

Производственно-технический журнал

# СВАРЩИК

№ **5** 2017

В РОССИИ

технологии — производство — ремонт

TECHNOLOGY FOR THE WELDER'S WORLD

**10** Производство  
в России   
лет

MIG/MAG • TIG • Плазма • РОБО • Аксессуары



ООО «АБИКОР БИНЦЕЛЬ  
Сварочная Техника»

129343, г. Москва, ул. Уржумская, д. 4

Тел.: (495) 221-84-81, 221-84-82,

факс: (495) 510-64-70

E-mail: binzel-abicor@yandex.ru

[www.binzel-abicor.ru](http://www.binzel-abicor.ru)

[www.binzel-abicor.com](http://www.binzel-abicor.com)

ABICOR  
BINZEL®



5 (69) 2017

Журнал выходит 6 раз в год.

Издается с мая 2006 г.

Подписной индекс **20994**  
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**  
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103** в каталоге  
российской прессы «Почта России» —  
персональная подписка

Производственно-технический журнал

# СВАРЩИК

№ 5 2017

## В РОССИИ

### СОДЕРЖАНИЕ

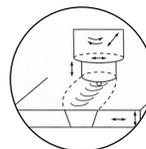
#### **Новости техники и технологий** ..... 4



#### **Технологии сварки трением**

Сварка металлов и сплавов трением. Технологические возможности сварки трением с перемешиванием.

*Г.И. Лащенко* ..... 6



#### **Технологии ремонтной сварки**

Явление термического удара при производстве массивных конструкций сложной формы.

*В.И. Панов* ..... 13



#### **Технологии и оборудование**

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционной термической обработки сварных соединений высокопрочных труб.

*А.А. Письменный, К.А. Письменный* ..... 18



Современные высокоэффективные многопостовые системы ручной и механизированной дуговой сварки.

*Н.М. Махлин, В.Ю. Буряк, В.Е. Водолазский, В.Е. Попов, Д.С. Олияненко, А.Е. Коротынский, М.И. Скопюк* ..... 24



#### **Дефекты в наплавленном металле**

Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними.

Полости. Включения.

*И.А. Рябцев, И.И. Рябцев, А.А. Бабинец, Э.В. Турык* ..... 33



#### **Выставки**

17-я Международная выставка Weldex 2017.

Новейшее сварочное оборудование от ведущих российских и зарубежных производителей. .... 38



**News of technique and technologies ..... 4**

**Technologies of friction welding**

Welding of metals and alloys by friction.

Technological features of the friction stir welding.

*G.I. Lashenko* ..... **6**

**Technologies of repair welding**

The phenomenon of thermal impact in the production of massive structures of complex shape.

*V.I. Panov* ..... **13**

**Technologies and equipment**

Modeling of electromagnetic and thermal processes in systems of induction heat treatment of welded joints of high-strength pipes.

*A.A. Pis'mennyi, K.A. Pis'mennyi* ..... **18**

Modern highly effective of multi-station systems manual and mechanized arc welding.

*N.M. Makhlin, V.Yu. Buryak, V.E. Vodolazsky,*

*V.E. Popov, D.S. Oliyanenko, A.E. Korotynsky,*

*M.I. Skopyuk* ..... **24**

**Defects in the weld metal**

Defects in the weld metal, their origin and measures to combat them. Cavities. Inclusions.

*I.A. Ryabtsev, I.I. Ryabtsev, A.A. Babinets, E.V. Turyk* ..... **33**

**Exhibitions**

17-th International exhibition Weldex 2017.

The newest welding equipment from leading Russian and foreign manufacturers. .... **38**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-24185 от 25.04.2006, выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

**Издатель** ООО «Центр трансфера технологий Института электросварки им. Е. О. Патона», ООО «Специальные сварочные технологии»

**Тел. моб.** +7 903 795 18 49

**E-mail** ctt94@mail.ru

**Главный редактор** В. Д. Позняков

**Зам. главного редактора** В. Г. Абрамишвили

**Редакторы** Р. С. Сухомуд  
О. А. Трофимец

**Верстка и дизайн** А. В. Рябов

За достоверность информации и содержание рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели. Мнение авторов статей не всегда совпадает с позицией редакции.

Рукописи не рецензируются и не возвращаются. Редакция оставляет за собой право редактировать и сокращать статьи. Переписка с читателями — только на страницах журнала.

При использовании материалов в любой форме ссылка на «Сварщик в России» обязательна.

Подписано в печать 09.11.2017. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура PetersburgС. Отпечатано в ЗАО «ТДДС-Столица-8». Заказ № П000010975 от 08.11.2017. Тираж 1000 экз.

Издание выходит при содействии производственно-технического журнала «Сварщик»

**Учредители** Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, ООО «Технопарк ИЭС им. Е.О. Патона»

**Издатель** НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ

**Главный редактор** В. Д. Позняков

**Зам. главного редактора** В. Г. Абрамишвили

**Редакционная коллегия** В. А. Белинский, Ю. К. Бондаренко, А. В. Вавилов, Ю. В. Демченко, В. М. Илюшенко, Г. И. Лашенко, О. Г. Левченко, В. М. Литвинов, Л. М. Лобанов, А. А. Мазур, В.И. Панов, П. П. Проценко, С. В. Пустовойт, И. А. Рябцев, А. А. Сливинский

**Адрес редакции** 03150, Киев, а/я 337

**Телефон** +380 44 200 53 61, 200 80 18

**Тел./факс** +380 44 200 80 14

**E-mail** welder.kiev@gmail.com  
trofimits.welder@gmail.com

**URL** <http://www.welder.stc-paton.com>

**Подписка-2017**

Подписной индекс **20994**  
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**  
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**  
в каталоге российской прессы  
«Почта России» — персональная подписка

**Сварка металлов и сплавов трением. Технологические возможности сварки трением с перемешиванием.**

*Г.И. Лащенко*

Показано, что благодаря отсутствию плавления металла сварка трением с перемешиванием (СТП) позволяет существенно улучшить свариваемость различных материалов (алюминиевых, магниевых, титановых, медных сплавов и сталей) по сравнению с дуговой сваркой и др. способами сварки плавлением. При этом улучшаются структура, механические свойства и ряд характеристик соединений. Основным препятствием для широкого использования СТП применительно к соединению высокопрочных сталей различных классов является недостаточная стойкость сварочного инструмента. Но и в этом направлении в последние годы наблюдается заметный прогресс. сегодня технология СТП эффективна во многих наукоемких областях: судостроение, аэрокосмическая промышленность, железнодорожный транспорт и метро, автомобильная, электротехническая и пищевая промышленности, строительная индустрия, ядерная энергетика.

**Явление термического удара при производстве массивных конструкций сложной формы.**

*В.И. Панов*

Приведены примеры отрицательного и положительного влияния термического удара при производстве металлических конструкций и деталей. Феноменологическая модель механизма образования трещин (разрушения) в основном металле массивных конструкций в течение их жизненного цикла предполагает вероятность образования трещин в течение производственного процесса и эксплуатации, она определяется концентраций напряжений возле дефекта основного металла в реальных условиях.

**Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционной термической обработки сварных соединений высокопрочных труб.**

*А.А. Письменный, К.А. Письменный*

Описано, что для обеспечения нормативных показателей по ударной вязкости для соединений труб из высокопрочных сталей, применяется послесварочная местная ускоренная термическая обработка сварного шва и околосшовной зоны, осуществляемая методом индукционного нагрева. Показано, что реализация численного метода конечных элементов для моделирования тепловых полей при индукционном нагреве через решение задачи распределения электромагнитных полей переменных токов, позволяет проектировать индукционные системы, обеспечивающие локализованный подвод тепловой мощности к обрабатываемому объекту и минимизацию термовлияний, приводящих к излишним разупрочнениям металла вне обрабатываемой зоны. Установлено, что практические результаты измерений температурных полей при индукционной термообработке сварных швов стыковых соединений труб подтверждают адекватность создаваемых моделей реальным условиям.

**Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними. Полости. Включения.**

*И.А. Рябцев, И.И. Рябцев, А.А. Бабинец, Э.В. Турык*

Проведен обзор дефектов сварки и наплавки в виде различных полостей, неметаллических и металлических включений. Дефекты классифицированы в соответствии с международным стандартом ISO 6520-1:2007 и его аналогом ГОСТ Р ИСО 6520-1:2012. Проанализированы основные причины образования этих дефектов и приведены методы борьбы с ними. Проведенный анализ показал, что при наплавке (сварке) с полостями и твердыми включениями можно успешно бороться, выполняя меры подготовки и контроля основного и наплавочных материалов, не допуская отклонений от технологии наплавки.



## Физики из России создали суперпрочные версии титана и стали

Физики из Костромы сумели существенно повысить прочность и износостойкость титановых и стальных деталей и конструкций, научившись насыщать их поверхность атомами бора, углерода и азота.

«Мы разрабатываем электролитно-плазменную модификацию стальных и титановых сплавов. Ее суть заключается в скоростном диффузионном насыщении поверхностного слоя детали азотом, углеродом и бором, что приводит к повышению их твердости, износостойкости и коррозионной стойкости», — рассказывает Павел Белкин (Костромской государственный университет).

Главной проблемой машин и прочих сооружений из металла и др. неприродных материалов является постепенное разрушение несущих конструкций и движущихся деталей, требующее ремонта. Сегодня Китай, США и многие др. промышленно развитые страны мира тратят по 3–5% своего ВВП на борьбу с коррозией и износом.

П. Белкин с коллегами создали новый способ защиты сплавов и металлических деталей от износа и коррозии, разработав методику их обработки плазмой, состоящей из азота, бора и углерода. Попадание этих элементов в приповерхностные слои металла заметно повышает его стойкость к агрессивным химическим веществам и увеличивает прочность.



Такие суперсплавы создаются следующим образом — металл опускают в раствор электролита, содержащий в себе углерод, бор или азот и пропускают через него серию электрических импульсов высокой мощности. В результате этого на границе между деталью и жидкостью возникает облачко из плазмы, которое проникает в верхние слои металла и меняет его свойства.

Российские ученые заметно улучшили эффективность ранее известной обработки и приспособили ее для работы с плазмой, что позволило увеличить износостойкость металла из различных марок стали в 3–10 раз, улучшить др. свойства, провести аналогичные операции на протезах из титана и др. металлических изделиях.

[www.rus.vrw.ru](http://www.rus.vrw.ru)

● # 1047

## Балтийская Промышленная Компания открыла в Санкт-Петербурге научно-производственный комплекс

В г. Санкт-Петербург открылся новый научно-производственный комплекс БПК-СЕВЕР (производство российских металлорежущих станков под торговой маркой F.O.R.T.)

На территории предприятия общей площадью более 22 000 м<sup>2</sup> разместились инновационный центр, цех по производству металлообрабатывающих станков с ЧПУ, административный блок, новое конструкторское бюро С.-Петербургского Политехнического университета Петра Великого.

Научно-производственный комплекс возведен в рамках проекта «Станкостроение» для разработки и производства металлообрабатывающего оборудования на территории Российской Федерации.

На сегодняшний день на территории России производится литье и обработка станин, изготовление базовых деталей к ряду станков, изготовление механических частей и кабинетных защит для модельного ряда станков «F.O.R.T.»

Основная и главная цель проекта «Станкостроение» — полный цикл производства оборудования для металлообработки на территории России с использованием отечественных разработок.



ЗАО «Балтийская Промышленная Компания» работает в отрасли станкостроения более 15 лет. Профессиональная деятельность компании началась с капитального ремонта и модернизации уникальных тяжелых станков. С 2014 г. предприятие, в партнерстве с предприятиями Госкорпорации «Росатом», С.-Петербургским Политехническим Университетом Петра Великого, реализует проект «Станкостроение».

Конструкторское бюро предприятия выполняет исследовательские и опытно-конструкторские программы в области машиностроения и материаловедения. Получены патенты на уникальные гибридные аддитивные установки.

[www.rus.vrw.ru](http://www.rus.vrw.ru)

● # 1048

## Производство Ту-160М2: есть первая «боевая» сварка!

Темпы строительства самолетов Ту-160 новой модификации М2 существенно сокращены. Для производства первых модифицированных самолетов используется находящийся на консервации на Казанском авиазаводе задел агрегатов и деталей советского производства: три готовых средних части фюзеляжа с центропланами. Однако этого задела не хватит на всю программу, успех которой в целом зависит от восстановления полной технологической цепи, в т.ч. и таких критических элементов, как сварка главного лонжерона центроплана.

Лонжерон — основной силовой элемент самолета. Он представляет собой коробчатую балку переменного сечения длиной 12,4 и шириной 2,1 м, а максимальная высота соответствует сечению фюзеляжа в этом месте. На каждом ее конце установлен шарнир поворота консолей и т.о. балка принимает большую часть нагрузки от подъемной силы крыла в целом. К ней крепятся также основные стойки шасси и силовые конструкции, несущие узлы крепления двигателей.

В полете весь самолет буквально висит на главном лонжероне центроплана. Сила, которая стремится изогнуть эту балку, может превышать 550 т, а изгибающий момент — 4 000 т на метр! Чтобы балка могла выдержать такую нагрузку и при этом оставалась максимально легкой, ее выполнили из высокопрочного титанового сплава. 12-метровые монолитные детали свариваются электронно-лучевой сваркой в среде практически космического вакуума. Малейшее нарушение условий сварки приводит к тому, что в швы попадает имеющийся в воздухе водород, от чего резко падает прочность соединения. Установка для сварки главного лонжерона Ту-160



делалась по спецзаказу именно под производство данного самолета и не имела аналогов в советской промышленности. И сегодня в мире подобных сварочных вакуумных камер насчитывается буквально несколько штук.

Когда в 1994 г. серийный выпуск Ту-160 был остановлен, прекратилась и эксплуатация этого оборудования. Для выпуска самолетов в 2000 и 2008 гг. использовали балки старого изготовления. Естественно, после длительного простоя сварочный комплекс пришлось тщательно проверять и восстанавливать. Еще более сложной оказалась ситуация с кадрами — специалисты, работавшие на этом участке, были столь же уникальны, как и их «инструмент». И вот 8 июня 2017 г., после серии контрольных сварок, они впервые выдали промышленную продукцию.

Присутствовавший в ходе первой «боевой» сварки главного лонжерона центроплана Ту-160М2 на Казанском АПО им. Горбунова заместитель министра обороны России Юрий Борисов заявил: «Сегодня знаменательный для завода день — осуществляется первая промышленная или «боевая» сварка лонжерона для первого серийного самолета. Будем ждать результатов — комиссия проверит качество всех швов, доложит нам. Все предварительные сварки показывали, что технология восстановлена».

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

● # 1049

## В Калуге наладили производство турбин для отечественных ТЭС

Калужский турбинный завод (КТЗ), входящий в состав энергомашиностроительной компании «Силовые машины», наладил производство профильной продукции для отечественных теплоэлектростанций. Две турбины, мощность каждой из которых составляет 38 МВт, были изготовлены, испытаны и отгружены сотрудниками КТЗ.

В данном случае речь идет о турбинах, предназначенных для производства электроэнергии в составе блока парогазовой установки на Прегольской ТЭС в Калининграде.

Между тем договор о поставке оборудования на территорию Прегольской теплоэлектростанции был заключен с ООО «Калининградская генерация» еще в 2016 г.

Первая турбина для выработки электроэнергии достигла пункта назначения в августе, вторая — в сентябре 2017 г. На Калужском турбинном заводе продолжается работа по изготовлению остальных

машин. В данный момент сотрудники КЭТ собирают третью турбину, а для четвертой — изготовлены основные узлы.

Поставки оборудования осуществляются в ходе реализации проекта строительства парогазовой станции в Калининградской области. Объект состоит из четырех парогазовых энергетических блоков мощностью 110 МВт каждый. После ввода в эксплуатацию всех блоков мощность станции в общей сложности составит 456 МВт.

Калужский турбинный завод является крупнейшим на территории России и СНГ производственным объектом, чья деятельность направлена на разработку и изготовление паровых турбин, турбоприводов и блочных турбогенераторов для отечественных ТЭС и др. энергетических объектов.

[www.rus.vrw.ru](http://www.rus.vrw.ru)

● # 1050

# Сварка металлов и сплавов трением. Технологические возможности сварки трением с перемешиванием\*

Г.И. Лашенко, канд. техн. наук, НТК «ИЭС им. Е.О. Патона» НАНУ (Киев)

*Сварка трением с перемешиванием (СТП) нерасходуемым инструментом развивается и совершенствуется более 25 лет. За это время непрерывно совершенствовался инструмент, были предложены различные способы и приемы сварки, расширилась номенклатура свариваемых материалов и увеличились объемы промышленного применения технологии СТП.*

**Способы и приемы сварки.** С целью интенсификации процесса СТП и предупреждения образования дефектов, предложены различные его способы и технологические приемы.

Представляют интерес предложения воздействовать механическими колебаниями сварочного инструмента на массу разогретого до пластичного состояния материала (Патент Германии 19953260) или силой пульсации посредством инструмента специальной формы (Патент РФ 2277465). В первом случае необходимы сложные исполнительные механизмы и повышенная прочность, особенно усталостная, инструмента (рис. 24). Во втором случае пульсация создается за счет небольшого угла отклонения опорного бурта от оси вращения инструмента.

Предлагается также введение в зону соединения дополнительной тепловой энергии для сварки деталей с большой толщиной соединяемых кромок или из материалов с повышенной температурой перехода в пластическое состояние. В качестве источников дополнительного нагрева предлагаются лазерный луч (Патент WO 02/074479, Европейский

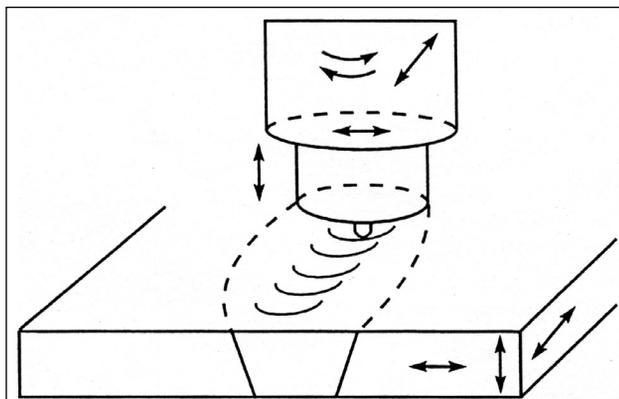


Рис. 24. Направления принудительных колебаний инструмента при СТП

\* Продолжение публикации серии статей «Сварка металлов и сплавов трением». Начало в № 1, 2, 3, 4 – 2017.

патент 01/08345), высокочастотный индуктор (Патент Норвегии 99/000421), активное сопротивление (Европейский патент 7716/956, Патент Швеции 98/00613).

Нагрев дает возможность увеличить скорость сварки и уменьшить частоту вращения инструмента, что снижает вероятность перегрева и оплавления металла под опорным буртом. Посредством предварительного подогрева, в частности плазменного, можно также влиять на структуру и прочностные характеристики соединения [27].

Предложен способ сварки трением с перемешиванием (СТП) с одновременным использованием двух и более инструментов (технология Twin-Stir™, Европейский патент 0615480), применяемый в нескольких вариантах технологических схем (рис. 25). Сварка при параллельном перемещении двух инструментов Twin-Stir™; при перемещении друг за другом по линии стыка Tandem Twin-Stir™ или инструментов со смещением относительно друг друга как в поперечном, так и в продольном направлениях Staggered Twin-Stir™.

При сварке с параллельно расположенными инструментами (рис. 25, а) можно повысить скорость сварки при меньшей скорости вращения инструмента, уменьшить асимметрию швов, уменьшить перемещения и крутящий момент на инструменте. При сварке с перемещением инструментов друг за другом (рис. 25, б) происходит дополнительный нагрев первым инструментом, что облегчает работу второго и позволяет увеличить толщину соединяемых деталей, а также измельчить структуру и остаточные оксиды в шве.

При сварке с поперечным смещением двух инструментов относительно друг друга шов первого инструмента частично перекрывают швом второго (рис. 25, в), что позволяет формировать нахлесточное соединение шириной до 4,3 толщины верхнего свариваемого листа. В зоне перекрытия двух швов дополнительно разрушаются остаточные оксиды и измельчается структура. Эффект достигается при встречном вращении инструментов.

Разработана технологическая оснастка сварки Re-Stir™, с помощью которой осуществляется циклическое возвратно-вращательное движение инструмента. Это решает проблему асимметрии швов, присущую традиционной СТП.

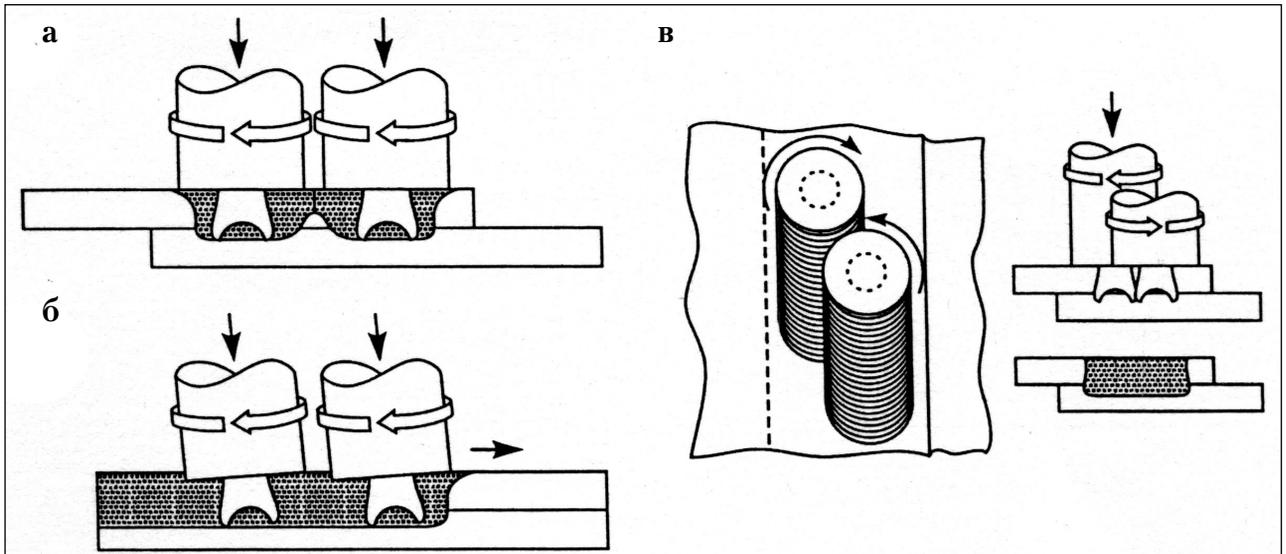


Рис. 25. Варианты технологических схем Twin-Stir™ при перемещении инструмента по стыку: а – параллельном Twin-Stir™; б – последовательном (Tandem Twin-Stir™); в – со смещением (Staggered Twin-Stir™)

Разработан способ СТП разнородных материалов (рис. 26). Согласно этому способу оптимальным является положение инструмента, при котором стержень погружен в менее прочный материал (алюминиевый сплав) и немного углублен (на 0,2 мм) в более прочный материал (сталь).

В последнее время увеличился интерес к СТП точечных соединений. Этот процесс может быть использован и для устранения «кратера» шва, образующегося после подъема инструмента, и др. дефектов. Точечную СТП используют для соединения как стальных, так и алюминиевых заготовок.

Точечные швы выполняют по двум технологическим схемам. Первая предусматривает погруже-

ние вращающегося инструмента в деталь, с доведением до пластического состояния и перемешиванием металла под буртом. После этого инструмент вынимают, оставляя в детали характерное углубление (PFSW). По второй схеме выполняют точечную сварку с заполнением шва (RFSW). В этом случае используют инструмент, у которого бурт и накопчик имеют отдельные системы привода. Вращающийся инструмент опускают в деталь, накопчик выдавливает и перемешивает находящийся под ним металл, а затем его вынимают и металл под буртом заполняет углубление, образуя шов.

**Качество швов и свойства сварных соединений.**

Установлено, что основным специфическим дефектом соединений, выполненных СТП, является несплавление. Основными причинами возникновения этого дефекта являются локальное увеличение толщины свариваемого металла либо нарушение переноса металла в корневую часть соединения.

Улучшения перемешивания металла в корневой части соединения можно достичь путем выполнения скоса кромок с обратной стороны пластин (рис. 27, а), которое улучшает заполнение этой области при течении металла в пластическом состоянии. Устранению дефектов шва способствует и применение подкладок с канавкой (рис. 27, б), в которую выдавливается металл, формируя небольшой валик. Затем его удаляют механической обработкой, обеспечивая высокое качество корневой части соединения.

Как отмечалось выше, одним из недостатков соединений, выполненных СТП, является незначительное утончение металла в области соединения из-за контакта заплечика инструмента и поверхности заготовки. Обычно эта величина равна 0,1–0,2 мм, однако в некоторых случаях это может оказать влияние на прочность соединений. Для устранения такого недостатка рекомендуют создавать в месте стыка

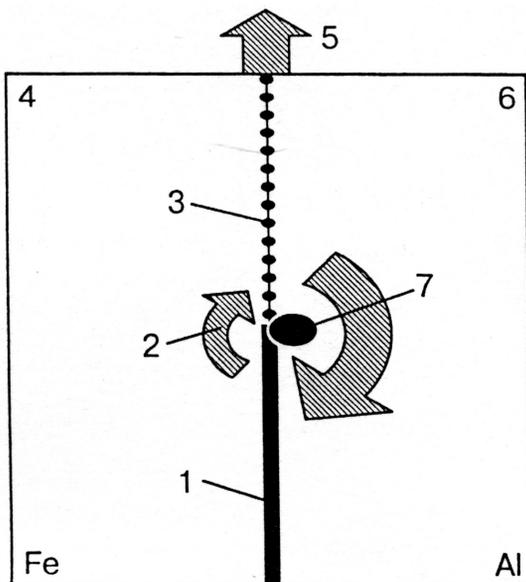


Рис. 26. Технологическая схема СТП алюминиевого сплава со сталью: 1 – активируемая зона; 2 – направление вращения; 3 – неактивированная зона; 4, 6 – сторона сложения и разности векторов скоростей сварки и вращения инструмента; 5 – направление сварки; 7 – инструмент

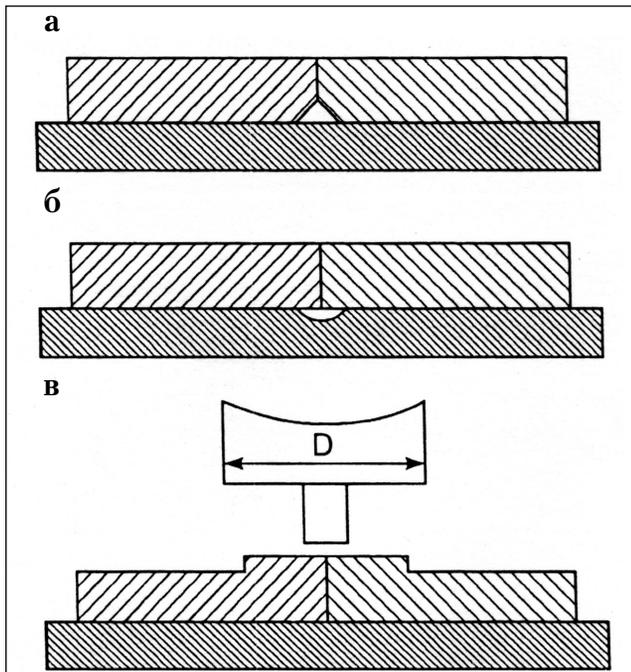


Рис. 27. Подготовка свариваемых кромок: а – со скосом в корневой части; б – выполнение канавки в подкладке; в – создание местного утолщения в зоне сварки

утолщение (рис. 27, в), равное по ширине диаметру заплечика.

При правильно выбранных режимах СТП, как правило, отсутствуют дефекты, превышающие допустимый нормативными документами критический размер.

**Процессы обработки, родственные СТП.** При СТП в случае нарушения режимов в швах могут возникать специфические «туннельные» дефекты, т.е. продольные каналы. Это явление было использовано для получения в монолитных металлических деталях прямолинейных и криволинейных каналов, в т.ч. имеющих большую длину.

Технология получения каналов подобна технологии СТП. Наконечник инструмента погружают в материал детали в зоне расположения изготавливаемого внутреннего канала и перемещают вдоль его тра-

ектории. В зоне обработки создают давление, обеспечивающее течение пластифицированного металла до разрыва его сплошности и получения внутренней полости, образующей упомянутый канал, который имеет преимущественно форму прямоугольника. При этом давление инструмента на пластифицированный металл равно 0,3–0,7 от величины давления в случае образования сварного шва.

В процессе СТП существенную роль играют термомеханические эффекты, приводящие к уплотнению и измельчению структуры металла. В зарубежной литературе такую обработку называют модифицированием. Технологию модифицирования используют для улучшения структуры и свойств медных и алюминиевых сплавов, в т.ч. и кромок заготовок под последующую сварку плавлением.

**Номенклатура свариваемых материалов.**

С помощью СТП нерасходуемым инструментом можно получать стыковые, тавровые и нахлесточные соединения (рис. 28).

На первых этапах развития СТП основное внимание разработчиков было сосредоточено на проблеме сварки алюминиевых и магниевых сплавов различных марок, обладающих сравнительно низкой температурой плавления и пластификации. Последнее обстоятельство позволило использовать в качестве материала сварочного инструмента сравнительно дешевые и доступные инструментальные стали. Однако применение таких рабочих инструментов для соединения большинства марок сталей, никелевых, титановых и др. сплавов, которые используют в современных и перспективных изделиях, практически невозможно. В табл. 3 обобщены сведения по основным материалам инструментов, применяемых для соединений конструкционных материалов различных составов и толщин [22]. В большинстве случаев речь идет о соединении материалов малых и средних толщин.

Наиболее широко особенности СТП изучены применительно к соединениям алюминиевых сплавов. Показано, что тепловложение при СТП меньше, чем при аргонодуговой сварке примерно в 2 раза и для алюминиевого сплава 6N01-T5 толщиной 4 мм

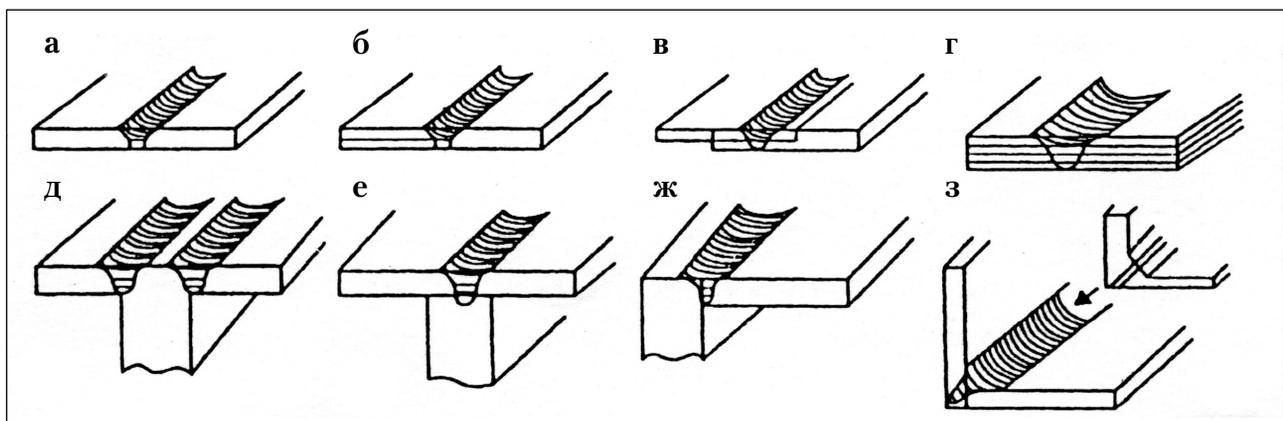


Рис. 28. Типы выполняемых СТП соединений: а – стыковое; б – нахлесточно-стыковое; в – нахлесточное; г – многослойное нахлесточное; д – двухпроходное тавровое; е – тавровое прорезное; ж, з – угловое

Таблица 3. Номенклатура соединяемых СТП материалов

Соединяемые материалы	Марка	Толщина, мм	Материал инструмента
Al	6061-T6 6111-T4 6082-T6 5754	9,5; 12,7 0,9 1,5 1,3	Сталь H13
	7075-T7351	6,3; 16	MP-159; MP-159/H13 (стержень/бурт)
	7020-T6	1,5; 4	Углеродистая сталь
	A-319; A413	6	Инструментальная сталь
Mg	AZ31Mg AZ31B-H24	1,5 2	Сталь H13
	AZ31B	6	Быстрорежущая и углеродистая сталь
Ti	Ti	3 2 5,6	pcBN; WC/W (стержень/бурт) WC-Co TiC, спеченый
	Ti-6Al-4V	3-12 2	W-La W-wt-% Re
	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-5111 плита	3 12,7	Сплав Mo Сплав W
Fe	Fe-1,02C-0,24Si-0,37Mn-1,4Cr Аустенитная сталь 270 SAF 2507 Duplex 5S Углеродистая сталь DP-780 Ферритная сталь 430, 329J4L Duplex, 304, 316L, 310 Сталь легированная бором	2,3 6 4 1,5 6 1,4	pcBN
	304L-SS	3,2	Сплав W
	15-5PH DP 600	2,6 1,2	W-25%Re
	Низкоуглеродистая сталь	0,6	WC-13%Co; WC-13%Co + 6% Ni, 1,5% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> WC Сплавы Mo и W Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> с покрытием (TiC, TiN) и без него
	Углеродистая сталь AlSi 1018 DP 590	1,6 6,3 1,2	
Разнородные	AA6061-T651+ сталь SS400 AA6061-T6 + Cu AA2024-T3 + Ti-6Al-4V	6 1,5 2	AlSi 4140 Сталь H13 Инструментальная сталь WC с покрытием AlCrN
	AA1050 + сталь 22MnB5	1,8	
	Az31 + углеродистая сталь Az31 + AA5083 Az31B, Az61A, Az91D + Ti	0,8 1,2 2	Инструментальная сталь SKD61
	Ti + сталь 304L	4	WC
Металломатричные композитные	AA6061 + 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al359 + 20% SiC	3-6 4	AlSi – закаленная инструментальная сталь, 62 HRC
	AA6061 + (3-7)% TiC Al-10wt-% TiB <sub>2</sub>	3-6 6	Углеродистая сталь, легированная Cr
	Al-15wt-% Mg <sub>2</sub> Si	6	Сталь H13

составляет 190 и 390 Дж/мм соответственно (скорость сварки 500 мм/мин) [15].

Анализ данных усталостных испытаний соединений алюминиевых сплавов показал, что их работоспособность во многих случаях выше, чем у соединений полученных сваркой плавлением, и при этом меньше разброс значений [15]. Результаты испытаний на усталостную прочность однопроходных сварных соединений листов толщиной 6 мм сплавов 5083-0 и 2014Т6 (рис. 29) были выше и с меньшим разбросом значений, чем у двухпроходных соединений, выполненных ТИГ или МИГ способами сварки, которые регламентированы нормами BS8118 класс 35 и Европейскими рекомендациями В3 для соединений, выполненных сваркой плавлением. Показатели усталостной прочности соединений сплавов 6082Т5 и 6005Т4, выполненных СТП, при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 1$ , близки к показателям усталостной прочности основного металла и значительно выше, чем у соединений, выполненных др. способами сварки, в частности МИГ и плазменной сваркой со сквозным проплавлением.

В работе [28] определяли оптимальные параметры режимов одно- и двухпроходной СТП стыковых соединений листов сплава 15651М толщиной 7 мм. Установлено, что при двухпроходной СТП средняя прочность соединений составляет 355 МПа и превосходит значения для однопроходной сварки (334 МПа). Металл шва в обоих случаях существенно превосходит прочность соединения. Предел выносливости соединения при двухпроходной СТП составляет 135 МПа, а при однопроходной СТП – 115 МПа. Причина снижения выносливости соединений, выполненных однопроходной СТП, кроется в наличии оксидных включений, сконцентрированных в корневой части соединений.

Анализ сварных образцов алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1460 толщиной 1,8–2,5 мм показал, что соединения, выполненные СТП, отличаются высоким уровнем механических свойств (коэффициент

прочности сварных соединений составляет 0,7–0,9 уровня прочности основного металла) [29].

В работе [30] определяли стойкость швов против зарождения и распространения трещин при растяжении образцов низколегированных и высокопрочных сложнелегированных алюминиевых сплавов с концентратором, полученных СТП и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. При этом швы, полученные СТП имели заметно более высокую стойкость к зарождению и распространению трещин.

СТП позволяет сваривать практически все деформируемые и литейные алюминиевые сплавы как в одноименном, так и в разноименном сочетаниях, многие композитные и разноименные материалы, обеспечивая высокое качество швов и необходимые свойства сварных соединений. Поэтому такой способ сварки можно применять для соединения трудносвариваемых, а иногда и не свариваемых способами плавления сочетаний алюминиевых сплавов. Например, при сварке плавлением сплавов 1201 и АМг6 в некоторых зонах шва образуется композиция легирования с таким соотношением содержания меди и магния (и примесей др. химических элементов), при котором в процессе кристаллизации металла шва по границам кристаллитов образуются эвтектики. Они содержат  $CuAl_2$  с низкой температурой затвердевания (549 °С) и, локализуя термомеханическую сварочную деформацию, служат очагом кристаллизационного растрескивания. Поскольку при СТП нагревания зоны соединения до температуры солидуса не происходит, то кристаллизационные трещины в шве не образуются. Прочность такого соединения находится на уровне 0,75 от прочности сплава АМг6.

Как видно из рис. 30 [29], качество соединений, выполненных СТП, лучше по сравнению с качествами соединений, выполненных аргонодуговой и лазерной сваркой.

При СТП алюминий-литиевых высокопрочных сплавов 1420, 1460 и др. образуются ультрадисперсные структуры, способствующие повышению твердости, но одновременно происходит частичное выделение из пересыщенного твердого раствора избыточных фаз, что приводит к некоторому снижению твердости соединения [31]. Однако степень разупрочнения металла при СТП упомянутых сплавов намного меньше, чем при сварке плавлением. Поэтому предел прочности соединений этих сплавов, выполненных СТП, выше соединений без усиления шва, полученных при дуговой сварке неплавящимся электродом в аргоне. В то же время максимальный уровень остаточных напряжений в соединениях сплава 1420, полученных СТП, на 35% ниже, чем при дуговой сварке.

Установлено также, что характеристики сопротивления усталости стыковых соединений сплавов 1420 и 1460 в случае сварки трением, превышают соответствующие показатели варианта дуговой свар-

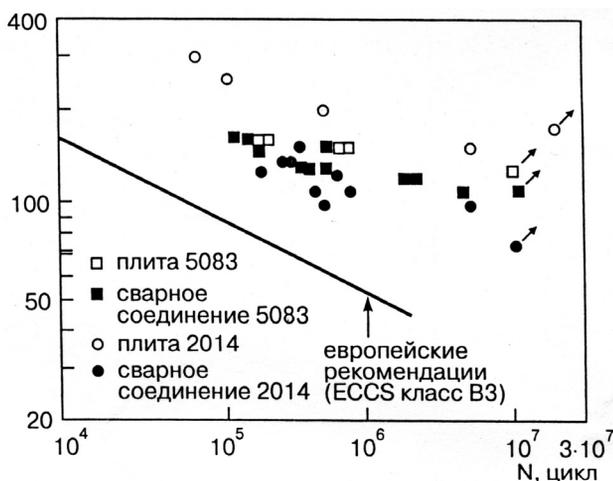


Рис. 29. Усталостная прочность стыковых СТП соединений сплавов 5083-0 и 2014 Т6

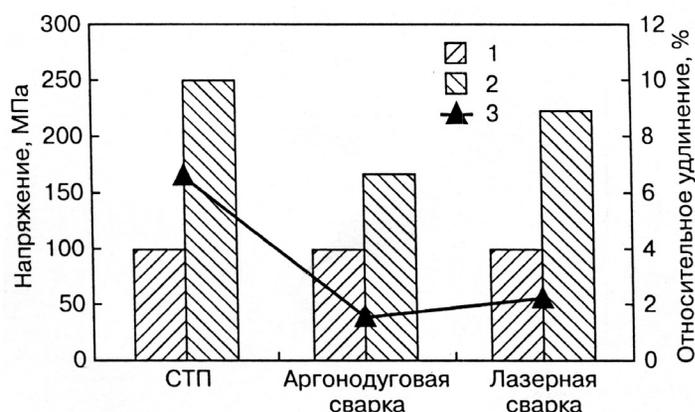


Рис. 30. Механические свойства сварного соединения, выполненного различными способами сварки: 1 – предел текучести; 2 – предел прочности; 3 – относительное удлинение

ки. Значения предельных размахов напряжений на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений для соединений, выполненных СТП, только на 10–12% ниже показателей основного металла.

Следует обратить внимание на то, что повторные проходы СТП, применяемые для устранения дефектов, снижают прочностные характеристики сварного соединения высокопрочностных алюминиево-литиевых сплавов на 10–15% и пластичность в 2–3 раза [32]. Применение в качестве ремонтного варианта ручной аргоно-дуговой сварки приводит к значительному снижению механических свойств. Авторы отмечают, что основными дефектами при СТП алюминиевых сплавов являются непровары, связанные с недостаточным перемешиванием металла особенно в корневой части соединений, и рыхлости, возникающие при перегреве свариваемого металла.

Исправление дефектов СТП с использованием ручной аргоно-дуговой сварки приводит к значительному порообразованию и хрупкому, межзеренному разрушению, связанному с выделением большого количества интерметаллидных частиц по границам зерен.

Опыты по СТП литых заготовок из термически неупрочняемых сплавов системы Al-Mg-Sc показали, что в этом случае качество и уровень прочности соединения не ниже основного металла. В результате пластичной деформации происходит формирование наноструктуры и достигается высокий для сплавов системы Al-Mg-Sc уровень твердости – HB = 1900 МПа [33].

В настоящее время имеются все основания утверждать, что СТП позволяет соединять все деформируемые и литейные алюминиевые сплавы как в одноименном, так и в разноименном сочетаниях, многие композитные и разноименные материалы, обеспечивая высокое качество швов и необходимые свойства сварных соединений. Такой способ сварки можно применять для соединения трудносвариваемых, а иногда и не свариваемых способами плавления сочетаний алюминиевых сплавов.

В последние годы заметно расширился интерес к применению в промышленности магниевых сплавов. Обладая уникальными весовыми характеристиками, магниевые сплавы постоянно находятся в поле зрения разработчиков авиационной и космической техники, автомобилестроения и изделий др. отраслей промышленности. Учитывая повышенную возгораемость магния, для соединения магниевых сплавов предпочтительна сварка давлением.

Ряд исследователей выделяют особенности СТП магниевых сплавов: диапазон параметров режима сварки уже, чем у алюминиевых сплавов; сплавы серии АМ имеют тенденцию повышенного налипания на инструмент с ухудшением качества поверхности шва и др.

В [34] рекомендуют область оптимальных режимов сварки магниевого сплава AZ91 толщиной 2 мм, обеспечивающих получение соединения прочностью 330–360 МПа, что превышает прочность основного материала.

Получены положительные результаты и по СТП титановых сплавов различного назначения. Этот способ считается наиболее перспективным для соединения упомянутых материалов [35]. Но особый интерес у разработчиков и исследователей вызывает СТП различных марок сталей [36].

Основным «тормозом» для СТП сталей, особенно средних толщин, является низкая стойкость сварочного инструмента.

Благодаря использованию СТП удается успешно соединять различные комбинации разнородных материалов. В [37] сообщается о СТП нахлесточных соединений из высокопрочного чугуна FCD450 с коррозионностойкой сталью 304, причем сталь расположена сверху.

В ряде работ перспективными считаются исследования по СТП разнородных материалов: сталь + алюминий, медь + алюминий, сталь + титан и др.

Авторы [38] рассматривали различные варианты оксиднодисперсно-упрочненных сталей для современных ядерных реакторов с учетом высокотемпературной прочности, коррозионной стойкости и стойкости к радиационным разрушениям. Они пришли к выводу, что преимущественным способом соединения этих сталей является СТП.

**Промышленное применение.** Преимущества СТП по сравнению с другими способами сварки обуславливают все возрастающие объемы ее применения в различных отраслях промышленности, в первую очередь для соединения алюминиевых сплавов толщиной от 0,2 до 75 мм за один проход. Интенсивная работа зарубежных ученых и специалистов, направленная на совершенствование технологии и установок, позволила использовать этот способ сварки в ряде наукоемких отраслей промышленности: авиакосмической, транспортной, судостроительной, автомобильной, электротехнической и др. (табл. 4).

Таблица 4. Области применения СТП алюминия и алюминиевых сплавов

Область применения	Характеристика изделия	Фирма-производитель
Авиакосмическая техника	Топливные баки ракет семейства «Delta»: диаметр от 2 до 6 м; длина швов 15 м; сплав 2014Т6	Boeing (США)
	Внешний бак ракеты «Shuttle»: восемь продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и четыре продольных шва на резервуаре для жидкого кислорода	NASA (США)
	Элементы крыльев нового поколения самолетов Airbus	British Aerospace (Великобритания)
Подвижной состав	Укрупнение прессованных панелей: заготовки толщиной 1,6–15 мм при максимальных размерах 16х6 м	Marin Aluminium (Норвегия)
	Железнодорожные вагоны	Hitachi (Япония)
Автомобилестроение	Рама двигателя, кузов, двери, автомобильные цистерны	AOS/APS (Швеция), Automotive (США), Mazda Motor Corp. (Япония)

Благодаря использованию СТП решают задачи повышения качества сварных конструкций, производительности и улучшения условий труда.

В настоящее время основными областями применения СТП являются:

- судостроение (палубные надстройки, переборки, элементы корпуса);
- аэрокосмическая промышленность (элементы фюзеляжа, крыльев, топливные и баки для криогенных жидкостей, корпуса ракет);
- железнодорожный транспорт и метро (корпуса вагонов, рамы и основания поездов метро);
- автомобильная промышленность (узлы крепления двигателя, диски колес, рамы автомобилей);
- электротехническая промышленность (корпуса электромоторов, токоподводы, параболические антенны, шины);
- строительная индустрия (алюминиевые мосты и трубопроводы, теплообменники и кондиционеры);
- пищевая промышленность (емкости для пива, упаковка);
- ядерная энергетика (сварка медных контейнеров для ядерных отходов);
- добыча нефти и газа (сварка и модифицирование стальных буровых труб).

В случае разработки удачных решений по конструкции и материалу инструмента для СТП сталей различного класса, особенно высокопрочных с особыми свойствами, можно ожидать существенной активизации технологических работ на этом направлении.

Литература

27. Yaduwanshi D.K., Bag S., Pal S. Effect of Preheating in Hybrid Friction Stir welding of Aluminum Alloy // J. Mater. Eng. and Perform.— 2014.— № 10.— S. 3794–3803.

28. Овчинников В.В., Малов Д.В., Дриц А.М. Двухпроходная сварка трением с перемешиванием стыковых соединений листов сплава 15652М // Научные технологии в машиностроении.— 2014.— № 6.— С. 7–13.

29. Покляцкий А.Г., Гринюк А.А., Подъяльников А.Г. Сварка трением с перемешиванием тонколистовых материалов // Сварщик.— 2007.— № 5 — С. 11–13.

30. Покляцкий А.Г. Стойкость швов тонколистовых алюминиевых сплавов против зарождения и распространения эксплуатационных трещин // Автомат. сварка.— 2011.— № 9.— С. 7–11.

31. Покляцкий А.Г., Кныш В.В., Клочков И.Н. и др. Особенности и преимущества процесса сварки трением с перемешиванием стыковых соединений тонколистовых алюминий-литиевых сплавов // Автомат. сварка.— 2016.— № 5–6.— С. 93–98.

32. Лукин В.И., Иода Е.Н., Безескин А.В. и др. Сварка трением с перемешиванием высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Сварочное пр-во.— 2012.— № 4.— С. 45–48.

33. Предко П.Ю. Микро- и наноструктура соединений при аргонодуговой и СТП сплавов системы Al-Mg-Sc // 8 Рос. ежегод. конф. мол. науч. сотrud. и аспиr. «Физико-химия и технология неорганических материалов», М., 15–18.11.2011; Сборник материалов.— М.: 2011.— С. 95–96.

34. Nakata K., Jnoki S., Nagano Y. et all. Friction stir welding of AZ 91D thixomlded sheet // 3rd International Friction Stir Welding Symposium. 2001. Kobe, Japan.

35. Винокуров Н.В. Проблемы сварки титановых сплавов и современные способы их решения // Науч. диск.: вопросы технических наук: Матер. Междунар. заочной научно-практич. конфер., М., 12 ноября 2012.— С. 45–51.

36. Hidetoshi F. Friction stir welding of steels // Weld. Int.— 2011.— № 4.— P. 260–273.

37. Sawada Yu-ki, Naka Mitsuru. Lapped friction stir welding between ductile cast irons stainless steels // Weld. Int.— 2013.— № 2.— S. 121–128.

38. Baker B. W., Brewer L. N. Joining of Oxide Dispersion Strengthened Steels for Advanced Reactors // Metals and Mater. Soc.— 2013.— № 12.— S. 2442–2457.

# Явление термического удара при производстве массивных конструкций сложной формы

В.И. Панов, д-р техн. наук, ПАО «Уралмашзавод» (Екатеринбург)

*В зависимости от воздействия на металлическую конструкцию ее разрушение (образование трещин) может происходить под воздействием механического, электрохимического и других видов нагружения, среди них температурное воздействие на металл играет далеко не последнюю роль. По этой причине нам представляется необходимым требование уточнить понятие «тепловой удар». В справочной литературе [1] под «тепловым ударом» понимают резкое изменение температуры среды. Термин «тепловой удар» (солнечный и др.) наиболее употребим по отношению к организму человека. Меры защиты от воздействия теплового излучения, которое может приводить к нарушениям терморегуляции человеческого тела, широко известны. В настоящей статье не рассматривается влияние концентрации тепла и высоких температур источников теплоты (сварочной дуги и др.) на организм человека. Речь пойдет о тепловом ударе, как нам представляется, правильнее говорить о термическом ударе в металлических конструкциях. Подход к этой теме чрезвычайно важен, т.к. нагрев изделия перед технологической обработкой (термической обработкой, сваркой, в т.ч. и ремонтной, и др.) является одним из основных в жизненном цикле металлоизделий. Как известно, он включает в себя воздействие технологических процессов производственного цикла и эксплуатации на изменение структуры металла, его напряженно-деформированное состояние и др.*

На основе собственного опыта постараемся обобщить визуально наблюдаемые факты в распределении температур при термическом ударе в металлических конструкциях в зависимости от способа и режимов технологической операции.

Под тепловыми процессами, протекающими в металлических изделиях (заготовках), подразумеваются процессы, приводящие к изменению их температуры за счет тепла, подводимого от источника нагрева, распространения тепла по изделию и отвода его в окружающую среду.

Рассмотрим несколько примеров из практики металлургического передела о влиянии термического удара на образование трещин, их дальнейшего развития вплоть до разрушения детали.

В мировой практике ремонтной сварке изложниц уделяется серьезное внимание. В отливках изложниц любого развеса слитков в результате тепловых (изменения температур) в процессе их эксплуатации в местах концентрации напряжений («трефах») возможно образование трещин (рис. 1).

Если не принимать определенных мер по укреплению прочности изложниц при дальнейших разливах металла слитков (установка бугелей, устранение трещин ремонтной сваркой и др.), явление термического удара (нагрев изложницы теплотой металла будущего слитка) может привести к развитию имеющихся трещин, их переходу из поверхностных в сквозные, полному разрушению изложницы (рис. 2). Теплоты, полученной от слитка в процессе его кристаллизации, хватает, чтобы термические напряжения в острие поверхностной трещины изложницы оказались достаточными для ее роста. В итоге крупногабаритная изложница разрушилась на две части, а незакристаллизовавшийся

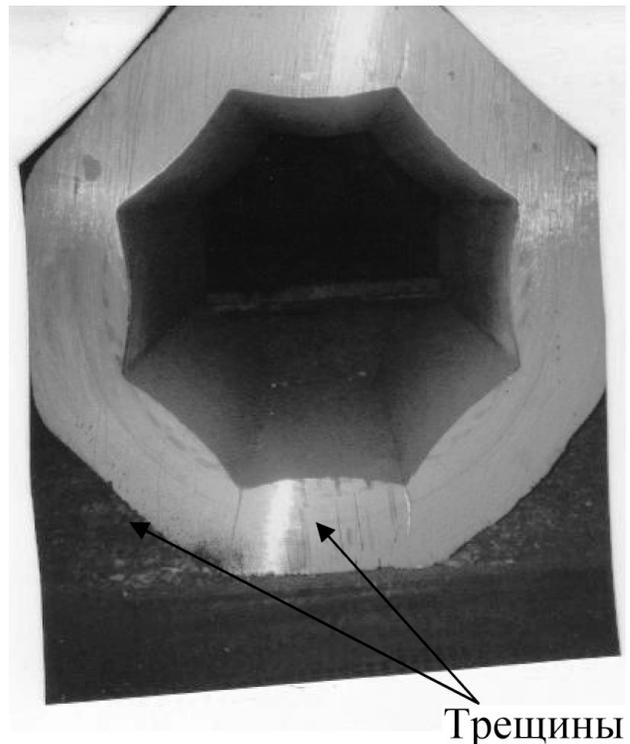


Рис. 1. Эксплуатационные трещины в крупнотоннажной изложнице (толщина стенки 200 мм)



Рис. 2. Хрупкое разрушение изложницы в процессе кристаллизации слитка массой 100 т

металл слитка вытек, фактически получился окончательный брак.

Пример устраненной трещины (поз. 1), возникшей в толстостенной отливке (сталь 20) после ремонтной сварки металлургического дефекта (поз. 2) приведен на *рис. 3*.

В начальный момент процесса печной термической обработки возможно хрупкое разрушение кованых прокатных валков (*рис. 4*).

Резкое изменение температуры металла валка вызывает в нем временные термические напряжения, величина которых зависит от величины градиента температур, толщины изделия и др. факторов. Для предупреждения подобных явлений мерами борьбы с термическими ударами являются посадка изделия в нагревательную печь при температуре печи не выше 270 °С, последующий его нагрев до заданной температуры осуществляется со скоростью не выше 27–30 °С/ч.

Своеобразное тепловое нагружение металла обрабатываемых деталей в механосборочном производстве также может вызвать образование трещин [2].

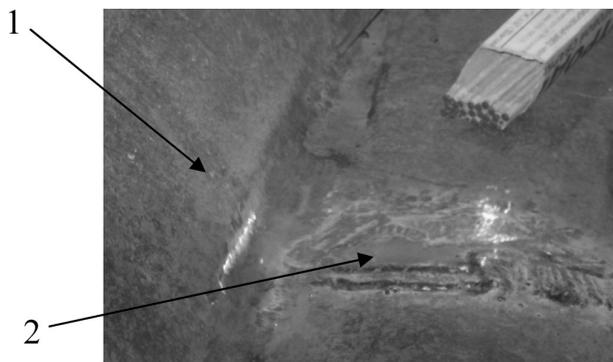


Рис. 3. Трещина термического удара (устраненная сваркой и зачищенная, поз. 1), возникшая после устранения литейного дефекта в теле отливки изложницы (поз. 2)

В настоящее время создана обобщенная теория прочности сварных металлических конструкций (оценка свариваемости, определение механической и усталостной прочности, термостойкости и др.). Но в тоже время многочисленные экспериментальные и практические работы, проведенные на нашем предприятии по ремонтной сварке массивных деталей сложной формы, дают возможность сформулировать некоторые важные общие положения для этого направления сварочных работ и выводы, рассматриваемые ниже.

В сварочном производстве наряду с традиционными источниками теплоты (газокислородное пламя, электрическая дуга и др.) широко используются и высокотемпературные источники тепла (плазма и ее разновидности, лазерное излучение). В этих случаях подвод тепловой энергии осуществляется настолько быстро, что создаются большие

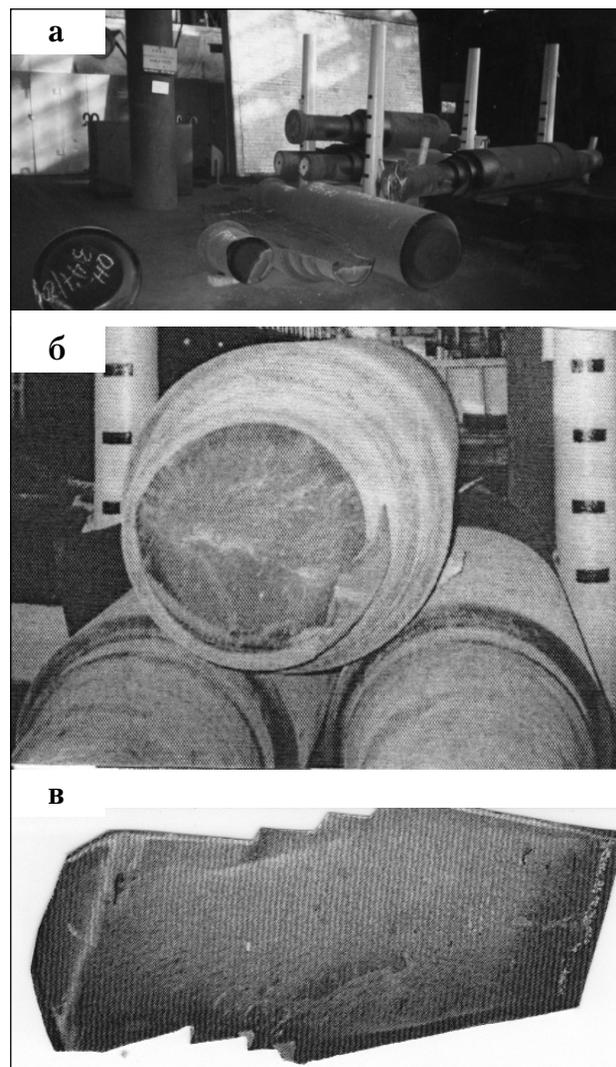


Рис. 4. Примеры хрупкого разрушения прокатных валков (сталь марки 45Х5МФ), возникшие в начальный момент нагрева под термическую обработку: а – участок бракованных валков; б – поперечное хрупкое разрушение валка; в – разрушение валка в его продольном направлении

градиенты температур, которые могут вызвать термические удары.

В практике сварочного производства термический удар может иметь положительное и отрицательное явление.

При сборке заготовок крупногабаритных конструкций, когда возникают трудности с подгонкой сопрягаемых поверхностей, применяют локальный нагрев с последующим механическим поджатием кромок свариваемых деталей или их закрепление с помощью талрепов, скоб, стяжек, домкратов, грузов и т.п. (рис. 5).

Под влиянием силовых воздействий при сварочных операциях возможны искривления и местные погибы, потеря устойчивости («бухтины») и др. разновидности потерь товарного (внешнего) вида листовых (балочных) конструкций. Для восстановления товарного вида применяют термическую (тепловую) правку (рис. 6). Этот технологический процесс осуществляют местным нагревом газовой горелкой (резаком).

Целью указанных операций является то, что при нагреве металл стремится расширяться, а окружающий его холодный металл ограничивает возможность расширения, в результате возникают пластические деформации сжатия. После охлаждения нагретого участка происходит уменьшение его линейных размеров, что приводит к сокращению или устранению деформаций.

Но в то же время практика ремонтной сварки крупногабаритных массивных конструкций сложной формы показывает, что явление термического удара может быть одной из причин образования трещин в массивных конструкциях и даже их хрупкого разрушения. При ремонтной электродуговой ручной сварке шабота гидравлического пресса усилием 100 МН в основном металле толстостенной литосварной конструкции (сталь марки 25ГС) на расстоянии ~ 800 мм от шва образовалась трещина.



Рис. 5. Применение местного нагрева при сборке крупногабаритных конструкций под сварку

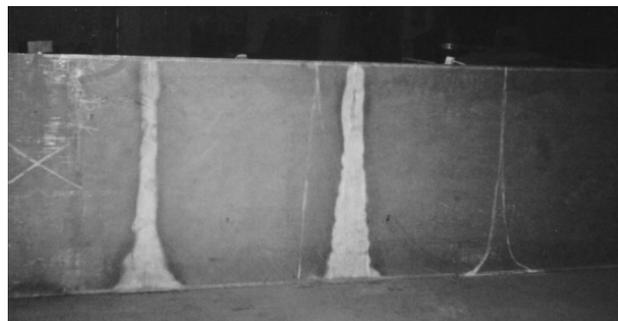


Рис. 6. Безударный метод термической правки деформированных листовых конструкций балочного типа

Наблюдения за ней показали, что после полного завершения сварки длина трещины не изменилась, но произошел рост ее глубины на 5–10 мм.

Теория распространения тепла при выполнении сварочных процессов [3] основана на принципах местного и временного влияния, согласно которым характер распределения тепла в теплопроводящем теле в пределах некоторой области с характерным размером  $d$  не оказывает практически влияния на температуру в зоне, удаленной от центра указанной области на расстояние больше зоны термического влияния. Также утверждается следующее: «характер распределения тепловой мощности во времени на отрезке  $\Delta T = T_2 - T_1$  оказывает небольшое влияние на температуру теплопроводящего тела».

Таким образом при изучении термических ударов нельзя воспользоваться известными теоретическими схемами, поэтому необходимую информацию о распространении тепла по изделию можно получить только экспериментальным путем. Воздействие термического удара происходит в первый момент возобновления прерванного процесса сварки, когда еще не успело сформироваться квазистационарное состояние подвижного температурного поля.

При термическом ударе распространение теплоты в массивном изделии происходит по законам теплопроводности и при многопроходной сварке носит волнообразный характер. Трещины образуются в основном металле в местах расположения литейных дефектов (рис. 7).

Действие термического удара усиливается при наличии внутренних дефектов металла и др., концентрирующих тепловые напряжения и затрудняющих пластическую деформацию. Возможно образование трещин при ремонтной сварке конструкций, бывших длительное время в эксплуатации (рис. 8), металл которых подвергся термомеханическому или деформационному старению.

Можно предположить, что на градиент температур оказывают влияние объем сварочной ванны и конвективные потоки в жидком металле. Во всяком случае, при электрошлаковой сварке объем ремонтной сварки резко возрастает (рис. 9). По техни-

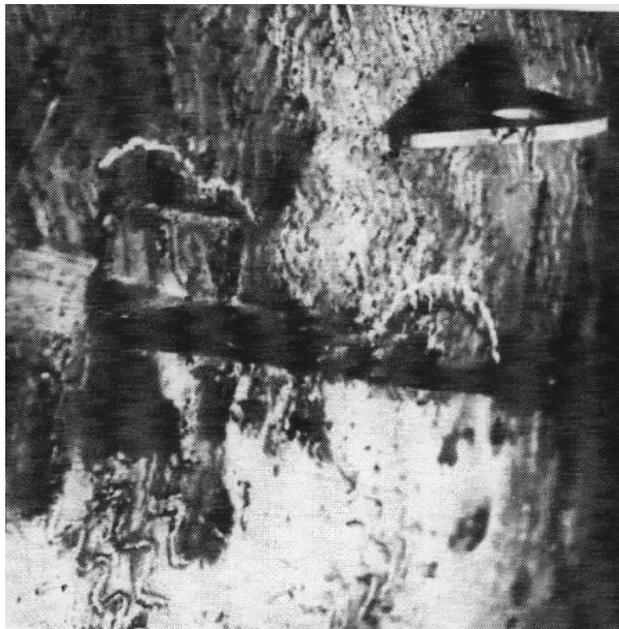


Рис. 7. Образование трещин (показаны мелом) в основном металле при монтажной сварке ковша шагающего экскаватора (сталь марки 14Х2ГМРЛ, толщина 160 мм)

ческим причинам был приостановлен процесс ЭШС станины (сталь 35Л, содержание углерода < 0,34%) гидравлического пресса усилием 50 МН. После его возобновления образовались поперечные трещины. Их удаление произвели механическим путем. Получившаяся разделка представлена на *рис. 9*.

Термическим ударом можно считать и резкое охлаждение крупногабаритной толстостенной конструкции при ее эксплуатации в полевых условиях в период резкого снижения атмосферной температуры (в нашей практике от -12...-13 °С до -47 °С), сопровождаемого обильным снегопадом и сильным ветром. При этом внешние слои металла сжимаются, а внутренние (глубокие), имеющие более высокую температуру, препятствуют сжатию. С нашей точки зрения, к подобным явлениям следует от-



Рис. 8. Образование трещины (показано стрелкой) под влиянием термического удара на крышке мультипликатора (сталь марки 10ХСНД) гидравлического пресса усилием 100 МН при ремонтной сварке

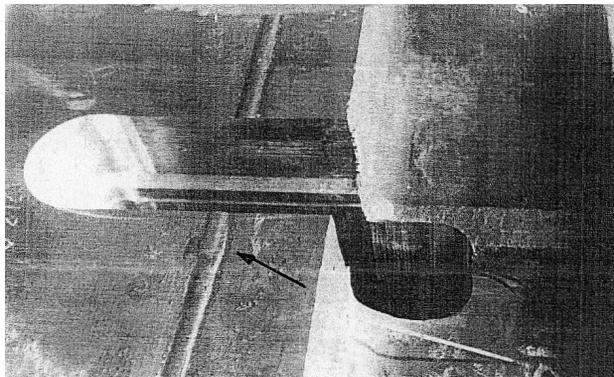


Рис. 9. Вид разделки (длина 960, ширина 120, глубина - 1 200 мм) после удаления трещин, образовавшихся при возобновлении процесса электрошлаковой сварки (стрелкой показано место остановки процесса) станины гидравлического пресса

нести и сварку на сквозняке (например, приварку к поворотной платформе карьерного экскаватора стали 10ХСНД рельса стали Р65).

Согласно общепринятому мнению подогрев (предварительный и сопутствующий) является средством повышения технологической прочности закаливающихся сталей, который чаще всего выполняется газокислородным пламенем. Оно считается менее сосредоточенным источником теплоты, чем электрическая дуга [3]. Однако к этому приему надо относиться достаточно осторожно. Неоднократно встречались случаи, при которых нагрев перед удалением закалочных трещин (стали типа 9Х2МФ и др.) заканчивался разрушением ремонтируемой детали (*рис. 10*). Очаг разрушения находился на расстоянии ~ 40–50 мм от места нагрева. Подобный распад детали на отдельные части может привести к травме рабочего.

Термические удары возможны также при возобновлении сварки разделок в толстостенном металле, остывших до температуры окружающего воздуха. Особенно надо быть осторожным при монтажной сварке в полевых условиях при низкой атмосферной температуре, когда по целому ряду причин сварку приходилось прекращать и металл конструкции остывал до температуры окружающего воздуха. При возобновлении предварительного подогрева в самый начальный момент проведения этой операции образовывались развитые трещины магистрального типа длиной до 1 100 мм.

Возможно образование трещин и при разделительной газокислородной резке металлолома на scrap (*рис. 11*). Наличие адиабатической границы в разрезаемой детали приводит к образованию сквозной трещины (на *рис. 11* показана стрелками) и после полного охлаждения до температуры окружающего воздуха отрезанная часть заготовки распадается на куски, чем нарушаются условия договора на поставку лома определенного размера для

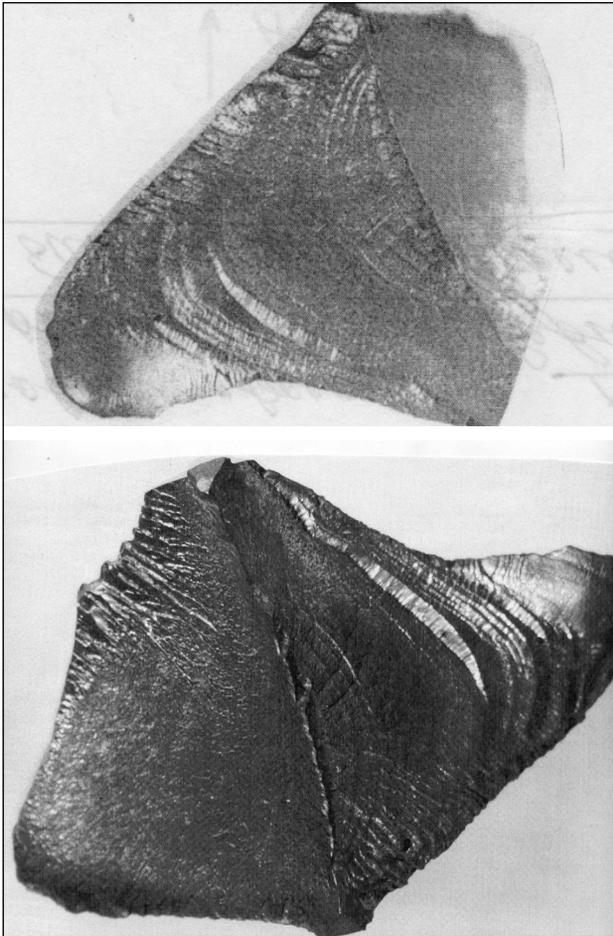


Рис. 10. Фрагмент детали, разрушенной в процессе предварительного подогрева. Состояние основного металла – закалка с отпуском

последующих его загрузок в плавильный агрегат заказчика и расплавления.

Вероятность образования трещин в металле крупногабаритных конструкций при термическом ударе носит стохастический характер и во многом определяется неоднородностью металла. При-

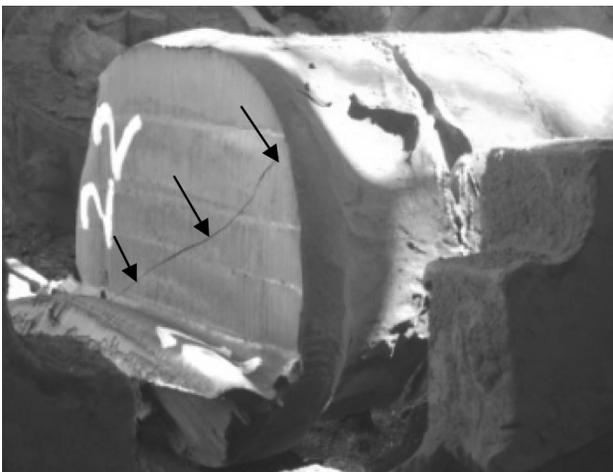


Рис. 11. Образование сквозной трещины в массивной поковке (сталь 38ХГН, диаметр 980 мм) при ее разделке машинной газокислородной резкой на скрап

ближенная оценка вероятности образования трещин при термическом ударе с привлечением вероятностно-статистических методов является крайне сложной операцией для практических расчетов [4]. Проверить адекватность расчетной модели если и удастся, то весьма и весьма затруднительно. Поэтому была сделана попытка объяснить механизм образования трещин такого типа с позиций физики теплового удара при ядерном взрыве [5]. В ядерной физике на основе соответствующего программного обеспечения разработаны модели кинетического и энергетического подходов к разрушению металлических элементов при значительном градиенте температур. Выполненные исследования позволили, в частности, установить, что критическая удельная энергия разрушения металла (стали, меди, никеля и др. материалов), необходимая для образования трещин (хрупкого разрушения), не является константой. При прогнозировании стойкости металла к разрушающему действию термического удара необходимо учитывать масштабный фактор, его учет может привести к снижению порога разрушения металла. Энергетический подход основан на сопоставлении запаса энергии в образце и в металле детали. Данные атомщиков подтвердили наши гипотетические предположения образования трещин (разрушения) при термических ударах.

Полученные феноменологические модели механизмов образования трещин (разрушения) в металлических конструкциях в течение их жизненного цикла при быстром нагреве последних позволяют технически грамотно проектировать технологии ремонтной сварки и ее выполнения.

#### Литература

1. Толковый металлургический словарь. Основные термины / под ред. В. И. Куманина. М.: «Русский язык». 1989. – 447 с.
2. Панов В. И. Проблемы ремонтной сварки стали 110Г13Л большой толщины // Сварщик. – 2014. – № 1. – С. 36–39.
3. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке: учебное пособие / М.: Машгиз. 1951. – 296 с.
4. Панов В. И. Математические методы прогнозирования работоспособности конструкций индивидуального тяжелого машиностроения после выполнения восстановительных работ // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 17–20.
5. Молитвин А. М. Прочность и удельная энергия разрушения металлов при тепловом ударе // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44. – № 1 – С. 163–167.

# Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционной термической обработки сварных соединений высокопрочных труб

А.А. Письменный, к.т.н., ЗАО «Псковэлектросвар» (Псков), К.А. Письменный, «ИЭС им. Е.О. Патона» НАНУ (Киев)

Новое поколение трубных сталей отличается высокими прочностными свойствами, сохраняющимися при низких температурах эксплуатации. Известно [1], стали такого типа являются термически нестабильными, что проявляется в необратимости структурных изменений в металле шва и околошовной области, в результате чего механические свойства в этих зонах отличаются от свойств основного металла резким снижением пластических свойств и большей склонностью к хрупким разрушениям, причем данные изменения проявляются после любого вида сварки. Известно также [2], что условием для улучшения прочностных показателей металла шва в части его вязких свойств, является осуществление ускоренной местной термической обработки, заключающейся в повторной перекристаллизации металла шва и околошовной зоны. При этом, как наиболее высокопроизводительный способ, часто применяют термическую обработку сварных швов, используя оборудование индукционного нагрева токами высокой частоты, что обуславливается простотой технологии, стабильно высоким качеством тепловой обработки, возможностями автоматизации и паспортизации.

Метод индукционного нагрева металлов имеет значительные преимущества перед другими (например газопламенным, нагревом сопротивлением), т.к. подвод тепла к обрабатываемому объекту происходит бесконтактным способом, в результате преобразования омических потерь от индуцированных в ферромагнитное тело вихревых токов в тепловую энергию.

Необходимая ширина зоны нагрева сварного соединения в осевом направлении труб определяется геометрическими размерами индукционной системы. Основное преимущество индукционного способа подвода тепла заключается в высокой скорости нагрева обрабатываемого участка до заданной температуры, что повышает производительность операции.

Если зазор между индуктирующим проводником, охватывающим обрабатываемую поверхность труб, во всех точках приближенно одинаков, то тепловое поле по длине и ширине шва распределяется во времени практически однородно и перекристаллизация металла в объеме этого поля от центра зоны нагрева в осевом направлении труб и в глубину шва происходит также с равномерной скоростью (рис. 1).

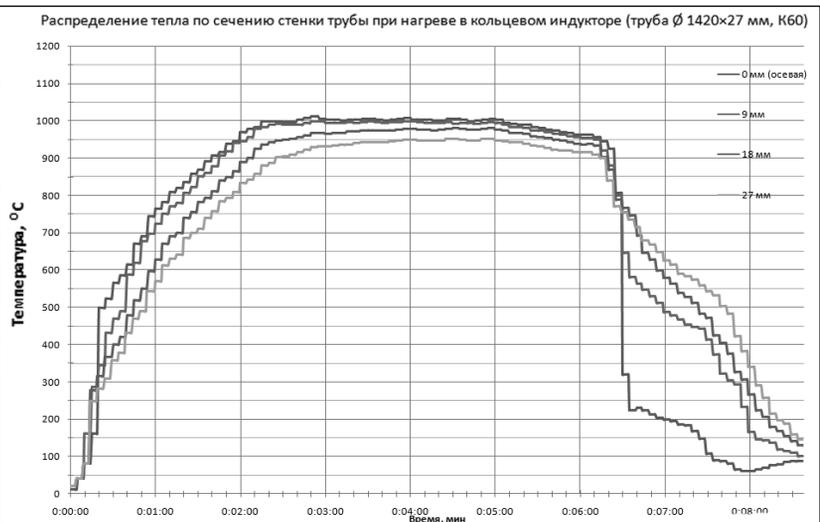


Рис. 1. Распределения температур по глубине стенки труб  $\varnothing 1420 \times 27$  мм при индукционном нагреве и ускоренном охлаждении (измерения с помощью термопар ТХА, тип К)

Вид измеренного поля распределения температур в стенке трубы толщиной 27 мм приведен на *рис. 2* (конструкция индуктора показана произвольно).

Частота тока в индукторе и начальная скорость нагрева, прямо пропорциональная величине вкладываемой удельной мощности, во многом определяют конфигурацию температурного поля по сечению, а, следовательно, и конечную разность температур снаружи и внутри шва. Если подвод тепла осуществляется с одной стороны обечайки толстостенной трубы, то практически неизбежна некоторая разница в фактических температурах нагрева между ее наружной и внутренней стенками (*рис. 1, 2*). При таком способе индукционной термообработки следует стремиться к минимизации этой разности, но не допустить того, чтобы основной металл вне обрабатываемой зоны подвергался излишним структурным изменениям, приводящим к дополнительному разупрочнению. Ошибки при выборе частоты тока и/или начальной удельной мощности обычно приводят к тому, что не обеспечивается прогрев внутренней стороны шва до необходимой температуры, при этом чрезмерно широкой может стать зона нагрева наружной поверхности, поскольку с течением времени скорость распространения тепла вдоль оси труб может превысить скорость проникновения тепла вглубь шва.

Проведенные аналогичным способом (*рис. 1*) измерения температур по сечению трубы с толщиной стенки 16 мм на частоте тока индуктора 2,4 кГц показали, что разность температур между наружной и внутренней стенкой составляет не более 10 °С. Сравнение с результатом измерений при нагреве трубы со стенкой 27 мм показывает,

что при одной и той же частоте и времени выдержки разница в температурах на глубине 16–18 мм значительно отличается. Это объясняется тем, что в толстостенной трубе ниже измеренной точки еще находится значительный объем металла, который принимает тепло из верхних, нагретых участков. Поэтому при индукционном нагреве стыковых швов толстостенных труб важно понимание того, как выглядит распределение температурного поля по сечению стенки толстостенной трубы при применении различных конструкций индукторов – их работы на различных частотах тока, изменяющихся энергетических параметрах, условий окружающей среды.

Помимо применения существующих методик для оценки параметров индукционной системы, предназначенной для нагрева массивных тел, важная роль отводится экспериментальной работе, т.к. построение точной тепловой трехмерной модели поля является сложной в математическом отношении задачей в силу большого числа непрерывно меняющихся во времени переменных. На практике, при проектировании и экспериментальной проверке индукционных систем, для определения температурных полей часто используют термодпары, с определенным шагом устанавливаемые вдоль оси трубы и по глубине ее стенки. В зависимости от желаемой точности измерений, число термодпар может достигать до нескольких десятков и даже сотен. Соответственно, на подготовку каждого такого эксперимента затрачивается много времени. Чтобы сократить число экспериментов, обращаются к построению многоуровневых математических моделей для анализа и прогнозирования комплекса характеристик вновь проектируемых систем, причем степень достоверности модели значительно повышается,

если в ней используются верифицированные данные, полученные в ходе экспериментальных проверок.

Существуют современные численные методы расчета, отличительной особенностью которых является возможность оценки сопротивления сред переменному току с учетом эффектов близости и вытеснения, в частности, позволяющие моделировать конфигурации тепловых полей через решение задачи распределения электромагнитных полей переменных токов. Наряду с применением оценочных расчетов индукционных систем по известным мето-

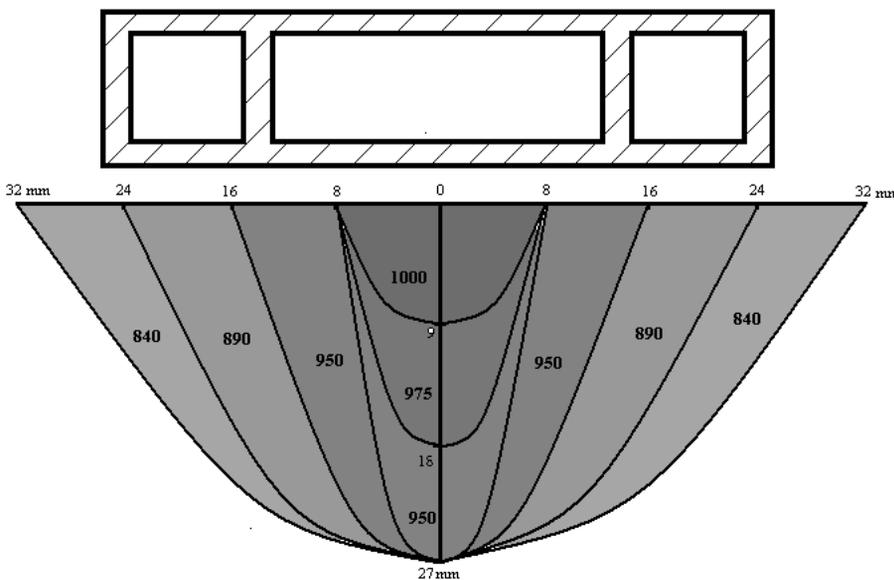


Рис. 2. Экспериментально измеренное поле распределения температур в стенке трубы толщиной 27 мм, при индукционном нагреве обечайки из трубной стали (ширина индуктора 50 мм, частота тока 2,4 кГц)

дикам, в т.ч. разработанной Институтом электросварки им. Е. О. Патона методике синтеза электромагнитных полей при заданной форме настила тока или удельной мощности на поверхности [3], возможно применение программных комплексов [4], реализующих численный метод конечных элементов для моделирования электромагнитных и тепловых полей. Для рассматриваемого нами случая можно применить комплекс «Elcut», где на первом этапе будет получено распределение электромагнитного поля в стенке трубы, обусловленного индуцируемыми в ней вихревыми токами. Затем геометрия задачи и данные, полученные при ее решении, передаются в новую, тепловую задачу. В ней мощности тепловыделения, определяемые омическими потерями, используются в качестве источников

тепла, т.е. рассчитываются в каждой точке «сетки», в которой известно значение плотности индуктированного тока, результатом чего является искомое поле распределения температур по сечению сварного шва. Для достоверного отображения картины теплового поля следует задаваться граничным условием третьего рода – конвекцией на границах модели (соответствующие коэффициенты теплоотдачи с поверхности нагреваемых участков должны быть предварительно определены экспериментально).

В качестве простого примера можно рассмотреть типичную индукционную систему (рис. 3), которая состоит из фрагмента обечайки трубы и охватывающего ее индуктирующего провода.

Для рассматриваемой задачи достаточно двумерной модели, которая может быть представлена в осесимметричной постановке: в разрезе трубы

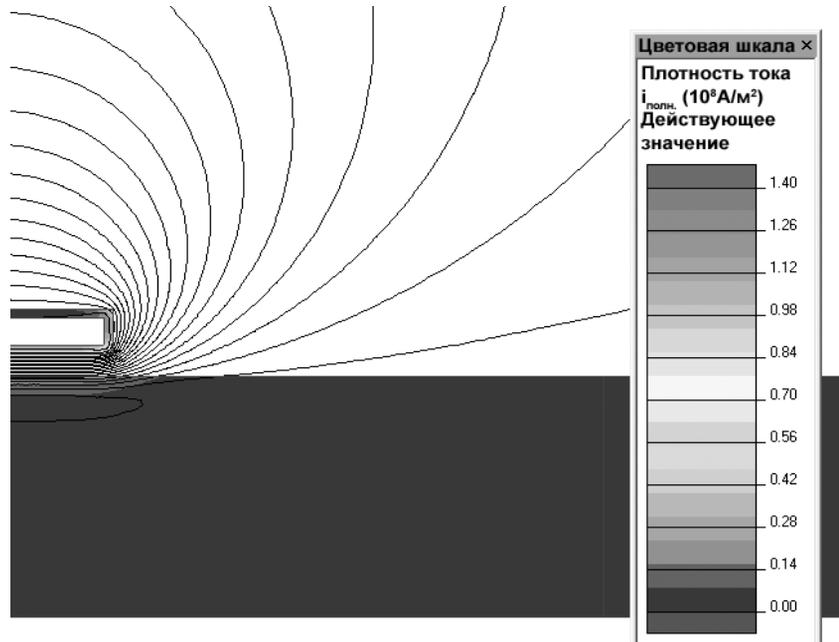


Рис. 4. Распределение магнитного поля вокруг индуктора и в стенке трубы (частота тока 2,4 кГц, сила тока 5 кА)

и индуктора плоскостью вдоль оси трубы и затем – поперек шва. Изолинии магнитного поля вокруг индуктора с током изображены на рис. 4.

Рассмотрим нагрев при частотах тока в индукторе 1,0 и 2,4 кГц при одном и том же значении действующего в нем тока.

В начале нагрева глубина индуцированного в стенку трубы настила тока сравнительно невелика и при частоте тока в индукторе 2,4 кГц составляет около 1,0 мм; при частоте тока 1,0 кГц – около 1,8 мм [5]. Однако, несмотря на сравнительно небольшую глубину, в этом слое выделяется большая тепловая мощность, достаточная для обеспечения интенсивного распространения тепла под индуктором вглубь металла за счет теплопроводности. По мере повышения температуры в зоне нагрева удельное сопротивление нагреваемого участка стали постепенно растет, в момент достижения

температуры, при которой металл переходит в немагнитное состояние (~700 °С), его удельное сопротивление скачкообразно возрастает в несколько раз и тогда глубина проникновения тока составляет порядка 10 мм при частоте тока 2,4 кГц и около 16 мм при 1,0 кГц.

Такое перераспределение индуктированного тока вызывает резкое снижение величины удельной мощности и сниже-

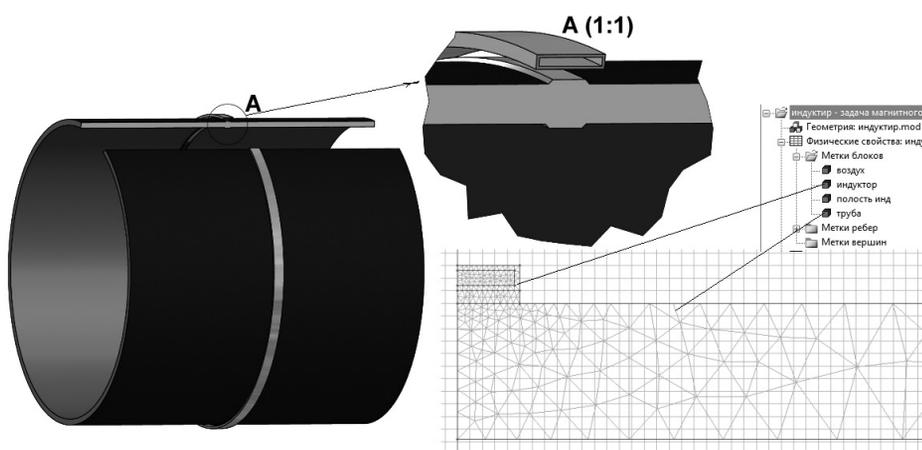


Рис. 3. Система «обечайка трубы – охватывающий индуктор» и ее расчетная модель в «Elcut» в осесимметричной постановке

ние темпа нагрева. После перехода металла верхнего участка трубы в немагнитное состояние, под ним нагревается следующий, пока еще магнитный участок и, таким образом, тепло проникает вглубь стенки трубы при непрерывно меняющемся сопротивлении на границе сред. Поскольку электромагнитное поле убывает из-за фактически увеличивающегося зазора между индуктирующим проводником и магнитным слоем стенки, то прогрев внутренней стороны стенки трубы толщиной свыше 16 мм происходит преимущественно за счет теплопроводности.

При переходе на другие толщины и диаметры рассматриваемых труб можно говорить о том, что частота тока индуктора не зависит от внешнего диаметра трубы, поскольку толщина стенки трубы всегда несоизмеримо меньше наружного диаметра трубы:  $\delta_{тр} \ll D_{тр}$ , где  $\delta_{тр}$  — толщина стенки трубы;  $D_{тр}$  — диаметр трубы.

Поэтому если для нагрева металла трубы с какой-либо толщиной определена оптимальная величина частоты тока в индукторе, то производится оценка погонной (удельной) мощности нагрева. Затем эта погонная мощность учитывается при расчете установленной электрической мощности источника питания для нагрева трубы любого диаметра. Основная потребляемая мощность при цикле термообработки приходится на начальный нагрев при подъеме температуры; необходимо также иметь запас мощности при переходе металла в немагнитное состояние для поддержания интенсивности нагрева (высокой плотности тока) в новом объеме — активную мощность нужно будет увеличить, поскольку она связана с глубиной проникновения тока соотношением:

$$P \sim S \frac{\delta_{тр}^2 \cdot \rho \cdot \Delta k}{4}$$

где  $\Delta k = \frac{0,5}{\sqrt{f}}$  — оценочная глубина проникновения тока в сталь, нагретую выше точки Кюри;  $f$  — частота, Гц;  $S$  — площадь нагрева;  $\rho$  — удельное сопротивление стали.

На *рис. 5* изображено распределение плотности индуктированного тока в стенке трубы под индуктором. Частота тока в индукторе 2,4 и 1,0 кГц, сила тока 5 кА, толщина стенки трубы 27 мм, ширина индуктора 50 мм. Моделирование учитывает изменяющуюся магнитную проницаемость металла трубы при переходе через точку Кюри. Видно, что при более низкой частоте глубина проникновения тока в сталь больше, соответственно больше величина тепловыделения на одном и том же расстоянии от наружной стенки трубы. В частности, при частоте тока в индукторе 1 кГц, на глубине 10 мм плотность индуктированного тока выше в 1,3 раза, а тепловыделение больше почти в 1,9 раза, несмотря на то, что плотность тока у поверхности при частоте 1 кГц значительно ниже.

Результат решения задачи теплопередачи, связанной с предыдущей электромагнитной задачей, показан на *рис. 6*. Изображены распределения тепловых полей в стенке трубы, при этом с понижением частоты и одинаковой величине тока в индукторе, тепло интенсивнее распространяется вглубь металла, но температура в наружном приповерхностном слое ниже, чем при частоте 2,4 кГц.

Для повышения интенсивности нагрева под индуктором применяют магнитопроводы, состоящие из набора стальных пластин с высокой магнитной проницаемостью либо представляющие блок-конструктив из ферромагнитных материалов (*рис. 7*). Например, применение дополнительного магнитопровода-сердечника из трансформаторной стали на индуктирующем проводе позволяет изменить распределение индуктированного тока на поверхности изделия.

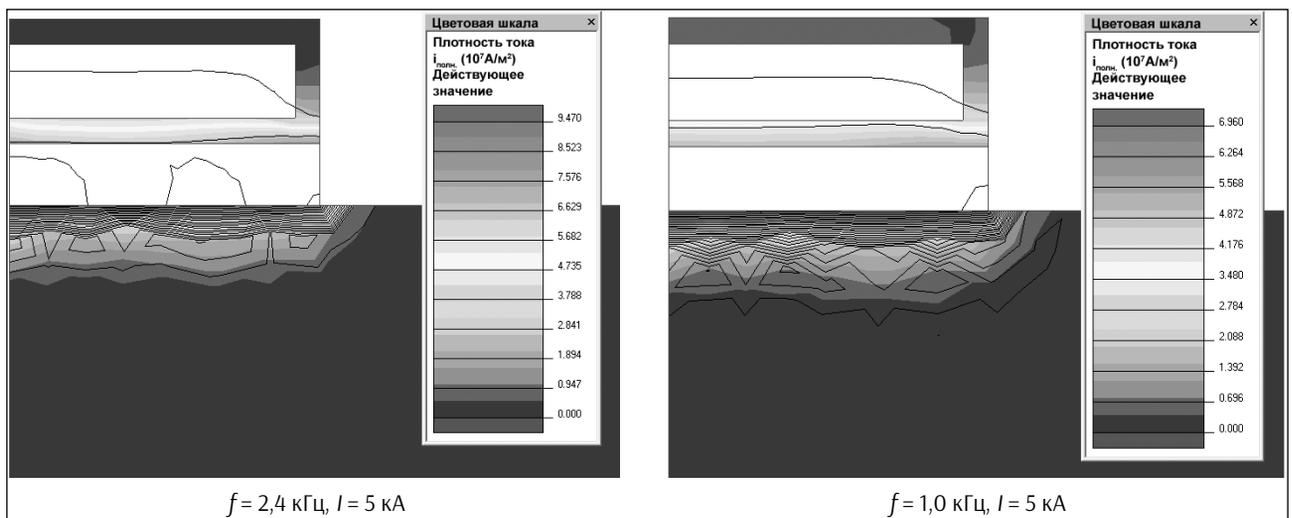


Рис. 5. Распределение плотности тока в стенке трубы под кольцевым одновитковым индуктором при одинаковой величине действующего тока в индукторе, при различных частотах

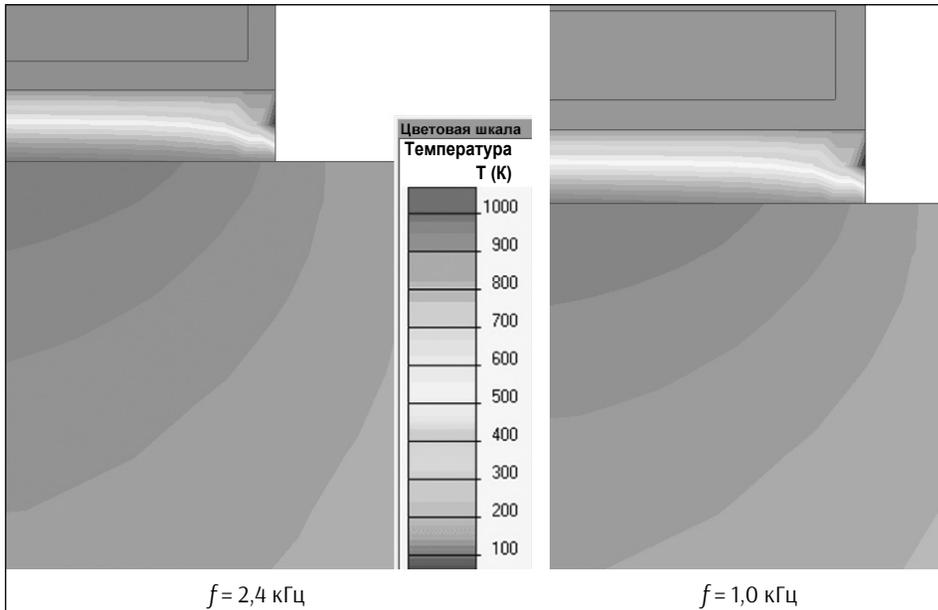


Рис. 6. Распределение тепловых полей в стенке трубы под кольцевым одновитковым индуктором при различных частотах

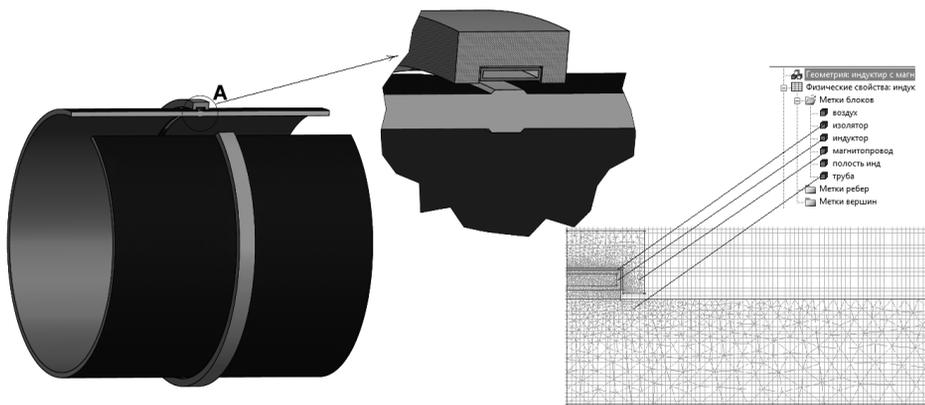


Рис. 7. Индукционная система – обечайка трубы с охватывающим индуктором с магнитопроводом и ее расчетная модель в осесимметричной постановке

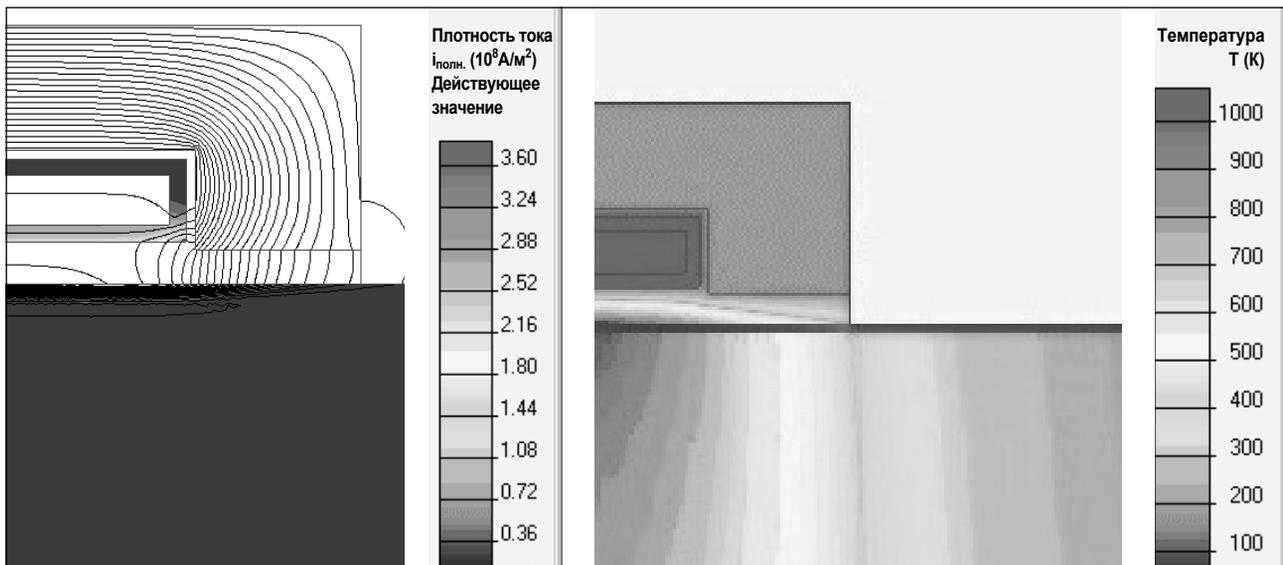


Рис. 8. Распределение электромагнитного и теплового полей в стенке трубы под условной конструкцией индуктора, оснащенного магнитопроводом из стали с высокой магнитной проницаемостью ( $f = 2,4$  кГц,  $I = 5$  кА)

Картина резкого изменения теплового поля, из-за вытеснения тока к пазу магнитопровода и резкого повышения его плотности под индуктором, представлена на рис. 8.

Такой явно выраженный эффект обусловлен тем, что магнитное поле с обратной стороны магнитопровода пренебрежимо мало. В результате создается основное поле нагрева, определяемое шириной паза магнитопровода, что проявляется в форме полосы с резко очерченными границами. В технологическом отношении такое обстоятельство вместе с высокой скоростью нагрева способствует процессу повторной перекристаллизации в границах необходимого объема металла сварного шва.

Приведенная расчетная модель прошла экспериментальную проверку. Для этого были спроектированы и изготовлены опытные модели индукторов для поверхностной термообработки сварных швов темплетов труб

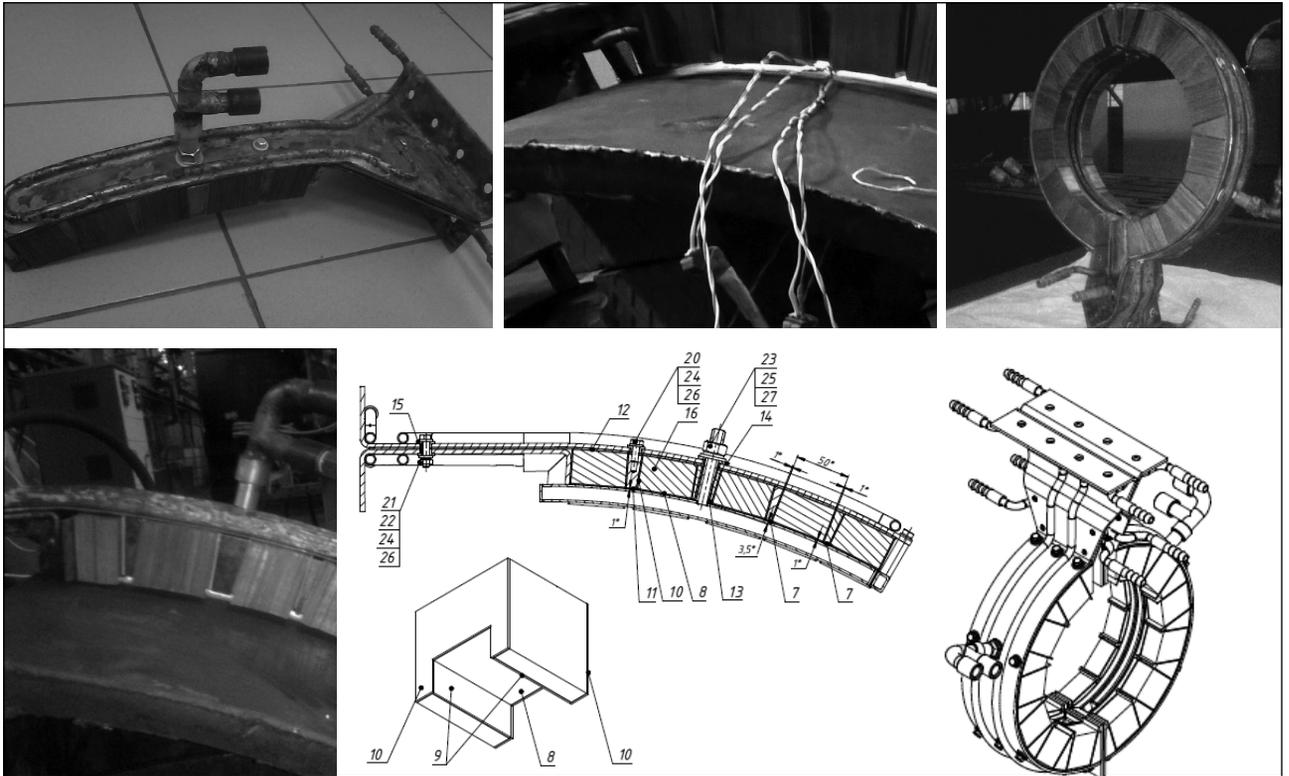


Рис. 9. Индукторы, оснащенные магнитопроводами, для ускоренной индукционной термообработки сварных швов труб

Ø 1219–1420 мм трубной стали 10Г2ФБ, К60 и обсадных труб Ø 219 мм, с встроенными спрейерами ускоренного охлаждения зоны нагрева (рис. 9). Экспериментальная работа проводилась на стенде, позволяющем моделирование разнообразных индукционных систем в диапазоне частот тока от 1 кГц до 10 кГц мощностью до 200 кВА для решения задач локального нагрева как криволинейных, так и плоских поверхностей. При этом на практике подтвердилось соответствие применяемого метода анализа электромагнитных и тепловых полей, реальным условиям индукционной термообработки.

На основании изложенного выше можно сформулировать следующие выводы.

1. Для проектирования, анализа и прогнозирования комплекса характеристик индукционных систем, целесообразно прибегать к построению математических моделей связанных электромагнитных и тепловых полей. Существующие пакеты программного обеспечения, оснащенные приложениями, использующими метод конечных элементов для моделирования электромагнитных и тепловых полей, позволяют получить визуальное представление о распределении электромагнитного поля, в частности, в стенке нагреваемой трубы, а также осуществить построение картины теплового поля в нагреваемом объекте.

2. Применение компьютерного моделирования индукционных систем с решением совмещенной электромагнитной и тепловой задачи позволяет

свести к минимуму время разработки индукционных нагревателей для самого широкого круга приложений.

#### Литература

1. Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.В., Хоменко В.И. и др. Технология термической обработки соединений труб из стали класса прочности К56, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. — Автоматическая сварка. — 2013. — № 2. — С. 3–8.
2. Кучук-Яценко С.И., Лебедев В.К., Скульский Ю.В. и др. Местная термообработка стыковых сварных соединений газопроводных труб диаметром 1420 мм. — Автоматическая сварка. — 1977. — № 10. — С. 38–40.
3. Письменный А.С. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий / Под ред. Б.Е. Патона. — К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 2005. — С. 16–20.
4. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя. — СПб: ООО «Тор», 2013. — 295 с. URL: [http://elcut.ru/free\\_doc\\_r.htm](http://elcut.ru/free_doc_r.htm).
5. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974. — С. 9, 15.

# Современные высокоэффективные многопостовые системы ручной и механизированной дуговой сварки

Н.М. Махлин, В.Ю. Буряк, В.Е. Водолазский, В.Е. Попов, Д.С. Олияненко, ГП «НИЦ СКАЭУ ИЭС им. Е.О. Патона», А.Е. Коротынский, д.т.н., М.И. Скопюк, «ИЭС им. Е.О. Патона» НАНУ (Киев)

*На крупных машиностроительных предприятиях, в судостроении, при монтаже и ремонте объектов энергетики (в частности энергоблоков АЭС), в металлургии, др. отраслях индустрии и транспорта во всех случаях, когда на ограниченной производственной площадке сосредоточено значительное число сварочных постов, что характерно при изготовлении крупногабаритных конструкций, широко используются многопостовые сварочные системы (МСС), предназначенные для ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА), ручной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (TIG) и механизированной сварки электродной проволокой в среде защитных газов (MIG/MAG) [1–3]. К МСС предъявляется ряд технологических и функциональных требований [3], но основными из них являются независимость работы сварочных постов друг от друга и нечувствительность каждого из постов к внешним возмущающим факторам. Однако получившие наибольшее распространение МСС постоянного тока, построенные на базе балластных реостатов, принципиально не способны удовлетворить эти требования и имеют крайне низкий КПД, что обусловлено большими потерями активной мощности в балластных реостатах.*

*Одной из целей настоящей статьи является: показать перспективы расширения технологических возможностей и повышения энергетической эффективности МСС для дуговой сварки, что представляет собой актуальную научно-техническую задачу. В статье представлены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по усовершенствованию МСС для дуговой сварки, проводимых в течение ряда лет в НИЦ СКАЭ совместно с ИЭС им. Е. О. Патона.*

*Рассмотрены преимущества и особенности разработанных современных отечественных МСС и входящих в их состав электронных регуляторов сварочного тока, изготавливаемых в Украине, их технологические и функциональные возможности, а также пути реализации их преимуществ. Приведены структурно-функциональные схемы таких МСС, а также электронных регуляторов сварочного тока и блока подачи электродной проволоки (для процессов MIG/MAG).*

В отечественном сварочном производстве наибольшее распространение получили МСС постоянного тока, в состав которых входят: централизованный источник питания — мощный нерегулируемый многопостовый выпрямитель с жесткой внешней вольтамперной характеристикой (ВАХ); индивидуальные сварочные посты (ИСП) и соединяющие их электрические сети (магистральные шинопроводы или «разводки»). Каждый ИСП подключен к многопостовому выпрямителю или к магистральным шинопроводам через балластный реостат, с помощью которого осуществляется ступенчатое регулирование параметров режима сварки. Однако такие МСС характеризуются ограниченными технологическими возможностями и энергетической неэффективностью.

Технологические ограничения, присущие построенным на базе балластных реостатов МСС, обусловлены тем, что в них проявляются ярко выраженная зависимость сварочного тока от колебаний напряжения питания (следовательно, и выходного выпрямленного напряжения) многопостового выпрямителя и от флуктуаций длины дугового промежутка, взаимное влияние ИСП друг на друга при их одновременной работе, отсутствие возможности автоматически поддерживать с необходимой точностью заданные технологические режимы, программировать и осуществлять цикл сварки, а также — режимы сварки модулированным током. Серьезные технические и экономические затруднения возникают и при попытках создания устройств дистанционного управления оборудованием ИСП [1–3].

Энергетическая неэффективность МСС, построенных на базе балластных реостатов, объясняется тем, что в таких системах [3]  $I_{\Pi} = I_{\text{д}}$ , где  $I_{\Pi}$  — ток ИСП (потребляемый постом от многопостового выпрямителя или магистрального шинопровода);  $I_{\text{д}}$  — ток сварочной дуги. При заданном напряжении сварочной дуги  $U_{\text{д}}$  ток сварочной дуги  $I_{\text{д}}$  будет соответствовать выражению:

$$I_{\text{д}} = (U_{2\text{ВЫХ}} - U_{\text{д}}) / R_{\text{Б}} \quad (1)$$

где  $U_{2\text{ВЫХ}}$  — вторичное выходное напряжение постоянного тока многопостового выпрямителя

(напряжение на магистральном шинопроводе);  $R_B$  — активное включенное сопротивление балластного реостата. КПД ИСП  $k_{\Pi}$  с балластным реостатом определяется как:

$$k_{\Pi} = P_d / P_{\text{ПИТ}} = U_d / U_{2\text{ВЫХ}} \quad (2)$$

где  $P_d$  — мощность, используемая в сварочной дуге;  $P_{\text{ПИТ}}$  — мощность, подводимая к посту (потребляемая постом). Общий КПД МСС  $k_{\text{МСС}}$  с учетом КПД многопостового выпрямителя  $k$  составляет:

$$k_{\text{МСС}} = k_{\Pi} \times k \quad (3)$$

Для типичного случая, когда  $U_{2\text{ВЫХ}} = 60$  В в диапазоне сварочных токов до 200 А,  $k_{\text{МСС}} \leq 0,42$  — при ММА,  $k_{\text{МСС}} \leq 0,36$  — при MIG/MAG,  $k_{\text{МСС}} \leq 0,27$  — при TIG. Приведенные значения  $k_{\text{МСС}}$  — расчетные, в действительности же КПД МСС, созданных на базе балластных реостатов, еще меньше, если учитывать неизбежные потери мощности в магистральных шинопроводах и проводах сварочного контура.

Отмеченные недостатки находящихся в эксплуатации МСС, дают все основания полагать, что расширение технологических возможностей и повышение энергетической эффективности МСС возможны только при условии совершенствования постового оборудования путем использования современных достижений силовой электроники и средств управления ею.

Необходимо отметить, что одновременно с началом широкого применения МСС на базе балластных реостатов предпринимались попытки создания более экономичных МСС путем использования в качестве постового оборудования электронных преобразователей постоянного тока [4–6]. Однако широкому практическому применению таких преобразователей препятствовала их недостаточная надежность из-за отсутствия силовых полупроводниковых приборов, способных коммутировать значительные мощности (5 кВт и более) в диапазоне сверхзвуковых частот (свыше 18 кГц).

Создание надежных электронных преобразователей для дуговой сварки стало возможным только с освоением промышленного производства (с середины 1990-х гг.) современных силовых полупроводниковых приборов, в частности, мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов, быстродействующих диодов и силовых модулей на основе этих приборов. В импульсных электронных преобразователях (конверторах DC-DC) для дуговой сварки наиболее широкое применение получили мощные MOSFET- и IGBT-транзисторы, силовые модули на их основе третьего и четвертого поколений, а также силовые модули, в которых мощные транзисторы и быстродействующие силовые обратные диоды объединены в единую конструкцию.

Среди многообразия импульсных полупроводниковых преобразователей постоянного тока в дуговой сварке наибольшее распространение получил однотактный конвертор DC-DC понижающего типа. К его преимуществам следует отнести простоту схемы силовой части, способность функционировать при изменениях в широких пределах напряжения питания (входного напряжения) и сопротивления нагрузки, высокое значение КПД и коэффициента мощности (значение около единицы).

В 2002–2004 гг. в НИЦ СКАЭ совместно с ИЭС выполнены работы по улучшению методик расчета и проектирования МСС на базе электронных регуляторов сварочного тока, выполненных на основе однотактных конверторов DC-DC, проведены всесторонние испытания, в т.ч. технологические, экспериментальных образцов регуляторов сварочного тока для ММА, TIG и MIG/MAG, разработан ряд моделей таких регуляторов, структурно-функциональные схемы которых приведены на рис. 1 [7–9].

Основной частью системы управления (СУ) электронных регуляторов сварочного тока (рис. 1) является тракт управления, включающий широкополосный широтно-импульсный модулятор (ШИМ), контроллер цикла сварки, датчики сварочного тока (ДТ) и напряжения на дуге (ДН), причем последний входит в состав тракта управления при ММА и MIG / MAG. По конфигурации, функциональному назначению, быстродействию и во многом по схемотехнике тракт управления электронных регуляторов сварочного тока аналогичен основной части СУ современных сварочных инверторных источников питания, в которых как способ импульсного регулирования сварочного тока и/или напряжения на дуге используется ШИМ. Предпочтительность ШИМ в электронных регуляторах сварочного тока обусловлена тем, что в однотактных конверторах DC — DC понижающего типа с ШИМ частота переключений силового ключа (VT), а, следовательно, и частота пульсаций тока нагрузки в процессе регулирования неизменна, при этом размах пульсаций, определяемый индуктивностью дросселя ( $L_{\text{ДР}}$ ), может быть сколь угодно мал. Это позволяет не только оптимизировать параметры дросселя ( $L_{\text{ДР}}$ ) и буферного конденсатора (С), но и обеспечить предпосылки для эффективного возбуждения дуги в начальной стадии процесса сварки и поддержания устойчивого дугового разряда в межэлектродном промежутке при низких значениях сварочного тока, что особенно важно для осуществления процесса TIG.

Контроллер цикла сварки формирует все необходимые временные интервалы и сигналы задания параметров внешней ВАХ регулятора, соответствующие каждой стадии процесса сварки, а также сигналы управления приводом подачи электродной проволоки и подачей защитного газа при MIG / MAG или подачей инертного газа при TIG.

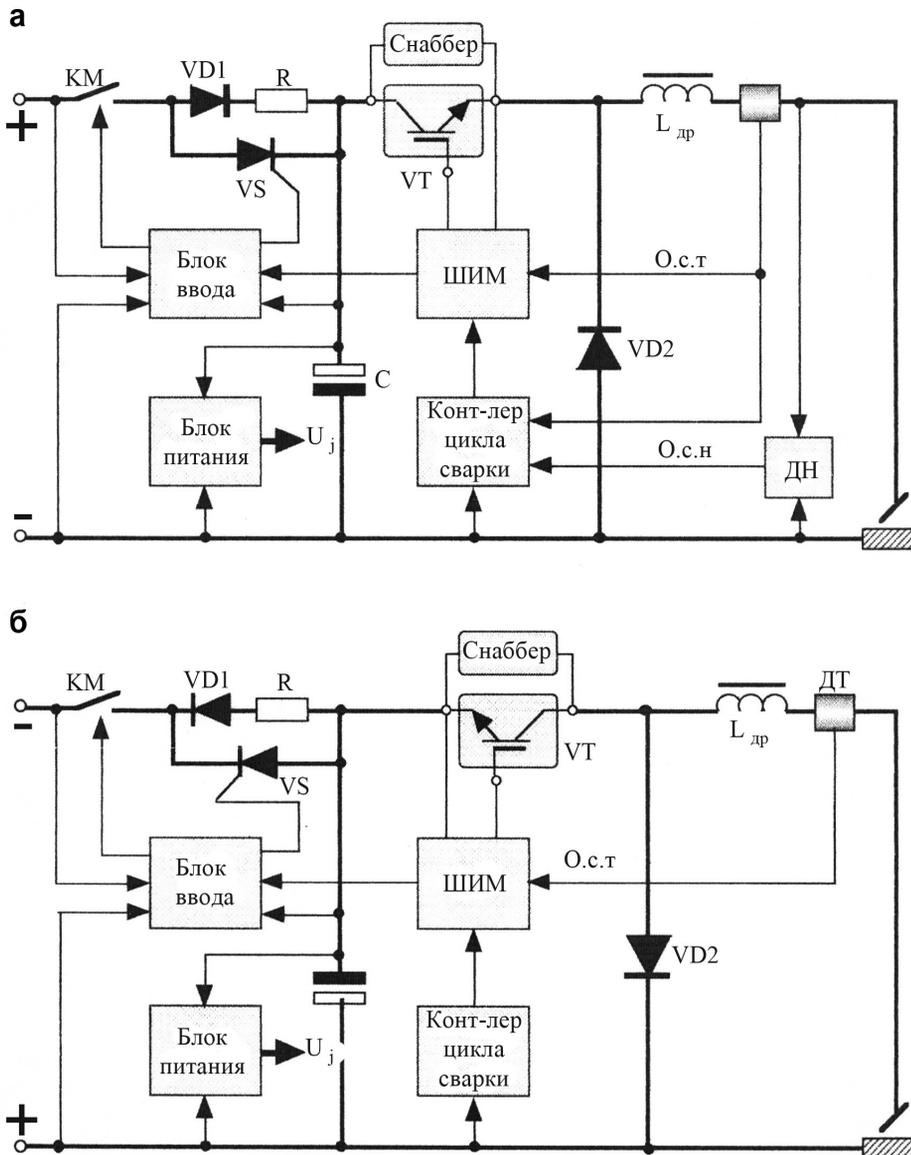


Рис. 1. Структурно-функциональные схемы регуляторов сварочного тока: а – для MMA и MIG / MAG, б – TIG

При MMA и/или MIG / MAG с датчиков ДТ и ДН на информационные входы контроллера цикла сварки поступают сигналы, пропорциональные сварочному току и напряжению на дуге. В результате обработки и преобразования этих сигналов, и сигнала установки сварочного тока или напряжения на дуге, в контроллере цикла сварки вырабатывается сигнал задания сварочного тока или напряжения на дуге, соответствующий текущей стадии плавления или переноса электродного металла и который в окончательно сформированном виде с выхода контроллера цикла сварки подается на управляющий вход ШИМ – контроллера, информационный вход которого соединен с информационным выходом датчика ДТ.

В регуляторах сварочного тока для TIG с выхода контроллера цикла сварки на управляющий

вход ШИМ – контроллера поступает сигнал, пропорциональный сигналу установки сварочного тока, а на информационный вход ШИМ – контроллера подается сигнал обратной связи по сварочному току с информационного выхода датчика ДТ.

Помимо узлов тракта регулирования, в состав СУ регуляторов входят блоки ввода и питания. Блок ввода контролирует процесс мягкого заряда буферного конденсатора С, формирует импульсное управление тиристором VS и обеспечивает развязку от влияния других ИСП в МСС, а также обеспечивает защиту регулятора от перегрузок по току нагрузки, от недопустимых значений напряжения питания и перегрева силовых полупроводниковых приборов, а при MMA и/или MIG / MAG – и от коротких замыканий в нагрузке, длительность которых превышает регламентированные значения. При срабатывании исполнительных элементов защиты силовая часть регулятора обесточивается с помощью входного коммутирующего устройства КМ.

Регуляторы сварочного тока с приведенными на рис. 1 структурами обеспечивают: высокое быстродействие тракта регулирования; формирование оптимизированных статических и динамических ВАХ во всем диапазоне плавного регулирования сварочного тока или напряжения на дуге; надежное возбуждение дуги касанием и устойчивое ее горение во всем технологически обоснованном диапазоне длины дуги; благоприятный перенос электродного металла при MMA и MIG / MAG; реализацию заданного цикла сварки и его элементов; стабильность заданных параметров режима сварки при внесении внешних возмущений; возможность при MMA и MIG / MAG коррекции ВАХ в зависимости от длины проводов сварочной цепи; возможность осуществления процессов сварки модулированным током.

КПД электронных регуляторов сварочного тока  $k_{PCT}$  определяется в основном активными потерями в элементах их силовой части и может быть рассчитан по формуле [8]:

$$k_{PCT} = I_D \times U_D / f(0,5C_{SN}U_{\Pi}^2 + E_{SW(ON)} + E_{SW(OFF)}) + I_D(U_D + \sqrt{1-d} \times U_{CE(SAT)} + \sqrt{1-d} \times U_F + d \times U_{VS}) + I_D \times U_D / I_D^2 \{R_0 + d(1-d)^2 \times R_{ESR}\} + P_{CY} \quad (4)$$

где  $f$  — частота преобразования (переключений);  $C_{SN}$  — емкость конденсатора снабберной цепочки;  $U_{\Pi}$  — напряжение питания регулятора;  $E_{SW(ON)}$  и  $E_{SW(OFF)}$  — энергия потерь на включение и выключение силового полупроводникового ключа, отнесенная на единичный импульс;  $d$  — относительная длительность открытого состояния силового полупроводникового ключа, равная  $U_D / U_{\Pi}$ ;  $U_{CE(SAT)}$  — прямое падение напряжения на силовом полупроводниковом ключе в его открытом состоянии;  $U_F$  и  $U_{VS}$  — прямое падение напряжения на открытых обратном диоде и тиристоре в их открытом состоянии;  $R_0$  — активное сопротивление обмотки дросселя  $L_{DR}$ ;  $R_{ESR}$  — эквивалентное активное сопротивление буферного конденсатора  $C$ ;  $P_{CY}$  — мощность, потребляемая СУ регулятора (не более 30 Вт).

Как видим из (4) основными факторами, влияющими на КПД электронных регуляторов сварочного тока, являются частота преобразования  $f$  и относительная длительность открытого состояния силового полупроводникового ключа  $d$ . На связанные с  $f$  динамические потери приходится 25–40% общих потерь в электронном регуляторе сварочного тока, поэтому в таких регуляторах, выполненных с использованием мощных IGBT — транзисторов или силовых IGBT — модулей, частота преобразования  $f$  обычно составляет 18–25 кГц, а при использовании мощных MOSFET — транзисторов или силовых MOSFET — модулей — 25–35 кГц. Выражение (4) позволяет сделать вывод о том, что чем меньше  $d$ , тем меньше КПД и наоборот.

Реально достижимые значения КПД электронных регуляторов сварочного тока при использовании IGBT — транзисторов или силовых IGBT — модулей составляют 84–91% при ММА и/или MIG/MAG и 79–85% при TIG. Появление в последние годы на рынке мощных MOSFET — транзисторов с низким сопротивлением канала «исток-сток» и положительным температурным коэффициентом этого сопротивления позволяет выполнить построение электронных регуляторов сварочного тока с несколько более высокими значениями КПД (на 2–4%) по сравнению с достигнутыми, что осуществляется путем выполнения силового полупроводникового ключа в виде параллельно включенных мощных MOSFET — транзисторов.

Реализация преимуществ МСС с электронными

регуляторами сварочного тока может быть осуществлена двумя путями: повышением эффективности использования находящихся в эксплуатации многопостовых выпрямителей; оптимизацией мощности и рабочего напряжения стационарных и мобильных многопостовых выпрямителей, и сечения магистральных или радиальных шинопроводов [7].

Возможность повышения эффективности использования находящихся в эксплуатации многопостовых выпрямителей заключается в том, что нагрузочная способность каждого из таких выпрямителей при использовании электронных регуляторов сварочного тока определяется по выражению [7]:

$$N = k_{PCT} \times I_{2НОМ} \times U_{2НОМ} / k_0 \times I_{ДНОМ} \times U_{ДНОМ} \times \sqrt{\frac{ПН}{100}} \quad (5)$$

где  $N$  — наибольшее число сварочных постов (регуляторов), которые могут быть подключены к многопостовому выпрямителю;  $I_{2НОМ}$  и  $U_{2НОМ}$  — номинальный ток нагрузки (А) и номинальное вторичное рабочее напряжение (В) многопостового выпрямителя;  $k_0$  — коэффициент одновременной работы сварочных постов;  $I_{ДНОМ}$  и  $U_{ДНОМ}$  — номинальные сварочный ток поста и напряжение на дуге; ПН — продолжительность нагрузки поста (в %). Например, если номинальный сварочный ток одного поста  $I_{ДНОМ} = 200$  А,  $k_0 = 0,65$ , а ПН = 60%, то для одного из наиболее популярных многопостовых выпрямителей ВДМ-1001 его нагрузочная способность в варианте балластных реостатов составит 10 постов ММА или 10 постов TIG, а в варианте электронных регуляторов сварочного тока — 18 постов ММА или 27 постов TIG.

Оснащение действующих МСС электронными регуляторами сварочного тока позволяет не только увеличить число одновременно работающих сварочных постов и при этом исключить их влияние друг на друга, но и в 1,8–2,7 раза уменьшить необходимое сечение проводов, соединяющих каждый сварочный пост с магистральными шинопроводами или непосредственно с многопостовым выпрямителем. Наибольший выигрыш в массе соединительных проводов может быть получен при радиальной схеме МСС.

Второй путь реализации преимуществ МСС с электронными регуляторами сварочного тока наиболее целесообразен для мобильных МСС, отличающихся фиксированным числом сварочных постов и характеризующихся мощностью электростанции, входящей в состав сварочного комплекса. Значение мощности  $P_{МС}$ , потребляемой МСС в случае использования электронных регуляторов сварочного тока, можно определить из выражения [7]:

$$P_{МС} = k_0 \times N \times I_{ДНОМ} \times U_{ДНОМ} \times \sqrt{\frac{ПН}{100}} / k_{PCT} \times k \quad (6)$$

Энергетическую эффективность мобильных МСС с электронными регуляторами сварочного тока можно продемонстрировать на следующем примере. При монтаже и ремонте магистральных и промышленных трубопроводов и резервуаров широко применяются четырех и восьми-постовые сварочные комплексы (например, АЭП-52 и АС-81 соответственно). Для энергоснабжения многопостового выпрямителя в этих комплексах используется электростанция (генератор переменного тока) мощностью 100 кВт [10], при этом обеспечивается работа восьми сварочных постов с балластными реостатами при  $I_{\text{дном}} = 200 \text{ А}$ ,  $k_0 = 0,8$  и ПН = 60%. В варианте электронных регуляторов сварочного тока для энергоснабжения такого же числа сварочных постов (8-ми) при  $k_0 = 0,8$  и ПН = 100% мощность, потребляемая МСС, составит 48,6 кВт, а при ПН = 60% — 37,4 кВт, т.е. для энергоснабжения восьми-постовой МСС может быть использована электростанция мощностью до 50 кВт.

В настоящее время в Украине и в др. странах разработан ряд моделей электронных регуляторов сварочного тока для применения в МСС [11]. Однако зарубежным сварочным конверторам DC-DC понижающего типа присущи существенные недостатки — они не адаптированы к условиям и требованиям отечественного сварочного производства, не имеют ряда необходимых опций, требуют значительных эксплуатационных затрат, характеризуются низкой ремонтпригодностью и высокой стоимостью. Среди предлагаемых рынком сварочных конверторов DC-DC, разработанных и изготовленных зарубежными фирмами, преобладают регуляторы (сварочные конверторы чопперного типа) для ММА и MIG / MAG [11], но в них не предусмотрена возможность осуществления режимов сварки модулированным током. На рынке зарубежного сварочного оборудования практически полностью отсутствуют модели сварочных конверторов DC-DC для TIG, что резко сужает технологические возможности МСС, используемых в энергетике, особенно в ядерной.

В НИЦ СКАЭ совместно с ИЭС в течение 2002–2006 гг. разработаны, спроектированы и запущены в промышленное производство различные модели электронных регуляторов сварочного тока (сварочных конверторов чопперного типа), в частности, РДЭ-256 УЗ.1 для ММА с диапазоном плавного регулирования сварочного тока от 20 до 265 А и РДГ — 201 УЗ.1 для TIG с диапазоном плавного регулирования сварочного тока от 8 до 260 А [12]. Опыт их эксплуатации, в т.ч. на АЭС и др. предприятиях отрасли атомной энергетики Украины, подтверждает высокую технологическую и энергетическую эффективность МСС с такими регуляторами.

При ММА с применением регуляторов РДЭ-256 УЗ.1 обеспечиваются мелкокапельный перенос

электродного металла; качественное формирование шва при сварке короткой и предельно короткой дугой электродами с любым типом покрытия; значительно облегчается сварка электродами разнородных и аустенитных сталей. Установлено, что при сварке модулированным током на 25–40% повышается производительность сварки в пространственных положениях, отличных от нижнего; измельчается первичное зерно металла шва; улучшаются механические свойства сварных соединений; заметно облегчается выполнение корня шва, в т.ч. при сварке с увеличенным зазором, при этом достигается качественное формирование обратного валика; упрощается техника сварки; становится возможным использование аустенитных электродов без их перегрева и расплавления до обычного огарка; обеспечивается возможность сварки «сверху-вниз» в вертикальном положении электродами с любым типом покрытия. По данным А.К. Царюка и Л.С. Захарова (ИЭС) применение модулированного тока при ММА жаропрочных сталей оказывает положительное влияние на формирование наплавленного металла, его структуру и размеры зоны термического влияния; позволяет избежать образования  $\beta$ -феррита при повышенном содержании хрома в наплавленном металле или минимизировать это образование в необходимых пределах, что также положительно влияет на служебные свойства сварных соединений.

В регуляторах РДЭ-256 УЗ.1 предусмотрены все опции, свойственные современным инверторным источникам сварочного тока для ММА: «горячий старт» («hotstart»), «форсирование дуги» («forcearc»), «антипримерзание электрода» («antistick»). В комплект поставки РДЭ-256 УЗ.1 входит портативный пульт дистанционного управления, позволяющий сварщику оперативно, непосредственно в процессе сварки плавно изменять рабочее значение сварочного тока в пределах до  $\pm 10\%$  от предварительно заданного значения.

Применение регуляторов сварочного тока РДГ — 201 УЗ.1 при TIG позволяет реализовать все технологически обоснованные циклы TIG в режимах управления 2Т и 4Т; значительно повысить качество формирования швов, особенно корневых, при сварке с подачей присадочной проволоки и без нее (преимущественно с использованием режимов модуляции сварочного тока) неповоротных стыков трубопроводов и др. металлоконструкций; практически устранить образование «утяжин» при сварке стыков трубопроводов из аустенитных сталей; уменьшить тепловложение в основной металл; упростить технику сварки и сократить продолжительность подготовки квалифицированных сварщиков.

Регуляторы РДГ — 201 УЗ.1 для TIG обеспечивают по команде сварщика «Пуск»: продувку зоны сварки инертным газом («pregas») перед на-

чалом процесса сварки, эффективное возбуждение дуги на минимальном сварочном токе (до 8 А), автоматическое плавное нарастание сварочного тока от минимального до рабочего значения в начальной стадии сварки, стабилизацию заданных значений сварочного тока при воздействии внешних возмущений; по команде — «Стоп»: автоматический плавный спад сварочного тока до нуля или минимального значения в завершающей стадии сварки («заварку кратера») и обдув зоны сварки инертным газом непосредственно после этого в течение заданного интервала времени («postgas»).

Помимо отмеченных особенностей, в регуляторах сварочного тока РДЭ-256 УЗ.1 и РДГ-201 УЗ.1 предусмотрены возможности программирования параметров цикла и режима сварки, их контроля с помощью стрелочного индикатора, а также возможность осуществления низкочастотной модуляции сварочного тока с раздельным и независимым ступенчатым регулированием длительностей импульсов и пауз сварочного тока, что существенно расширяет технологические возможности этих регуляторов. Следует заметить, что практически у всех аналогов регулятора РДЭ-256 УЗ.1 для ММА подобная опция отсутствует.

Ввиду того, что ММА и MIG/MAG, как правило, осуществляются сварочным током «обратной» полярности («плюс» на электроде), а TIG — сварочным током «прямой» полярности («минус» на электроде), в сложившейся отечественной практике на объектах энергетики и на др. предприятиях индустрии предусмотрено существование двух независимых друг от друга МСС — каждая со своим централизованным источником питания (многопостовым выпрямителем) и шинопроводом полярности, к которому подключаются соответствующие сварочные посты. При этом общим для обеих МСС является непосредственно сам объект сварки (в большинстве случаев глухо за-

земленный) — например, все металлоконструкции энергоблока АЭС. Структурная схема такой организации двуполярных МСС приведена на рис. 2.

Общий вид регулятора сварочного тока РДГ-201 УЗ.1 (РДЭ-256 УЗ.1 имеет незначительные отличия) показан на рис. 3, а основные технические характеристики регуляторов сварочного тока РДЭ-256 УЗ.1 и РДГ-201 УЗ.1 приведены в табл. 1.

К настоящему времени в НИЦ СКАЭ завершаются работы по модернизации существующих отечественных электронных регуляторов сварочного тока в направлении улучшения их потребительских свойств за счет сокращения числа органов управления и введения цифровых дисплеев, а также расширения технологических возможностей, в частности, регулятора РДЭ-256 УЗ.1.

В НИЦ СКАЭ разработан и спроектирован автономный блок подачи электродной проволоки

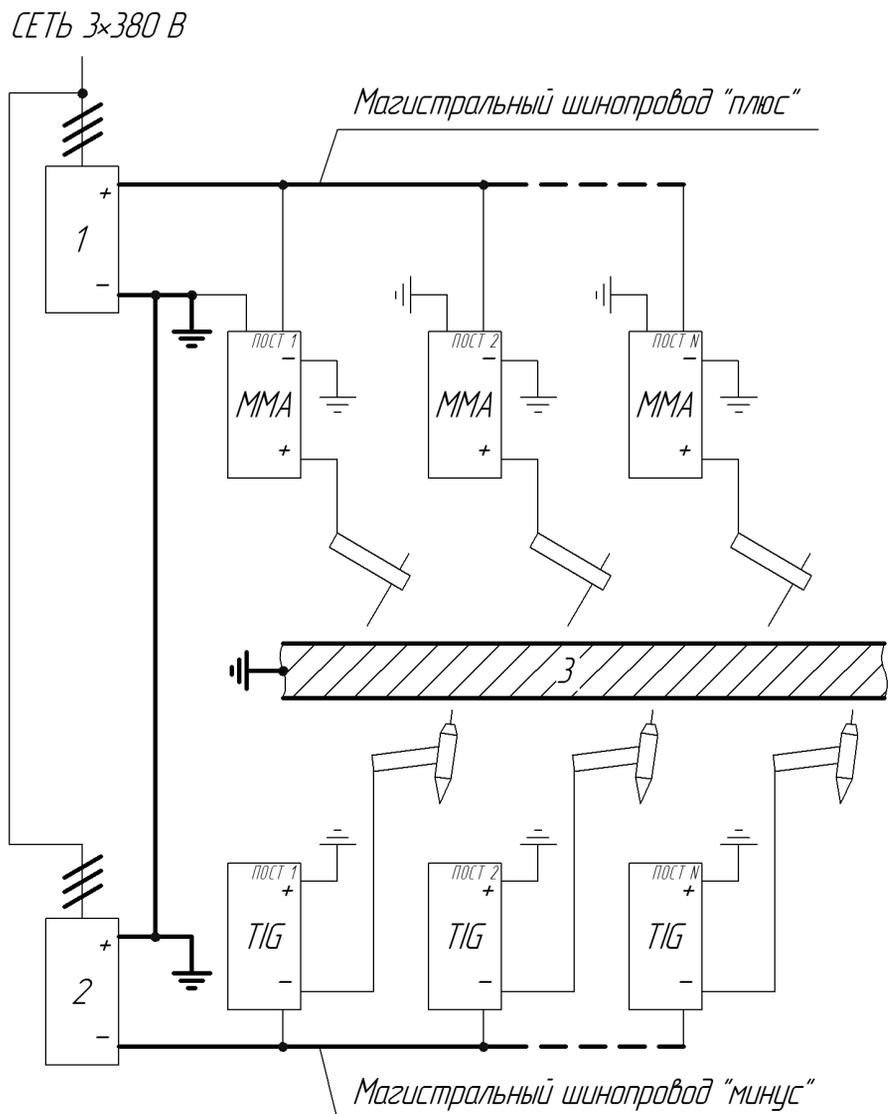


Рис. 2. Структурно-функциональная схема комплекса двух независимых МСС для ММА и TIG (характерная для объектов энергетики): 1, 2 — многопостовые сварочные выпрямители; 3 — свариваемое изделие



Рис. 3. Общий вид регулятора сварочного тока РДГ – 201 УЗ.1

ПДГЦ-256 УЗ.1 для процессов MIG/MAG, проведено опробование экспериментального образца этого блока и подготовка его к промышленному изготовлению. Особенностью разработанного блока ПДГЦ-256УЗ.1 является его питание выходным напряжением многопостового выпрямителя (напряжением на магистральных шинопроводах МСС). Структурно-функциональная схема ПДГЦ-256 УЗ.1 представлена на *рис. 4*, а его основные технические характеристики – в *табл. 2*.

В состав блока ПДГЦ-256 УЗ.1 входят модули питания, управления, контроллера привода подачи электродной проволоки; тяговый низковольтный электродвигатель постоянного тока, датчик частоты вращения вала электродвигателя (энкодер); механизмы подачи электродной проволоки толкающего типа и фиксации, и вращения кассеты с электродной проволокой.

Модуль питания ПДГЦ-256 УЗ.1 выполнен в виде высокочастотного преобразователя DC-DC с гальванической развязкой входа и выхода и со стабилизацией выходного низковольтного напряжения постоянного тока, которое предназначено для питания модулей управления, контроллера привода подачи электродной проволоки и тягового низковольтного электродвигателя.

Модуль управления обеспечивает автоматическое включение/отключение привода подачи электродной проволоки в зависимости от стадии процесса сварки и управление направлением вращения вала электродвигателя привода подачи, а также работу «отсекателя» газа (газового клапана) системы газоснабжения сварочного поста.

В качестве модуля контроллера привода подачи электродной проволоки используется одна из модификаций модуля контроллера привода

**Таблица 1. Основные технические характеристики регуляторов сварочного тока РДЭ – 256 УЗ.1 и РДГ – 201 УЗ.1**

Наименование показателя	Значение	
	Тип регулятора сварочного тока	
	РДЭ-256 УЗ.1	РДГ-201 УЗ.1
Номинальный сварочный ток, А	250	
Диапазон плавного регулирования сварочного тока: нижнее значение, не более, А верхнее значение, не менее, А	20 265	8 260
Продолжительность нагрузки (ПН): при наибольшем сварочном токе, не менее, % при сварочном токе, не превышающем номинальный, %	60 100	
Диапазон плавного регулирования длительности стартового импульса (интервала времени «hotstart»), в пределах, с	0,5–1,5	-
Диапазон плавного регулирования длительности продувки зоны сварки инертным газом (интервала времени «pregas»), в пределах, с	-	5–25
Диапазон плавного регулирования длительности нарастания сварочного тока от минимального до рабочего значения в начальной стадии процесса сварки, в пределах, с	-	0,5–5,0
Диапазон ступенчатого раздельного и независимого регулирования длительностей импульсов и пауз сварочного тока в режиме его модуляции, с	0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45	
Множитель длительности импульсов и пауз сварочного тока в режиме его модуляции	×2	×5
Диапазон плавного регулирования длительности спада сварочного тока (длительности «заварки кратера») в завершающей стадии процесса сварки, в пределах, с	-	0,5–5,0
Диапазон плавного регулирования длительности обдува зоны сварки инертным газом (интервала времени «postgas»), в пределах, с		15–25
Коэффициент полезного действия (КПД), не менее, %	87	80
Габаритные размеры (Д×Ш×В), не более, мм	515 × 281 × 353	
Масса, не более, кг	24	

**Таблица 2. Основные технические характеристики блока подачи электродной проволоки ПДГЦ-256 УЗ.1**

Наименование показателя	Значение
Номинальная мощность тягового электродвигателя, Вт	90–130
Номинальное напряжение питания электропривода, постоянного тока, В	24
Напряжение питания (входное напряжение) постоянного тока блока подачи электродной проволоки, в пределах, В	55–85
Диаметр электродной проволоки сплошного сечения, в пределах, мм	0,8–1,6
*Диапазон плавного регулирования скорости подачи электродной проволоки: нижнее значение, не более, м/ч верхнее значение, не менее, м/ч	90 260
Уровень автоматического ограничения тока (защиты по потребляемому току) электропривода, в пределах, А	6–8
Масса (без электродной проволоки), не более, кг	12

*Примечание. \*Диапазон плавного регулирования скорости подачи электродной проволоки может быть расширен за счет сменных роликов.*

ИЦ616.20.11.000, имеющего высокие показатели функциональной и эксплуатационной надежности, способного обеспечивать требуемую стабильность заданной скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока, необходимый диапазон регулирования скорости, и являющегося унифицированным узлом сварочного оборудования, разработанного в НИЦ СКАЭ.

СЕТЬ 3×380 В

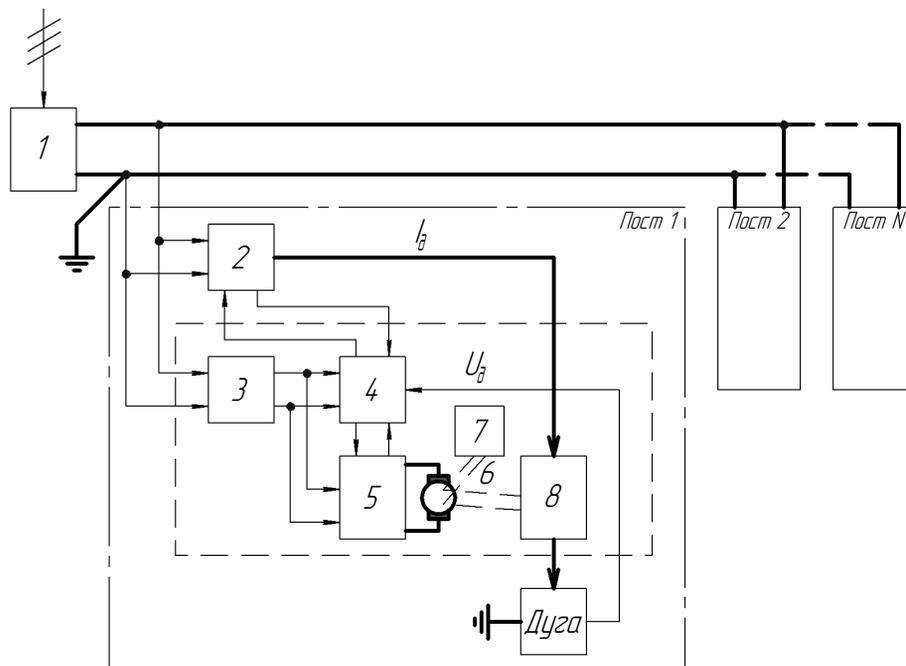


Рис. 4. Структурно-функциональная схема блока подачи электродной проволоки ПДГЦ - 256 УЗ.1: 1 – многопостовый сварочный выпрямитель; 2 – электронный регулятор сварочного тока; модули: 3 – питания, 4 – управления, 5 – контроллера привода подачи электродной проволоки; 6 – тяговый низковольтный электродвигатель постоянного тока; 7 – энкодер, связанный со вторым выходом вала тягового электродвигателя; 8 – механизм подачи электродной проволоки

Тяговый электродвигатель блока ПДГЦ-256 УЗ.1 представляет собой низковольтный коллекторный электродвигатель с постоянными магнитами, выполненный с двумя выходами вала. Один из выходов кинематически связан со входом понижающего редуктора механизма подачи электродной проволоки, а второй – с оптоэлектрическим энкодером, с помощью которого осуществляется обратная связь по скорости вращения вала электродвигателя. Тяговый электродвигатель управляется модулем контроллера привода подачи электродной проволоки. Выходные импульсные сигналы энкодера поступают на вход интегрирующей цепочки модуля контроллера привода ИЦ616.20.11.000. Образующееся вследствие интегрирования напряжение постоянного тока, среднее значение которого пропорционально частоте вращения вала тягового электродвигателя, поступает в качестве сигнала обратной связи на информационный вход специализированного ШИМ – контроллера модуля контроллера привода ИЦ616.20.11.000.

Механизм подачи электродной проволоки толкающего типа блока ПДГЦ-256 УЗ.1 содержит кинематически связанный с выходным валом тягового электродвигателя понижающий шестеренчатый редуктор, две пары роликов, один из которых в каждой паре ведущий, а другой – ведомый, и механизм прижима ведомых роликов к электродной проволоке.

Разработаны и спроектированы два варианта исполнения регулятора сварочного тока для ММА и MIG/MAG. Один из вариантов (РДЭ-256МП УЗ.1) предполагает совместную работу с автономным мобильным блоком подачи электродной проволоки ПДГЦ-256 УЗ.1, в другом (РДЭ-256УПУЗ.1) – собственно регулятор сварочного тока и блок подачи электродной проволоки объединены в единую конструкцию. Поставка той или иной модели регулятора сварочного тока для ММА и/или MIG/MAG определяется требованиями Заказчика.

В качестве централизованного источника питания постоянного тока МСС с электронными регуляторами сварочного тока могут использоваться находящиеся в эксплуатации многопостовые выпрямители серий ВДМ, ВКСМ, ВМГ и их аналоги, имеющие жесткую внешнюю ВАХ, номинальное напряжение холостого хода в пределах от 60 до 90 В, вторичное рабочее напряжение при полной нагрузке в пределах от 55 до 85 В, коэффициент пульсаций выходного напряжения не более 12% и номинальную частоту этих пульсаций 300 Гц. При сравнительно небольшом числе сварочных постов в качестве многопостовых могут быть применены выпрямители сварочные ВС-300Б или ВС-400 либо им аналогичные.

Исходя из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. По своим технологическим возможностям, функциональным, энергетическим характеристикам и показателям отечественные МСС, построенные на базе электронных регуляторов сварочного тока, значительно превосходят МСС с балластными реостатами, имеют ряд ощутимых преимуществ по сравнению с МСС зарубежного производства. Могут обеспечить существенное повышение производительности сварочных работ и качества сварных соединений при монтаже и ремонте трубопроводов, иных металлоконструкций объектов энергетики (в т.ч. ядерной) и др. отраслей экономики, при этом динамические свойства каждого сварочного поста не отличаются от свойств индивидуальных сварочных инверторных источников питания.

2. Разработанные, спроектированные и изготавливаемые в НИЦ СКАЭ МСС с электронными регуляторами сварочного тока (или регуляторы сварочного тока) полностью исключают влияние сварочных постов друг на друга при их совместной работе и обеспечивают выполнение самых жестких требований, предъявляемых к оборудованию для ММА, TIG и MIG/MAG. Указанные МСС позволяют сварщикам производить сварочные работы на значительном удалении от централизованного многопостового выпрямителя и от других сварочных постов, осуществлять управление процессом сварки непосредственно на своем рабочем месте. Возможно также реализация режимов, упрощающих технику сварки и сокращающих продолжительность подготовки квалифицированных сварщиков.

3. В качестве централизованных источников питания разработанных МСС с электронными регуляторами сварочного тока могут применяться любые из находящихся в эксплуатации стационарных и мобильных многопостовых выпрямителей, а при создании и комплектации новых МСС — современные многопостовые выпрямители отечественного производства (например, ВДМ-6303П, ВДМ-1202П разработки и производства ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона или их аналоги).

4. При необходимости осуществления сварки или родственных процессов, требующих сварочного тока, превышающего номинальный ток одного поста, возможно использование параллельного подключения двух или более сварочных постов на общую нагрузку.

#### Литература

1. Лебедев В.К., Заруба И.И., Андреев В.В. Централизованное питание постов током при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка.— 1973.— № 3.— С. 62–64.
2. Бункин П.Я., Донской А.В. Многопостовые сварочные системы — Л.: Судостроение, 1985.— 228 с.
3. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В.В. Смирнова.— Л.: Энергоатомиздат.— 1986.— 656 с.
4. Драбович Ю.И., Лебедев А.В., Кравченко В.В. и др. Регулирование режимов механизированной сварки в СО<sub>2</sub> при использовании многопостовых источников тока // Автомат. сварка.— 1987.— № 10.— С. 70–71.
5. Патон Б.Е., Лебедев А.В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Там же.— 1988.— № 11.— С. 1–5.
6. Гладков Э.А., Фетисов Г.П., Синельников Н.Г. Совершенств. управления процессами дуговой сварки на базе высокочаст. преобразоват. энергии // Свароч. пр-во.— 1984.— № 3.— С. 13–16.
7. Махлин Н.М., Коротынский А.Е., Богдановский В.А. и др. Электронные регуляторы сварочного тока для МСС//Там же.— 2004.— № 5.— С. 13–18.
8. Коротынский А.Е., Махлин Н.М., Богдановский В.А. К расчету электрон. регуляторов сварочного тока для МСС//Автомат. сварка.— 2002.— № 12.— С. 19–27.
9. Богдановский В.А., Махлин Н.М., Полосков С.И. Высокоэконом. МСС с расширен. технологичес. возможн. // Труды межд. научно-практ. конф. 07–11.10.2008 г. «Экология окружающей среды — 2008. Энерго- и ресурсосбереж. в промышл. энергетике и на транспорте».— К.: ИЭС им. Е. О. Патона.— 2008.— С. 53–59.
10. Зайцев К.И., Шмелева И.А. Сварка магистральных и промысловых трубопроводов и резервуаров: Учебник для техникумов — М.: Недра, 1985.— 231 с.
11. <http://www.lincolnelectric.com>.
12. Коротынский А.Е., Махлин Н.М., Полосков С.И. Высокоэффективные МСС с расширен. технологичес. возможн. // Сварка и диагностика.— 2009.— № 1.— С. 5–8.

● # 1054

**За информацией о поставке оборудования  
Вы можете обратиться:**

**НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ**

**Тел./факс: +38 (044) 287-55-29**

**E-mail: Proskudin@ntk.in.ua, office@stc-paton.com**

**www.stc-paton.com**

# Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними. Полости. Включения.

И.А. Рябцев, д.т.н., И.И. Рябцев, к.т.н., А.А. Бабинец, к.т.н., ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (Киев), Э.В. Турык, д.т.н., Instytut Spawalnictwa (Гливице, Польша)

В предыдущей публикации [1], посвященной дефектам наплавленного металла, основное внимание было уделено различного вида трещинам. В данной статье описаны причины образования и методы борьбы с различными полостями и включениями, характерными для наплавки. Дефекты в виде полостей и включений классифицированы в соответствии с международным стандартом ISO 6520-1:2007 [2] и его аналогом ГОСТ Р ИСО 6520-1:2012 [3].

## Полости (Cavities; индексы 200–203)

Полости различной формы в наплавленном слое (200) классифицируют следующим образом [2, 3]:

201 – газовые полости (gas cavities), образованные задержанным газом, выделяющимся при кристаллизации;

202 – усадочные раковины (shrinkage cavities), т.е. полости образованные в результате усадки во время кристаллизации;

203 – микроусадки (micro-shrinkage cavities) – усадочные раковины, видимые исключительно под микроскопом.

Подгруппа 201 включает газовые поры (gas pores, индекс 2011), под которыми понимают газовые полости практически сферической формы. Равномерная пористость (uniformly distributed porosity, индекс 2012) – это ряд газовых пор, распределенных сравнительно равномерно в наплавленном металле. Группу газовых пор, имеющих беспорядочное геометрическое расположение (clustered (localized) porosity), обозначают индексом 2013 (рис. 1, а-в) [2, 3].

К этой же подгруппе относят свищи (worm-hole, индекс 2016) – трубчатые полости в наплавленном металле, образованные выходящим газом (рис. 1, г). Форму и положение свищей определяет про-

цесс кристаллизации и источник газа. Некоторые свищи, как и поры, могут выходить на поверхность наплавленного металла.

Подгруппа 202 – усадочные раковины, включает междендритные усадочные раковины (interdendritic shrinkage, индекс 2021), образующиеся между дендритами во время кристаллизации; кратерные усадочные раковины на конце наплавленного валика, которые не устраняются при наплавке следующего валика (crater pipe, индекс 2024); незаваренный кратер в конце наплавленного валика (end crater pipe, индекс 2025) (рис. 2, а-в) [2, 3].

В подгруппу 203 входят: междендритная микроусадка (interdendritic microshrinkage, индекс 2031) – удлиненная микроусадочная раковина по границам зерен, образовавшаяся между дендритами во время кристаллизации; транскристаллическая микроусадка (transgranular microshrinkage, индекс 2032) – удлиненная микроусадочная раковина, пересекающая зерна во время кристаллизации.

В большинстве случаев полости (поры) в наплавленном слое можно обнаружить с помощью рентгенографического или ультразвукового контроля. На рис. 3 [4] представлена рентгенограмма слоя, наплавленного методом MIG сплошной бронзовой проволокой, со скоплениями пор (2013).

Газовые полости (поры), как и трещины, могут быть допустимыми или недопустимым дефектом в наплавленном слое. Пример допустимых поверхностных пор (surface pore, индекс 2017) в наплавленном слое износостойких биметаллических листов представлен на рис. 4 [5–7].

В других случаях, например в слое, наплавленном на ответственные чугунные детали, которые эксплуатируются в условиях высокого контактно-

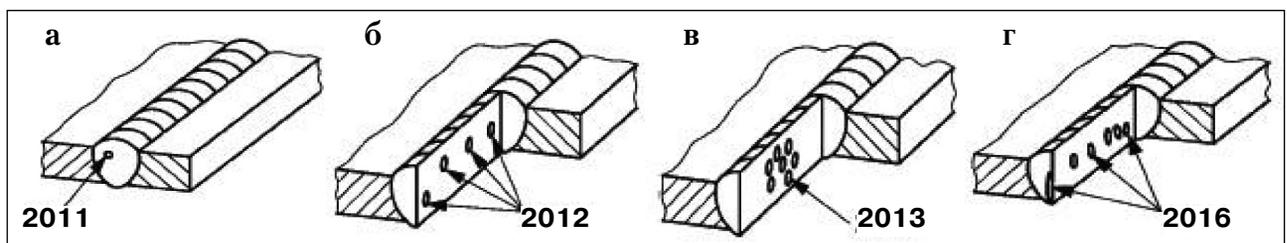


Рис. 1. Обозначение газовых пор в соответствии со стандартами [2, 3]: а – единичная пора (2011); б – равномерная пористость (2012); в – скопление пор (2013); г – свищи (2016)

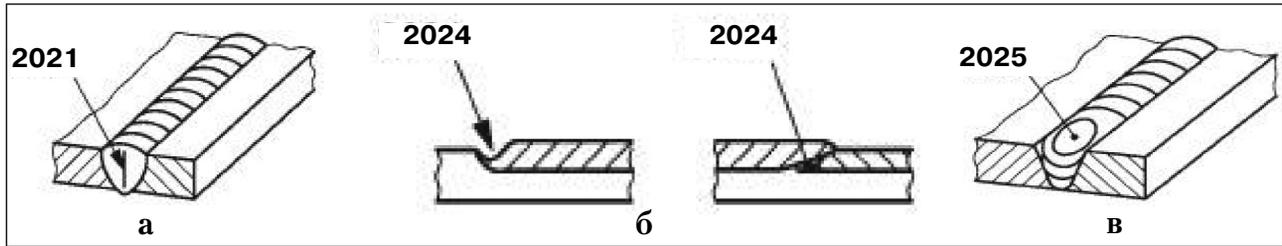


Рис. 2. Обозначение усадочных раковин в соответствии со стандартами [2, 3]: а – междендритная (2021); б – кратерная (2024); в – незаваренный кратер (2025)

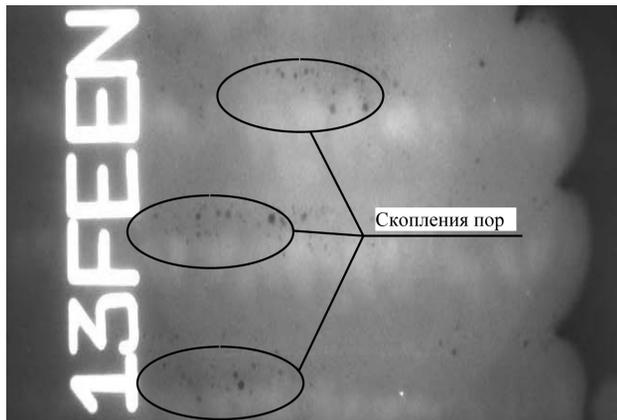


Рис. 3. Скопления пор (2013) в слое, наплавленном методом MIG сплошной бронзовой проволокой [4]

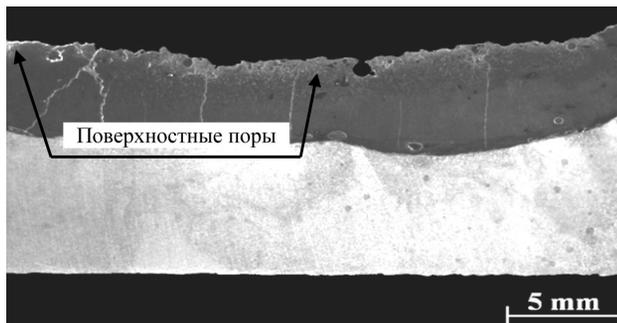


Рис. 4. Допустимые поверхностные поры (2017) в износостойком слое биметаллического листа, наплавленного высокохромистым чугуном [5-7]

го давления и трения металла по металлу, внутренние газовые поры (2011) не допускаются (рис. 5, а-в).

Различные газовые полости (поры) образуются, если в период кристаллизации сварочной ванны происходит сильное газообразование, и пузырьки газов не успевают удаляться из сварочной ванны. Газы образуются в связи с выделением из металлического расплава пересыщающих его водорода и азота; химических реакций в расплавленном металле, при которых продуктами реакции являются газы, в основном, оксид углерода [8].

Образование пор, связанных с водородом и азотом, обусловлено изменением их растворимости при изменении тем-

пературы. В жидком состоянии железо и его сплавы могут растворять значительные количества водорода и азота. При снижении температуры вплоть до температуры затвердевания растворимость этих газов снижается постепенно, и образовавшиеся пузырьки газов свободно всплывают в жидкой ванне. При затвердевании металла растворимость азота и водорода в нем снижается скачкообразно (рис. 6).

Более низкая растворимость водорода и азота в твердом металле по сравнению с их растворимостью в жидком металле ведет к обогащению расплава этими газами, что способствует зарождению газовых пузырьков на поверхности раздела жидкого и твердого металлов. Пока существует жидкая сварочная ванна газовые пузырьки непрерывно из нее удаляются. Если скорость удаления газов меньше, чем скорость их накопления в жидкой ванне, то не все пузырьки успевают всплыть и часть из них остается в наплавленном металле в виде газовых полостей (пор).

Водород поступает в атмосферу дуги из ржавчины, влаги и др. загрязнений, находящихся на поверхности наплавливаемого и электродного (присадочного) металла, защитного газа или материалов, входящих в состав покрытия электродов, шихты порошковых проволок и лент или флюса. Ограничить поступление водорода можно зачисткой наплавливаемого металла от всех загрязнений, наплавочные материалы необходимо надежно упаковывать и хранить

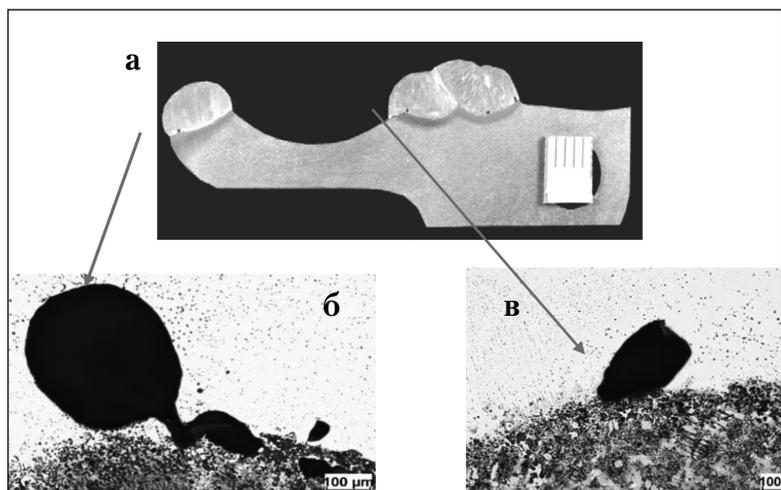


Рис. 5. Недопустимые внутренние газовые поры (2011) в слое, наплавленном на ответственные чугунные детали: а – макроструктура наплавленной детали; б, в – газовые поры в наплавленном металле на границе сплавления

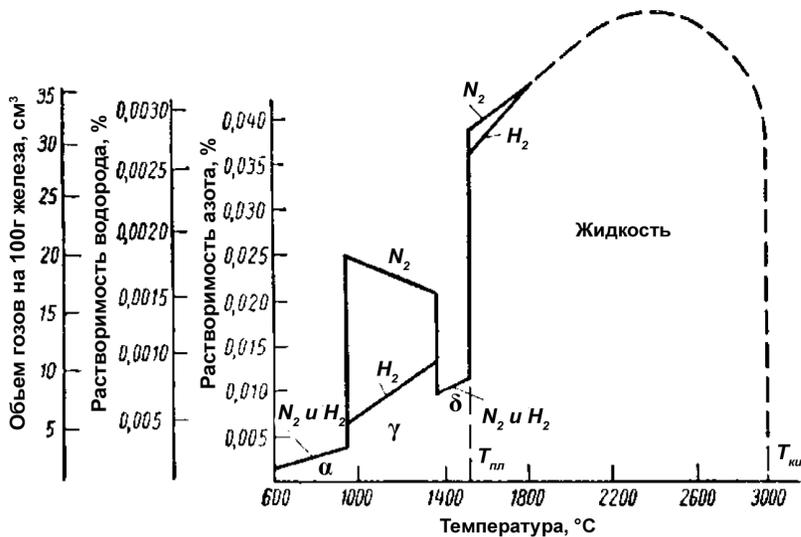
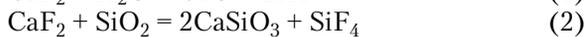


Рис. 6. Растворимость водорода и азота в твердом и жидком железе [8]

в сухом помещении, перед наплавкой эти материалы должны быть просушены и прокалены в соответствии с технической документацией.

Еще одна мера борьбы с водородной пористостью в наплавленном металле — снижение парциального давления водорода и водяного пара за счет связывания водорода в термически стойкий нерастворимый в металле фторид водорода HF. Возможны такие реакции в покрытиях, флюсах и газовой фазе:



В основном, связывание водорода в HF идет по реакциям (3 и 4), однако, возможно образование HF и непосредственно по реакции (1).

В состав шихты наплавочных порошковых проволок и лент для снижения вероятности появления пор рекомендуется вводить кремнефтористый натрий [9], который полностью разлагается при 720 °C по реакции:

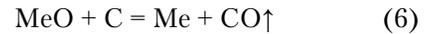


Дальнейшее связывание водорода в HF идет по реакциям (3 и 4).

Азот поступает в сварочную ванну из окружающей атмосферы, основного металла и наплавочных материалов. Чтобы ограничить доступ азота к сварочной ванне, необходимо применять надежную газовую или шлаковую защиту. Содержание азота в основном металле и в наплавочных материалах не должно превышать допустимых пределов. Для связывания азота в стойкие нитриды можно применять легирование наплавленного металла титаном, алюминием, цирконием и др. нитридообразующими элементами.

Поры от оксида углерода могут быть результатом недостаточной раскисленности металла сва-

рочной ванны. Оксид углерода может образовываться в результате взаимодействия углерода с оксидами металлов либо непосредственно в результате реакции углерода с кислородом, которые могут находиться в жидкой ванне:



Образующийся оксид углерода может дать начало зародышам газовых пузырьков или же выделяться в уже существующие пузырьки других газов.

Чтобы избежать пористости от оксида углерода, в сварочную ванну вводят раскислители — элементы с высоким сродством к кислороду. Количество растворенного в жидком металле кислорода будет тем мень-

ше, чем выше химическое сродство к кислороду данного элемента и больше его концентрация в расплаве. Наиболее сильными раскислителями являются титан, алюминий, кремний. При недостаточной их концентрации основные реакции раскисления будут происходить за счет этих элементов, и образование оксида углерода может быть в значительной мере подавлено.

Уменьшить вероятность образования пор можно также за счет технологических мер. Опытным путем установлено, что минимальное количество пор образуется при наплавке постоянным током прямой полярности.

Если образование и выделения газов при наплавке происходит в период, когда сварочная ванна находится в жидком состоянии, и протекает интенсивно, то пузырьки газов успевают полностью удалиться из сварочной ванны. Их выделение не только не приводит к образованию газовых полостей, но и оказывает рафинирующее действие на сварочную ванну, снижая ее газонасыщенность.

Большое значение имеет скорость кристаллизации сварочной ванны. При ее увеличении растет вероятность того, что пузырьки газов не успеют всплыть и образуются поры. По этой причине увеличение скорости наплавки и снижение тока наплавки увеличивает пористость. На процесс поробразования влияет также скорость кристаллизации (рис. 7). При малой скорости кристаллизации пузырьки газа успевают всплыть, а при большой — часть пузырьков газа не успевает всплывать и остается в наплавленном металле в виде пор.

Есть некоторые особенности образования пор при дуговой наплавке самозащитными порошковыми проволоками. В этом случае появление пор в значительной мере зависит от напряжения дуги. Увеличение напряжения дуги ухудшает защиту



Рис. 7. Схема всплывания пузырьков газа при малой и большой скорости кристаллизации [9]

сварочной ванны от азота воздуха, и в наплавленном металле появляются поры. Отсутствие пор и хорошее формирование наплавленного металла при заданном токе можно обеспечить лишь в определенных, достаточно узких диапазонах напряжений. При этом оптимальные режимы наплавки для каждой проволоки могут быть различными. В качестве иллюстрации на рис. 8 показано влияние напряжения дуги на пористость наплавленного металла при наплавке самозащитными проволоками с одинаковым содержанием металлической части шихты, но с разным составом газшлакообразующих материалов [10].

Некоторое значение для предотвращения пористости имеет и форма ванны: из широкой и мелкой ванны газы удалить легче и быстрее, чем из глубокой и узкой.

**Твердые включения (Solid inclusion, индексы 300–304)**

Твердые включения в наплавленном металле это инородные вещества небольшого объема неметаллического или металлического происхождения. К неметаллическим относятся шлаковые (slag inclusion, индекс 301), флюсовые (flux inclusion, индекс 302) и оксидные (oxide inclusion, индекс 303) включения, а к металлическим (metallic inclusion, индекс

304) относят включения вольфрама (3041), меди (3042) или других металлов (3043) [2, 3].

Шлаковые включения, также как флюсовые, оксидные и металлические включения могут быть линейными (3011), единичными (3012) или хаотичными скоплениями (3013) (рис. 9, а-в) [2, 3].

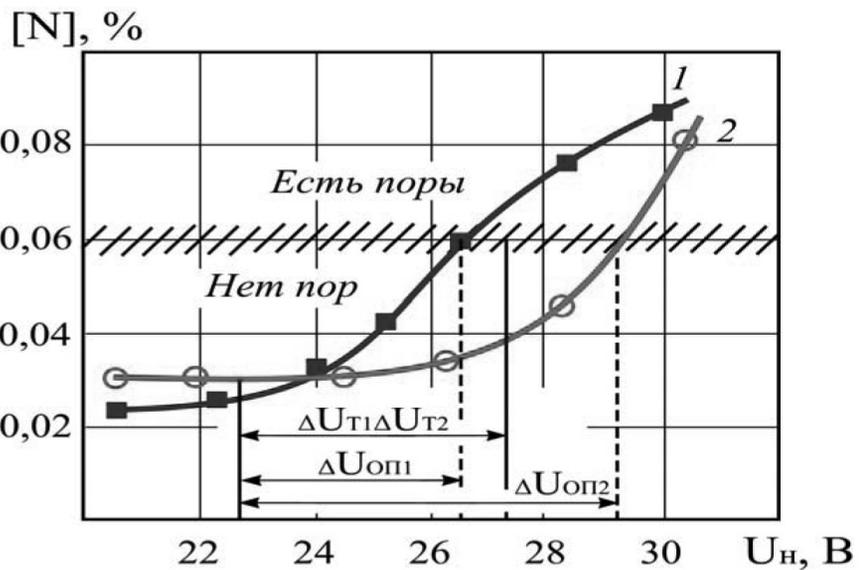


Рис. 8. Влияние напряжения дуги на содержание азота и образование пор в металле, наплавленном самозащитными порошковыми проволоками 1 и 2 с различным содержанием компонентов: 1 – рутил, мрамор, флюорит; 2 – рутил, флюорит, фторцирконат кальция, слюда.  $\Delta U_{T1}$ ,  $\Delta U_{T2}$  и  $\Delta U_{оп1}$ ,  $\Delta U_{оп2}$  – рабочий и критический диапазоны напряжений для проволок 1 и 2; ток – 300 А

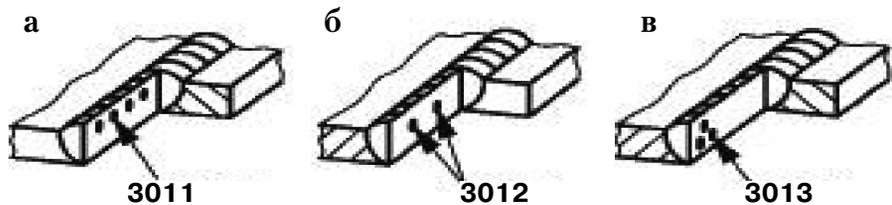


Рис. 9. Обозначение шлаковых включений в соответствии со стандартами [2, 3]: а – линейные (3011); б – единичные (3012); в – хаотичные скопления (3013)

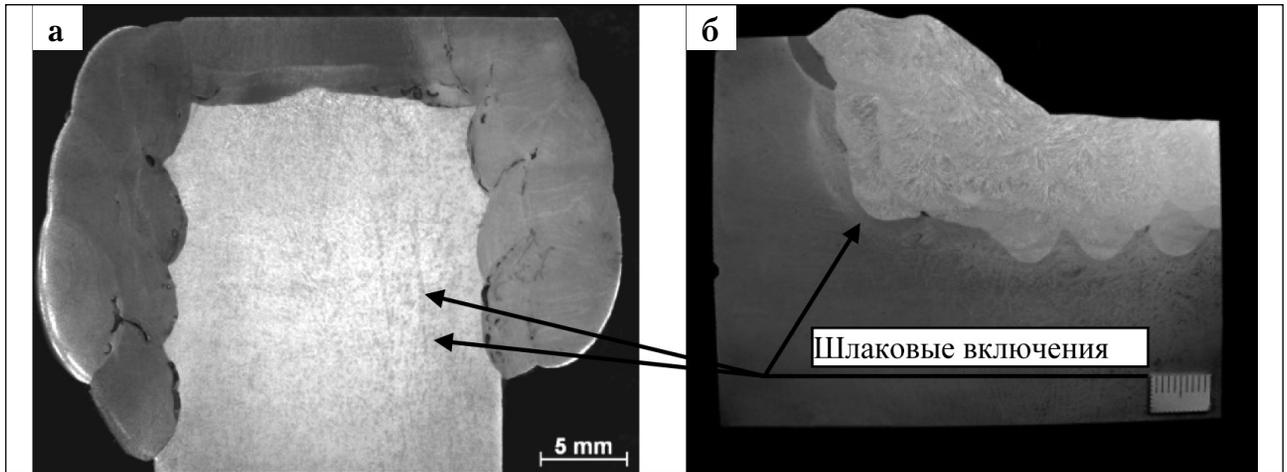


Рис. 10. Макроструктура поперечного сечения: а - наплавленной оправки [5], б - кранового колеса со шлаковыми включениями (301) [11]

Шлаковые включения могут образовываться в сварных швах (наплавленном металле) при ручной дуговой сварке или наплавке штучными электродами, при сварке или наплавке самозащитными порошковыми проволоками (рис. 10, а) и при автоматической наплавке под флюсом (рис. 10, б) [11].

Причиной появления шлаковых включений является чаще всего плохая зачистка наплавленного слоя от шлака перед наплавкой следующего слоя, сильная адгезия шлака к наплавленному металлу предыдущего слоя, подрезы, а также затруднения всплывания шлака из кристаллизующегося металла сварочной ванны.

Флюсовые включения — это частицы нерасплавленного флюса, попавшие в наплавленный слой.

Оксидные включения — включения оксидов кремния, марганца, железа и т.п., которые появляются в наплавленном металле в результате плохой защиты сварочной ванны от окружающей атмосферы или в результате обменных окислительно-восстановительных реакций.

Включения вольфрама встречаются при аргонодуговой наплавке неплавящимся вольфрамовым электродом. При большой силе тока наплавки или плохом качестве вольфрамового электрода кусочки вольфрама могут попасть в сварочную ванну. Ввиду высокой температуры плавления, вольфрам не расплавляется в сварочной ванне, образуя после кристаллизации включение. При превышении допустимых размеров такие включения необходимо удалять.

Как показывает выполненный анализ, при наплавке с дефектами типа полостей (пор) или твердых включений можно успешно бороться, тщательно выполняя рекомендуемые меры подготовки и контроля основного и наплавочных материалов, а также не допуская отклонений от рекомендуемой технологии наплавки. Кроме того, опыт показывает, что в большинстве случаев эти дефекты в процессе эксплуатации наплавленных деталей являются менее опасными по сравнению с трещинами.

#### Литература

1. Рябцев И. А., Турык Э. В., Рябцев И. И., Бабинцев А. А. Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними. Трещины // Сварщик. — 2017. — № 5. — С. 13–19.
2. ISO 6520-1:2007 Welding and allied processes. Classification of geometric imperfections in metallic materials. Part 1: Fusion welding.
3. ГОСТ Р ИСО 6520-1:2012 Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением.
4. Góral T. Wpływ technologicznych parametrów napawania brązu na podłożu stalowe na wybrane właściwości użytkowe napoin. Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2007 r., s. 179, дата доступа: 22.03.2017, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9900/full9900.pdf>.
5. DVS-Merkblatt DVS0945-2. Unregelmäßigkeiten geschweißter Beschichtungen. DVS Media GmbH.
6. ДСТУ EN14700:2008 Матеріали зварювальні. Зварювальні матеріали для наплавлення. Класифікація.
7. Проценко Н. А., Рябцев И. И. Гармонизация стандартов на наплавочные материалы в соответствии с требованиями европейского стандарта EN14700 «Сварочные материалы — Сварочные материалы для наплавки» // Сварщик. — № 5. — 2007 г. — С. 30–38.
8. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. — М.: Высшая школа, 1977. — 392 с.
9. Фруммин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
10. Юзвенко Ю. А., Кириллук Г. А. Наплавка порошковой проволокой. — М.: Машиностроение, 1973. — 46 с.
11. Riabcew I. A., Rosert R., Senchenkow I. K., Turyk E. Niezgodności spawalnicze warstw napawanych // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. — 2017. — № 3. — S. 26–36.

# Weldex 2017: новейшее сварочное оборудование от ведущих российских и зарубежных производителей

*С 10 по 13 октября 2017 г. в Москве, в КВЦ «Сокольники», состоялась 17-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий Weldex. Организатором выставки выступает Группа компаний ITE, лидер рынка выставочных услуг в России. Выставка проходила при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, Российского научно-технического сварочного общества (РНТСО), Московского межотраслевого альянса главных сварщиков и главных специалистов по резке и металлообработке (ММАГС), Ассоциации Сварщиков Полимерных Материалов (АСПМ) и компании «Элсвар».*

На сегодняшний день Weldex является самой крупной в России выставкой сварочного оборудования и материалов. Участники Weldex имеют возможность за короткое время представить новое оборудование и материалы большому количеству специалистов российских предприятий, использующих сварочные технологии, продемонстрировать оборудование для сварки и резки в работе, привлечь новых клиентов, расширить сферы взаимодействия с заказчиками и увеличить географию продаж.

В выставке Weldex 2017 приняли участие 187 компаний – ведущих производителей и поставщиков сварочного оборудования из 13 стран мира. Общая площадь экспозиции превысила 8 000 кв.м. Среди постоянных участников выставки: Esab, Fanuc, Lincoln Electric, Messer, Panasonic, Pemamek, voestalpine Böhler Welding, ГРПЗ, Дельтасвар, Евротек, Рутектор, Сварной, Технотрон, Титан Инжиниринг и др.

В числе новичков, представивших свою продукцию впервые, 31 компания, среди них: Ador Welding – один из крупнейших производителей сварочного оборудования и материалов в Индии; Casarini Robotica – итальянский производитель позиционеров и аксессуаров для робототехники, поставщик и интегратор промышленных роботов Hyundai; «Кей Плант Рус» – поставщик оборудования для автоматизации промышленной сварки, роботизированных комплексов для сварки и напыления; GYS SAS – французское предприятие, производитель сварочного оборудования, зарядных устройств, оборудования для ремонта

корпусов автомобилей; Центр Компетенции Систем Промышленной Автоматизации – специализируется на поставках оборудования и расходных материалов для материалобработки, являющийся официальным представителем Precitec, Nutech, Cleanlaser в России;

«Монолит-Центр» – официальное представительство Белорусского завода ООО «Светлогорский завод сварочных электродов» на территории РФ.

В этом году организаторы выступили с новой инициативой: организацией посещения выставки делегациями представителей производственных предприятий Владимирской и Тульской областей. В программе был предусмотрен тур по стендам участников, встречи с производителями и поставщиками, участие в деловой программе выставки. Среди делегатов – представители таких компаний, как Владимирский завод металлорукавов, ТУЛАЧЕРМЕТ-СТАЛЬ, «Прибор РСТ», Кимовский радиомеханический завод, Муромский стрелочный завод, Филиал АО «КБП» – «ЦКИБ СОО», БМТ Металл-мастер 71, СБС-Агроальянс, Мешзавод «Штамп», Государственный лазерный полигон ЦКБА «Радуга», АК «Тулмашзавод» и др.

Традиционно на стендах российских и зарубежных компаний были продемонстрированы новинки сварочного оборудования и материалов.

На стенде компании «Рутектор», выступившей спонсором выставки, были продемонстрированы сварочные аппараты и аппараты для плазменной резки компаний CEA и FLAMA, новейшие модели сварочных масок от одного из лидеров отрасли TECMEN, аппараты контактной сварки TECNA, сварочные агрегаты MOSA и SHINDAIWA, роботизированный комплекс FANUC, аппараты для приварки шпилек NELSON, а также оборудование для микросварки SUNSTONE. Эксклюзивом выставки Weldex стал виртуальный тренажер сварщика Soldamatic в версии 2018 года, который в России показан впервые.

Компания ЭСАБ традиционно подготовила несколько новинок, в частности, самый легкий и компактный в своем классе сварочный инвертор Renegade ES300i – мощный аппарат для ручной электродуговой сварки штучными электродами (ММА) и TIG сварки,





сварочную маску Sentinel A50, созданную по технологии нового поколения, а также передовое решение в области IT технологий и сварочного процесса — систему ESAB Weld Cloud. Ее возможности позволяют вести удаленный учет и контролировать весь процесс сварки.

Отечественный завод сварочного оборудования «Технотрон» впервые представил Мобильный комплекс сварки трубопроводов МКСТ, который разработан для высокопроизводительной автоматической сварки неповоротных стыков труб диаметром до 1420 мм.

В рамках деловой программы выставки Weldex состоялся цикл мероприятий — презентаций, круглых столов и секционных заседаний по актуальным темам сварочной отрасли.

В день открытия выставки 10.10.2017 г. Министерство промышленности и торговли РФ с участием представителей Фонда развития промышленности провело презентацию отраслевого модуля сварки и родственных технологий в рамках Государственной информационной системы промышленности ГИСП «Сварка». В этот же день прошла работа двух секций: «ГИСП «Сварка» — новый инструмент в области подготовки кадров, стандартизации и аттестации сварочного производства», при участии Минпромторга и Фонда развития промышленности, и «Оценка соответствия в сварочном производстве», в рамках Круглого стола, организованного Российским научно-техническим сварочным обществом.

Во второй день работы выставки состоялась сессия главных сварщиков Москвы и Московской области в формате круглых столов по теме «Методы повышения качества, производительности и снижения издержек в сварочных производствах — рекомендации от ведущих мировых и отечественных разработчиков и производителей прогрессивной продукции для сварки, резки, восстановительной и упрочняющей наплавки».

12.10.2017 г. впервые прошла конференция «Сварка полимерных материалов», организованная при содействии Ассоциации сварщиков полимерных материалов (АСПМ). В работе конференции приняли участие ведущие специалисты полимерной отрасли, представители производителей полимерных труб, листов, пленок, мембран, руководители и специалисты строительных организаций и надзорных органов из различных регионов России. Они обсудили актуальные вопросы

совершенствования применения сварки полимерных материалов, внедрения в практику актуализированных нормативных документов и лучших технологий для содействия успешному развитию отраслей, использующих полимеры.

В рамках выставки Weldex традиционно прошли конкурсы «Лучший сварщик 2017», «Лучший молодой сварщик 2017», «Лучший инженер (ученый) в сварочной области 2017» и «Мисс Сварка Мира 2017». Цель конкурсов — повышение престижа рабочей профессии сварщика, выявление и поощрение специалистов-сварщиков, обладающих выдающимися профессиональными знаниями и навыками. В конкурсах приняли участие более 100 сварщиков из России, СНГ и др. стран мира, работающих на предприятиях различных отраслей производства. Награждение победителей состоялось 12 октября. Партнером конкурса «Лучший сварщик» выступила компания Esab.

Генеральный информационный партнер выставки — журнал «Сварочное производство», информационные партнеры — журналы «Сварщик в России», «Сварщик в Белоруссии», «Ритм машиностроения», «Оборудование. Разработки. Технологии» и др.

Состоявшаяся выставка Weldex 2017, по мнению специалистов, в очередной раз вызвала большой интерес у посетителей, помогла наладить множество полезных контактов для успешной реализации коммерческих планов и развития производства. Посетители за четыре дня выставки смогли ознакомиться с новыми технологиями в области сварки и родственных процессов, увидеть оборудование в действии, найти надежных поставщиков и партнеров для бизнеса, посетить мероприятия деловой программы и обсудить важные производственные вопросы с профессионалами отрасли.

**Следующая выставка Weldex пройдет с 9 по 12 октября 2018 г. в КВЦ «Сокольники».**

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

Название книги Цена (руб.)\*

- В. М. Литвинов, Ю. Н. Лысенко.**  
Кислородная резка и внепечной нагрев в тяжелом машиностроении. 2017.— 368 с. . . . . 600
- В. И. Лакомский, М. А. Фридман.**  
Плазменно-дуговая сварка углеродных материалов с металлами. 2004.— 196 с. . . . . 400
- А. А. Кайдалов.** Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Издание 2-е, переработанное и дополненное. 2004.— 260 с. . . . . 500
- В. Я. Кононенко.** Газовая сварка и резка. 2005.— 208 с. . . . . 400
- С. Н. Жизняков, З. А. Сидлин.** Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология. 2006.— 368 с. . . . . 500
- А. Я. Ищенко и др.** Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях. 2006.— 112 с. с илл. 400
- П. М. Корольков.** Термическая обработка сварных соединений. 3-е изд., перераб. и доп. 2006.— 176 с. 400
- А. Е. Анохов, П. М. Корольков.** Сварка и термическая обработка в энергетике. 2006.— 320 с. . . . . 500
- Г. И. Лащенко.** Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. 2006.— 384 с. . . . . 500
- А. А. Кайдалов.** Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. 2007.— 456 с. . . . . 500
- П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев.** Плазменная наплавка. 2007.— 292 с. . . . . 500
- А. Г. Потапьевский.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. 2007.— 192 с. . . . . 500
- Г. И. Лащенко, Ю. В. Демченко.** Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций. 2008.— 168 с. . . . . 400
- Б. Е. Патон, И. И. Заруба и др.** Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги. 2008.— 248 с. . . . . 400
- З. А. Сидлин.** Производство электродов для ручной дуговой сварки. 2009.— 464 с. . . . . 600
- В. Н. Радзиевский, Г. Г. Ткаченко.** Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении. 2009.— 400 с. . . . . 500
- В. Н. Корж, Ю. С. Попиль.** Обработка металлов водородно-кислородным пламенем. 2010.— 194 с. . 400
- Нормирование расхода покрытых электродов при ручной дуговой сварке и наплавке.**  
**Нормирование расхода сварочных материалов при сварке в углекислом газе и его смесях.**  
**Нормирование расхода сварочных материалов при сварке под флюсом.**  
Справочное пособие. 2008.— 68 – 68 – 40 с. . . . . 200
- \*\* Г. И. Лащенко.** Современные технологии сварочного производства. 2012.— 720 с. . . . . 300

\* Цены на книги указаны без учета стоимости доставки.

\*\* Продается только в электронной версии.

Электронные версии книг стоят в два раза дешевле.

## Тарифы на рекламу в 2017 г.

### На внутренних страницах

Площадь	Размер, мм	Стоимость, руб.*
1 полоса	210×295	25000
1/2 полосы	180×125	13000
1/4 полосы	88×125	7000

### На страницах основной обложки

Страница	Размер, мм	Стоимость, руб.
1 (первая)	215×185	50000
4 (последняя)	210×295 (после обрезки 205×285)	36000
2		33000
3		30000

(\*все цены в руб. с НДС)

### Изготовление оригинал-макета

- 10% стоимости рекламной площади

### Статья на правах рекламы

- 1 стр. — 10000 руб.

### Прогрессивная система скидок

Количество подач	2	3	4	5	6
● Скидка	5%	10%	13%	17%	20%

### Требования к оригинал-макетам

**Для макетов «под обрез»:** формат издания после обрезки 205×285 мм; до обрезки 210×295 мм; внутренние поля для текста и информативных изображений не менее 15 мм.  
**Файлы принимаются в форматах:** PDF, AI, INDD, TIF, JPG, PSD, EPS, CDR, QXD с прилинкованными изображениями и шрифтами. Изображения должны быть качественными, не менее 300 dpi, цветовая модель CMYK, текст в кривых, если нет шрифтов. Размеры макета должны точно соответствовать указанным редакцией.

Зам. гл. ред., рук. ред., к. ф.-м. н., **В. Г. Абрамишвили:**  
тел./факс: +380 44 200-80-14, моб.: +380 50 413-98-86,  
моб.: +380 95 146-06-91  
e-mail: welder.kiev@gmail.com

Ред., зам. рук. ред., **О. А. Трофимец:**  
тел.: +380 44 200-80-18  
e-mail: trofimits.welder@gmail.com

[www.welder.stc-paton.com](http://www.welder.stc-paton.com)

## Подписка-2017 на журнал «Сварщик в России»

Подписной индекс **20994**  
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**  
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**  
в каталоге российской прессы  
«Почта России» — персональная подписка

На электронную версию журнала можно подписаться в редакции или на сайте:  
[www.welder.stc-paton.com](http://www.welder.stc-paton.com) (скидка 50 %)