты, образование замкнутого профиля, его калибровку и порядную укладку проволоки в бухту.

Вторым главным элементом технологии внепечной обработки расплава порошковыми про-

волоками в ковше, промковше, кристаллизаторе является наличие в ней так называемых трайбаппаратов. Основное их значение — протянуть проволоку с заданной скоростью и создать на выходе толкающую силу, обеспечивающую преодоление сил трения проволоки о направляющую трубу и при прохождении ею расплава металла, а также преодоление сил трения в самом трайбаппарате. Конструкции трайбаппаратов могут быть одно-, двух- и многоручьевого исполнения, т. е. для подачи в расплав одного, двух и более видов проволоки [29, 30]. В ряде случаев предлагается использовать технологические комплексы, совмещающие процессы изготовления порошковой проволоки и ее подачи в жидкий металл (рис. 5) [22]. По-видимому, такое техническое решение все же нельзя признать оптимальным, так как любое нарушение технологии производства проволоки и ее качества будет непосредственно влиять на качество обрабатываемого металла. Кроме того, формирование проволоки «внахлест» может приводить, как отмечалось ранее, к ее раскрытию в жидком металле.

Обычно проволока вводится в расплав вертикально [29, 31], но некоторые авторы считают целесообразным ее вводить в промковш под углом 40...70° к вертикали, что значительно (в 1,5...3 раза) увеличивает длину погруженной части проволоки и, следовательно, позволяет варьировать ее скорость ввода [32].

Таким образом, предложенный в конце XIX века Н.Н. Бенардосом сварочный материал особой

конструкции, получивший впоследствии название порошковой проволоки, нашел практическое применение не только в сварке, но и в наплавке, переплаве, литейном производстве. В каждой из этих областей он смог показать главные свои преимущества: в наплавке — возможность широкого легирования наплавленного металла; в переплаве — обеспечение непрерывного процесса плавления материалов; в литейном производстве — улучшение качества металла за счет его рафинирования, модифицирования и легирования.

### Список литературы

1. Фрумин И.И. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков, Metallurgizdat.
2. Походня И.К., Суптель М.А., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
3. Мазур А.А., Липодаев В.Н., Пустовойт С.В., Петрук В.С. (2017) Современное состояние рынка сварочного оборудования и материалов в Украине. *Автоматическая сварка*, **11**, 40–46.
4. Гладкий П.В., Кондратьев И.А., Юматова В.И., Жудра А.П. (1991) *Наплавочные порошковые ленты и проволоки*. Справочник. Киев, Техника.
5. Походня И.К., Альтер В.Ф., Шлепаков В.Н. и др. (1980) *Производство порошковой проволоки*. Учеб. пособие для вузов. Киев, Вища школа.
6. Патон Б. Е. (ред.) (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Москва, Машиностроение.
7. Блашкочич П., Пекница П. (1979) Стойкость наплавленных электрошлаковым способом валков для горячей прокатки листа. *Информационные материалы СЭВ*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, вып. **1**, сс. 49–50.
8. Соколов Г. Н., Филлюшин А. А. (1988) Влияние структуры и типа наплавленного металла на износостойкость кулачков трубообточных станков. *Автоматическая сварка*, **8**, 47–49.
9. Соколов Г.Н. (1984) *Исследование и разработка материалов для наплавки прессового инструмента производства подшипников*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
10. Соколов Г. Н., Филлюшин А.А. (1982) *Электрошлаковая наплавка торцовых объемов деталей штампов. Современные способы наплавки и их применение*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 84–89.
11. Самсонов И.Г. (1981) *Исследование теплофизических процессов при электрошлаковой наплавке порошковыми проволоками*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, УПИ им. С.П. Кирова.
12. Соколов Г.Н. (2004) Свойства наплавленного металла, используемого для упрочнения металлургического инструмента. *Автоматическая сварка*, **9**, 62–64.
13. Рамаччиотти А., Репетто Э., Соммовиго П., Сонджини Г. (1982) Получение биметаллических прокатных валков методом электрошлаковой наплавки трубчатými металлопорошковыми электродами. Электрошлаковый переплав. *Материалы VII международной конференции по вакуумной металлургии, специальным видам плавки и металлургическим покрытиям*. Токио, 26–30 ноября 1982 г. Киев, Наукова думка, вып. **8**, сс. 130–136.
14. Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И., Козулин М.Г. и др. (1989) *Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах*. Киев, Наукова думка.
15. Kuskov Yu.M. (2003) A new approach to electros slag welding. *Welding J.*, **4**, 42–49.
16. Соколов Г.Н., Лысак В.И. (2005) *Наплавка износостойких сплавов на прессые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей*. Волгоград, РПК «Политехник».
17. Королев Н.В., Платонов А.Г., Мухин Д.В. (1992) Особенности плавления проволочных электродов при электрошлаковой наплавке. *Сварочное производство*, **3**, 26–28.
18. Daemen R.A., Blaskovic P. (1970) Pridavne materialy pre electroskove navaranie ocel'ovych valcov valcovacich stolic. *Zvaranie*, **8**, 234–239.
19. Лево Ж. (1973) Электрошлаковая плавка с добавкой металлических порошков. Электрошлаковый переплав. *Материалы III международного симпозиума по технологии электрошлакового переплава*. Питтсбург. 8–10 июня 1971 г. Киев, Наукова думка, сс. 26–33.
20. Дескамп Дж., Этьен М. (1974) Современное состояние процесса непрерывного электрошлакового переплава порошков. Электрошлаковый переплав. *Материалы международной конференции по технологии электрошлакового переплава*. Шеффилд. 10–11 января 1973 г. Киев, Наукова думка, вып. **2**, сс. 202–210.
21. Парсонс Р.С. (1973) Производство инструментальных сталей методом непрерывного электрошлакового переплава порошков. Электрошлаковый переплав. *Материалы III международного симпозиума по технологии электрошлакового переплава*. Питтсбург. 8–10 июня 1971 г. Киев, Наукова думка, сс. 243–251.
22. Марченко И.К., Царев А.В., Галентовский Г.Г., Хейфец В.Г. (1990) Ресурсосберегающая технология и оборудование для внепечной обработки жидкой стали. *Тяжелое машиностроение*, **5**, 28–29.
23. Дюдкин Д.А., Маринцев С.Н., Онищук В.П., Гринберг С.Е. (2000) Технично-экономическая эффективность обработки чугуна и стали порошковыми проволоками. *Металл и литье Украины*, **1**, 2, 41–42.
24. Медовар Б.И. (ред.) (1989) *Обработка стали кальцием. Материалы междунар. симпозиума по обработке стали кальцием*. 30.06.1988, Глазго, Великобритания. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
25. Каблукровский А.Ф., Зинченко С.Д., Никулин А.Н. и др. (2006) *Внепечная обработка стали порошковой проволокой*. Москва, Metallurgizdat.
26. Visser H.-J., Boom R., Biglari M. (2008) Simulation of the Ca – treatment of Al – killed liquid steel. *La Revue de Metallurgie*, СІТ, **4**, 172–180.
27. Wen Yang, Lifeng Zhang, Xinhua Wang et al. (2013) Characteristics of inclusions in low carbon Al – killed steel during ladle furnace refining and Ca treatment. *ISIJ International*, **53**, **8**, 1401–1410.
28. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е. и др. (2002) *Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками*. Донецк, Юго-Восток.
29. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Павлюченков И.А., Болотов В.Ю. (2007) *Прецизионная обработка металлургических расплавов*. Москва, Теплотехник.
30. Титиевский В.И., Бордюгов. В.Н. (2000) Технологический комплекс для ввода порошковой проволоки в жидкий металл. *Металл и литье Украины*, **1**, 2, 7–9.
31. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Маточник В.А. и др. (2006) Использование порошковой проволоки с наполнением силикокальцием для внепечной обработки стали на Белорусском металлургическом заводе. *Электрометаллургия*, **6**, 16–20.
32. Носоченко О.В., Троцан А.И., Чичкарев Е.А. и др. (2003) Рациональный режим обработки стали в промежуточном ковше порошковыми и монолитными проволоками. *Металл и литье Украины*, **7-8**, 28–30.

### References

1. Frumin, I.I. (1961) *Automatic electric arc surfacing*. Kharkov, Metallurgizdat [in Russian].
2. Pokhodnya, I.K., Suptel, M.A., Shlepakov, V.N. (1972) *Flux-cored welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Mazur, A.A., Lipodaev, V.N., Pustovojt, S.V., Petruk, V.S. (2017) State-of-the-art of welding equipment and consumables market in Ukraine. *The Paton Welding J.*, **11**, 31-37.

4. Gladky, P.V., Kondratiev, I.A., Yumatova, V.I., Zhudra, A.P. (1991) *Surfacing flux-cored strips and wires*. In: Refer. book. Kiev, Tekhnika [in Russian].
5. Pokhodnya, I.K., Alter, V.F., Shlepakov, V.N. et al. (1980) *Manufacture of flux-cored wire*. In: *Manual for institutes of higher education*. Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
6. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Blaskovic, P., Pecnitsa, P. (1979) Resistance of deposited by electroslag method of rolls for hot rolling of sheets. In: *Information documents of CMEA*. Kiev, PWI, 1, 49-50.
8. Sokolov, G.N., Filyushin, A.A. (1988) Influence of structure and type of deposited metal on wear resistance of cams of pipe turning machine. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 47-49 [in Russian].
9. Sokolov, G.N. (1984) Investigation and development of materials for surfacing of extrusion toolage in production of bearings. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Kiev, PWI [in Russian].
10. Sokolov, G.N., Filyushin, A.A. (1982) Electroslag surfacing of volume ends of die parts. In: *Modern methods of surfacing and their application*. Kiev, PWI, 84-89 [in Russian].
11. Samsonov, I.G. (1981) Investigation of thermophysical processes in electroslag surfacing with flux-cored wires. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Sverdlovsk, UPI [in Russian].
12. Sokolov, G.N. (2004) Properties of deposited metal used for metallurgical tool hardening. *The Paton Welding J.*, **10**, 55-57.
13. Ramacciotti, A., Repetto, E., Sommovigo, P., Sondini, G. (1982) Production of bimetallic mill rolls by method of electroslag surfacing with metal-flux-cored electrodes. Electroslag remelting. In: *Proc. of 7th Int. Conf. on Vacuum Metallurgy, Special Types of Melting and Metallurgical Coatings (Japan, Tokyo, 26-30 November, 1982)*. Kiev, Naukova Dumka, Issue 8, 130-136.
14. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. et al. (1989) *Electroslag welding and surfacing in repair works*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
15. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42-49.
16. Sokolov, G.N., Lysak, V.I. (2005) *Surfacing of wear-resistant alloys on pressing tools and tools for hot working of steels*. Volgograd, RPK Politekhnik [in Russian].
17. Korolyov, N.V., Platonov, A.G., Mukhin, D.V. (1992) Peculiarities of melting of wire electrodes in electroslag surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, **3**, 26-28.
18. Daemen, R.A., Blaskovic, P. (1970) Pridavne materialy pre electroskove navaranie ocel'ovych valcov valcovacich stolic. *Zvaranie*, **8**, 234-239 [in Slovakian].
19. Leveau, J. (1973) Electroslag melting with addition of metal powders. Electroslag remelting. In: *Proc. of 3rd Int. Symp. on Technology of Electroslag Remelting (USA, Pittsburg, 8-10 June 1971)*. Kiev, Naukova Dumka, 26-33.
20. Descamp, J., Etienne, M. (1974) State-of-the art of the process of continuous electroslag remelting of powders. Electroslag remelting. In: *Proc. of Int. Conf. on Technology of Electroslag Remelting (Great Britain, Sheffield, 10-11 January 1973)*. Kiev, Naukova Dumka, 2, 202-210.
21. Parsons, R.S. (1973) Production of tool steels by method of continuous electroslag remelting of powders. Electroslag remelting. In: *Proc. of 3rd Int. Symp. on Technology of Electroslag Remelting (USA, Pittsburg, 8-10 June 1971)*. Kiev, Naukova Dumka, 243-251.
22. Marchenko, I.K., Tsarev, A.V., Galentovsky, G.G., Khejsets, V.G. (1990) Resource-saving technology and equipment for out-of-furnace treatment of liquid steel. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **5**, 28-29 [in Russian].
23. Dyudkin, D.A., Marintsev, S.N., Onishchuk, V.P., Grinberg, S.E. (2000) Technical and economic efficiency of cast iron and steel treatment with flux-cored wires. *Metall i Litio Ukrainy*, **1**, 2, 41-42 [in Russian].
24. (1989) Calcium treatment of steel. Ed. by B.I. Medovar. In: *Proc. of Int. Symp. on Calcium Treatment of Steel (Great Britain, Glasgow, 30 June 1988)*. Kiev, PWI.
25. Kablukowsky, A.F., Zinchenko, S.D., Nikulin, A.N. et al. (2006) *Out-of-furnace treatment of steel with flux-cored wire*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
26. Wisser, H.-J., Boom, R., Biglari, M. (2008) Simulation of the Ca-treatment of Al-killed liquid steel. *La Revue de Metallurgie, CIT*, **4**, 172-180.
27. Wen Yang, Lifeng Zhang, Xinhua Wang et al. (2013) Characteristics of inclusions in low carbon Al-killed steel during ladle furnace refining and Ca treatment. *ISIJ Int.*, **53**(8), 1402-1410.
28. Dyudkin, D.A., Bat, S.Yu., Grinberg, S.E. et al. (2002) *Out-of-furnace treatment of melt with flux-cored wires*. Donetsk, OOO Yugo-Vostok [in Russian].
29. Dyudkin, D.A., Kisilenko, V.V., Pavlyuchenkov, I.A., Bolotov, V.Yu. (2007) *Precision treatment of metallurgical melts*. Moscow, Teplotekhnika [in Russian].
30. Titievsky, V.I., Bordyugov, V.N. (2000) Technological complex for introduction of flux-cored wire into liquid metal. *Metall i Litio Ukrainy*, **1**, 2, 10 [in Russian].
31. Dudkin, D.A., Kisilenko, V.V., Matochnik, V.A. et al. (2006) Application of flux-cored wire with silicocalcium filling for out-of-furnace treatment of steel in Belarusian metallurgical plant. *Elektrometallurgiya*, **6**, 16-20 [in Russian].
32. Nosochenko, O.V., Trotsan, A.I., Chichkarev, E.A. et al. (2003) Rational mode of steel treatment in cold hearth with flux-cored and solid wires. *Metall i Litio Ukrainy*, **7-8**, 28-30 [in Russian].

## ЗАСТОСУВАННЯ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ, ПЕРЕПЛАВЛЕННІ ТА В МЕТАЛУРГІЇ (Огляд)

Ю. М. Кусков

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

Розглянуто історію появи порошкових дротів і їх використання в якості матеріалу, що переплавляється, як в мікрометалургії (наплавлення), так і у великій металургії (електрошлаковий переплав та ливарне виробництво). Показано особливості технологічних процесів з використанням порошкових дротів в кожній із розглянутих галузей. В даний час найбільш активно розвиваються технології, що забезпечують підвищення якості металу в ливарному виробництві. Перспективи використання порошкових дротів при наплавленні з точки зору поліпшення технології їх виробництва та створення нових композицій наплавленого металу багато в чому вже вичерпано. Певні потенційні можливості більш широкого застосування мають технології наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі, особливо в області отримання композитних шарів. Електрошлакове переплавлення металу, як і в роки свого розвитку, в основному, орієнтоване на отримання злитків великої маси та діаметру з використанням монолітних електродів великого перерізу. Бібліогр. 32, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* порошковий дріт, дугове наплавлення, електрошлакове переплавлення, позапічна обробка

APPLICATION OF FLUX-CORED WIRES AT SURFACING,  
REMELTING AND IN METALLURGY

Y.M. Kozub

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the history of flux-cored wires appearance and their application as remelted material, both in micrometallurgy (surfacing), and in large-scale metallurgy (electroslag remelting and foundry). Features of technological processes with flux-cored wire application in each of the considered areas are shown. At present technologies ensuring improvement of metal quality in foundry are developing the most actively. Prospects for flux-cored wires application in surfacing from the viewpoint of improvement of their production technology and development of new compositions of deposited metal have largely been exhausted. Technologies of surfacing in a current-supplying mould have certain potential for a wider application, particularly in the field of producing composite layers. Electroslag remelting of metal, as in the years of its development, is mainly focused on producing ingots of a large mass and diameter with application of monolithic electrodes of a large cross-section. 32 Ref., 5 Fig.

*Keywords: flux-cored wire, arc surfacing, electroslag remelting, ladle treatment*

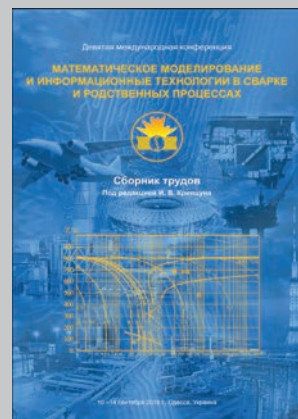
Поступила в редакцию 12.11.2018

## НОВЫЕ КНИГИ

**Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах:** Сб. докл. Девятой межд. конф. / Под ред. проф. И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 96 стр. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/mmw2018.pdf>).

В сборнике представлены доклады Девятой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (10–14 сентября 2018 г., Одесса, Украина), в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».



Сборники девяти конференций MMITWRP за 2002-2018 гг. находятся в открытом доступе на сайте Издательского Дома «Патон»: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings/mmw>.

**Титан 2018. Производство и применение в Украине:** Сб. докл. межд. конф. / Под ред. проф. С.В. Ахонина. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 168 с.

В сборнике представлен 41 доклад международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине» (11–13 июня 2018 г., Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), в которых отражены научные достижения и практические результаты в области производства, сварки, обработки и применения титана и его сплавов. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из Австралии, Польши и Украины. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области индустрии титана и его сплавов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».



# MODULAR DESIGN OF HIGH PRODUCTIVITY ELECTRON BEAM WELDING MACHINES

**F. Kolenic, L. Kovac, R. Sekerka, P. Faragula**

FIRST WELDING COMPANY Inc., Bratislava, Slovak Republic

The paper presents the results achieved in the field of actual design and technical solution of modern high-tech electron beam welding equipments in THE FIRST WELDING COMPANY Inc. The fundamental conceptual approaches to solution of modern technological complexes with application of powerful electron beam generator systems are described. The electron beam technological welding equipments are constructed modularly with special attention paid to harmonisation of hardware and software compatibility. The individual modules of technological unit are periodically innovated with respect to the progressive world trends in the field of electrotechnics, drive systems, computer control, mechanical modules and advances in vacuum technology. The contribution presents both the development of principal modules which form the core of technological welding complex such as stationary and movable electron gun, beam generation systems, vacuum chambers as well as auxiliary modules, which are adapted to the needs of modern industrial production and quality management. Among the examples, remote diagnostics of electron beam machine by web applications, module for monitoring and editing the parameters of technological process can be found. Three examples of different design of electron beam equipments are documented and described. 5 Ref., 14 Fig.

*Keywords: electron beam, welding machines, modular design, modules of welding equipment, remote diagnostics, monitoring process parameters*

## 1. Introduction

The electron beam technologies are finding their application in industrial production already for several decades. During their utilisation they have brought about an immense merit to progress in actually all industrial branches, participating thus in excellent results that have been achieved in development of scientific knowledge and technical progress for the past 50 years. These have played irreplaceable task in recognition of space, progress in aviation transport and aviation industry, power engineering and general machine building [1]. They meet the parameters for incorporation into the group of high-tech technologies. Design of welding complexes makes use of new scientific knowledge and methods, materials and modern computer technology. An important role in their further development is played by factors such as commercial availability, high reliability, application flexibility and the fact that they are immediately applicable to direct industrial applications.

In the field of development and supply of electron beam machines, a system of modular design was developed in the FIRST Welding Company (FWC). In this system, unified modules are used as the basic building blocks. Technical criteria for functional modules or units are set to meet a specified function with high reliability, hardware and software are fully compatible with other modules and allow for work in autonomous mode. According to the meaning and technical function, modules can be divided into principal and auxiliary. The principal modules form the core of technological welding complex and assure the primary function of equipment, namely

the fabrication of welded joints of metallic materials in vacuum. The main modules comprise the power generator of electron beam, which is briefly called as a power block, electron gun, vacuum welding chamber, modules for vacuum generation in the welding chamber and in the electron gun, modules for positioning of welded parts, CNC control modules, modules for monitoring and illumination of welding process. The software is an inseparable part of technological complex. The auxiliary modules are not necessary a part of the equipment, however they fulfil an essential function in setting and monitoring of process parameters, creation of process databases, protection of welded joints against defect formation, extension of technological capabilities of equipment, allowing the remote diagnostics, prophylactics and service of the equipment, with utilization of remote approach by the aid of web applications. FWC have at present completed design of several tens unified, mutually compatible functional modules for the delivery of electron beam welding equipment. The concept of modular design allows to satisfy actually nearly all technical and technological requirements of customers in the highest quality and in the desired time terms. Some specific requirements of customers, mainly in deliveries of high productive welding equipment are prevalently solved by the adaptation of design of a selected module with application of its conceptual solution.

## 2. Selected modules of electron beam welding equipment

It is impossible to present all unified modules within the extent of this contribution. The following chapter

will present the significant modules of welding complexes from the production of FWC.

2.1. Modules of beam generation system

The powerblock belongs to the main unified modules and serves for creating the conditions for generation of electron beam and its automatic control [2]. The electron beam itself is formed in the electron gun. FWC is offering three power grades of electron beam generators with type designation PZ EB 7,5, PZ EB 15 and PZ EB 30. All power blocks grades have the same external dimensions, they differ just in internal electrical connections. They are inserted into two unified 19" racks & electronics cabinets type Schroff (Fig. 1).

The first cabinet comprises a controllable and stabilized HV source serving for acceleration of electrons of electron gun. This source provides the kinetic energy to electrons, which is transferred to thermal energy after impingement on welded joint and serves thus for formation of welded joint. The second cabinet comprises the auxiliary sources which serve for heating the thermo-emission cathode of electron gun, the source of control voltage which regulates and stabilises the welding current, the source of current for magnetic beam focusing, the source system for magnetic beam deflection and a logic PLC automat for the manual and/or automatic control of powerblock operation. The powerblock type PZ EB 7,5 generates the electron beam with maximum power of 7.5 kW. At acceleration voltage of 60 kV it provides the welding current within the range from 0 to 125 mA. The powerblock type PZ EB 15 generates the electron beam with maximum power of 15 kW and with welding current value adjustable from 0 to 250 mA at the voltage of 60 kV. Maximum current of electron beam at the acceleration voltage of 60 kV can attain 500 mA. Fig. 1 shows the mechanical design of powerblocks. Three power grades of powerblocks are conceptually built on the identical basis, they differ just in electronic outfit.

The high-voltage source of acceleration voltage is of inverter type and it consists of the following main parts:

1) HV transformer with rectifier, filtration capacitors and measuring circuits situated in a separate vessel insulates with transformer oil.

2) Medium-frequency converter with a series-parallel resonance circuit with the frequency of 20 kHz.

3) Control, regulating, safety and measuring circuits.

Excitation of high-voltage transformer is realised via a medium-frequency inverter (20 kHz). In the case of this solution, the exciting signal is formed by an alternating switching of power transistors T1, T4 and T2, T3 connected in a bridge, what forms the alternating voltage with rectangular course of constant frequency in the bridge diagonal. This voltage is connected to the primary HV winding via the serial-parallel resonance LC circuit, which ensures almost ideal harmonic course of the excitation voltage and a more efficient energy transfer. Stabilization of voltage and power regulation of HV source is solved by altered range of transistor switching, what allows a regulation intervention at the level of several milliseconds. Advantage of such a connection consists in application of a constant switching frequency of the exciting current, what allows to achieve very low ripple of accelerating voltage at suitable selection of filtration capacity of the secondary circuit. The measured value of welding voltage ripple at the nominal source power output of 30 kW and the switching frequency of 20 kHz is at the level of  $\pm 1.0 \%$ . The electronic anti-discharge protection is selectable by an auxiliary module to HV source. The electric scheme of HV source type PZ EB 30 kW is shown in Fig. 2.

The auxiliary sources serve for generation of electron beam and the desired setting of welding parameters. These allow manual, automatic and/or program control of welding current, focusing current and electron beam deflection. The group of auxiliary sources includes the current source for filament heating, source of cathode bombarding current, voltage source for control electrode, the source of focusing current and the source for beam deflection.

The typical technical parameters of powerblock are as follows:

Value of accelerating voltage..... controllable from 30 to 60 kV;  
 Maximum power of electron beam, depending on the type..... 7.5, 15, 30 kW;  
 Stability and ripple of acceleration voltage ... maximum  $\pm 1.0 \%$ ;  
 Stability and ripple of welding current ..... maximum  $\pm 1.5 \%$ ;  
 Stability of focusing current..... maximum  $\pm 0.5 \%$ .

2.2. Electron gun module

The electron gun serves for generation, control and adjustment of power electron beam for the technological operations of welding and/or surface treatment of metallic materials [3]. It is the most



Fig. 1. The powerblock type PZ EB 30



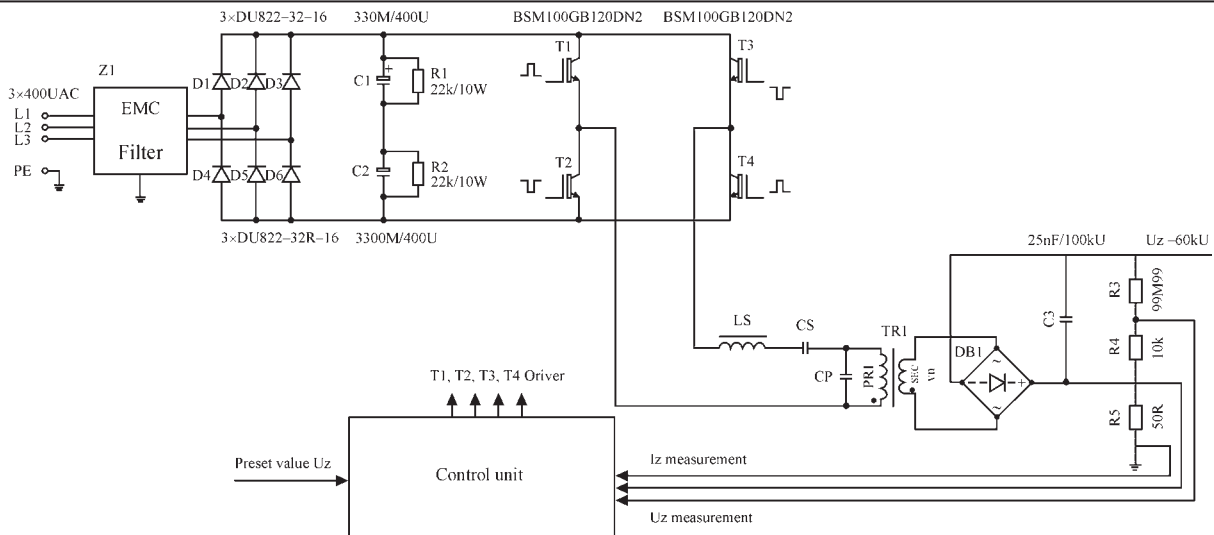


Fig. 2. Electric scheme of HV source type PZ EB 30 kW

important part of electron beam welding equipment. The power necessary for generation of electron beam is supplied from the powerblock. Therefore, the gun and powerblock must be mutually compatible. Modular concept recognizes the stationary electron gun working from outside at atmospheric pressure and the gun destined for applications in vacuum chamber – movable electron gun. The stationary guns are situated on the welding chamber wall to which they are tightly vacuum-proof attached. They are mostly attached to vacuum chamber statically and the welded joint is formed by programable positioning of weld joint against the electron beam. Stationary electron guns have the same design for all output power graders. An example of design of stationary gun is shown in Fig. 3.

Such a gun cannot properly perform the welding operation unless it is equipped with the appropriate modules, permitting its basic functions and which enable an exact setting of electron beam on the welded joint. This is realised via auxiliary modules as the module of gun pumping to a high vacuum,

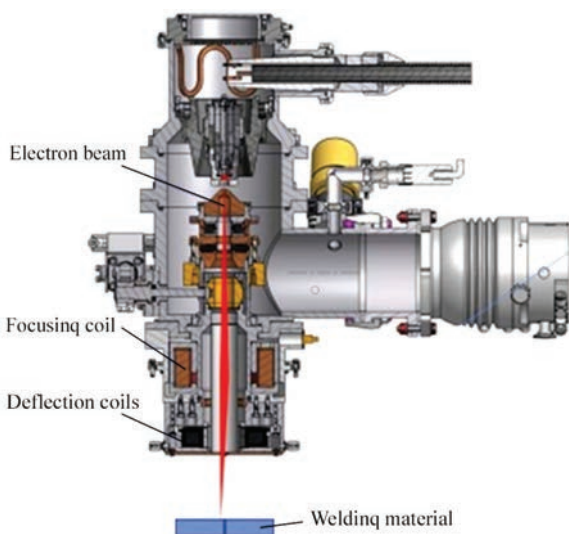


Fig. 3. Design of a module of atmospheric gun

module for monitoring of welding process and the module for process illumination. These modules together with the gun body are attached to a common base and create a separate unit. An example of placing the configuration of auxiliary modules on a common base with gun is shown in Fig. 4.

Regarding the design viewpoint, the differences between stationary gun and movable gun for welding applications are minimum, consisting of a small deviation in sealing the inner space of the gun and the total weight. Greater differences may be observed only in the system of vacuum pumping of both guns. The atmospheric vacuum gun is pumped by a turbomolecular vacuum pump, which is additionally pumped also with a rotary vacuum pump. The movable electron gun is pumped only with a turbomolecular gun, whereas the rotary vacuum pump is unnecessary, since the vacuum is ensured by the vacuum system of the chamber. The design of vacuum electron gun is shown in Fig. 5.

Another essential condition for correct operation of this electron gun consists in its positioning to welding trajectory in the vacuum welding chamber.

### 2.3. Module for positioning the vacuum electron gun

Two types of modules for positioning of movable electron gun in vacuum chamber are designed.

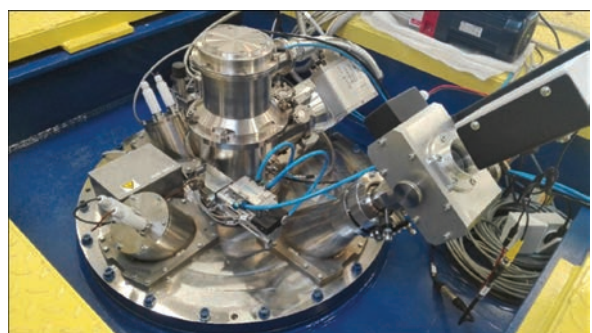


Fig. 4. Configuration of auxiliary modules of the stationary electron gun

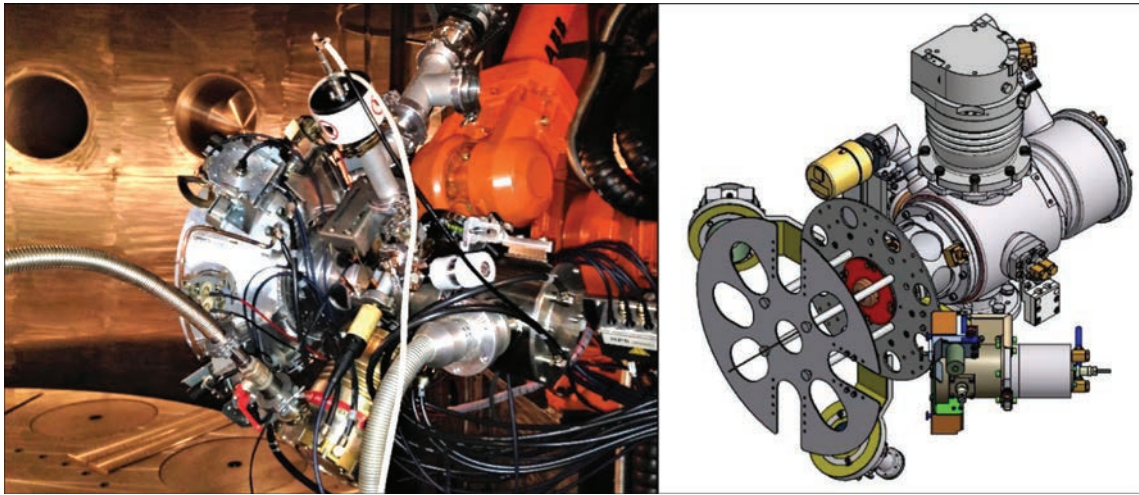


Fig. 5. Design of movable electron gun

These differ both conceptually and in the way of application. For the vacuum chambers of medium size, the module of two-axial positioning is designed in a Cartesian coordinate system with addition of a manual or fully automatically controlled rotary axis. Design of the two-axial module with a manual rotary axis is shown in Fig. 6. The  $x$  and  $z$  axes are fully program-controlled axes ensuring the gun positioning in  $x$ - $z$  plane. Gun tilting in rotary axis is performed manually. This system serves for fabrication of linear welds and in combination with an additional rotary positioner also for fabrication of the face and circumferential rotary welds. The presented concept allows the location of a feed mechanism for the additive manufacturing with application of a filler in the form of wire. Practical application of this type of positioning system is shown in Fig. 7.

Another way of electron gun positioning in vacuum is solved with application of an adapted robotic system, modified for the operation in vacuum environment. This way of electron gun positioning is suitable for application in large vacuum chambers. Positioning of electron gun is assisted by an industrial robot type IRB 4600 in special adaptation for the

work in high vacuum (Fig. 8). The ABB IRB 4600 represents industrial robot with 6 axes, 45 kg carrying capacity and 2200 mm working radius. It is provided with control unit type IRC5 and RobotWare software. The robot is situated on a carriage of vertical support, which in the function of fully controlled axis allows the robot positioning in its vertical  $Z$  axis. The additional « $Z$ » axis has extended the working range of robot in  $Z$  axis to value of 8.5 m. Next additional axes  $\omega_1$  — rotation of the main positioner and  $\omega_2$  — rotation of rotational nests serves for positioning of weldments. All nine axes of positioning system e.g. six robot axes and the additional three axes  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  and  $Z$  represents fully controlled axes and can be controlled by FlexPendant unit on selecting the «technology» option from the main menu and/or by a program from the technological computer. The electron gun with monitoring is defined as the working tool EB\_GUN\_Ti. This tool has a defined mass centre of gravity and has determined the tool coordinates TCP (Tool Centre Point). RobotWare software supports all aspects of robot system, as robot motion, development and implementation of application programs system, as robot motion,

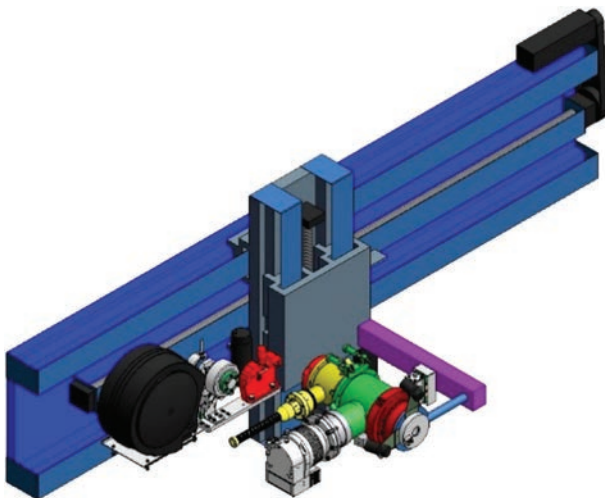


Fig. 6. Design of a positioning module of electron gun

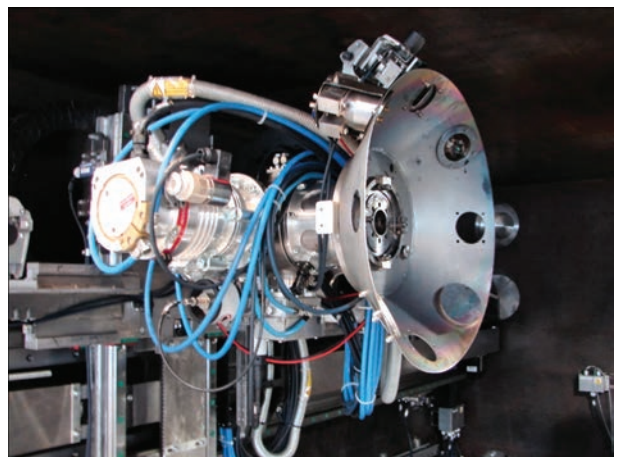


Fig. 7. Practical application of a module for vacuum gun positioning

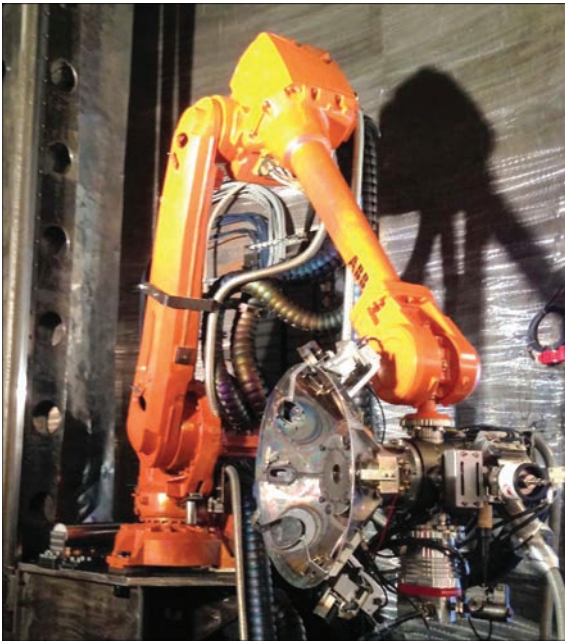


Fig. 8. Module for vacuum electron gun positioning

development and implementation of application programs and communication. Communication between the control unit IRC5 and technological computer is realized through Ethernet interface. The FlexPendant controller is a portable operation unit with graphical touch screen. The RAPID programming language contains the instructions allowing the application to perform robot motions, to set the outputs and/or to read the inputs.

#### 2.4. Modules of vacuum chambers

The vacuum chambers are in most cases designed by the «fitness for purpose» approach, i. e. tailored for the needs of an actual customer. The size and shape of vacuum chamber is given by the dimensions of parts to-be-welded, desired time for pumping to working vacuum and the electron gun employed. The technological preparation and manufacturing technology comprise the unifying element of modules for welding chamber design. The welding chamber must be vacuum proof, resistant against distortions and must comprise an advanced and unified system for sealing of static flanges and door systems and also for sealing of movable parts.

A versatile medium-size vacuum chamber with the volume of 16 m<sup>3</sup> may be shown as an example in Fig. 9.

The welding chambers for high-productive welding must meet the condition of high efficiency. These are destined for welding of a great number of parts with identical shape and with a slight dimensional diversity. They are mostly composed of a vacuum welding chamber and one or more auxiliary chambers. Such a design makes possible that the welding chamber could be permanently pumped to the working vacuum. The auxiliary chambers ensure the operation of loading and unloading of weldments and also the operation of air intake and vacuum

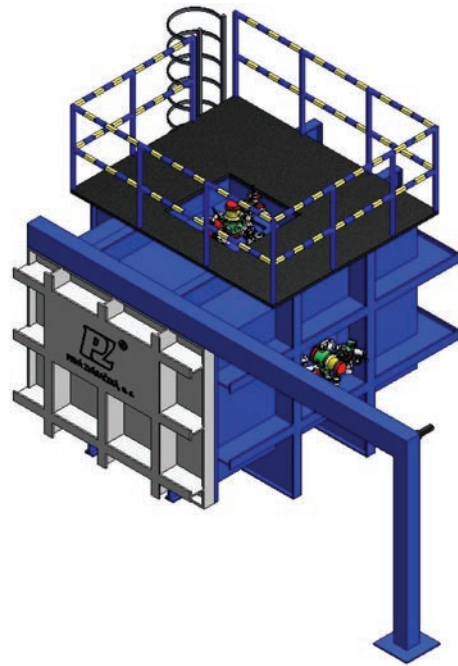


Fig. 9. Module of a versatile chamber with the volume of 16 m<sup>3</sup> pumping of the auxiliary chamber. The proportion of net welding time during one shift against the manipulation and preparatory times is at the level of 80 %. An example of modular concept of welding chambers for the high-productive welding is shown in Fig. 10 and Fig. 11.

The presented examples of design of principal modules of electron beam welding equipments elucidate the concept of modular design which is applied by the FWC Inc. in design, construction and manufacture of electron beam equipment for diverse applications destined for external customers. This concept has proved as sufficiently flexible, economical and it thus creates the conditions for deliveries of equipments for the external customers in the shortest possible terms and in high quality.

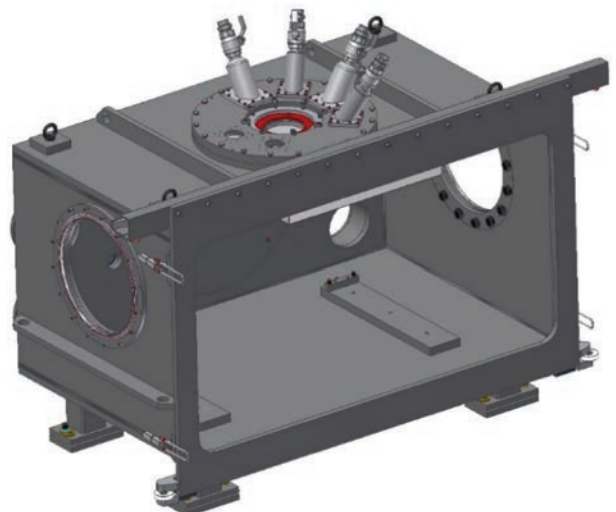


Fig. 10. An example of design of welding chamber module for high-productive welding machine

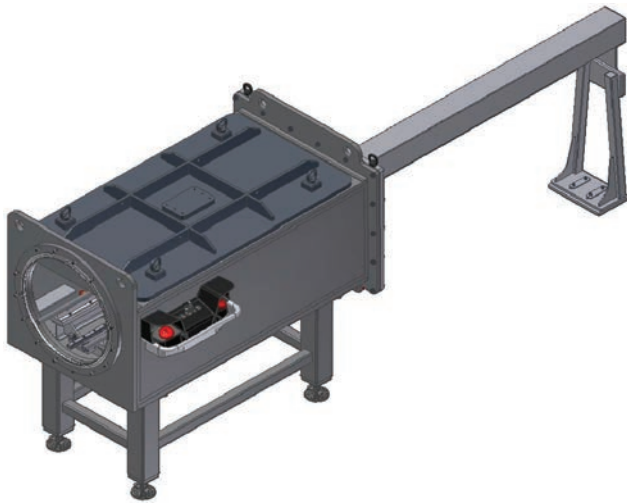


Fig. 11. An example of design of auxiliary chamber module for high-productive welding machine

### 2.5. Modul for processing data collection

This module belongs to the auxiliary modules. It can be integrated into the device upon customer request. Main function of the module is to collect all decisive welding process parameters, as the value of accelerating voltage, welding current, focusing current, welding speed, electron beam position related to welded joint etc. These and other selected parameters are recorded during the entire welding cycle. They are used for the retrospective diagnostics. The recorded process parameters are gained from the sensors of the control system and it allows simultaneous recording of more than 15 process parameter with the sampling period from 1 to 10 ms. The elaborated program allows to alter the sampling period and it also allows the collection and storage of data coming from several sources. The recorded data from individual sensors are sent in a special binary format through the communication line to the archiving computer, which assigns them the identification signs and stores them on memory media. Moreover, the program records also all binary states of the drives. The developed program for data analysis represents a browser for a huge quantity of binary data in graphical and tabular form.

### 2.6. Remote diagnostics of electron beam machine by web applications

Solution of remote diagnostics, which belongs to the next auxiliary module of electron beam welding machine, is based on special hardware and software configuration. For connecting equipment to the remote access, the industrial router from eWON company was selected and for creating a communication for data transfer between the equipment and remote user the internet service Talk2M (from the English «Talk to Machines») was utilised. These circuits are then integrated into a control system of electron beam welding machine at the customer workplace. The present state of

technological solution of equipment provides the remote access to equipment by utilising the internet and it offers the following options: Sending an alarm message in case of failure occurrence, connection of a remote visualisation, work of programmer directly in the development environment of PLC, access to archive of records of welding parameters created via a special software module for collection and analysis of processing data. The created communication channel meets all relevant safety standards, what provides a high level of protection for the transferred data against abuse.

## 3. Examples of design of electron beam equipments

As an example, three designs of welding equipments are shown, representing different field of industrial application of high-tech technologies from the production portfolio of FWP company, making use of electron beam technologies.

The first example is a welding technological complex with type designation PZ EZ 30 JUMBO.

This equipment is destined for welding sizable parts in general engineering and power industry [4]. The new design of equipment employing the electron gun attached on the robot arm with integrated other two rotary and one liner axes makes possible to fabricate the rotary and linear welded joints as follows:

Rotary circumferential joints of sizable weldments on a central rotary positioner in side position as follows:

- range of weldment diameter from 500...5000 mm;
- range of weldment weight from 200 kg to 100 t;
- range of weldment height from 500...8000 mm;
- range of weld depth from 1...90 mm on austenitic steel in PC position.

Rotary circumferential welds on medium size weldments fabricated on auxiliary rotary positioners as follows:

- range of weldment diameter from 100...500 mm;
- range of weldment weight from 1...200 kg;
- range of weldment height up to 5000 mm;
- maximum number of weldments placed in welding chamber and welded under one vacuum pumping makes 10 pieces.

Linear welds on sizable weldments fabricated on a central positioner as follows:

- range of weld length from 10...5000 mm;
- range of distance from the axis of central positioner varies within 500...2500 mm;
- range of weldment weight from 100 kg to 200 kg;
- range of weld depth (penetration depth) from 1...100 mm on austenitic steel.

Linear weld of slim weldments in weight up to 200 kg fabricated on the auxiliary rotary positioners as follows:

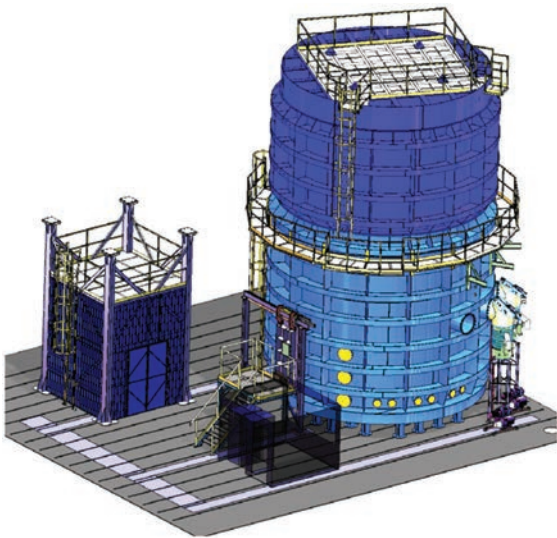


Fig. 12. The welding workplace type PZ EZ30 JUMBO

- range of weld length from 10...5000 mm;
- range of distance from the axis of auxiliary positioner varies within 50...400 mm;
- range of weld depth (penetration depth) from 1...100 mm on austenitic steel.

The electron gun of triode type with maximum power of 30 kW is made of titanium and allows to weld the CrNi steels in thickness of 90 mm on one pass [5]. The system is provided with an electronic anti-discharge protection, monitoring module with three video cameras and laser space navigator. For the needs of surface heat treatment and fabrication of surface layers the equipment is provided with a module for programmable beam scanning. The volume of welding chamber is 265 m<sup>3</sup> (Fig. 12). The time of pumping to working vacuum of  $5 \cdot 10^{-2}$  Pa is 85 minutes.

The welding workplace type PZ EZ 30 TWINBEAM is a versatile workplace with the volume of welding chamber of 16 m<sup>3</sup>. It is destined for welding thin-walled and heavy-walled (up to 80 mm) parts in medium vacuum. Besides welding it also allows the heat treatment of surfaces of metallic materials and additive manufacturing with application of filler in the form of wire. The complex electron beam workplace is equipped with two guns, whereas it is possible to weld just with one gun or both guns



Fig. 13. The welding workplace type PZ EZ 30 TWINBEAM



Fig. 14. The welding equipment type PZ EZ ZPH

simultaneously. The time of vacuum pumping to working vacuum is maximum 25 min. The vacuum chamber is equipped with the X-Y positioning table for positioning during welding, which is integrated with the system for loading and unloading of weldments to and from the vacuum chamber, a rotary positioning system and also with a wire feed unit. The overall view on the workplace is shown in Fig. 13.

The welding equipment type PZ EZ ZPH may be shown as an example of a single-purpose high-productive workplace. This workplace is destined for series welding of hydromotor pistons in vacuum. The pistons of hydro-converters represent an example of extremely loaded part made of hardenable low-alloyed Cr-Mo steel. Since the steel type 42CrMo4 (1.5124) is susceptible to cold cracking, it is necessary to alter the steep thermal cycle of welding by application of preheat eventually postheat. The purpose of application of preheat/postheat is to suppress the formation of martensite in the weld metal and to ensure the formation of a tougher structure which is not susceptible to cold cracking. Possible notch effect of unsuitable geometry is eliminated by the relieving recesses under the weld root. This mechanical adaptation has allowed to dissipate the stress flow from welding, what resulted in reduced concentration of stresses in the root of welded joint. Welding of hydromotor pistons in vacuum represents an ideal application of electron beam welding technology, regarding their dimensions and desired productivity, which by its nature allows to realize a controlled preheat and postheat by the same heat source which is used also for welding.

Welded joints are fabricated at the acceleration voltage of 40 kV, while the nominal power of welding equipment is 6 kW. Maximum annual production of equipment is 500 000 weldments per one shift. This welding equipment is shown in Fig. 14.

### Conclusions

The aim of this contribution is to present a unified concept of design and realisation of deliveries of sophisticated technological equipments and complexes with a high degree of automation. Based

on the presented results the system of modular design can be characterized as flexible and economically efficient. As the main constructional elements this system makes use of unified modules, which represent a separate functional unit which are hardware and software fully compatible with the other modules of technological complex. This system offers a great potential of a broader application in design and construction of versatile and single-purpose equipments in the segment of general engineering.

*Acknowledgement: This work was supported Slovak Research and Development Agency under the contract No.APVV-17-0432.*

## References

1. Schultz H. (2004) *Electron Beam Welding*. Cambridge, Abington Publishing, England, ISBN 1-85573-050 2.
2. Kolenič F., Faragula P., Maštalir P. (2016) Modernizácia modulov elektrónového dela umiestneného vo vnútri vákuovej komory (Modernisation of electron gun modules situated inside the vacuum chamber) *Zvárač-profesionál, (Welder-professional)*, XIII/2016, pp. 16-19, ISSN 1336-5045.
3. Kolenič F., Fodrek P. (2012) New Generation of EB Welding Machines, IIW DOC XII-2063-12, *Joint Intermediate meeting Com. IV, Com. XII and SG 212, Berlin, April, 2012*.
4. Kolenič F. (2014) Large Chamber EBW Machine Using 9 Axes Robotic System for Positioning of Electron Gun and Weldment in Vacuum. *67th IIW International Conference, 13th–18th July, 2014, Seoul, Korea*.
5. Kolenič F., Kováč L. (2011) Nová generácia elektrónovlúčových zariadení s výkonom do 30 kW (New generation of electron beam welding equipment with the power up to 30 kW). *Zvárač-profesionál, (Welder-professional)*, VIII/2011, pp. 22-24, ISSN 1336-5045.

## ПРОМИСЛОВІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ЗВАРЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Ф. Каленич, Л. Ковач, П. Фарагула

FIRST WELDING COMPANY Inc., Братислава, Словацька Республіка

У статті представлені результати, досягнуті в області актуального проектно-технічного рішення сучасних високотехнологічних електронно-променевих зварювальних апаратів у ПЕРШІЙ ЗВАРЮВАЛЬНІЙ КОМПАНІЇ. Описано електронно-променеве технологічне зварювальне обладнання побудоване модульно з особливою увагою до гармонізації апаратної та програмної сумісності. Окремі модулі технологічного підрозділу періодично впроваджуються з урахуванням прогресивних світових тенденцій в області електротехніки, приводних систем, комп'ютерного управління, механічних модулів і досягнень у вакуумній техніці. Цей вклад представлено як розробку основних модулів, які є ядром технологічного зварювального комплексу: стаціонарної і рухомої електронної гармати, систем генерації променів, вакуумних камер, а також допоміжних модулів, адаптованих до потреб сучасного промислового виробництва та управління якістю. Серед прикладів, дистанційна діагностика електронно-променевого апарату за допомогою веб-додатків, модуль для моніторингу та редагування параметрів технологічного процесу можна шляхом пошуку. Задokumentовано та описано три приклади різної конструкції електронно-променевого обладнання. Бібліогр. 5, рис. 14.

*Ключові слова: електронний промінь, зварювальні апарати, модульна конструкція, модулі зварювального обладнання, дистанційна діагностика, моніторинг технологічних параметрів*

## ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ СВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Ф. Коленич, Л. Ковач, Р. Секерка, П. Фарагула

FIRST WELDING COMPANY Inc., Братислава, Словацкая Республика

В статье представлены результаты, достигнутые в области актуального проектирования и технического решения современного высокотехнологического оборудования для электронно-лучевой сварки в компании FIRST WELDING COMPANY Inc. Основными концептуальными подходами к решению современных технологических комплексов с применением мощных систем генерации электронного пучка являются следующие: электронно-лучевое технологическое сварочное оборудование построено модульно, особое внимание уделено согласованию аппаратной и программной совместимости. Отдельные модули технологического блока периодически обновляются с учетом прогрессивных мировых тенденций в области электротехники, приводных систем, компьютерного управления, механических модулей и достижений в вакуумной технике. Этот вклад представляет собой разработку основных модулей, составляющих ядро технологического сварочного комплекса, таких как стационарная и подвижная электронная пушка, системы генерации пучка, вакуумные камеры, а также вспомогательных модулей, которые адаптированы к потребностям современного промышленного производства и управления качеством. В качестве примера можно отметить удаленную диагностику электронно-лучевой машины с помощью веб-приложений, модуль для мониторинга и редактирования параметров технологического процесса. Три примера различной конструкции электронно-лучевого оборудования задокументированы и описаны. Библиогр. 5, рис. 14.

*Ключевые слова: электронный луч, сварочные аппараты, модульная конструкция, модули сварочного оборудования, дистанционная диагностика, мониторинг параметров процесса*

Поступила в редакцию 13.11.2018

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ (Обзор)

**П.Н. Ткач, А.В. Молтасов, И.Г. Ткач, С.Н. Прокопчук**

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

Для сварных соединений трубопроводов и элементов сварных конструкций, в том числе трубчатых, характерны изменения сечения в зоне шва. В местах изменения формы возникает местное повышение напряжений или их концентрация. Степень концентрации часто играет решающую роль при определении напряженно-деформированного состояния конструкции в целом, оказывает влияние на долговечность при циклических нагрузках, а также влияет на процесс зарождения и развития трещин. В настоящей статье приведен обзор работ, посвященных методикам определения максимальных локальных напряжений, действующих в зоне концентрации напряжений, вызванной геометрической формой сварных соединений трубопроводов и трубчатых конструкций. Библиогр. 49, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* сварные соединения трубопроводов, трубчатые конструкции, геометрия сварного шва, локальные напряжения, коэффициент концентрации напряжений

Концентрация напряжений, обусловленная геометрией шва, является одним из основных факторов, определяющих характеристики сопротивления усталости сварных соединений [1].

Опыт показывает, что с концентрацией напряжений необходимо считаться не только при действии вибрационной нагрузки, но и при действии статической нагрузки и ударе, когда возможно хрупкое разрушение [2], что особо актуально для трубопроводов, эксплуатируемых при низких климатических температурах, например, в условиях Крайнего Севера или в заполярных районах [3, 4].

Традиционно максимальные напряжения при упругом деформировании получают умножением номинальных напряжений на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений (ККН), который служит количественной оценкой концентрации напряжений.

В инженерной практике в последние годы широкое распространение получил подход, согласно которому теоретический коэффициент концентрации напряжений представляется в виде произведения двух коэффициентов. Первый учитывает макрогеометрию, т. е. конструкцию сварного узла, поэтому он получил название конструктивного ККН. Второй учитывает наличие сварного шва и его микрогеометрию. Такой подход дает достаточно достоверный результат, что было подтверждено, в том числе, и отечественными исследователями [5]. При наличии линейных (несоосность труб) или угловых (перекос труб) смещений кромок в сварном узле возникают дополнительные внешние нагрузки, которые учитываются соответствующими коэффициентами, на которые умножаются первые два [6].

Концентрация напряжений, связанная с размерами усиления и геометрией зоны перехода от шва к основному металлу, в первую очередь зависит от отношения радиуса этого перехода к толщине основного металла [7], а в нашем случае к толщине стенки трубы [8].

Исследованию влияния ККН на усталостную прочность посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [9, 10], что свидетельствует о значительном научном интересе к этому вопросу, в частности, применительно к сварным соединениям трубопроводов и трубчатых конструкций [11].

Для оценки напряженного состояния нагруженных деталей и элементов конструкций, как правило, используются аналитические, экспериментальные и численные методы, а современные методики основаны на их сочетании с максимальным использованием преимуществ каждого из них. Поэтому целью настоящего обзора является отслеживание современных тенденций и определение приоритетных направлений дальнейшего развития методик расчета максимальных локальных напряжений в сварных соединениях труб.

Большинство работ, опубликованных за последние десятилетия, основаны на использовании метода конечных элементов (МКЭ) для получения формул, позволяющих определять напряжения в «горячей точке» (the hot spot stresses, или HSS), которые представляют собой максимальные локальные напряжения. Применение указанного подхода позволяет определить конструктивный ККН с использованием оболочечных элементов при приложении как осевой нагрузки, так и изгибающих моментов в различных плоскостях исследуемого сварного узла. Например, в работе [12]

для Т-образных соединений таким путем были установлены значения конструктивного ККН по всей длине шва в случае приложения осевой нагрузки вдоль патрубка  $F_a$ , изгибающего момента поперек сечений трубы и патрубка  $M_{IPB}$  и в плоскости сечения трубы  $M_{OPB}$  (рис. 1).

Значения ККН (рис. 1) удовлетворительно совпадают с результатами работ, приведенных в [12]. Следует отметить, что авторы [12] ограничились графическим представлением результатов, и уравнений, позволяющих определять ККН в зависимости от геометрических параметров, не получали.

В работе [13] с применением МКЭ получены формулы для определения конструктивного ККН в соединениях квадратных и круглых труб ДТ/Х-образных трубчатых конструкций. Выполнена сравнительная оценка расчетных значений ККН указанных соединений с соответствующей величиной для аналогичных соединений круглых труб, полученных по известным на тот момент формулам. Установлено, что соединения «квадрат-круг» при приложении осевой нагрузки и изгибающего момента не в плоскости имеют ККН меньше, чем соединения «круг-круг». При изгибе моментом в плоскости конструкции картина обратная.

Авторами [14] для сварных соединений Х-образных и крестообразных трубчатых конструкций с помощью МКЭ было проанализировано около 2 тыс. вариантов конструкций с разными углами пересечения и шестью схемами нагружения (растяжение и изгиб в разных направлениях и плоскостях). В результате на основе регрессионного анализа получены новые параметрические уравнения для определения конструктивного ККН. Результаты расчета по полученным зависимостям авторы сравнили с результатами эксперимента, проведенного на стальных и акриловых моделях. Совпадение оказалось удовлетворительным, поэтому полученные формулы рекомендованы к использованию для расчета трубчатых ферм.

Работа [15] во многом аналогична работе [14], но посвящена К-образным трубчатым конструкциям. В них также на основе решения с помощью МКЭ 254 задач, соответствующих разным вариантам конструкций, и последующего регрессионного анализа полученных результатов, построены зависимости для определения конструктивного ККН. Проверка полученных результатов также выполнялась на стальных и акриловых моделях.

В работе [16] теми же авторами на основе [15] и базы данных из других своих работ разработана методика прогнозирования значений конструктивного ККН и угла прогиба в К-образных трубчатых конструкциях.

Авторами [17] для К-образных трубчатых конструкций на основе метода перемещения в эффективном концентраторе были определены локальные напряжения с учетом геометрических параметров сварного шва. Авторы этой работы исследовали концентрацию напряжений в сварных соединениях с угловыми швами, имеющими исправленный профиль. Минимизация ККН (здесь ККН формы шва) достигалась путем удаления дефектов в зоне перехода от шва к основному металлу и приданием профилю необходимого радиуса.

В работе [18] для сварных соединений ХХ-образных пространственных трубчатых конструкций на основе МКЭ получена база данных по ККН. С ее использованием разработана простая и эффективная методика прогнозирования значений ККН при разных видах нагрузки. Для определения ККН получены уравнения и диаграммы, рекомендованные для инженерной практики.

Подход, применяемый в работах [12–15], был распространен на Т-, Х- и Y-образные трубчатые конструкции для двенадцати схем приложения нагрузок в работе [19].

В работе [20] определены значения конструктивного ККН для сварного соединения штуцера и сферического резервуара в широком диапазоне изменения их параметров (диаметры и толщины стенок) и представлены в виде таблиц и графиков.

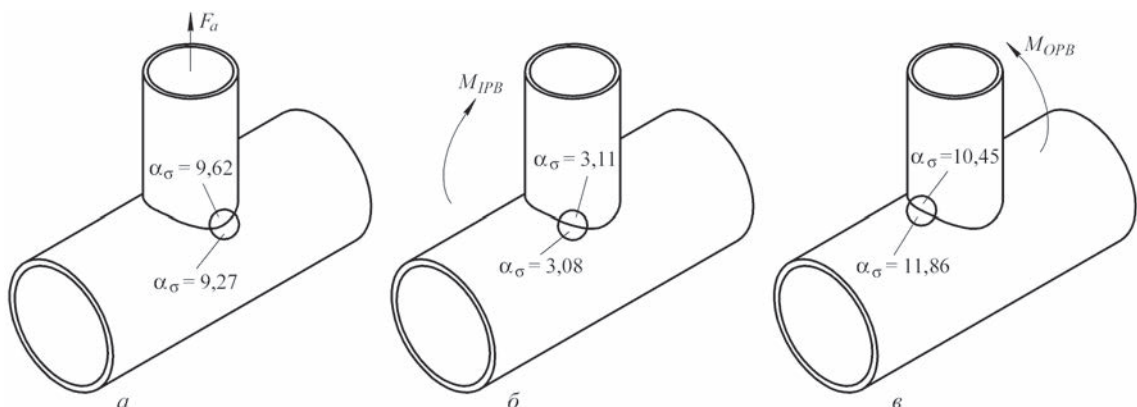


Рис. 1. Максимальные значения ККН по данным [12] под действием осевой силы (а), момента поперек сечений трубы и патрубка (б) и момента в плоскости сечения трубы (в)



Авторы использовали МКЭ и теорию тонких оболочек под внутренним давлением. Оба метода показали хорошую сходимость результатов даже с учетом усиления, имеющего место в соединении, поэтому, по мнению авторов, полученные в этой работе результаты могут быть распространены и на швы приварки штуцеров к цилиндрическим оболочкам.

Результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности ДТ-образных соединений труб представлены в работе [21]. Авторами были изготовлены сваркой ТИГ образцы двух видов из стали S31803. Первый вид образцов имитировал трубчатую конструкцию, т. е. приварку трубы меньшего диаметра к трубе большего. Второй вид образцов представлял собой элемент трубопровода, т. е. трубу с приваренными к ней штуцерами. В ходе исследований авторами определялся конструктивный ККН для обоих видов образцов. Как по результатам натурных измерений, так и путем расчета по формулам, рекомендованным МИС (IIW Doc. XV-E-98-236), было установлено, что ККН образцов второго вида на 35 % меньше, чем первого.

В работе [22] представлен метод определения конструктивного ККН сварных соединений трубопроводов, основанный на МКЭ, причем ККН выделяется как основной фактор, влияющий на долговечность кольцевых швов трубопроводов. Согласно кодам ASME Section III и B31, соответственно, для сосудов под давлением и трубопроводов, их долговечность определяется таким важным показателем как коэффициент снижения предела выносливости (ASME Section III) и коэффициент интенсивности напряжений (ASME B31). Оба являются аналогом эффективного коэффициента концентрации и связаны с ККН, поэтому задача более точного и достоверного определения ККН является актуальной. Авторы этой работы отмечают, что общепринятый подход к его определению с помощью МКЭ недостаточно эффективен для сварных швов трубопроводов из-за чувствительности результатов к размеру сетки, а

предложенный метод дает значение ККН, которое от него не зависит. Важным результатом этой работы является установление функциональной взаимосвязи между коэффициентом снижения предела выносливости и ККН.

Разработанный и представленный в работе [22] подход успешно реализован его авторами в работе [23] на примере Т-образной трубчатой конструкции, работающей на изгиб в плоскости, предложенный метод применен для определения HSS. Подобно работе [21], в [23] рассмотрены как трубчатые конструкции, так и соединения трубопроводов. Для получения последних в модели исключалась часть поверхности трубы, соответствующая пересечению. Результаты свидетельствуют о следующем: наибольшее значение конструктивный ККН принимает на трубе большего диаметра. Для случая трубчатой конструкции и соединения трубопроводов характер распределения ККН вдоль шва различен. В зоне максимального ККН соединения трубопроводов его значение на 33 % ниже, чем у трубчатой конструкции. Последний результат совпадает с результатами работы [21], полученными на натурных образцах и с помощью аналитических зависимостей.

Работа [24] во многом аналогична [22], причем авторы отмечают чрезмерный консерватизм кодов ASME, дающих завышенные значения. Авторами работы [24] на основе МКЭ получены графики зависимости конструктивного ККН от соотношения диаметра трубы  $D$  и приваренного к ней ответвления диаметром  $d$  с переменной толщиной стенки. Данные получены для широкого диапазона  $d/D = 0,05...1,0$ . Значения конструктивного ККН при нагружении внутренним давлением находятся в пределах 1,8...3,5.

С момента представления в 2003 г. нового метода определения конструктивного ККН [22], к 2007 г. он прошел валидацию. В работе [25] авторы [22] успешно применили свой метод при обновлении кодов 2007 ASME Div 2. Выход новой редакции стал возможным, в том числе благодаря новому, более точному методу определения ККН.

Авторы [26] исследовали влияние на конструктивный ККН локального утонения стенки в районе Т-образного соединения трубы и ответвления (рис. 2).

Исследование выполнено в два этапа. На первом этапе модель прошла валидацию с помощью известных зависимостей для конструктивного ККН, которые были получены такими исследователями как:

- Линд (Lind)

$$\alpha_{\sigma} = \min\{K_1; K_2\},$$

где

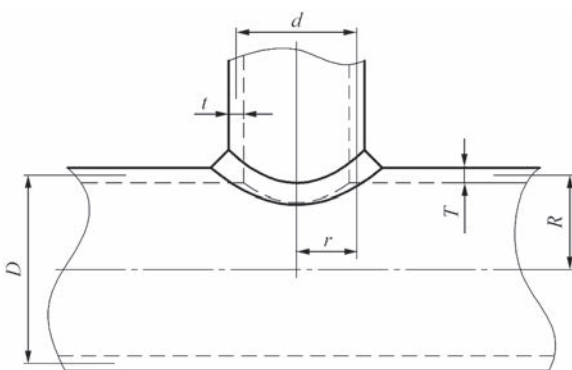


Рис. 2. Параметры Т-образного соединения трубы и ответвления

$$K_1 = \frac{[1 + 1,77(d/D)\sqrt{D/T} + (d/D)^2 \sqrt{s/S}][1 + (T/D)/\sqrt{s/S}]}{1 + (d/D)^2 \sqrt{s/S}/(s/S)},$$

$$K_2 = \frac{[1,67\sqrt{s/S}\sqrt{D/T} + 0,565(d/D)][1 + (T/D)/\sqrt{s/S}]}{0,67\sqrt{s/S}\sqrt{D/T} + 0,565(d/D)^2/(s/S)},$$

$$S = d/(2t), S = D/(2T); \quad (1)$$

• Мани (Money)

$$\alpha_\sigma = 2,5 \left[ (r/t)^2 (T/R) \right]^{0,2042} \quad \text{для } r/R < 0,7,$$

$$\alpha_\sigma = 2,5 \left[ (r/t)^2 (T/R) \right]^{0,24145} \quad \text{для } r/R > 0,7; \quad (2)$$

• Декок (Decock)

$$\alpha_\sigma = \frac{[2 + 2(d/D)\sqrt{(d/D)(t/T)} + 1,25(d/D)\sqrt{D/T}]}{1 + (t/T)\sqrt{(d/D)(t/T)}}; \quad (3)$$

• Гурумурти (Gurumurthy)

$$\alpha_\sigma = 1,75(T/t)^{0,4}(d/D)^{-0,08}(\lambda)^{0,6}, \quad (4)$$

где  $\lambda = d/(DT)^{0,5}$ ;

• Моффат (Moffat)

$$\alpha_\sigma = [2,5 + 2,2,715(d/D) + 8,125(d/D)^2 - 6,877(d/D)^3] + [-0,5 - 1,193(d/D) - 5,416(d/D)^2 + 5,2(d/D)^3](t/T) + [0,078(d/D) - 0,195(d/D)^2 + 0,11(d/D)^3](D/T)^{1,2} + [-0,043(d/D) + 0,152(d/D)^2 - 0,097(d/D)^3](t/T)(D/T)^{1,2}. \quad (5)$$

После валидации были построены модели в широком диапазоне параметров соединения и оценено влияние утонения на конструктивный ККН, в результате было установлено, что он возрастет с уменьшением толщины стенки. Для относительно тонкостенных труб при  $d/D < 0,2$  влияние утонения на ККН становится не таким существенным вплоть до обратной картины, когда с уменьшением толщины может уменьшаться и ККН. Для относительно толстостенных труб при  $d/D > 0,3$  ККН с уменьшением толщины возрастает существенно. Для соединений как с утонением, так и без него максимальные локальные напряжения имеют место на линии пересечения внутренних поверхностей.

Распределение ККН вдоль шва и зоны максимального ККН в трубчатых сварных конструкциях оказывают существенное влияние на долговечность конструкции. Особенно важно знать характер распределения ККН для пространственных трубчатых конструкций. Авторы [27] исследовали распределение конструктивного ККН для ДКТ-конструкций под действием осевых нагрузок. С помощью параметрического моделирования и с применением МКЭ оценено влияние геометрии конструкции на распределение ККН вдоль швов. Оценка включала также сравнение значений ККН плоских конструкций (КТ) с простран-

ственными (ДКТ). Установлено, что конструктивный ККН ДКТ-конструкции в 1,1...1,6 раза выше, чем ККН КТ-конструкции. Получены параметрические уравнения, связывающие конструктивный ККН с размерами трубчатой конструкции, коэффициент корреляции составил 0,993...0,999. Данные по распределению ККН в Т-образном элементе КТ-конструкции аналогичны результатам [12].

Стоит отметить, что получение достоверных аналитических зависимостей является на сегодня актуальной задачей. Наглядным примером удобства применения формул для ККН, подобным [27], в сочетании с другими факторами являются статьи [28, 29], где исследуется влияние на долговечность конструкций остаточных напряжений и ударной обработки сварных швов. В литературе довольно часто определение ККН встречается в сочетании с другими факторами, определяющими долговечность сварных соединений.

В работе [30] наглядно продемонстрировано, насколько значение конструктивного ККН влияет на накопленное усталостное повреждение свай, сваренных в стык односторонним швом, при их забивании в морское дно. Конструктивный ККН в рассматриваемом случае связан с изгибом, вследствие эксцентриситета из-за разности толщин соединяемых труб, и вводится наряду с классификационным коэффициентом (classification factor), зависящим от способа сварки, т. е. представляющий собой теоретический ККН формы шва. Повышение последнего от 1,34 до 1,52, т. е. на 13 %, влечет за собой увеличение накопленного усталостного повреждения (определялось по гипотезе Пальмгрена-Майнера) на 46 %, что установлено авторами упомянутой работы расчетным путем с помощью программного продукта GRLWEAP.

В отличие от работы [30], где рассматривалось только осевое нагружение при забивании свай, авторы [31] оценивали ККН при действии на сваю как осевой нагрузки, так и изгибающего момента (по отдельности и вместе). Влияние на накопленное усталостное повреждение не оценивалось, однако была выполнена большая работа по определению общего ККН в зависимости от диаметра и толщины стенки  $t$  сваи при следующих параметрах шва: высота выпуклости составляет 5 % толщины стенки плюс 2 мм, и радиус перехода от шва к основному металлу  $\rho$  составляет 1 мм. Ширина и высота усиления определялись конструктивно, радиальное смещение труб  $e$  принималось фиксированным и составляло 2 мм. Полученные значения были представлены графически, и сравнивались с известной формулой для плоских деталей ( $K_{cm} = 1 + 3e/t$ ) [32] и с уточненными формулами, полученными для труб [33, 34]. Установлено, что все результаты удовлетворительно согласуют-

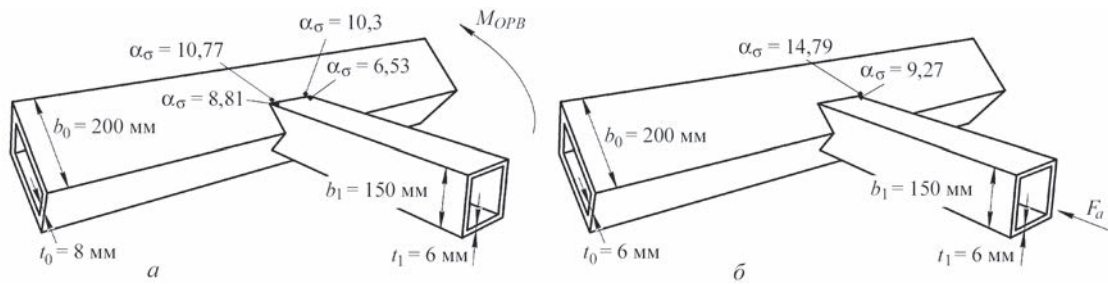


Рис. 3. Максимальные ККН по данным [39, 40] при действии момента в плоскости трубы (а) и осевой силы вдоль патрубка (б)

ся. Зависимости ККН от толщины стенки, полученные по формулам и с помощью МКЭ, имеют одинаковый характер. От диаметра трубы ККН практически не зависит.

Отдельно следует упомянуть работы И. Лотсберга (Inge Lotsberg), который сделал большой вклад в развитие методов определения локальных напряжений в сварных соединениях трубопроводов и трубчатых конструкциях. Особенностью его работ является получение точных аналитических выражений для ККН на основе классической теории оболочек. Так, например, формулы Лотсберга, представленные им в работе [35], позволяют определять конструктивный ККН в зависимости от погрешностей изготовления конструкций. Формулы применимы для стыковых соединений труб, кольцевых ребер жесткости и шпангоутов, конических переходов трубопроводов. Дальнейшие его работы были направлены на расширение области применения формул и оценку влияния ККН на усталостную долговечность трубчатых конструкций [33, 36]; рассмотрение более широкого спектра нагрузок, например, при действии внутреннего давления [34]; уточнение полученных другими авторами эмпирических зависимостей для определения ККН [37]. Итогом более чем сорокалетней деятельности ученого стала книга [38], вобравшая в себя практически все аспекты усталостной долговечности трубчатых конструкций.

Расширение области применения формул для определения ККН является характерной чертой исследований последних лет [39–43]. Работы [39, 40] взаимно дополняют друг друга и направлены на изучение вопроса распределения ККН в Т-образных сварных соединениях труб квадратного сечения (рис. 3).

В работе [39] установлены зоны наибольшего ККН вдоль шва, а также максимальные его значения при нагружении изгибающим моментом в плоскости трубы (рис. 3, а). Оценка выполнялась экспериментально на образцах из труб разных размеров (9 образцов) путем измерения перемещений с учетом нелинейности их распределения вдоль горячей линии. Известно, что метод определения HSS допускает возможность линейной и квадратичной экстраполяции. Авторами [39] уста-

новлено, что для соединений, представленных на рис. 3, необходимо применять квадратичную экстраполяцию. Именно в этом случае ККН определяется более точно, следовательно, могут быть применены кривые усталости, рекомендованные МИС. Авторы отмечают, что применение формул для расчета ККН является очень удобным, поэтому получение таких формул они представили как цель своих дальнейших исследований.

Те же авторы в работе [40] рассмотрели аналогичные соединения под действием осевых нагрузок, где для определения ККН применен МКЭ, в остальном полученный набор данных аналогичен [39], максимальные ККН получены для образца с тем же соотношением размеров, что и в [39]. Установлено, что наибольшие значения ККН имеют место в соединении при приложении осевой силы к трубе меньшего диаметра (рис. 3, б). Кроме того, авторы сравнили полученные результаты со значениями ККН Т-образных традиционных соединений (рис. 4) и труб круглого сечения (рис. 2). Даны критические значения размеров труб, при которых соединения (рис. 3) имеют преимущества перед остальными.

Авторы [41] также исследовали Т-образные соединения квадратных труб, в которых труба меньшего сечения повернута на  $45^\circ$  относительно положения, показанного на рис. 3. Для исследования применялся МКЭ, модель валидировалась с помощью натуральных измерений перемещений. Всего рассмотрено четыре вида нагрузки: осевые нагрузки, приложенные к трубам большего и меньшего диаметра, изгиб в плоскости и вне плоскости. В работе подтвержден вывод [39] о том, что для соединений квадратных труб необходимо применять квадратичную экстраполяцию при определении HSS. На основе определения ККН с помощью МКЭ на многочисленных моделях, в рассматриваемой работе получены достоверные формулы для определения ККН при перечисленных выше вариантах нагрузки.

Поскольку формулы (1)–(5) для расчета конструктивного ККН угловых швов Т-образных трубчатых конструкций (рис. 2) имеют сравнительно невысокую точность, авторы [42] с помощью МКЭ на основании решения 1526 задач получили более простые и достоверные формулы

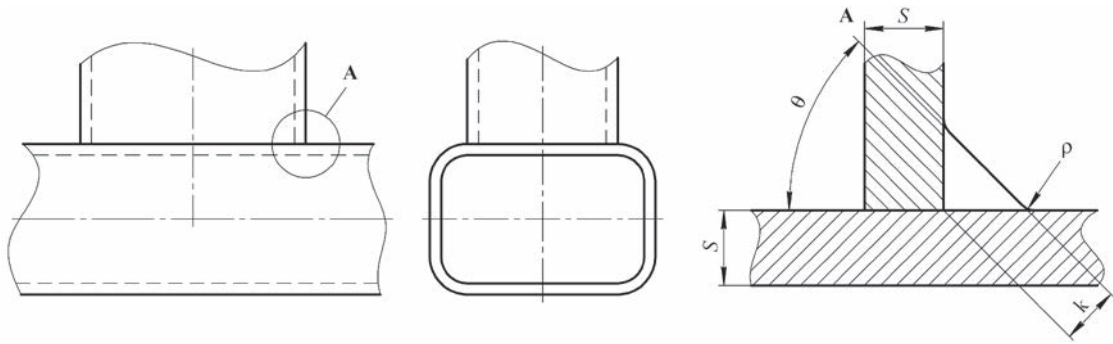


Рис. 4. Схема Т-образного сварного соединения прямоугольных труб

для определения его величины при действии внутреннего давления.

В работе [43] с применением МКЭ на основе регрессионного анализа данных, полученных с множества моделей, получены формулы для определения ККН К-образных трубчатых конструкций. Конструкция, рассмотренная авторами, сварена из большей трубы круглого и двух меньших труб квадратного сечения. Формулы применимы для определения ККН на каждой из труб под действием осевых нагрузок.

Работа [44] в методологическом плане родственна работе [26], но посвящена оценке влияния объемных поверхностных дефектов на долговечность тройников трубопроводов, в том числе и сварных. На первом этапе исследования автор построил модели тройников и с помощью МКЭ установил значения конструктивных ККН. Из всех видов тройников максимальные значения были получены для тройника с приварным штуцером. Они составили  $\alpha_{\sigma} = 4,5$  для тройника с  $D = 426$  мм,  $T = 20$  мм,  $d = 168$  мм,  $t = 9$  мм. Зоны максимальной концентрации стали местом дальнейшего рассмотрения постулированных дефектов. Стоит отметить, что эти зоны совпали с зонами, отмеченными авторами [26]. Сравнение результатов расчетов ККН по формулам (1)–(5) с результатами, полученными в [44], и экспериментальными данными, взятыми из [45], приведено в таблице. Числовые значения ККН, полученные в работах [44] и [26] с применением МКЭ, согласуются как с экспериментальными данными, так и с расчетными значениями. При этом имеют место расхождения в результатах расчетов по формулам. Очевидно, что формула (2) дает заниженное, а формула (4) — завышенное значение для данного типоразмера тройника.

Поскольку большинство из рассмотренных выше работ [6, 8, 11–31, 33–45] ограничиваются определением только конструктивного ККН при помощи МКЭ, причем далеко не все исследователи получают формулы для его определения, экспериментальные методы определения ККН формы шва все еще не утратили своей актуальности. Так авторы работы [46] с помощью поляризационно-оптического метода на моделях, изготовленных по реальным размерам Т- и Y-образных трубчатых конструкций, получили значение ККН, учитывающего и конструктивные параметры, и геометрию шва. Созданные модели учитывают нестабильность формы сварного шва и ее влияние на напряженное состояние трубчатых узлов. Значения HSS, определенные с учетом фактической геометрии сварного шва, по оценкам авторов, возрастают в 2,5...3,0 раза. Сделанные в [46] выводы указывают на необходимость учета геометрии шва, иначе это может привести к образованию трещин в зоне перехода от шва к основному металлу трубчатых узлов. В работе [47] значения ККН стыковых сварных соединений труб получены также с помощью поляризационно-оптического метода. Диапазон значений в зависимости от геометрических параметров шва составляет 1,1...1,7.

Авторами [48] в ходе моделирования нестационарных процессов в стыковом сварном соединении трубопровода с помощью МКЭ получено значение теоретического ККН, которое составило 1,8. Данный результат согласуется с результатами [46] и со значениями ККН стыковых сварных соединений плоских деталей, приведенными в обзорах [9, 10].

Поляризационно-оптический метод был также использован для определения ККН сварных соединений, применяемых при ремонте магистраль-

ККН сварных соединений тройников под действием внутреннего давления

Метод определения	Экспериментальный [45]	МКЭ		Формула				
		[44]	[26]	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Значение	4,23	4,5	4,08*	4,47	3,57	4,11	6,14	4,18

Примечания: \* — значение получено по данным [26] методом интерполяции параметров тройников, ближайших к [44]; расчет по формулам (1)–(5) выполнен для параметров, полученных интерполяцией. Тем же параметрам соответствует и экспериментальное значение.

ных трубопроводов без остановки транспорта продукта [49]. Значения ККН в зависимости от вида нагрузки составили 1,6...3,0 для угловых и 1,2...2,0 для нахлесточно-стыковых сварных соединений.

## Выводы

1. За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в задаче определения ККН трубопроводов и трубчатых конструкций. На сегодня наиболее распространенными для оценки напряженного состояния являются методики, основанные на применении МКЭ. Значительно меньшим количеством представлены методики, основанные на экспериментальных методах получения локальных напряжений и аналитические методы.

2. Ограничения применимости МКЭ для расчета ККН трубопроводов и трубчатых конструкций в каждом отдельно взятом случае связаны с высокой трудоемкостью при построении точной трехмерной модели и ее аппроксимации трехмерными конечными элементами. Поэтому большинство исследователей стремится применять параметрическое моделирование на основе оболочечных элементов и получать регрессионные уравнения, позволяющие вычислять ККН в широком диапазоне параметров.

3. Формулы для определения ККН с помощью МКЭ, представленные в литературе за указанный период, носят частный характер. Они могут быть применены только к определенной конструкции в установленном диапазоне параметров. Второй особенностью существующих зависимостей является тот факт, что они позволяют определять только конструктивный ККН, т. е. не учитывают наличия и геометрии сварного шва. При этом экспериментальные исследования показывают, что напряжения в локальных зонах перехода от шва к основному металлу заметно возрастают, а игнорирование при расчетах наличия сварного шва может привести к преждевременному разрушению сварного трубчатого узла.

4. В современной инженерной практике локальную составляющую ККН, связанную с наличием сварного шва, рекомендуется рассчитывать с использованием приближенных формул, однако для сварных соединений труб такие формулы на сегодня не были получены. Поэтому при определении характеристик сопротивления усталости трубчатых сварных конструкций используются различные методические приемы, например, метод перемещения в эффективном концентраторе. Следует отметить, что использование фиктивного радиуса перехода от шва к основному металлу не позволяет определить места с максимальным значением локального ККН вдоль кольцевого или

углового шва в трубчатых конструкциях и соединениях трубопроводов, что играет важную роль для достоверной оценки их долговечности.

## Список литературы/References

1. Труфяков В.И., Дворецкий В.И., Михеев П.П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.  
Trufyakov, V.I., Dvoretzky, V.I., Mikheev, P.P. et al. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Навроцкий Д.И. (1968) *Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений*. Ленинград, Машиностроение.  
Navrotsky, D.I. (1968) *Calculation of welded structures taking into account stress concentration*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Кучук-Яценко С.И., Кирьян В.И., Казымов Б.И., Хоменко В.И. (2006) К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*, № 3, 3–9.  
Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kirian, V.I., Kazymov, B.I., Khomenko, V.I. (2006) Methodology for control of fitness for purpose of flash butt welded joints in pipelines. *The Paton Welding J.*, № 2, 2–6.
4. Патон Б.Е. (2013) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона для современной энергетики. *Там же*, № 11, 14–22.  
Paton, B.E. (2013) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute for nowadays power engineering. *Ibid.*, № 11, 14–22.
5. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. (2015) Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 2(3), 184–194.  
Korostylyov, L.I., Litvinenko, D.Yu. (2015) Evaluation of stress concentration factor in welded assemblies of thin-walled structures using calculation of macro- and microconcentration. *Nauk. Visnyk Khersonsk. Derzh. Morskoi Akademii*, 2(3), 184–194.
6. Ostsemin A.A., Dil'man V.L. (2003) Effect of stress concentration in a welded seam on the low-cycle fatigue of large-diameter pipes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 39, 5 6, 259–264.
7. Рыбин Ю.И., Стаканов В.И., Костылев В.И. и др. (1982) Исследование методом конечных элементов влияния геометрических параметров швов тавровых и крестообразных сварных соединений на концентрацию напряжений. *Автоматическая сварка*, 5, 16–20.  
Rybin, Yu.I., Stakanov, V.I., Kostylyov, V.I. et al. (1982) Investigation by finite element method of geometric parameters influence of T- and cruciform welded joints on stress concentration. *Avtomatich. Svarka*, 5, 16–20 [in Russian].
8. Macdonald K.A., Haagensen P.J. (1999) Fatigue design of welded aluminum rectangular hollow section joints. *Engineering Failure Analysis*, 6, 113–130.
9. Tkacz P.N., Moltasow A.W. (2017) Rozwój metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Część 1. Metody tradycyjne. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 4, 52–56.
10. Tkacz P.N., Moltasow A.W. (2017) Rozwój metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Część 2. Metody najnowsze. *Ibid.*, 5, 98–103.
11. Wood J. (2008) A review of literature for the structural assessment of mitred bends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 8, 275–294.
12. N'Diaye A., Hariri S., Pluvinage G., Azari Z. (2007) Stress concentration factor analysis for notched welded tubular T-joints. *International Journal of Fatigue*, 9, 1554–1570.
13. Ai-Kah Soh, Chee-Kiong Soh. (1991) SCF Equations for DT/X square-to-round tubular joints. *J. Construct. Steel Research*, 9, 81–95.

14. Chang E., Dover W.D. (1996) Stress concentration factor parametric equations for tubular X and DT joints. *Int. J. Fatigue*, 18, 6, 363–387.
15. Morgan M.R., Lee M.M.K. (1997) New parametric equations for stress concentration factors in tubular K-joints under balanced axial loading. *Ibid*, 19, 4, 309–317.
16. Morgan M.R., Lee M.M.K. (1998) Prediction of stress concentrations and degrees of bending in axially loaded tubular K-joints. *J. Construct. Steel Res*, 45, 1, 67–97.
17. Rodriguez J.E., Brennan F.P., Dover W.D. (1998) Minimization of stress concentration factors in fatigue crack repairs. *Int. J. Fatigue*, 20, 10, 719–725.
18. Karamanos S.A., Romeijn A., Wardenier J. (1999) Stress concentrations in multi-planar welded CHS XX-connections. *J. Construct. Steel Res*, 5, 259–282.
19. Lee M.M.K. (1999) Estimation of stress concentrations in single-sided welds in offshore tubular joints. *Int. J. Fatigue*, 21, 895–908.
20. Dekker C.J., Brink H.J. (2000) Nozzles on spheres with outward weld area under internal pressure analysed by FEM and thin shell theory. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 7, 399–415.
21. Maddox S.J., Manteghi S. (2002) Fatigue tests on duplex stainless steel tubular t-joints. *Welding in the World*, 46, 3/4, 12–19.
22. Dong P., Hong J.K., Osage D., Prager M. (2003) Assessment of ASME's FSRF rules for vessel and piping welds using a new structural stress method. *Ibid*, 47, 1/2, 31–43.
23. Dong P., Hong J.K. (2004) The master S-N curve approach to fatigue of piping and vessel welds. *Ibid*, 48, 1/2, 28–36.
24. Finlay J.P., Rothwell G., English R., Montgomery R.K. (2003) Effective stress factors for reinforced butt-welded branch outlets subjected to internal pressure or external moment loads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80, 311–331.
25. Dong P., Prager M., Osage D. (2007) The design master S-N curve in ASME Div 2 rewrite and its validations. *Welding in the World*, 51, 5/6, 53–63.
26. Qadir M., Redekop D. (2009) SCF analysis of a pressurized vessel-nozzle intersection with wall thinning damage. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 541–549.
27. Ahmadi H., Lotfollahi-Yaghin M. A., Aminfar M. H. (2011) Distribution of weld toe stress concentration factors on the central brace in two-planar CHS DKT-connections of steel offshore structures. *Thin-Walled Structures*, 49, 1225–1236.
28. Acevedo C., Nussbaumer A. (2012) Effect of tensile residual stresses on fatigue crack growth and S-N curves in tubular joints loaded in compression. *International Journal of Fatigue*, 46, 171–180.
29. Habibi N., H-Gangaraj S.M., Farrahi G.H. et al. (2012) The effect of shot peening on fatigue life of welded tubular joint in offshore structure. *Materials and Design*, 43, 250–257.
30. Chung J., Wallerand R., Hélias-Brault M. (2013) Pile fatigue assessment during driving. 5th Fatigue Design Conference, Fatigue Design 2013. *Procedia Engineering*, 6, 451–463.
31. Li Y., Zhou X.P., Qic Z.M., Zhang Y.B. (2014) Numerical study on girth weld of marine steel tubular piles. *Applied Ocean Research*, 44, 112–118.
32. Вершинский С.В., Винокуров В.А., Куркин С.А. и др. (1975) *Проектирование сварных конструкций в машиностроении*. Москва, Машиностроение.
33. Vershinsky, S.B., Vinokurov, V.A., Kurkin, S.A. et al. (1975) *Design of welded structures in machine building*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
34. Lotsberg I. (1998) Stress concentration factors at circumferential welds in tubulars. *Marine Structures*, 11, 207–230.
35. Lotsberg I. (2004) Fatigue design of welded pipe penetrations in plated structures. *Ibid*, 17, 29–51.
36. Lotsberg I. (2009) Stress concentrations due to misalignment at butt welds in plated structures and at girth welds in tubulars. *International Journal of Fatigue*, 31, 1337–1345.
37. Lotsberg I. (2008) Stress concentration factors at welds in pipelines and tanks subjected to internal pressure and axial force. *Marine Structures*, 21, 138–159.
38. Lotsberg I. (2011) On stress concentration factors for tubular Y- and T-joints in frame structures. *Ibid*, 24, 60–69.
39. Lotsberg I. (2016) *Fatigue design of marine structures*. Cambridge University Pres.
40. Cheng B., Qian Q., Zhao X.L. (2015) Stress concentration factors and fatigue behavior of square bird-beak SHS T-joints under out-of-plane bending. *Engineering Structures*, 99, 677–684.
41. Cheng B., Qian Q., Zhao X.L. (2015) Numerical investigation on stress concentration factors of square bird-beak SHS T-joints subject to axial forces. *Thin-Walled Structures*, 94, 435–445.
42. Tong L., Xu G., Liu Y. et al. (2015) Finite element analysis and formulae for stress concentration factors of diamond bird-beak SHS T-joints. *Ibid*, 86, 108–120.
43. Mukhtar F.M., Al-Gahtani H.J. (2016) Finite element analysis and development of design charts for cylindrical vessel-nozzle junctures under internal pressure. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 10, 4195–4206.
44. Chen Y., Wan J., Hu K. et al. (2017) Stress concentration factors of circular chord and square braces K-joints under axial loading. *Ibid*, 113, 287–298.
45. Юхимец П.С. (2015) Оценка остаточного ресурса поврежденного тройника. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 26–31.
46. Yukhimets, P.S. (2015) Evaluation of residual life of a damaged T-joint. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 26-31.
47. Moffat D.G., Mistry J., Moore S.E. (1999) Effective stress factor correlation equations for piping branch junctions under internal pressure loading. *J. Press Vessel Technol.*, 121(2), 121–126.
48. Губайдулин Р.Г., Тиньяев А.К., Лупин В.А. (2012) Исследование напряженного состояния сварных соединений бесфасонных трубчатых узлов. *Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлургия»*, 18, 5, 31–36.
49. Gubajdulin, R.G., Tingaev, A.K., Lupin, V.A. (2012) Investigation of stress state of welded joints of non-faceted tubular assembly. *Vestnik YuUrGU, Seriya Metallurgiya*, 18(5), 31-36 [in Russian].
50. Маковецкая-Абрамова О.В., Хлопова А.В., Маковецкий В.А. (2014) Исследование концентрации напряжений при сварке трубопроводов. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2(28), 25–27.
51. Makovetskaya-Abramova, O.V., Khloпова, A.V., Makovetsky, V.A. (2014) Examination of stress concentration in welding of pipelines. *Tekhn.-Tekhnol. Problemy Servisa*, 2(28), 25-27 [in Russian].
52. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В., Игнатов М.Н. (2011) Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, 5, 376–382.
53. Fedoseeva, E.M., Olshanskaya, T.V., Ignatov, M.N. (2011) Modeling of nonstationary processes in welded joint of pipelines. *Neftegazovoe Delo: Elektronny Nauchny Zhurnal*, 5, 376-382 [in Russian].
54. Бут В.С., Олейник О.И. (2014) Развитие в Украине технологий ремонта дуговой сваркой магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации. *Автоматическая сварка*, 5, 42–50.
55. But, V.S., Olejnik, O.I. (2014) Development of technologies of repair by arc welding of operating main pipelines in Ukraine. *The Paton Welding J.*, 5, 40-47.

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБ (Огляд)

П.М. Ткач, А.В. Молтасов, І.Г. Ткач, С.М. Прокопчук

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

Для зварних з'єднань трубопроводів і елементів зварних конструкцій, в тому числі трубчастих, характерні зміни перерізу в зоні шва. У місцях зміни форми виникає місцеве підвищення напружень або їх концентрація. Ступінь концентрації часто набуває вирішального значення при визначенні напружено-деформованого стану конструкції в цілому, впливає на довговічність при циклічних навантаженнях, а також впливає на процес зародження та розвитку тріщин. У цій статті наведено огляд робіт, присвячених методикам визначення максимальних локальних напружень, що діють в зоні концентрації напружень, яка викликана геометричною формою зварних з'єднань трубопроводів і трубчастих конструкцій. Бібліогр. 49, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова: зварні з'єднання трубопроводів, трубчасті конструкції, геометрія зварного шва, локальні напруження, коефіцієнт концентрації напружень*

## METHODS FOR DETERMINATION OF LOCAL STRESSES IN WELDED PIPED JOINTS (Review)

P.N. Tkach, A.V. Moltasov, I.G. Tkach, S.N. Prokopchuk

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

For welded joints of pipelines and elements of welded structures, including piped ones, changes in the weld zone section are typical. In places of shape change, a local increase in stresses or their concentration occurs. The degree of concentration often plays a decisive role in determining the stress-strain state of the structure as a whole, affects the service life under cyclic loads, and also affects the process of crack nucleation and propagation. This article provides a review of works on methods for determining the maximum local stresses acting in the zone of stress concentration caused by the geometric shape of welded joints of pipelines and piped structures. 49 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: pipeline welded joints, piped structures, weld geometry, local stresses, stress concentration factor*

Поступила в редакцію 29.10.2018

### Подписка – 2019 на журнал «Автоматическая сварка» www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as Подписной индекс 70031

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
990 грн.	1980 грн.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств:

ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурій» (Україна); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).

### Подписка – 2019 на журнал «The Paton Welding Journal» www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj Подписной индекс 21971



Украина		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	192 дол. США	384 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

**Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.  
В 2019 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2017 гг. в формате \*.pdf.**

Подписано к печати 20.02.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,14. Усл.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44.

Печать ООО «ДИА». 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

© Автоматическая сварка, 2019

## НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К СВАРКЕ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС\*

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, Н.М. Махлин<sup>2</sup>, В.Е. Водолазский<sup>2</sup>, В.Е. Попов<sup>2</sup>, Л.П. Муценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

Исследованиями и практикой установлено, что соответствующее современным требованиям качество сварных соединений трубопроводов в значительной степени зависит от качества предшествующей сварке обработки торцов кромок разделки их стыков и от качества сборки деталей трубопроводов непосредственно перед сваркой. В работе представлены результаты экспериментальных, опытно-технологических и опытно-конструкторских работ, проведенных в НИЦ СКАЭ, по созданию торцевателя для металлических труб диаметром от 76 до 108 мм. Показано, что по сравнению с лучшими зарубежными аналогами, разработанный торцеватель имеет ряд существенных технологических и эксплуатационных преимуществ. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 1.

*Ключевые слова:* атомная энергетика, неповоротные сварные стыки трубопроводов, механическая обработка, пневмопривод, торцеватели, суппорты, резцы

При проведении исследований и опытно-технологических работ изучалось влияние на качество сварных соединений точности подготовки кромок деталей металлических трубопроводов с номинальным наружным диаметром 76, 89 и 108 мм, конструктивные элементы которых соответствуют требованиям ПН АЭ Г-7-009-89 и ОСТ 24.125.02-89, а также определялись области оптимальных режимов обработки этих кромок резанием.

Для исследований использовались образцы деталей трубопроводов из стали 08X18H10T и стали 20 с номинальными диаметрами 76; 89 и 108 мм, а также с номинальной толщиной стенки 7,0; 8,0 и 12,0 мм, соответственно. Кромки используемых для исследований и опытно-технологических работ образцов деталей трубопроводов обрабатывали с помощью токарно-винторезного станка 1М61 и фрезерного станка 6Р82Ш.

Обработку кромок разделок стыков испытуемых образцов деталей трубопроводов для имитации отклонений от линейных и угловых размеров, регламент-

рованных ПН АЭ Г-7-009-89 и ОСТ 24.125.02-89 для сварных соединений типа С-42, осуществляли в соответствии с табл. 1, при этом асимметрия углов скола кромок разделок образцов деталей трубопроводов для имитации отклонений от нормативных значений для труб с номинальными размерами 76×7,0; 89×8,0 и 108×12,0 мм составляла 4 и 8°.

В процессе обработки испытуемых образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T и стали 20 контроль их линейных и угловых размеров выполняли с применением стандартных средств измерений, в частности, штангенциркулей ШЦ-П-160 и ШЦ-П-250 по ГОСТ 166 (наибольшая погрешность измерений ±0,07 и ±0,08 мм, соответственно), стенкомеров индикаторных С-10А и С-25 по ГОСТ 11358 (наибольшая погрешность измерений ±0,02 и ±0,10 мм, соответственно), угломера с нониусом УТ мод. 127 с диапазоном измерения от 0 до 18° и наибольшей погрешностью измерений ±2' [2].

**Таблица 1.** Линейные размеры кромок разделок образцов деталей трубопроводов для имитации отклонений от регламентированных значений

Номинальные размеры трубы (D×S), мм	Разделка кромок						
	Диаметр расточки $d_p$ , мм		Толщина стенки в месте расточки, не менее	Притупление (S – M) при $S_1 = S_2$ , мм			
	Номинальное значение	Наибольшее допустимое отклонение		$S_1 - M_1$	$S_2 - M_2$		
					$M_2 = M_1$	$M_2 = M_1 + 1$	$M_2 = M_1 + 1,5$
76×7,0	63	+0,23	5,6	2,3 <sup>+0,4</sup>	3,3 <sup>+0,4</sup>	3,8 <sup>+0,4</sup>	4,2 <sup>+0,4</sup>
89×8,0	74		6,5	2,7 <sup>+0,3</sup>	2,7 <sup>+0,3</sup>	3,7 <sup>+0,3</sup>	4,2 <sup>+0,3</sup>
108×12,0	88		8,8	3,0 <sup>-0,3</sup>	3,0 <sup>-0,3</sup>	4,0 <sup>-0,3</sup>	4,5 <sup>-0,3</sup>

*Примечание.* Пояснения условных обозначений размеров  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $M_1$  и  $M_2$  приведены в [1].

\*В работе принимали участие инженеры Д.С. Олияненко и В.К. Смоляков (ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины»), С.И. Лавров, А.А. Кириленко, В.Г. Притыка и А.В. Ковалюк (ОП «Атомэнергомаш» ГП «НАЭК «Энергоатом»).

© Л.М. Лобанов, Н.М. Махлин, В.Е. Водолазский, В.Е. Попов, Л.П. Муценко, 2019



Основную часть обработанных в соответствии с табл. 1 испытуемых образцов деталей трубопроводов из стали 08X18H10T и стали 20 подвергли многопроходной автоматической орбитальной сварке неплавящимся электродом в среде аргона (GTAW) с подачей присадочной проволоки и колебаниями неплавящегося электрода. При этом применяли опытный образец разработанного в НИЦ СКАЭ автомата орбитального АДЦ 628 УХЛ4 [3], а для некоторой части этих испытуемых образцов — многопроходную ручную сварку GTAW с подачей присадочной проволоки неплавящимся электродом в среде аргона (TIG) с подачей присадочной проволоки. Для осуществления сварки TIG применяли разработанные ранее в НИЦ СКАЭ опытные образцы источника питания ИЦ 617 УЗ.1 для TIG и GTAW сварки, модуля силового питания МПС-101 и электронного регулятора сварочного тока РДГ-201 УЗ.1 [4], а также горелку АВТIG GRIPP 26 (фирмы ABICOR BINZEL) с вольфрамовым электродом марки WT20 диаметром 3,15 мм. При опытных сварках стыков деталей трубопроводов из стали 08X18H10T в качестве присадочной использовали проволоку Св-04X19H11M3, а из стали 20 — проволоку Св-08Г2С, при этом диаметр этих проволок составлял 1,6 мм.

Качество сварных соединений испытуемых образцов деталей трубопроводов номинальным диаметром от 76 до 108 мм контролировали визуальным, радиографическим и капиллярным способами [5].

В результате выполнения нескольких серий опытных сварок установлено:

- асимметрия углов скоса кромок деталей металлических трубопроводов диаметром от 76 до 108 мм при выполнении сварных соединений типа С-42 не должна превышать  $4^\circ$ , так как при больших значениях асимметрии углов скоса характерны такие сплошные дефекты, как недопустимые нарушения формирования сварного шва, несплавления кромок и отдельных валиков, непровары в заполняющих проходах, «провисания» части шва возле кромки с завышенным углом скоса, подрезы в облицовочном шве;

- отклонения расточки внутренних диаметров от нормативных значений при выполнении сварных соединений типа С-42 не должны превышать +0,23 мм для труб с номинальным наружным диаметром от 76 до 108 мм включительно, а разность между притуплениями обеих кромок не должна превышать 0,5 мм, поскольку сварные соединения деталей трубопроводов, у которых притупление одной из кромок отличается от притупления другой более, чем на 0,5 мм, склонны к таким дефектам корневого шва, как нарушения его регламентированной формы, непровары, «проседания»

шва с одной его боковой стороны и «утяжины» или несплавления с другой. При этом следует отметить, что в случае использования при сварке деталей металлических трубопроводов диаметром от 76 до 108 мм режимов сварки модулированным током даже при разности между притуплениями кромок до 0,75 мм дефекты корневого шва встречаются крайне редко и в большинстве случаев их вовсе не выявлено, а при разности между притуплениями кромок до 0,60 мм эти дефекты практически полностью отсутствуют;

- исходя из рекомендаций, вытекающих из многолетних исследований в направлении механической обработки деталей из сталей аустенитного класса и имеющегося производственного опыта такой обработки [6], в случае тонкого внешнего продольного точения и поперечного подрезания деталей из сталей аустенитного класса (например, 08X18H10T) область оптимальных значений скорости резания ограничена диапазоном от 10 до 40 м/мин, значения поправочных коэффициентов  $K_m$  и  $K_{mv}$  (первый из которых учитывает влияние на скорость резания физико-механических свойств заготовки из коррозионностойкой стали, второй — влияние на скорость резания состояния поверхности этой заготовки) составляют 0,8 и 0,9, соответственно, а значения подачи для чистового точения деталей из жаростойких и нержавеющей сталей — от 0,04 до 0,12 мм/об.

При разработке торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1 принимались во внимание результаты анализа информации о параметрах, характеристиках и построении предлагаемых рынком лучших зарубежных образцов оборудования для обработки торцов и кромок подлежащих сварке деталей трубопроводов и присущие этим аналогам основные недостатки [1]. Также учитывалось стремление к унификации основных составных частей отечественного оборудования для механической обработки для сварки торцов и кромок деталей трубопроводов.

Нами была использована кинематическая схема, аналогичная схеме торцевателя ТРЦ 76 УЗ.1 [1], а также выполнены расчеты трансмиссий и механизмов планшайбы этого торцевателя, расчеты прочности и долговечности элементов таких трансмиссий и механизмов и расчеты сил резания. Это обеспечило осуществление выбора необходимых материалов основных частей торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1 и позволило принять относительно его основных составных частей конструктивные решения, аналогичные тем, которые были приняты при проектировании торцевателя ТРЦ 76 УЗ.1 [1, 7], в том числе касательно наружного одноразового базирования, построения планшайбы, самоцентрирования соосно с продольными осями обрабатываемой трубы и механизма базирования.

**Таблица 2.** Основные параметры и характеристики опытных образцов торцевателей ТРЦ 76 УЗ.1 и ТРЦ 108 УЗ.1 и некоторых их иностранных аналогов

Наименование параметра или характеристики	Модель			
	ТРЦ 76 УЗ.1	ТРЦ 108 УЗ.1	Мангуст-2Т (Россия)	PROTEM PUS40 (Франция)
Наименьший внешний диаметр обрабатываемой трубы, мм	38	76	45	43
Наибольший внешний диаметр обрабатываемой трубы, мм	76	108	120	219
Наибольшая толщина стенки обрабатываемой трубы, мм	7,0	12,0	5,0	16,0
Длина расточки внутреннего диаметра обрабатываемой трубы, мм, не менее	15	20	Опция расточки отсутствует	
Базирование	На внешней поверхности обрабатываемой трубы		Внутреннее	
Максимальное возможное количество резцов в резцедержателях, шт.	4		1	1
Способ подачи резцов	Вручную			
Подача резца, мм/об, не более	0,15		0,20	
Частота вращения планшайбы номинальная, об/мин	100	70	70	25
Расход сжатого воздуха во время холостого хода, м <sup>3</sup> /мин, не более	1,5		1,7	1,6
Масса с приводом, кг, не более	12,6	13,4	9,5	16,0

Для обеспечения торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1 воздушно-масляной смесью использован унифицированный блок подготовки воздуха, применяемый в торцевателях ТРЦ 38 УЗ.1, ТРЦ 76 УЗ.1 и трубо-резу разъемном ТТЦ 660 УЗ.1.

В табл. 2 приведены основные параметры и характеристики опытных образцов торцевателей ТРЦ 76 УЗ.1 и ТРЦ 108 УЗ.1, а также некоторых их иностранных аналогов из числа лучших зарубежных образцов.

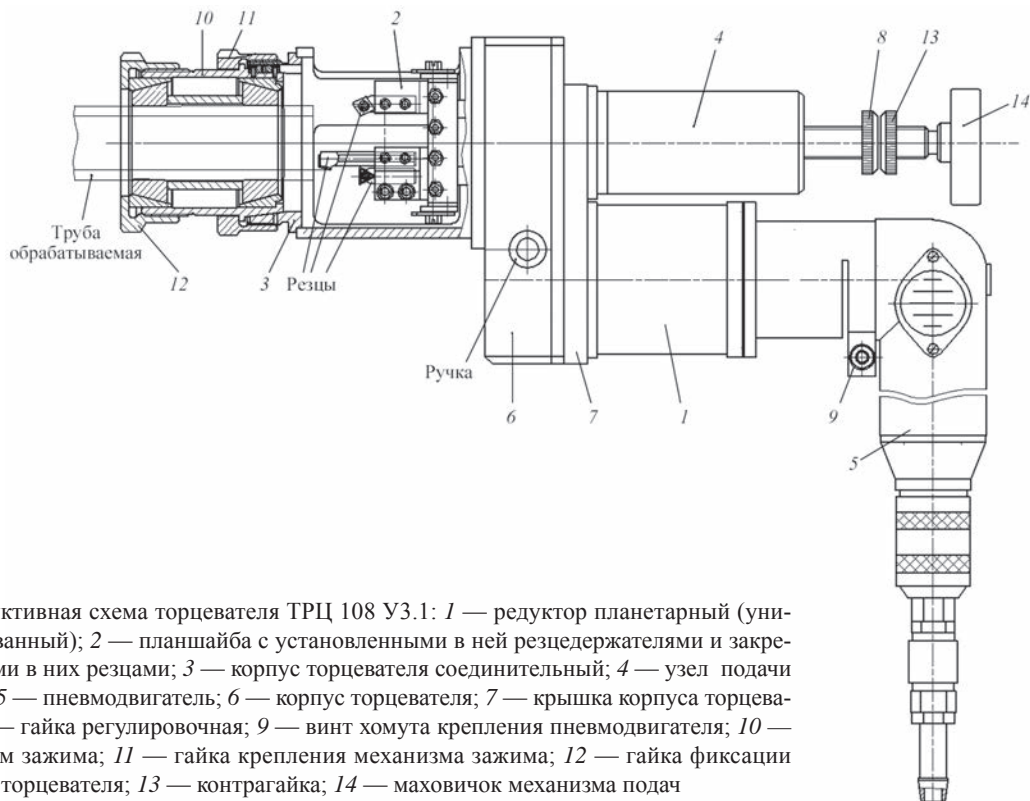
Конструктивная схема торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1, построенная с использованием технического решения, приведенного в [7], показана на рисунке.

**Выводы**

1. Разработан новый импортозамещающий торцеватель ТРЦ 108 УЗ.1 для подготовки к сварке неповоротных стыков трубопроводов диаметром от 76 до 108 мм энергоблоков АЭС и объектов других отраслей экономики Украины.

2. В результате разработки торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1 достигнуто:

– расширение технологических возможностей отечественного оборудования для подготовки к сварке деталей неповоротных стыков металлических трубопроводов и повышение производитель-



Конструктивная схема торцевателя ТРЦ 108 УЗ.1: 1 — редуктор планетарный (унифицированный); 2 — планшайба с установленными в ней резцедержателями и закрепленными в них резцами; 3 — корпус торцевателя соединительный; 4 — узел подачи резцов; 5 — пневмодвигатель; 6 — корпус торцевателя; 7 — крышка корпуса торцевателя; 8 — гайка регулировочная; 9 — винт хомута крепления пневмодвигателя; 10 — механизм зажима; 11 — гайка крепления механизма зажима; 12 — гайка фиксации головки торцевателя; 13 — контрагайка; 14 — маховичок механизма подач

ности процессов механической обработки торцов и кромок;

– повышение качества и точности подготовки к ручной или автоматической сварке этих торцов и кромок;

– упрощение и удешевление технического обслуживания торцевателей, снижение не менее чем в 1,5...2,0 раза себестоимости изготовления подобных изделий.

### Список литературы

1. Лобанов Л.М., Махлин Н.М., Смоляков В.К. и др. (2015) Оборудование для подготовки торцов труб применительно к сварке неповоротных стыков трубопроводов. *Автоматическая сварка*, **9**, 38–47.
2. Троицкий В.А. (2012) *Визуальный и измерительный контроль металлоконструкций и сооружений*. Киев, Феникс.
3. Махлін Н.М., Коротинський О.Є., Свириденко А.О. (2013) Апаратно-програмні комплекси для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів атомних електростанцій. *Наука та інновації*, **9**, **6**, 31–45.
4. Махлин Н.М., Коротинский А.Е., Богдановский В.А. и др. (2011) Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Автоматическая сварка*, **11**, 34–44.
5. Троицкий В.А. (2006) *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений*. Киев, Феникс.

6. Дальский А.М., Сулов А.Г., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. (редакторы) (2001) *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. Москва, Машиностроение.
7. Лобанов Л.М., Смоляков В.К., Водолазський В.Є., Махлін Н.М. (2015). *Портативний пристрій для обробки торців та крайок труб при їх підготованні до зварювання*, Україна, Пат. 102582.

### References

1. Lobanov, L.M., Makhlin, N.M., Smolyakov, V.K. et al. (2015) Equipment for preparation of pipe ends to welding of position butt joints of pipeline. *The Paton Welding J.*, **9**, 36–44.
2. Troitsky, V.A. (2012) *Visual and measuring testing of metal structures and constructions*. Kiev, Fenix [in Russian].
3. Makhlin, N.M., Korotynsky, O.E., Svyrydenko, A.O. (2013) Hardware-software complexes for automatic welding of position butt joints of nuclear power plant pipelines. *Nauka ta Innovatsii*, **9(6)**, 31–45 [in Ukrainian].
4. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2011) Single- and multioperator systems for automatic welding of position butt joints of nuclear power plant piping. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–36.
5. Troitsky, V.A. (2006) *Concise manual on testing of welded joint quality*. Kiev, Fenix [in Russian].
6. (2001) *Handbook of technologist-mechanical engineering*. Vol. 2. Ed. by A.M. Dalsky et al. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Lobanov, L.M., Smolyakov, V.K., Vodolazsky, V.E., Makhlin, N.M. (2015) *Portable device for treatment of ends and edges of pipes in their preparation for welding*. Pat. 102582, Ukraine [in Ukrainian].

## НОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ЗВАРЮВАННЯ НЕПОВОРОТНИХ СТИКІВ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, Н.М. Махлін<sup>2</sup>, В.Є. Водолазський<sup>2</sup>, В.Є. Попов<sup>2</sup>, Л.П. Муценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «НДЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

Дослідженнями та практикою встановлено, що якість зварних з'єднань трубопроводів, яка відповідає сучасним вимогам, в значній мірі залежить від якості обробки торців крайок оброблення їх стиків, що передє зварюванню, та від якості збірки деталей трубопроводів безпосередньо перед зварюванням. В роботі представлено результати експериментальних, дослідно-технологічних і дослідно-конструкторських робіт, проведених в НДЦ ЗКАЕ зі створення торцювача для металевих труб діаметром від 76 до 108 мм. Показано, що, в порівнянні з кращими закордонними аналогами, розроблений торцювач має ряд істотних технологічних та експлуатаційних переваг. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 1.

*Ключові слова:* атомна енергетика, неповоротні стики трубопроводів, механічна обробка, пневмопривід, торцювач, супорти, різці

## NEW EQUIPMENT FOR PREPARATION OF STATIONARY BUTTS OF NPP FOR WELDING

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, N.M. Makhlin<sup>2</sup>, V.E. Vodolazskiy<sup>2</sup>, V.E. Popov<sup>2</sup>, L.P. Mutsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 03150, 11 Kazimir Malevich Str., Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>SE «Scientific and Engineering Center of Welding and Control in the Field of Nuclear Energy of Ukraine of E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazimir Malevich str., 03150, Kiev, Ukraine. E-mail: electro@paton.kiev.ua

The carried out investigations and practice established that the quality of welded joints of pipelines, meeting the modern requirements largely depends on the quality of treatment of ends of groove edges of their butt joints prior to welding and on the quality of assembly of pipeline components directly before welding. The paper presents the results of experimental, technological and design works carried out at the Scientific and Engineering Center of Welding and Control in the Field of Nuclear Energy, on creating a facing tool for metal pipes of a diameter from 76 to 108 mm. It is shown that, in comparison with the best foreign analogues, the designed facing tool has a number of significant technological and operational advantages. 7 Ref., 2 Tabl., 1 Fig.

*Key words:* nuclear power engineering, stationary welded butts of pipelines, mechanical treatment, pneumatic drive, facing tools, rests, cutters

Поступила в редакцію 21.01.2019

## ЗИМНИЙ СЪЕЗД МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ

14–18 января 2019 г. в Институте сварки Франции (Вильпант, Париж) прошел ежегодный промежуточный зимний съезд Международного института сварки.

Традиционно зимой проходят собрания части рабочих групп и комиссий, входящих в Международную комиссию по аккредитации (IAB) и Совет по техническому менеджменту (ТМВ): группы А (Обучение и квалификация) и В (Аккредитация) IAB, комиссии С-XIV (Образование), С-V (Контроль и обеспечение качества в сварке), группы WG-RA (региональная деятельность) и WG-STAND (стандарты) и др. Также в ходе зимнего съезда проходят заседания совета директоров, редакционной коллегии журнала *Welding in the World* и совета аудиторов IAB.

В текущем году от Украины, помимо участия в работе групп и комиссий, было представлено 2 доклада.

Первый доклад был сделан на заседании комиссии С-XIV. Он был посвящен вопросам текущего состояния системы обучения и аттестации сварщиков, в том числе, стандартам и программам, утвержденным Министерством образования и науки Украины, гармонизированных с программами Международного института сварки. Следует отметить, что в данном вопросе Украина добилась существенного прогресса. Работы в этой области были отмечены, в частности, МОН Украины: в 2018 г. коллектив, в состав которого входят и сотрудники МУАЦ ИЭС им. Е.О. Патона, был удостоен Государственной премии в области образования.

Второй доклад был сделан на заседании группы WG-RA (региональная деятельность). Он был посвящен отчету о проведенной в начале декабря 2018 г. конференции «Welding and Related Technologies: Present and Future», посвященной 100-летию Национальной академии наук Украины. Конференция стала первым мероприятием, организованным в Украине в партнерстве с Международным институтом сварки, а специальным гостем конференции стала исполнительный директор Института д-р Сесиль Майер.

Конференция охватила множество актуальных тем, связанных со сваркой и родственными технологиями, а именно:

– технологии, материалы, оборудование;



Штаб-квартира МИС



Рабочий момент заседания

- сварные конструкции;
- неразрушающий контроль и техническая диагностика;
- оптимизация сварных конструкций, автоматизация проектирования, продление ресурса работы;
- инженерия поверхности;
- сварка в медицине, нанотехнологии и наноматериалы;
- экологические вопросы;
- спецэлектрометаллургия;
- стандартизация и сертификация;
- системы управления.

Участники группы SG-RA и лично д-р Майер отметили высокий уровень организации конференции и выразили пожелания в дальнейшем сотрудничестве в проведении подобных мероприятий.

Е.П. Чвертко