

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

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

Ученые университетов Украины

д.т.н. **В. В. Дмитрик**, НТУ «ХПИ», Харьков,д.т.н. **В. В. Квасницкий**,

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,

к.т.н. **Е. П. Чвертко**,

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,

д.т.н. **М. М. Студент**, Физ.-механ. ин-т

им. Г. В. Карпенко НАНУ, Львов

Зарубежные ученые

д.т.н. **Н. П. Алешин**

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **Гуань Цяо**

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

д.х.н. **М. Зиниград**

Ун-т Ариэля, Израиль

д.т.н. **В. И. Лысак**

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ

д-р инж. **У. Райсген**

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

д.т.н. **Я. Пилярчик**

Ин-т сварки, Гливице, Польша

д.т.н. **Г. А. Туричин**

С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ

03150, Украина, Киев-150,

ул. Казимира Малевича, 11

Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277

Факс: (38044) 200 5484, 200 8277

E-mail: journal@paton.kiev.uawww.patonpublishinghouse.com

Учредители

Национальная академия наук Украины,

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,

МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной

регистрации KB 4788 от 09.01.2001

ISSN 0005-111X

DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Рекомендовано к печати Ученым советом

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Журнал входит в перечень утвержденных

Министерством образования и науки

Украины изданий для публикации трудов

соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

Журналу «Автоматическая сварка» 70 лет 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Позняков В. Д. Свариваемость высокопрочных легиро-
ванных сталей с пределом текучести 590...785 МПа 7*Цыбульский Г. А.* Влияние собственных магнитных
полей на электрические дуги при тандемной дуговой
сварке 13*Дегтярев В. А.* Сопротивление усталости сварных
соединений сталей разной прочности с установивши-
мися остаточными напряжениями 18*Шваб С. Л., Петриченко И. К., Ахонин С. В.* Влияние
редкоземельных элементов на структуру и свойства
сварных швов титанового сплава BT22 23*Размышляев А. Д., Агеева М. В.* О механизме измельче-
ния структуры металла шва при дуговой сварке с воздей-
ствием магнитных полей (Обзор) 29

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Майданчук Т. Б., Илюшенко В. М., Бондаренко А. Н.
Влияние режимов дуговой наплавки на межзеренное
проникновение высокооловянной бронзы в сталь 34*Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В.*
Электрошлаковая наплавка электродом большого
сечения на постоянном токе в токоподводящем крис-
таллизаторе 38*Пантелеймонов Е. А.* К вопросу термической обработки
сварных стыков железнодорожных рельсов 43*Бурлака В. В., Гулаков С. В., Поднебенна С. К.* Стабі-
лізатор дуги змінного струму для зварювальних транс-
форматорів 48

ХРОНИКА

Новый состав Национальной академии наук Украины 52

Информация

Польский институт сварки в Гливицах 54

Формирование изделий с помощью 3D технологии 61

Киевская техническая ярмарка – 2018 62

Календарь марта 63

Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б. Є. Патон**

ЗМІСТ

Журналу «Автоматическая сварка» 70 років 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Позняков В. Д.* Зварюваність високоміцних легованих сталей з межею текучості 590...785 МПа 7
- Цибулькин Г. А.* Вплив власних магнітних полів на електричні дуги при тандемному дуговому зварюванні 13
- Дегтярев В. О.* Опір втомі зварних з'єднань сталей різної міцності з усталеними залишковими напруженнями 18
- Шваб С. Л., Петриченко І. К., Ахонін С. В.* Вплив флюсів, що містять з'єднання рідкісно-земельних елементів, на структуру і властивості зварних швів титанового сплаву VT22 23
- Размышляев О. Д., Агеева М. В.* Про механізм подрібнення структури металу шва при дуговому зварюванні з дією магнітних полів (Огляд) 29

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Майданчук Т. Б., Ілюшенко В. М., Бондаренко А. М.* Вплив режимів дугового наплавлення на утворення міжзеренних проникнень високо-олов'яної бронзи в сталь 34
- Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Осечков П. П., Осін В. В.* Електрошлакове наплавлення електродом великого перерізу на постійному струмі в струмопідвідному кристалізаторі 38
- Пантелеймонов Є. О.* До питання термічної обробки зварних стиків залізничних рейок 43
- Бурлака В. В., Гулаков С. В., Поднебенна С. К.* Стабілізатор дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів 48

ХРОНІКА

- Новий склад Національної академії наук України 52

ІНФОРМАЦІЯ

- Польський інститут зварювання в Глівіцах 54
- Формування виробів за допомогою 3D-технології 61
- Київська технічна ярмарка 62
- Календар березня 63

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

Адреса редакції

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

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

CONTENTS

«Avtomaticheskaya Svarka» Journal is 70 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Poznyakov V.D.* Weldability of high-strength alloyed steels with yield strength of 590...785 MPa 7
- Tsybulkin G. A.* Effect of own magnetic fields on electric arcs in tandem-arc welding 13
- Degtyarev V. A.* Fatigue resistance of steel welded joints of different strength with final residual stresses 18
- Schwab S.L., Petrychenko I.K., Akhonin S.V.* Influence of rare-earth elements on structure and properties of welds of titanium alloy VT22 23
- Razmyshlyayev A.D., Ageeva M.V.* On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under effect of magnetic fields (Review) 29

INDUSTRIAL

- Maidanchuk T.B., Ilyushenko V.M., Bondarenko A.N.* Influence of arc surfacing modes on intergranular penetration of high tin bronze into steel 34
- Kuskov Yu.M., Solovjev V.G., Osechkov P.P., Osin V.V.* Electroslag surfacing with large section electrode at direct current in a current-supplying mould 38
- Panteleymonov E. A.* To the issue of heat treatment of welded butts of rails 43
- Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebenna S.K.* Alternating current arc stabilizer for welding transformers 48

NEWS

- National Academy of Sciences of Ukraine elected new members 52

INFORMATIONS

- Institute of Welding Gliwice Poland 54
- 3d forming of products 61
- Kyiv Technical Fair 62
- March calendar 63

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

Address

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

ЖУРНАЛУ «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА» 70 лет



Рождением журнала считается март 1948 г., когда вышел в свет первый выпуск сборника «Труды по автоматической сварке под флюсом».

Инициатором издания был академик Евгений Оскарович Патон. Выпуск сборников стал систематическим и в июне 1950 г. они были преобразованы в научно-технический журнал «Автоматическая сварка» — ежемесячное печатное издание Института электросварки им. Е. О. Патона.



Появлению сборников, а затем и журнала предшествовали выпуски отдельных брошюр по темам работ электросварочной лаборатории, а затем и Института электросварки. Академик Е. О. Патон всегда придавал большое значение оперативной научной и технической информации. Новое специализированное периодическое издание было создано с целью регулярного освещения результатов исследований и опыта практического применения быстро развивающихся технологий сварки металлических материалов. По сравнению с обычными академическими журналами его отличал широкий охват рассматриваемых проблем — от глубоких научных исследований до практического применения их результатов в различных отраслях народного хозяйства.

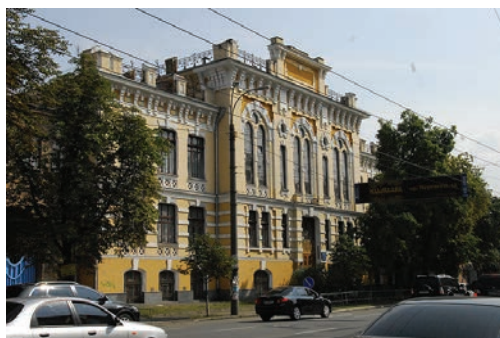
Появление журнала «Автоматическая сварка» сразу же привлекло внимание всех, кто интересуется сваркой, его авторами становятся специалисты не только ИЭС, но и многих других НИИ, заводов и предприятий СССР.

С 1959 по 1986 гг. англоязычная версия журнала «Автоматическая сварка» выпускается Британским институтом сварки под названием «Automatic Welding». В период 1991–1999 гг. журнал переиздается в Англии частным издателем Rieckensky под названием «The Paton Welding Journal». С 2000 г. организовано его издание в ИЭС им. Е. О. Патона под таким же названием.

В течение первых нескольких лет в журнале публикуются, в соответствии с его названием, преимущественно результаты исследований и опыт применения автоматической сварки под флюсом. На примере этого технологического процесса создавались основы теории сварки и сварных конструкций. Вместе с тем с первых же номеров должное внимание на его страницах уделялось и другим способам сварки, а также родственным процессам, однако журнал и в дальнейшем сохранил свое первоначальное название «Автоматическая сварка» — как дань традиции, заложенной его основателем Евгением Оскаровичем Патоном.

В эти же годы опубликованы статьи, посвященные изучению причин хрупкого разрушения, оценки свариваемости углеродистых и низколегированных сталей, цветных металлов и сплавов. Благодаря этим и последующим исследованиям сформировались научные представления о сварке как металлургическом процессе, была обоснована необходимость создания новых конструкционных сталей и сплавов с учетом технологических и металлургических особенностей сварки.

В журнале нашли отражение работы по основам теории автоматического регулирования, рассматривающие источник питания дуги, плавящийся электрод, подающий механизм и дугу как единую систему; по созданию оборудования для механизированных способов сварки. После смерти Е. О. Патона в августе 1953 г. редколлегию возглавил Борис Евгеньевич Патон. В течение



последующих лет расширяется тематика публикаций. В частности, в журнале стали появляться сообщения об использовании сварочных источников нагрева для получения металлических материалов особо высокого качества. Это второе основное на-





учное направление в деятельности ИЭС с 1960-х гг. освещается в другом печатном издании института — журнале «Проблемы специальной электрометаллургии» (в настоящее время «Современная электрометаллургия»).

С 1960-х гг. в связи с тем, что на ИЭС им. Е. О. Патона возлагаются функции головной организации по сварке и спецэлектрометаллургии в СССР, при институте создается Координационный совет по сварке, Научный совет ГКНТ СССР и Научный совет АН СССР. Журнал начинает публикацию материалов по вопросам организации сварочного производства, координации научных исследований, проблемам информации, обучения специалистов-сварщиков и др.

Публикации в журнале оказали небольшое влияние на развитие производства сварных конструкций и изделий для энергетического, тяжелого и химического машиностроения, в промышленном строительстве, ракетостроении, судостроении, железнодорожном и трубопроводном транспорте, резервуаростроении, радиоэлектронике и многих других областях современной техники.

Отражая результаты достижений ИЭС им. Е. О. Патона и других организаций, журнал первым в мире сообщил о многих выдающихся разработках и последовательно проследил их развитие. К числу таких разработок следует отнести:

- дуговую сварку с принудительным формированием сварного шва, обеспечивающую возможность применения механизированной сварки в условиях монтажа;
- электрошлаковую сварку, позволяющую осуществлять за один проход соединения изделий с практически неограниченной толщиной стенок и ставшую основой одного из новых металлургических процессов — электрошлакового переплава;
- технологию изготовления листовых конструкций методом рулонирования;
- технологию изготовления многослойных конструкций;
- технологию изготовления сварно-кованых и сварно-литых конструкций;
- сварку в углекислом газе проволокой малого диаметра — одного из наиболее распространенных до настоящего времени способа механизированной сварки;
- сварку по активирующему флюсу и активированной проволокой;
- импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом, особенно эффективную при изготовлении изделий из алюминиевых сплавов;
- многоэлектродную дуговую сварку в общую ванну, ставшую основным технологическим процессом при промышленном производстве труб большого диаметра;
- контактную стыковую сварку непрерывным оплавлением рельсов, труб и других изделий с большим поперечным сечением, позволяющую решать ряд сложных и важных технических задач;
- электронно-лучевую сварку, оказавшуюся очень эффективной при изготовлении толсто-стенных изделий ответственного назначения;
- парофазные технологии с электронно-лучевым нагревом;
- микроплазменную сварку — для изделий толщиной от сотых долей миллиметра до 1 мм;
- подводную механизированную сварку в «мокром» варианте;
- плазменную резку;
- сварку и резку взрывом;
- технологии изготовления криогенной техники на базе современных высоколегированных сталей;

- сварку в космосе;
- электродуговую наплавку сплавами, улучшающими эксплуатационные свойства изделий;
- сварку разнообразных композиционных материалов;
- плазменное и газотермическое напыление изделий защитными и другими материалами.

В журнале систематически публикуются результаты исследований физических особенностей многообразных явлений, происходящих в расплавленном металле; применения различных источников тепла; изучения взаимодействия расплавленного металла с газами и шлаками как основу создания эффективных сварочных материалов; гигиены и охраны труда в сварочном производстве.

На страницах «Автоматической сварки» можно найти обширную информацию о способах сварки и свойствах сварных соединений сплавов на основе железа, алюминия, меди, никеля, титана, ниобия и других металлических материалов, а также пластмасс, керамики и др. Обширность фактических данных и глубина исследования структуры и свойств различных материалов позволяют считать журнал не только сварочным, но и материаловедческим изданием.

Множество опубликованных статей отражают результаты изучения остаточных напряжений и деформаций, а также способов их снижения. В журнале регулярно помещаются работы по теме прочности сварных соединений и конструкций. В результате этих работ были созданы эффективные способы определения и регулирования напряженно-деформированных состояний, методы дефектоскопии и диагностики сварных конструкций. В настоящее время разработки, связанные с контролем и диагностикой разнообразных сварных изделий, публикуются еще в одном журнале Института электросварки — «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», издаваемом с 1989 г.

Следует отметить, что в 1960-е и 1970-е годы в журнале резко возросло количество публикаций, посвященных созданию новых и совершенствованию традиционных видов сварочных материалов — электродов, проволок, флюсов, организации их массового производства.

В этот же период в журнале систематически публикуются статьи по автоматическому управлению сварочными процессами, многие из которых можно рассматривать как пионерские, а также исследованию систем питания и особенностям расчета электротехнических сварочных устройств. Читатели регулярно получают информацию о создании новых образцов сварочного оборудования и материалов.

Все чаще на страницах журнала можно видеть сообщения о способах нанесения покрытий, о свойствах покрытий, о создании материалов, требующихся для этой цели.

Тираж журнала в эти годы достигает 8000 экз. Он поступает по подписке во многие страны мира.

В 1992 г. «Автоматическая сварка» приобретает статус международного научно-технического и производственного журнала. В состав его редакционного совета вошли ведущие специалисты в области сварки из Германии, Израиля, Китая, Польши и РФ.

В новом тысячелетии журнал «Автоматическая сварка», как и многие другие научные журналы, переживает непростые времена, но вместе с тем продолжает выступать инициатором квалифицированного информирования специалистов сварочного производства о

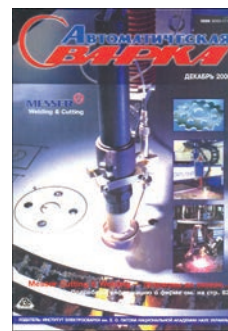
Тематические выпуски



«Космические технологии»



«Электрошлаковая сварка»



«Плазменные технологии»



«Лазерные технологии»



«Сварка давлением»



«Сварка взрывом»

Труды международных конференций



«Сварные конструкции»



«Современные проблемы сварки и ресурса конструкций»



«Сварочные материалы»



«Наплавка. Наука. Производство. Перспективы»



«Современные технологии сварки»



«Роботизация и автоматизация сварочных процессов»

состоянии и развитии отдельных технологий сварочного производства. Выходят в свет тематические выпуски журнала по направлениям «Электрошлаковая сварка» (№ 9, 1999), «Космические технологии» (№ 10, 1999), «Плазменные технологии» (№ 12, 2000), «Лазерные технологии» (№ 12, 2001), «Сварка давлением» (№ 7, 2002), «Сварка взрывом» (№ 11, 2009), а также выпуски журнала в качестве трудов международных конференций «Сварные конструкции» (№ 9-10, 2000), «Современные проблемы сварки и ресурса конструкций» (№ 10-11, 2003), «Сварочные материалы» (№ 6-7, 2014), «Наплавка. Наука. Производство. Перспективы» (№ 5-6, 2015), «Современные технологии сварки» (№ 5-6, 2016), «Роботизация и автоматизация сварочных процессов» (№ 5-6, 2017). В отдельных выпусках журнала публикуются подборки статей ученых и преподавателей в связи с юбилеями сварочных

факультетов и профильных кафедр технических вузов Украины. На страницах журнала описывается передовой опыт и наиболее важные разработки ведущих фирм Западной Европы и Америки, многие из которых в этом период основали дочерние компании в Украине.

За 70 лет в журнале опубликовано свыше 12 тысяч статей, в которых рассмотрены различные проблемы сварочного производства и все аспекты науки о сварке, многие проблемы родственных технологий. Широкий спектр публикаций сложился в своеобразную летопись, по которой можно судить о достижениях и динамике развития сварочной науки и техники за 70 лет. По широте охвата и глубине освещения рассматриваемых тем выпуски журналов можно считать сварочной энциклопедией. Информация, изложенная в этом издании, послужила и продолжает служить научно-техническому прогрессу.

В настоящее время журнал «Автоматическая сварка» представлен в базах данных INSPEC (Великобритания), EBSCO (США), Weldasearch Select (Франция); «Google Scholar» (США); реферативных журналах «Джерело» (Украина), «Сварка» (Россия), «Welding Abstracts» (Великобритания), реферируется в журнале «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology». С 2016 г. статьи из журнала включены в «CrossRef» и им присвоен индекс DOI (Digital Object Identifier). Акутальной задачей на современном этапе является включение журнала в международные наукометрические базы. Архив статей из журнала «Автоматическая сварка» на русском и английском языках с 2000 г. находится в открытом доступе на сайте журнала [www.patonpublishinghouse.com/rus\(eng\)/journals/as](http://www.patonpublishinghouse.com/rus(eng)/journals/as).

Процессы сварки и в третьем тысячелетии остаются ключевой технологией соединения материалов и создания конструкций. Они будут и далее совершенствоваться по пути создания высокоэффективных автоматизированных и роботизированных энергосберегающих технологий. И в этом важная роль по-прежнему сохраняется за профессиональным журналом «Автоматическая сварка» по информационному обеспечению профессионалов сварочного производства.

Редколлегия журнала

СВАРИВАЕМОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 590...785 МПа

В. Д. ПОЗНЯКОВ

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

В настоящей работе обобщены результаты исследований влияния характерных для дуговых процессов сварки термических циклов на структуру и механические свойства высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 590...785 МПа, а также на их склонность к образованию холодных трещин. Структурные превращения в металле зоны термического влияния сварных соединений исследовали с использованием быстродействующего дилатометра, а его механические свойства и склонность к образованию холодных трещин оценивались по результатам испытаний стандартных образцов и по методу Implant, соответственно. Представлены диаграммы структурных превращений аустенита на участке перегрева металла зоны термического влияния ряда высокопрочных легированных сталей, зависимости изменения их механических свойств при сварке, а также данные, характеризующие склонность высокопрочных легированных сталей к образованию холодных трещин при разных концентрациях диффузионного водорода в наплавленном металле. Библиогр. 15, табл. 4, рис. 4.

Ключевые слова: высокопрочные стали, дуговая сварка, структура металла, механические свойства, холодные трещины

Многолетний опыт использования высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 590...785 МПа в сварных конструкциях свидетельствует об их высокой технико-экономической эффективности. Такие конструкции надежны в работе в самых тяжелых условиях эксплуатации не только при статических, но и при ударных нагрузках.

Наиболее широкое применение указанные стали нашли в машиностроении при изготовлении особо нагруженных элементов конструкций, среди которых шахтные крепи и скипы, стрелы кранов и бетононасосов, кузова самосвалов большой тоннажности, балки-рукояти, стрелы, поворотные платформы и ковши экскаваторов.

Отличительной чертой высокопрочных легированных сталей (табл. 1, 2) является то, что поми-

мо значительной прочности, они характеризуются высокой ударной вязкостью при пониженной температуре. Это достигается за счет рационального легирования сталей марганцем, никелем, хромом, молибденом, микролегирования бором, ванадием, алюминием, ниобием и термической обработки, которая состоит из закалки на мартенсит от температуры 900...950 °С и высокого отпуска при температуре 600...680 °С [1]. Особо высокую хладостойкость имеют высокопрочные стали с низким содержанием серы и фосфора. Для получения таких сталей на металлургических предприятиях применяют электрошлаковый переплав (ЭШП), продувку аргоном, обработку синтетическими шлаками [2, 3] или другие мероприятия, позволяющие эффективно очищать расплавлен-

Таблица 1. Требования к химическому составу высокопрочных легированных сталей, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
12ГН2МФАЮ	0,09...0,16	0,3...0,5	0,9...1,2	0,2...0,5	1,40...1,75	0,15...0,25
12ГН2МФАЮ-Ш	0,09...0,16	0,3...0,5	0,9...1,2	0,2...0,5	1,40...1,75	0,15...0,25
14ХГ2САФД	0,12...0,18	0,4...0,7	1,4...1,9	0,5...0,8-	<0,3	-
14Х2ГМР	0,10...0,16	0,17...0,37	0,9...1,2	1,1...1,5	<0,3	0,4...0,5
12ГН3МФАЮДР-Ш	0,10...0,15	0,17...0,37	1,2...1,5	-	2,8...3,0	0,3...0,4
14ХГН2МДАФБ	0,12...0,17	0,17...0,37	1,1...1,4	0,9...1,3	1,7...2,2	0,2...0,3

Окончание табл. 1.

Сталь	Cu	V	Nb	B	Al	S	P
12ГН2МФАЮ	<0,3	0,05...0,10	-	-	0,05...0,10	≤0,035	≤0,035
12ГН2МФАЮ-Ш	<0,3	0,05...0,10	-	-	0,05...0,10	≤0,010	≤0,020
14ХГ2САФД	0,3...0,6	0,08...0,16	-	-	0,03...0,07	≤0,02	≤0,035
14Х2ГМР	0,20	<0,3	0,01...0,04	0,001...0,004	0,02...0,08	≤0,035	≤0,035
12ГН3МФАЮДР-Ш	0,3...0,5	0,04...0,08	-	-	0,02...0,05	≤0,010	≤0,020
14ХГН2МДАФБ	0,3...0,6	0,10...0,20	0,03-0,08	-	0,03...0,10	≤0,008	≤0,020

Таблица 2. Требования к механическим свойствам высокопрочных легированных сталей (не менее)

Сталь	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	KCU_{-40}	KCV_{-40}
	МПа	МПа	%	Дж/см ²	Дж/см ²
12ГН2МФАЮ	590	690	14	29	-
12ГН2МФАЮ-Ш	590	690	14	-	39
14ХГ2САФД	590	690	14	39	-
14Х2ГМР	590	690	14	39	-
12ГН3МФАЮДР-Ш	685	780	16	-	39
14ХГН2МДАФБ	785	885	15	39	-

ный металл от вредных примесей. К таким сталям относятся приведенные в табл. 1 и 2 стали 12ГН2МФАЮ-Ш и 12ГН3МФАЮДР-Ш.

Недостатком высокопрочных сталей является то, что они склонны к образованию холодных трещин [4–7]. Связано это с тем, что в процессе сварки в металле зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений может образовываться малопластичная хрупкая мартенситная структура. Усиливает процесс образования холодных трещин диффузионный водород, который попадает в сварочную ванну вместе с расплавленным металлом.

В отличие от стального проката, структура металла которого зависит главным образом от химического состава, способа и режима термической обработки, на формирование структуры металла

ЗТВ сварных соединений высокопрочных легированных сталей существенно влияет еще и термический цикл сварки (ТЦС) [8–12]. Наиболее существенные изменения в структуре стали при сварке происходят на участке перегрева металла ЗТВ, т. е. в той его зоне, которая находится в непосредственной близости к шву и нагревается до температур 1300...1150 °С.

Цель настоящей работы заключалась в обобщении результатов выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований, направленных на изучение влияния характерных для дуговых процессов сварки термических циклов на структуру и механические свойства металла ЗТВ высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 590...785 МПа, а также на их склонность к образованию холодных трещин в зависимости от условий охлаждения сварных соединений и содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

При дуговой сварке параметры ТЦС зависят от многих факторов. Важнейшими из них являются погонная энергия сварки, начальная температура металла и его толщина. С увеличением погонной энергии сварки и начальной температуры стали время пребывания металла ЗТВ в интервале температур 800...500 °С ($t_{8/5}$) увеличивается, а скорость его охлаждения в интервале температур

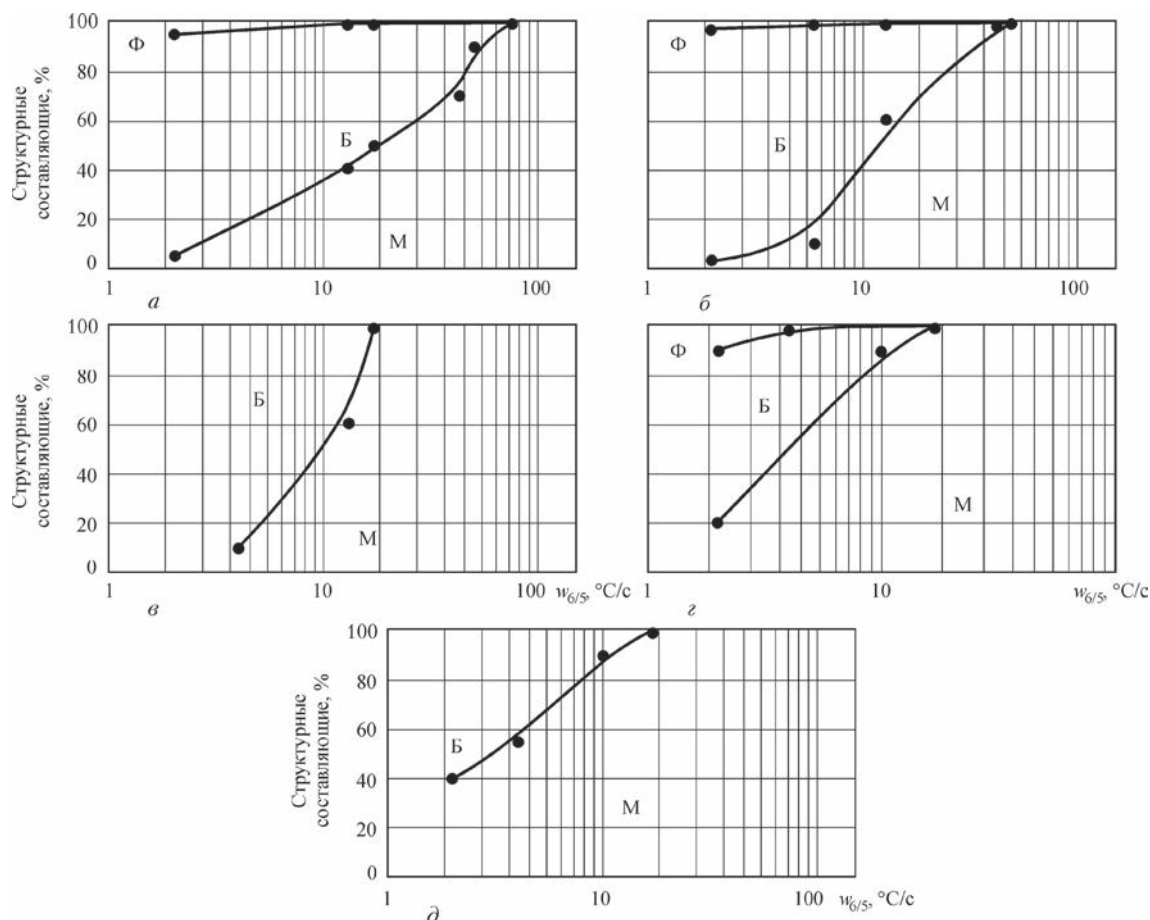


Рис. 1. Диаграммы структурных превращений аустенита на участке перегрева металла ЗТВ высокопрочных легированных сталей 12ГН2МФАЮ (а), 14ХГ2САФД (б), 14Х2ГМР (в), 12ГН3МФАЮДР (г) и 14ХГН2МДАФБ (д)

Таблица 3. Химический состав исследуемых высокопрочных легированных сталей, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	Al	S	P
12ГН2МФАЮ	0,15	0,41	1,14	0,38	1,56	0,22	0,19	0,07	-	-	0,06	0,032	0,014
14ХГ2САФД	0,13	0,57	1,42	-	-	-	0,39	0,08	-	-	0,08	0,015	0,019
14Х2ГМР	0,15	0,28	1,10	1,30	-	0,43	0,20	-	0,02	-	0,05	0,023	0,024
12ГН3МФАЮДР	0,13	0,23	1,36	-	3,08	0,33	0,40	0,05	-	-	0,02	0,004	0,020
14ХГН2МДАФБ	0,14	0,25	1,30	1,15	1,94	0,24	0,42	0,14	0,04	-	0,05	0,008	0,014

Таблица 4. Механические свойства исследуемых высокопрочных легированных сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	Ψ	KCU_{-40}	KCV_{-40}
	МПа		%		Дж/см ²	
12ГН2МФАЮ	625	720	20,8	62,2	80	52
14ХГ2САФД	635	750	20,0	54,3	65	52
14Х2ГМР	680	780	18,1	55,3	55	48
12ГН3МФАЮДР-Ш	821	887	19,2	52,6	186	130
14ХГН2МДАФБ	860	920	17,3	60,0	120	64

600...500 °С ($w_{6/5}$) уменьшается. При увеличении толщины металла эти показатели, наоборот, снижаются и возрастают, соответственно. В зависимости от этого изменяется структура, а следовательно, и механические свойства металла ЗТВ.

Для определения влияния химического состава и условий охлаждения металла на его структуру обычно используют диаграммы превращения аустенита, которые построены с учетом процессов, происходящих при дуговой сварке. Чтобы обеспечить характерную для сварки высокую стойкость аустенита для построения диаграмм в качестве стандартных выбирают такие условия нагрева образцов (w_n), при которых достаточно четко начинают проявляться индивидуальные особенности сталей относительно склонности к росту зерна. Скорость охлаждения дилатометрических образцов выбирают исходя из необходимости обеспечения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита таких условий, которые будут максимально приближены к условиям охлаждения металла ЗТВ сварных соединений [13]. Для имитации условий, характерных для дуговых процессов сварки, скорость нагрева образцов устанавливают в пределах 150...180 °С/с.

Скорость нагрева образцов регулируют, изменяя по заданной программе значение тока, который проходит через образец, а скорость охлаждения — за счет пропуска воды через устройства, в которых крепится образец, обдува образцов инертным газом или пропуска воды через них тока небольшой величины.

Диаграммы, характеризующие превращения аустенита в металле ЗТВ высокопрочных легированных сталей при непрерывном охлаждении образцов по термическому циклу сварки, представлены на рис. 1. Химический состав и механические свойства исследованных сталей приведены в табл. 3 и 4.

Характерным для рассмотренных высокопрочных легированных сталей различного состава является то, что мартенсит в них начинает образовываться при относительно небольших скоростях охлаждения ($w_{6/5} = 2...4$ °С/с). С увеличением $w_{6/5}$ количество мартенсита в металле ЗТВ таких сталей увеличивается. Более резко это происходит в сталях 14Х2ГМР, 12ГН3МФАЮДР-Ш и 14ХГН2МДАФБ. При $w_{6/5} = 4...8$ °С/с количество мартенсита в структуре металла ЗТВ этих сталей достигает 50 %, а при $w_{6/5} = 20$ °С/с — 100 %. В сталях 12ГН2МФАЮ и 14ХГ2САФД мартенсит в количестве 50 % образуется при более высоких скоростях охлаждения, $w_{6/5} = 20$ и 14 °С/с, соответственно, а 100 % мартенсита в них наблюдается при $w_{6/5} = 70$ и 50 °С/с. Кроме того, следует отметить, что по сравнению с высокопрочными легированными сталями других марок у стали 12ГН3МФАЮДР-Ш мартенситное превращение завершается при более низких температурах (200...250 °С). Указанные факторы, как известно, могут оказать существенное влияние на механические свойства металла ЗТВ сварных соединений и их сопротивляемость образованию холодных трещин.

Учитывая, что структура отдельных участков металла ЗТВ сварных соединений неоднородна, а размеры этих участков крайне малы, для определения влияния условий охлаждения на механические свойства участка перегрева ЗТВ использовали модельные образцы размером 150×13×13 мм. Как и при дилатометрических исследованиях, они принудительно нагревались и охлаждались по термическим циклам сварки в соответствии с методикой, описанной в работе [14].

Скорость нагрева образцов до температуры 1350 °С регулировали с помощью программирующего устройства установки МСР-75, а скорость охлаждения $w_{6/5}$ изменяли от 2,7 до 50 °С/с, используя принудительное охлаждение воздухом с разной интенсивностью.

Для определения влияния дуговых процессов сварки на механические свойства участка перегрева металла ЗТВ указанных сталей из обработанных по ТЦС заготовок изготавливали образцы для испытаний на растяжение (тип II по ГОСТ 6996-66) и ударный изгиб (тип VIII и тип XI по ГОСТ 6996-66). Испытания образцов на растяжение выполняли

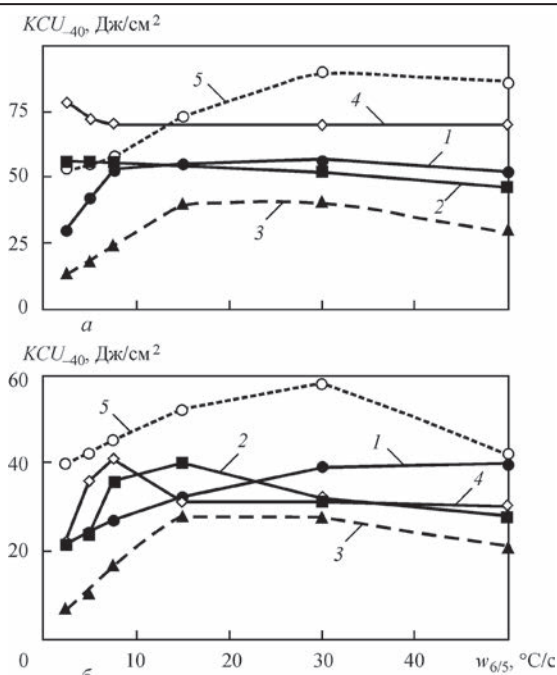


Рис. 2. Влияние скорости охлаждения $w_{6/5}$ на KCU_{-40} (а) и KCV_{-40} (б) металла на участке перегрева ЗТВ сталей: 12ГН2МФАЮ (1), 14Х2ГМР (2), 14ХГ2САФД (3), 14ХГН2МДАФБ (4), 12ГН3МФАЮДР-Ш (5)

при температуре 20 °С, а на ударный изгиб при температуре –40 °С. Их результаты представлены на рис. 2 и 3.

Как следует из рис. 2, под воздействием ТЦС ударная вязкость металла на участке перегрева ЗТВ по отношению к исходному состоянию стали

снижается. Но, несмотря на это, при $w_{6/5} > 5$ °С/с эти показатели для большинства исследованных высокопрочных легированных сталей находятся на уровне требований, предъявляемых к стальному прокату. Исключением является сталь марки 14ХГ2САФД. Необходимый уровень значений ударной вязкости в металле ЗТВ сварных соединений данной стали может быть получен лишь в том случае, когда сварка выполняется на режимах, обеспечивающих его охлаждение со скоростью $w_{6/5} = 15...30$ °С/с.

Графический материал, приведенный на рис. 3, свидетельствует о том, что с ростом скорости охлаждения показатели предела текучести и предел прочности металла на участке перегрева ЗТВ сначала резко, а затем монотонно увеличиваются. Относительное удлинение и относительное сужение при этом уменьшаются. Это вполне закономерно, поскольку, как было указано выше, с увеличением скорости охлаждения в металле увеличивается количество мартенситной составляющей, а мартенсит, как известно, имеет высокую прочность, однако отличается низкой пластичностью.

Оценку склонности высокопрочных легированных сталей к образованию холодных трещин проводили по методике Implant. Изучали влияние содержания диффузионного водорода ($[H]_{диф}$) и скорости охлаждения сварных соединений на стойкость сталей против образования холодных трещин. Использовали образцы-вставки диаметром 6 мм

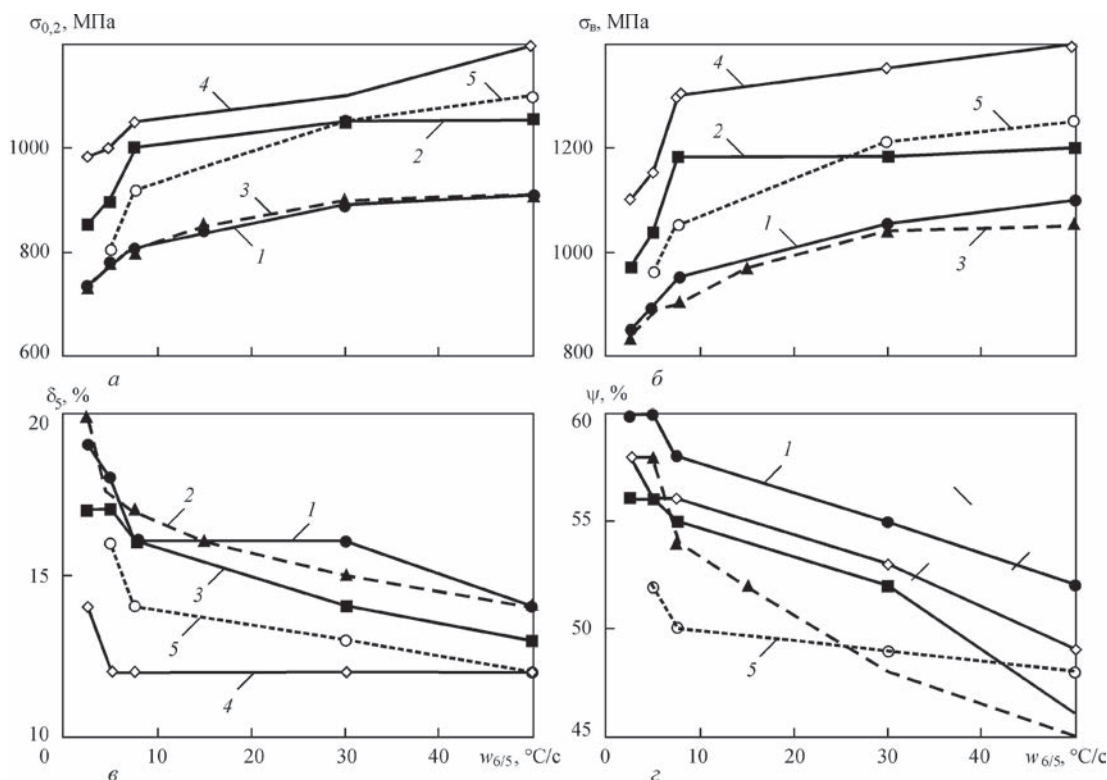


Рис. 3. Влияние скорости охлаждения $w_{6/5}$ на показатели предела текучести (а), предела прочности (б), относительного удлинения (в) и относительного сужения (г) металла на участке перегрева ЗТВ сталей: 12ГН2МФАЮ (1), 14Х2ГМР (2), 14ХГ2САФД (3), 14ХГН2МДАФБ (4), 12ГН3МФАЮДР-Ш (5)

с концентратором напряжений в виде винтовой канавки. Сварку образцов, установленных в отверстиях базовой пластины толщиной 20 мм, выполняли электродами марки АНП-9 (тип Э85) диаметром 4 мм на режиме: $I_{св} = 160...170$ А; $U_d = 25...26$ В; $v_{св} = 8,5...9,0$ м/ч. Нагружение образцов начинали во время охлаждения при температуре $150...100$ °С.

Скорость охлаждения металла ЗТВ $w_{6/5}$ от 25 до 10 °С/с регулировалась температурой предварительного подогрева базовых пластин, которую, в свою очередь, выбирали по осциллограммам термических циклов сварки для высокотемпературных участков ЗТВ образцов-вставок. Скорость охлаждения металла ЗТВ на уровне 25 °С/с была получена при сварке без предварительного подогрева, а 10 °С/с — при подогреве базовых пластин до температуры 120 °С. Количество диффузионного водорода в наплавленном металле зависело от температуры и времени прокали электродов и изменялось от 4 до 12 см³/100 г. Его содержание определяли хроматографическим методом [15].

Поскольку металл ЗТВ исследованных высокопрочных сталей имеет разную статическую прочность, то в качестве критерия, характеризующего его стойкость к образованию холодных трещин, использовали безразмерную величину, а именно соотношение $\sigma_{кр}/\sigma_{0,2}$, где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести металла ЗТВ, которую он имеет при конкретных условиях сварки (охлаждение сварных соединений), а $\sigma_{кр}$ — критическое (максимальное) значение напряжений, которое образцы в состоянии выдержать без образования трещины.

Результаты испытания образцов по методу Implant (рис. 4) свидетельствуют, что при ограниченном до 4 см³/100 г содержании диффузионного водорода в наплавленном металле металл ЗТВ сварных соединений легированных высокопрочных сталей типа 12ГН2МФАЮ и 12ГН3МФАЮДР-Ш отличается высокой стойкостью к образованию холодных трещин. Об этом свидетельствует тот факт, что даже в том случае, когда сварка осуществляется без предварительного подогрева ($w_{6/5} = 25$ °С/с), показатель $\sigma_{кр}/\sigma_{0,2}$ этих сталей находится в пределах $0,7...0,75$. Склонность сталей марок 12ГН2МФАЮ и 12ГН3МФАЮДР-Ш к образованию холодных трещин, как и у других высокопрочных легированных сталей, проявляется и усиливается по мере повышения содержания $[H]_{диф}$ в наплавленном металле.

Чтобы уменьшить риск образования холодных трещин в сварных соединениях из высокопрочных легированных сталей марок 14Х2ГМР, 14ХГН2МДАФБ и 14ХГ2САФД необходимо не только существенно ограничивать содержание диффузионного водорода в наплавленном метал-

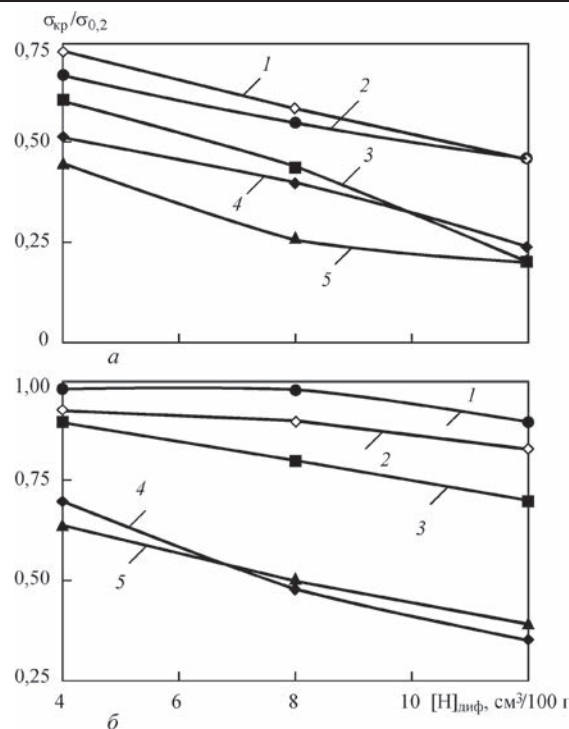


Рис. 4. Стойкость сталей 12ГН2МФАЮ (1), 12ГН3МФАЮДР (2), 14ХГ2САФД (3), 14ХГН2МДАФБ (4), 14Х2ГМР (5) к образованию холодных трещин в зависимости от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и условий охлаждения металла ЗТВ: а — $w_{6/5} = 25$ °С/с; б — 10

ле, но и обязательно подогревать до температуры не ниже 120 °С.

Выводы

1. Высокопрочные легированные термоупрочненные стали сочетают в себе высокую прочность и хладостойкость.

2. Под воздействием характерных для дуговых процессов сварки термических циклов превращение аустенита в металле ЗТВ рассмотренных высокопрочных легированных сталей происходит в бейнитной и мартенситной областях.

3. Увеличение скорости охлаждения металла ЗТВ высокопрочных легированных сталей вызывает повышение прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$ и σ_B), однако снижает его пластичность (δ_5 и Ψ).

4. Для получения сварных соединений из высокопрочных сталей с необходимым комплексом механических свойств и достаточной сопротивляемостью образованию холодных трещин содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не должно превышать 4 см³/100 г, а режимы сварки и температуру предварительного подогрева выбирать таким образом, чтобы они обеспечивали скорость охлаждения металла ЗТВ в пределах $5...20$ °С/с.

Список литературы/References

1. Show B. K., Veerababu R., Balamuralikrishnan R., Malakondaiah G. (2010) Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical

- properties of microalloyed HSLA steel. *Materials Science and Engineering A*, 527, 1595–1604.
2. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Тихонов В. А. и др. (1984) Исследование возможности повышения качества толстолистовых высокопрочных строительных сталей 12ГН2МФАЮ (ВС-1) и 12ХН2МФБАЮ (ВС-2) методом электрошлакового переплава. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 21, 3–7.
Paton, B.E., Medovar, B.I., Tikhonov, V.A. et al. (1984) Examination of possibility of quality improvement of thick-sheet high-strength structural steels 12GN2MFAYu (VS-1) and 12Kh2MFBAYu (VS-2) using electroslog remelting method. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 21, 3–7 [in Russian].
 3. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Тихонов В. А. и др. (1985) Электрошлаковый переплав высокопрочной строительной стали марки 12ГН2МФАЮ (ВС-1) под флюсами, содержащими соединения РЗМ. *Там же*, 1, 5–7.
Paton, B.E., Medovar, B.I., Tikhonov, V.A. et al. (1985) Electroslog remelting of high-strength structural steels 12GN2MFAYu (VS-1) grade under fluxes containing rare-earth metals. *Ibid.*, 1, 5–7 [in Russian].
 4. Pokhodnya I. K., Shvachko V. I. (1996) Cold cracks welded joint of structural steels. *Materials Science and Engineering*, 32, 1, 45–55.
 5. Stevenson M. E., Lowrie S. L., Bowman R. D., Bennett B. A. (2002) Metallurgical failure analysis of cold cracking in a structural steel weldment: Revisiting a classic failure mechanism. *Practical Failure Analysis*, 2, 55–60.
 6. Garašić I., Čorić A., Kožuh Z., Džić I. (2010) Occurrence of cold cracks in welding of high-strength S960 QL steel. *Technical Gazette*, 17, 327–335.
 7. Лобанов Л. М., Позняков В. Д., Махненко О. В. (2013) Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа. *Автоматическая сварка*, 7, С. 8–13.
Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Makhnenko, O.V. (2013) Formation of cold cracks in welded joints from high-strength steels with 350–850 MPa yield strength. *The Paton Welding J.*, 7, 7–12.
 8. Keehan E., Zachrisson J., Karlsson L. (2010) Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15, 233–238.
 9. Svensson L.-E. (2007) Microstructure and Properties of High Strength Weld Metals. *Materials Science Forum*, 539–543, 3937–3942.
 10. Ragu Nathan S., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Rao A. G. (2015) Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defence Technology*, 11, 3, 308–317.
 11. Ghazanfari H., Naderi M. (2013) Influence of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot Welded High Strength Steels. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 26, 5, 635–640.
 12. Ghazanfari H., Naderi M., Iranmanesh M., Seydi M. (2012) A comparative study of the microstructure and mechanical properties of HTLA steel welds obtained by the tungsten arc welding and resistance spot welding. *Materials Science and Engineering*, 534, 90–100.
 13. Шоршоров М. Х., Белов В. В. (1972) *Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке*. Москва, Наука.
Shorshorov, M. Kh., Belov, V.V. (1972) *Phase transformations and changes of steel properties in welding*. Moscow, Nauka [in Russian].
 14. Саржевский В. А., Сазонов В. Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75. *Автоматическая сварка*, 5, 69–70.
Sarzhovsky, V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Unit for simulation of welding thermal cycles based on the machine MSR-75. *Avtomatich. Svarka*, 5, 69–70 [in Russian].
 15. Походня И. К., Пальцевич А. П. (1980) Хроматографический метод определения количества диффузионного водорода в сварных швах. *Там же*, 1, 37–39.

Pokhodnya, I.K., Paltsevich, A.P. (1980) Chromatographic method for determination of diffusion hydrogen amount in welds. *Ibid.*, 1, 37–39 [in Russian].

В. Д. Позняков

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

ЗВАРЮВАНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ З МЕЖЕЮ ТЕКУЧОСТІ 590...785 МПа

В даній роботі узагальнено результати досліджень впливу характерних для дугових процесів зварювання термічних циклів на структуру і механічні властивості металу зони термічного впливу високоміцних легованих сталей з межею текучості 590...785 МПа, а також на їх схильність до утворення холодних тріщин. Структурні перетворення в металі зони термічного впливу зварних з'єднань досліджували з використанням швидкодійного дилатометра, а його механічні властивості і схильність до утворення холодних тріщин оцінювали за результатами випробувань стандартних зразків і по методу Implant, відповідно. Приведено діаграми структурних перетворень аустеніту на ділянці перегріву металу зони термічного впливу ряду високоміцних легованих сталей, залежності зміни їх механічних властивостей при зварюванні, а також дані, що характеризують схильність високоміцних легованих сталей до утворення холодних тріщин при різних концентраціях дифузійного водню в наплавленому металі. Бібліогр. 15, табл. 4, рис. 4.

Ключові слова: високоміцні сталі, дугове зварювання, структура металу, механічні властивості, холодні тріщини

V.D. Poznyakov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

WELDABILITY OF HIGH-STRENGTH ALLOYED STEELS WITH YIELD STRENGTH OF 590...785 MPa

This paper summarizes the results of investigations of influence of the thermal cycles, characteristic for arc welding processes, on the structure and mechanical properties of high-strength alloyed steels with yield strength of 590...785 MPa, as well as on their tendency to cold cracks formation. The structural transformations in the metal of heat-affected-zone of welded joints were investigated using a quick-response dilatometer, and its mechanical properties and tendency to cold cracks formation were evaluated according to the results of tests of standard specimens and by the Implant method, respectively. The diagrams of the structural transformations of austenite in the area of metal overheating of heat-affected-zone of a number of high-strength alloyed steels, the dependence of change of their mechanical properties during welding, and also the data, characterizing the tendency of high-strength alloyed steels to cold cracks formation at different concentrations of diffusion hydrogen in the deposited metal, are presented. 15 Ref., 4 Tab., 4 Fig.

Keywords: high-strength steels, arc welding, metal structure, mechanical properties, cold cracks

Поступила в редакцію 08.02.2018

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДУГИ ПРИ ТАНДЕМНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

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

Рассматривается влияние собственных магнитных полей на пространственное положение дуг, проявляющееся в отклонении их от осевых линий электродов при тандемной автоматической сварке. Основной целью работы является получение в аналитическом виде зависимостей указанных отклонений от длин дуг и сварочных токов. В рамках данной задачи найдены условия, ограничивающие соотношение между сварочными токами, невыполнение которых может привести к «слипанию» дуг или их обрыву в процессе сварки. В частности, при импульсной тандемной дуговой сварке плавящимися электродами соотношение между высотой («амплитудой») импульса сварочного тока одной дуги и базовым током другой не должно превышать определенного порога. Библиогр. 9, рис. 1.

Ключевые слова: тандемная дуговая сварка, плавящиеся электроды, электромагнитное взаимодействие дуг

Благодаря последним достижениям в области построения источников сварочного тока с микропроцессорным управлением стала возможной реализация дуговой автоматической сварки двумя последовательными дугами в защитном газе (Tandem Welding). Согласно работе [1] основное преимущество тандемной дуговой сварки по сравнению со сваркой одной дугой — существенное повышение ее производительности.

С технической точки зрения тандемная сварка представляет собой довольно сложный процесс, требующий обеспечения согласованного управления сваркой обеими дугами, горящими в непосредственной близости друг от друга. Кроме того, из-за близкого расположения электродов могут возникать нежелательные деформации дуг, приводящие к их «слипанию» или обрыву в процессе сварки. Основной причиной указанных деформаций является электромагнитное взаимодействие параллельных дуг с токами. Силы этого взаимодействия, как известно, определяются законом Ампера

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{r} l_2, \quad F_{21} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{r} l_1. \quad (1)$$

В формулах (1) F_{12} — сила, действующая на вторую дугу со стороны первой дуги; F_{21} — сила, действующая на первую дугу со стороны второй; μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды; i_1, i_2 — сварочные токи первой и второй дуги; l_1, l_2 — длина первой и второй дуги; r — расстояние между дугами.

Под воздействием сил F_{12} и F_{21} сварочные дуги с одинаково направленными токами будут искривляться в направлении друг к другу, как схематично показано на рисунке.

Также известно [2–6], что при искривлении сварочных дуг возникают так называемые восстанавливающие силы F_1^* и F_2^* , препятствующие указанному искривлению. При относительно небольших отклонениях дуг ξ_1 и ξ_2 от осевых линий своих электродов восстанавливающие силы пропорциональны самим отклонениям, т. е.

$$F_1^* = -G_1 \xi_1, \quad F_2^* = -G_2 \xi_2. \quad (2)$$

В выражениях (2) G_1 и G_2 — положительные коэффициенты, названные в работе [3] коэффициентами жесткости дуг; они связаны с токами i_1, i_2 и длинами дуг l_1, l_2 соотношениями

$$G_1 = N \frac{i_1^2}{l_1}, \quad G_2 = N \frac{i_2^2}{l_2}, \quad (3)$$

где $N = \text{const}$ — коэффициент, зависящий в основном от условий сварки.

Возникают следующие важные вопросы: насколько велико влияние собственных магнитных полей на электрические дуги при тандемной ду-

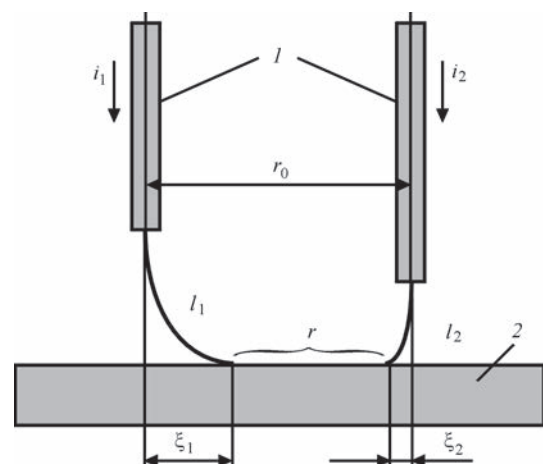


Схема магнитного взаимодействия двух дуг: 1 — плавящиеся электроды; 2 — свариваемое изделие

говой сварке плавящимися электродами, и какие ограничения необходимо налагать на сварочные токи i_1, i_2 , чтобы возможные отклонения ξ_1 и ξ_2 не нарушали стабильный режим сварки?

Судя по известным публикациям, на эти вопросы пока нет четкого ответа. В работе [7] проведено математическое моделирование электромагнитного взаимодействия двух дуг, используемых для выплавки металлов и сплавов в электропечах. Результаты моделирования представлены в виде нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, которые для практического использования не очень удобны. В статье японских исследователей [8] получены простые соотношения между отклонениями ξ_1, ξ_2 , сварочными токами i_1, i_2 и длинами дуговых промежутков l_{10}, l_{20} . Однако эти соотношения не совсем пригодны в случае сварки плавящимися электродами, которая, как известно, имеет свои особенности.

В настоящей работе сделана попытка получить ответы на поставленные выше вопросы. Следует сразу заметить, что воздействие электромагнитных сил на дуги проявляется не только в явлениях макроскопического характера, к которым относятся изменение формы, размеров и положение дуг в пространстве. Под воздействием электромагнитных полей внутри самих дуг возникают силы Лоренца, придающие центростремительные ускорения заряженным частицам и приводящие к спиральным движениям этих частиц. Очевидно, указанные силы, а также силы иного характера влияют на пространственное положение дуг в значительно меньшей степени, чем силы F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* , и их в данной задаче учитывать не будем.

Для математического описания действия сил F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* на сварочные дуги в тандемной дуговой сварке примем следующую идеализацию:

столб дуги, как и в работах [2, 3], будем рассматривать в виде гибкого тонкого проводника тока, один конец которого «закреплен» у торца электрода, а другой конец, располагающийся у сварочной ванны, является «свободным», т. е. может перемещаться вдоль сварочной ванны;

силы F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* коллинеарны и перпендикулярны осевым линиям электродов.

В рамках принятой модели запишем уравнения баланса сил, действующих на «свободные» концы сварочных дуг

$$F_{21} + F_1^* = 0, \quad F_{12} + F_2^* = 0.$$

С учетом соотношений (1)–(3) эти уравнения примут вид

$$Pl_1 \frac{i_1 i_2}{r} - N \frac{l_1^2}{l_1} \xi_1 = 0, \quad Pl_2 \frac{i_1 i_2}{r} - N \frac{l_2^2}{l_2} \xi_2 = 0,$$

где $P = \mu_0 \mu / (2\pi)$.

Перепишем уравнения следующим образом:

$$\xi_1 = \lambda \delta \frac{l_1^2}{r}, \quad \xi_2 = \frac{\lambda}{\delta} \frac{l_2^2}{r}, \quad (4)$$

здесь $\lambda = P/N$, $\delta = i_2/i_1$ — безразмерные параметры. Суммируя уравнения (4), получим

$$\xi_1 + \xi_2 = \frac{\lambda}{r} \left(l_1^2 \delta + \frac{l_2^2}{\delta} \right). \quad (5)$$

С другой стороны, из рисунка следует, что

$$\xi_1 + \xi_2 = r_0 - r, \quad (6)$$

где $r_0 = \text{const}$ — расстояние между осевыми линиями электродов.

Приравнявая правые части равенств (5) и (6), получим квадратное уравнение относительно расстояния между концами дуг r :

$$r^2 - r_0 r + a = 0.$$

Свободный член этого уравнения

$$a = \lambda \left(l_1^2 \delta + \frac{l_2^2}{\delta} \right) = \text{const}, \quad (7)$$

а его корни равны

$$r_* = \frac{r_0}{2} + \sqrt{\frac{r_0^2}{4} - a}, \quad r_{**} = \frac{r_0}{2} - \sqrt{\frac{r_0^2}{4} - a}. \quad (8)$$

Корни (8) вещественны, если выполняется условие

$$a \leq \frac{r_0^2}{4}. \quad (9)$$

Очевидно, физический смысл имеет лишь корень r_* (с увеличением расстояния r_0 увеличивается и расстояние r_*).

Если записать условие (9) в развернутом виде

$$\delta^2 - \frac{r_0^2}{4\lambda l_1^2} \delta + \frac{l_2^2}{l_1^2} \leq 0, \quad (10)$$

то решение неравенства (10) определит область допустимых значений отношения δ :

$$\delta_m \leq \delta \leq \delta_M, \quad (11)$$

где

$$\delta_m = \frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} - \sqrt{\left(\frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} \right)^2 - \frac{l_2^2}{l_1^2}},$$

$$\delta_M = \frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} + \sqrt{\left(\frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} \right)^2 - \frac{l_2^2}{l_1^2}}.$$

Возвратимся теперь к выражениям (4) и подставим вместо переменной r значение r_* , найденное в (8). В результате получим искомые оценки ξ_1 и ξ_2 :

$$\xi_1 = \lambda \delta \frac{l_1^2}{r_*}, \quad \xi_2 = \frac{\lambda}{\delta} \frac{l_2^2}{r_*}. \quad (12)$$

Оценки (12) носят приближенный характер, так как параметр λ , вернее — коэффициент N , входящий в соотношение $\lambda = P/N$, точно неизвестен и может быть определен лишь опытным путем. В

статье [3] приведено приближенное значение $N \approx 5,6\mu_0/(4\pi)$ (в наших обозначениях), полученное в результате экспериментального исследования, в котором определялась жесткость дуги G по измерениям отклонений «свободного» конца дуги ξ от осевой линии электрода при воздействии на дугу специально создаваемого поперечного магнитного поля.

Если воспользоваться этим результатом, то параметр λ получит следующее числовое значение:

$$\lambda = \frac{P}{N} = \frac{\mu_0 \mu 4\pi}{2\pi 5,6\mu_0 \mu} \approx 0,35,$$

а искомые оценки (12) примут вид расчетных формул

$$\xi_1 = 0,35\delta \frac{l_1^2}{r_*}, \quad \xi_2 = \frac{0,35}{\delta} \frac{l_2^2}{r_*}. \quad (13)$$

Сравнивая формулы (13) с формулами

$$\xi_1 = 0,5\delta \frac{l_{10}^2}{r_0}, \quad \xi_2 = \frac{0,5}{\delta} \frac{l_{20}^2}{r_0}. \quad (14)$$

полученными в работе [8] более сложным путем, видим, что они одинаковы по форме, но отличаются входящими в них параметрами. Во-первых, длины дуг l_1 и l_2 , фигурирующие в формулах (13), при сварке плавящимися электродами не равны начальным значениям l_{10} и l_{20} , а зависят от сварочных токов следующим образом [9]:

$$l_1 = \frac{u_x - u_0}{E} - T v_{e1}, \quad l_2 = \frac{u_x - u_0}{E} - T v_{e2}. \quad (15)$$

В этих выражениях u_x — напряжение холостого хода источников сварочного тока; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; E — напряженность электрического поля в сварочных дугах; v_{e1} и v_{e2} — скорости подачи первого и второго электродов соответственно; $T = R/(EM)$, где R — сопротивление сварочных контуров, M — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящихся электродов (предполагается, что оба сварочных контура идентичны).

Во-вторых, в формулах (13), в отличие от (14), значится не расстояние между электродами $r_0 = \text{const}$, а расстояние между концами дуг r_* , которое, согласно выражениям (8) и (7), зависит от длин дуг l_1 и l_2 , и от соотношения между сварочными токами δ .

В работе [8, рис. 3] приведены графики, изображающие формы дуг, полученные в результате моделирования отклонений концов дуг от осевых линий своих электродов при следующих параметрах: $i_1 = i_2 = 9 \cdot 10^3$ А, ($\delta = 1$), $r_0 = 800$ мм, $l_1 = l_2 = 400$ мм. Из графика, построенного для случая, когда формы дуг аппроксимированы полино-

мами второй степени, следует, что при указанных параметрах

$$\xi_1 = \xi_2 \approx 80 \text{ мм}. \quad (16)$$

Теперь сделаем расчет отклонений ξ_1 и ξ_2 по формуле (13). Для этого сначала по формуле (7) находим параметр $a = 11,2 \cdot 10^4$ мм². Далее проверяем условие (9): $a \leq r_0^2/4 = 16 \cdot 10^4$ мм². Условие выполняется. Затем по формуле (8) вычисляем $r_* = 619$ мм и по формулам (13) получаем

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(400 \text{ мм})^2}{619 \text{ мм}} \approx 90 \text{ мм}. \quad (17)$$

Сравнение оценок (16) и (17) позволяет заключить, что их числовые значения достаточно близки, хотя сами оценки получены различными способами. Заметим лишь, что для получения оценки (17) не требуется проводить сложные вычислительные процедуры и графические построения.

Эффективность полученных результатов проиллюстрируем на примере роботизированной тандемной дуговой сварки плавящимися электродами в среде защитного газа, выполняемой при следующих значениях параметров: $u_x = 30$ В, $u_0 = 16$ В, $E = 2$ В/мм, $M = 0,37$ мм/(с·А), $R = 0,04$ Ом, $r_0 = 10$ мм, $H = 17$ мм (H — расстояние между торцом горелки и свариваемым изделием).

Рассмотрим отдельно три случая.

1. Скорости подачи электродов v_{e1} и v_{e2} невелики. Пусть $v_{e1} = v_{e2} = 35$ мм/с. В этом случае $i_1 = i_2 = v_{e1}/M = 35/0,37 = 95$ А, ($\delta = 1$). По формулам (15) находим $l_1 = l_2 = 5,1$ мм, а по формуле (7) вычисляем $a = 18,2$ мм². Согласно (9) должно выполняться условие $a \leq r_0^2/4 = 25$ мм². Условие выполняется. Далее, по формуле (8) определяем расстояние между концами дуг $r_* = 7,6$ мм, а по формулам (13) вычисляем отклонения

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(5,1 \text{ мм})^2}{7,6 \text{ мм}} = 1,2 \text{ мм}.$$

2. Увеличим скорости v_{e1} и v_{e2} . Пусть $v_{e1} = v_{e2} = 80$ мм/с. Тогда $i_1 = i_2 = 216$ А, ($\delta = 1$), $l_1 = l_2 = 2,7$ мм, $a = 5,1$ мм², $r_* = 9,5$ мм. Следовательно,

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(2,7 \text{ мм})^2}{9,5 \text{ мм}} = 0,3 \text{ мм}.$$

3. Рассмотрим теперь случай, когда скорости v_{e1} и v_{e2} различны. Пусть $v_{e1} = 35$ мм/с, $v_{e2} = 80$ мм/с. В этом случае $i_1 = 95$ А, $i_2 = 216$ А, ($\delta = 2,3$), $l_1 = 5,1$ мм, $l_2 = 2,7$ мм, $a = 22,0$ мм², $r_* = 6,7$ мм. По формулам (13) находим

$$\xi_1 = 0,35 \cdot 2,3 \frac{(5,1 \text{ мм})^2}{6,7 \text{ мм}} = 3,1 \text{ мм}.$$

$$\xi_2 = \frac{0,35}{2,3} \frac{(2,7 \text{ мм})^2}{6,7 \text{ мм}} = 0,2 \text{ мм}.$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать несколько важных выводов, которые, вообще говоря, не являются очевидными.

1. Если сварочные токи обеих дуг равны, то с увеличением токов отклонения дуг ξ не увеличиваются, как это может показаться на первый взгляд, а уменьшаются. Этот факт физически объясняется тем, что увеличение сварочных токов (путем увеличения скорости подачи плавящихся электродов v_e при $H = \text{const}$) приводит к уменьшению длин дуг. При этом притягивающие силы F_{12} и F_{21} , пропорциональные длинам дуг, уменьшаются, а восстанавливающие силы F_1^* и F_2^* , обратно пропорциональные длинам дуг, увеличиваются. В результате точки, характеризующие положение концов дуг относительно осевых линий своих электродов, смещаются в сторону осевых линий, уменьшая тем самым отклонения дуг ξ от указанных линий.

2. Если сварочные токи различны, то отклонение ξ будет больше у той дуги, сварочный ток которой меньше. Это также обусловлено тем, что дуга с меньшим током имеет большую длину. Следовательно, притягивающая сила, действующая на более длинную дугу, превосходит притягивающую силу, действующую на более короткую. Кроме того, жесткость более длинной дуги и, соответственно, ее восстанавливающая сила значительно меньше, чем жесткость и восстанавливающая сила более короткой дуги.

3. Отклонения дуг ξ существенным образом зависят от соотношения между сварочными токами δ , причем с увеличением δ , как видно из выражений (12), резко увеличивается отклонение ξ более длинной дуги и уменьшается более короткой. Отсюда следует, что соотношение δ не может выбираться произвольно; оно должно быть выбрано в соответствии с ограничением (11). Это важный для практики момент.

В заключение следует отметить, что оценки отклонения дуг (12) под воздействием собственных магнитных полей получены нами, опираясь на упрощенную математическую модель, описывающую эти воздействия. Тем не менее, сравнение их с результатами, приведенными в работах [7, 8], убедительно показывает, что оценки (12) достаточно полно раскрывают функциональные зависимости между отклонениями дуг, их длинами, сварочными токами и расстоянием между дугами и при этом более удобны для практического использования. Потребность именно в таких простых оценках возникает уже на этапе разработки специального сварочного оборудования (в частности, сварочной горелки с двумя изолированными электродами) и самих технологий автоматизированной тандемной дуговой сварки плавящимися электродами.

Список литературы

1. Дилтай У., Штайн Л., Весте К., Райх Ф. (2003) Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий. *Автоматическая сварка*, **10-11**, 151–157.
2. Тиходеев Г. М. (1961) *Энергетические свойства электрической сварочной дуги*. Москва-Ленинград, Издательство Академии наук СССР.
3. Бачелис И. А. (1963) О расчете отклонения сварочной дуги в постоянном поперечном магнитном поле. *Сварочное производство*, **7**, 8–11.
4. Ковалев И. М. (1965) Отклонение сварочной дуги в поперечном магнитном поле. *Там же*, **10**, 4–6.
5. Лесков Г. И. (1970) *Электрическая сварочная дуга*. Москва, Машиностроение.
6. Ленивкин В. А. и др. (1989) *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. Москва, Машиностроение.
7. Ячиков И. М., Костылева Е. М. (2014) Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, **1**, 59–64.
8. Ueyama T., Ohnawa T., Yamazaki K., Tanaka M., Ushio M., Nakata K. (2005) High-Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System. *Transactions of JWRI*, **34**, 1, 11–18.
9. Цибулькин Г. А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.

References

1. Dilthey, U., Stein, L., Woeste, K. et al. (2003) Latest developments and trends in high-efficient welding technologies. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 146-152.
2. Tikhodeev, G.M. (1961) *Energy properties of welding electric arc*. Moscow-Leningrad, Izd-vo AN SSSR [in Russian].
3. Bachelis, I.A. (1963) On calculation of welding arc deviation in constant transverse magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 8-11 [in Russian].
4. Kovalev, I.M. (1965) Welding arc deviation in constant transverse magnetic field. *Ibid.*, **10**, 4-6 [in Russian].
5. Leskov, G.I. (1970) *Welding electric arc*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Lenivkin, V.A. et al. (1989) *Technological properties of welding arc in shielding gases*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Yachikov, I.M., Kostilyova, E.M. (2014) Mathematical modeling of arcs shape in their electromagnetic interaction. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **1**, 59-64 [in Russian].
8. Ueyama, T., Ohnawa, T., Yamazaki, K. et al. (2005) High-speed welding of steel sheets by the tandem pulsed gas metal arc welding system. *Transact. of JWRI*, **34**(1), 11-18.
9. Tsybulkin, G.A. (2014) *Adaptive control in welding*. Kiev, Stal [in Russian].

Г. О. Цибулькин

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

ВПЛИВ ВЛАСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ДУГИ ПРИ ТАНДЕМНОМУ ДУГОВОМУ ЗАВ'ЯЗУВАННІ

Розглядається вплив власних магнітних полів на просторове положення дуг, що проявляється у відхиленні їх від осевих ліній електродів при тандемному автоматичному зварюванні. Основною метою роботи є отримання в аналітичному вигляді залежностей зазначених відхилень від довжин дуг і зварювальних струмів. В рамках даного завдання знайдено умови,

що обмежують співвідношення між зварювальними струмами, невиконання яких може призвести до «злипання» дуг або їх обриву в процесі зварювання. Зокрема, при імпульсному тандемному дуговому зварюванні плавкими електродами співвідношення між висотою («амплітудою») імпульсу зварювального струму однієї дуги і базовим струмом іншої не має перевищувати певного порогу. Бібліогр. 9, рис. 1.

Ключові слова: тандемне дугове зварювання, плавкі електроди, електромагнітна взаємодія дуг

G. A. Tsybulkin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.
E-mail: office@paton.kiev.ua

EFFECT OF OWN MAGNETIC FIELDS ON ELECTRIC ARCS IN TANDEM-ARC WELDING

Considered is an effect of own magnetic fields on spatial position of arcs appearing in their deviation from electrode axial lines in automatic tandem-arc welding. The main aim of work is obtaining the dependencies of indicated deviations on arc lengths and welding currents in analytical form. In scope of this problem the conditions were found that limit a relationship between welding currents. Their neglecting can result in arc «adhesion» or their extinction in process of welding. In particular, the relationship between height («amplitude») of welding current of one arc and basic current of another one should not exceed specific limit in pulse tandem-arc consumable electrode welding. 9 Ref., 1 Fig.

Keywords: tandem-arc welding, consumable electrode, electromagnetic interaction of arcs

Поступила в редакцию 15.06.2018

Национальная академия наук Украины ♦ Институт электросварки им. Е.О. Патона
♦ Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
♦ Международная Ассоциация «Сварка»

Двадцать вторая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

10-14 сентября 2018 г.

г. Одесса, Аркадия, отель «Курортный»

Генеральный спонсор —
ЧАО «УкрНИИНК»



Спонсоры



Подача заявок и тезисов докладов для участия в конференции — до 30.06.2018 г.

Рассылка второго информационного сообщения — до 15.07.2018 г.

Оплата регистрационного взноса — до 10.09.2018 г.

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карту участника и направить ее в Оргкомитет до 30 июня 2018 г.

Адрес организационного комитета:

Международная Ассоциация «Сварка», ул. К. Малевича 11, г. Киев, 03150.
Тел.: (+38044) 200-82-77; 205-22-49. E-mail: journal@paton.kiev.ua

СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТИ С УСТАНОВИВШИМИСЯ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В работе предложен сравнительный анализ диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности при условии, что они содержат одинаковый уровень установившихся остаточных напряжений. На примере испытаний стыковых соединений сталей СтЗсп, 09Г2С и 14ХМНДФР показано, что сварные соединения с большими механическими свойствами имеют более высокие пределы выносливости во всем исследованном диапазоне изменения предельных установившихся остаточных напряжений. Установлено, что при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла сварные соединения более прочных сталей также имеют более высокие значения предела выносливости, которые увеличиваются более интенсивно с повышением относительных значений среднего напряжения цикла. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: сварное соединение, амплитуда напряжений цикла, среднее напряжение цикла, предел текучести, установившееся остаточное напряжение, предел выносливости, диаграмма предельных напряжений цикла

Исследованиями, проведенными в работе [1], установлено, что диаграммы предельных напряжений цикла (ДПНЦ) стыковых сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности с высокими остаточными напряжениями (ОН) растяжения в области ограниченной долговечности (до количества циклов нагружения $N = 5 \cdot 10^5$), имея одинаковый предел выносливости при симметричном цикле напряжений, с увеличением коэффициента асимметрии цикла R_σ расходятся, показывая преимущество сталей большей прочности. При $N > 2 \cdot 10^6$, начиная с симметричного цикла и до определенного положительного значения R_σ , ДПНЦ сварных соединений сталей разной прочности совпадают. Это означает, что диаграмма более прочного соединения является продолжением таковой, отражающей сопротивление усталости менее прочного соединения. Результаты исследований других типов сварных соединений показали такое же поведение диаграмм предельных напряжений цикла при $N > 2 \cdot 10^6$ [2]. Представление результатов исследований в виде совмещенных диаграмм позволило определить области рационального использования сталей разной прочности в элементах металлоконструкций с необрабатываемыми сварными соединениями, что, несомненно, имеет большую практическую ценность. Проведенный в работе [3] анализ публикаций показал, что каждая точка на ДПНЦ при разных средних напряжениях цикла σ_m или R_σ соответствует пределу выносливости сварного соединения со своим зна-

чением предельного установившегося остаточного напряжения $\sigma_{ост}^y$. Поскольку известно [4], что исходные остаточные напряжения увеличиваются пропорционально пределу текучести основного материала σ_T , то в сварных соединениях сталей большей прочности их значения выше. Поэтому, несмотря на одинаковые получаемые значения пределов выносливости на совпадающем участке диаграмм, т. е. при одинаковых напряжениях от внешней нагрузки, в сварных соединениях сталей большей прочности значения установившихся ОН будут большими. А учитывая, что величина $\sigma_{ост}^y$ при прочих равных условиях играет большую роль в понижении сопротивления усталости, сравниваются результаты испытаний сварных соединений, содержащие разный уровень $\sigma_{ост}^y$. Кроме того, нельзя не отметить, что одинаковые пределы выносливости сварных соединений разной прочности получают при неодинаковом отношении среднего напряжения к пределу текучести материала, т. е. при разном относительном значении среднего напряжения цикла.

В связи с этим представляет интерес в проведении таких исследований, которые позволят сопоставить сопротивление усталости сварных соединений сталей разных классов прочности, содержащих одинаковый уровень предельных установившихся ОН и при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла в диапазоне изменения R_σ , при котором происходит совпадение диаграмм предельных напряжений цикла.

Анализ полученных результатов. Анализ проведен на примере испытаний стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали СтЗсп ($\sigma_T = 300$ МПа), низколегированной стали 09Г2С

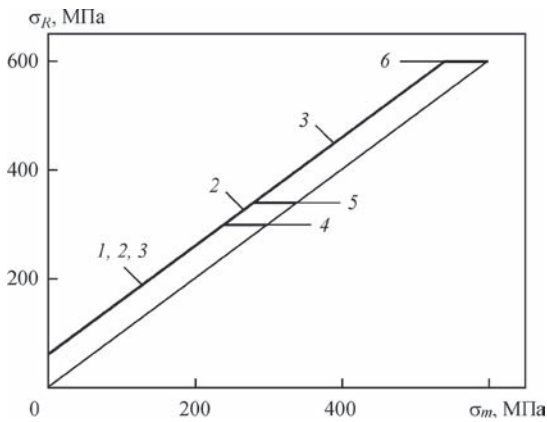


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений цикла стыковых сварных соединений с ОН низкоуглеродистой (1), низколегированной (2) и низколегированной высокопрочной (3) сталей, 4-6 — пределы текучести материала

($\sigma_T = 340$ МПа) и низколегированной высокопрочной стали 14ХМНДФР ($\sigma_T = 600$ МПа). Максимальные исходные ОН растяжения согласно работе [4] в зависимости от класса прочности стали находятся в диапазоне $(0,75...0,85)\sigma_T$, т. е. составляют в среднем, 260, 290 и 450 МПа в сварных соединениях сталей СтЗсп, 09Г2С и 14ХМНДФР, соответственно. Результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений с ОН низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности [4] в виде совмещенных диаграмм предельных напряжений цикла приведены на рис. 1. Видно, что в диапазоне изменения R_σ от -1 до 0,6 или среднего напряжения цикла σ_m до 235 МПа их пределы выносливости σ_R совпадают. Поскольку предельная амплитуда напряжений σ_a не зависит от σ_m , диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений можно описать зависимостью в виде

$$\sigma_R = \frac{2\sigma_{-1}}{1 - R_\sigma}, \quad (1)$$

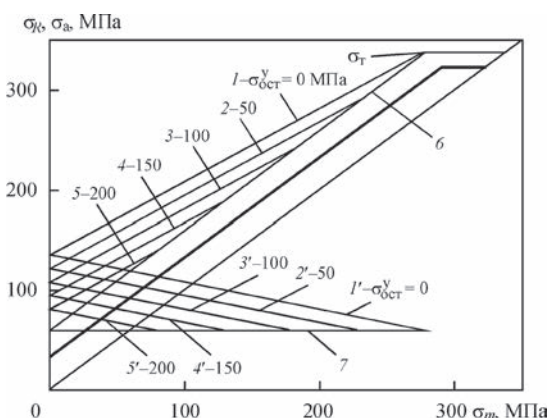


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений (1...5) и предельных амплитуд цикла (1'-5') стыковых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С: 1, 1' — без ОН; 2...5, 2'...5' — с установившимися ОН; 6, 7 — линии предельных напряжений и минимальной предельной амплитуды цикла, соответственно

где $\sigma_{-1} = 65$ МПа — предел выносливости сварного соединения с ОН при симметричном цикле нагружения.

В настоящей работе влияние теоретического коэффициента концентрации напряжений не учитывалось по причине принятого в литературе [5-7] определения ДПНЦ или диаграмм предельных амплитуд цикла (ДПАЦ) только от действия номинальных напряжений. Влияние ОН и напряжений, вызванных статической нагрузкой, считали идентичным [8]. Из анализа рисунка также следует, что при одинаковых значениях пределов выносливости в сварных соединениях сталей разной прочности как значения установившихся ОН, так и отношение предельных напряжений к пределу текучести материала будут разными.

Известно, что с ростом среднего напряжения цикла при условии достижения максимальных напряжений (с учетом остаточных) предела текучести материала происходит снижение исходных ОН до установившегося уровня. Проведенные ранее исследования [3] позволили разделить ДПНЦ или ДПАЦ соединений с разной величиной $\sigma_{ост}^y$, используя результаты испытаний сварных соединений без ОН, определяемые по формулам:

$$\sigma_R = \sigma_{-1m} + (1 - \psi_\sigma)\sigma_m - \psi_\sigma \sigma_{ост}^y, \quad (2)$$

или

$$\sigma_a = \sigma_{-1m} - \psi_\sigma(\sigma_m + \sigma_{ост}^y), \quad (3)$$

где σ_{-1m} — предел выносливости сварного соединения без остаточных напряжений; ψ_σ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений.

В качестве примера в обобщенном виде такие диаграммы стыкового сварного соединения стали 09Г2С с разным уровнем $\sigma_{ост}^y$ приведены на рис.2. Видно, что наклонный участок диаграмм смещается на величину $\Delta\sigma_a = \psi_\sigma \sigma_{ост}^y$ параллельно диаграммам сварных образцов без ОН, и с увеличением $\sigma_{ост}^y$ каждая последующая диаграмма располагается ниже предыдущей. Заканчиваются они на прямых 6 и 7, где каждая точка на этих прямых соответствует или предельному напряжению цикла, или минимальной предельной амплитуде цикла σ_a^H сварного соединения со своим значением предельного $\sigma_{ост}^y$, что обеспечивает реализацию предельного цикла напряжений. При этом среднее напряжение, которое также в этом случае является предельным, смещается на величину $\Delta\sigma_m = \sigma_{ост}^y$. В табл. 1 приведены необходимые расчетные значения предельных напряжений, позволяющие определить подобные диаграммы сварных соединений сталей другой прочности при разных значениях $\sigma_{ост}^y$. Исходя из ограниченного количества экспериментальных данных [9], а также литературных

Т а б л и ц а 1. Расчетные предельные напряжения (МПа) для разного уровня установившихся ОН в сварных соединениях сталей СтЗсп и 14ХМНДФР

Сталь	$\sigma_{ост}^y$, МПа											
	0		50		100		200		300		400	
	σ_R	σ_m	σ_R	σ_m	σ_R	σ_m	σ_R	σ_m	σ_R	σ_m	σ_R	σ_m
СтЗсп ($\sigma_{-1M} = 108$ МПа, $\psi_\sigma = 0,183$)	300	235	250	185	200	135	100	35	-	-	-	-
14ХМНДФР ($\sigma_{-1M} = 110$ МПа, $\psi_\sigma = 0,085$)	600	535	-	-	500	435	400	335	300	235	200	135

данных, приведенных в работе [10], можно предположить, что ДПНЦ сварных соединений стали 14ХМНДФР без ОН может иметь параболический характер. В этом случае ψ_σ будет переменной величиной. Поэтому с целью удобства расчетов диаграмму несколько идеализировали и представили в виде прямой линии.

Представление данных в таком виде позволит перейти к определению предельных напряжений цикла сварных соединений исследуемых сталей при одинаковом уровне установившихся ОН. Чувствительность стыковых сварных соединений к величине $\sigma_{ост}^y$ иллюстрирует рис. 3. Учитывая экспериментальные и расчетные данные, на рисунке представлены зависимости между отношением предельной амплитуды напряжений к соответствующему пределу выносливости и величиной установившихся ОН. В данном случае рассматривалась наиболее интересная характеристика — минимальная предельная амплитуда цикла, при которой реализуется единый предельный цикл напряжений. Из анализа полученных результатов следует, что одинаковые значения $\sigma_{ост}^y$ в сварных соединениях сталей с более высокими механическими свойствами достигаются при более низких σ_a^n/σ_R . И эта разница увеличивается по мере повышения $\sigma_{ост}^y$. Также нетрудно определить значения $\sigma_{ост}^y$ при одинаковом отношении σ_a^n/σ_R . Например, $\sigma_a^n/\sigma_R = 0,5$ в сварных соединениях сталей СтЗсп и 14ХМНДФР можно получить при $\sigma_{ост}^y$, равных 170 и 440 МПа, соот-

ветственно. Пользуясь полученными данными, на рис. 4 представлены зависимости пределов выносливости сварных соединений исследуемых сталей от предельных установившихся ОН при условии, что сварные соединения разной прочности, как уже отмечалось, имеют одинаковый предел выносливости при симметричном цикле, или одинаковую минимальную предельную амплитуду напряжений от внешней нагрузки, что одно и то же, равную 65 МПа. Анализ представленных результатов показал, что с повышением $\sigma_{ост}^y$ пределы выносливости сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированных сталей разной прочности уменьшаются. Однако у сварных соединений сталей с более высокими механическими свойствами они остаются выше во всем исследованном диапазоне изменения $\sigma_{ост}^y$. Например, при изменении $\sigma_{ост}^y$ от 50 до 200 МПа σ_R сварного соединения низколегированной высокопрочной стали по сравнению с низкоуглеродистой выше в 2,2 и 4,0 раза, соответственно. Если при $\sigma_{ост}^y$, равном 200 МПа, снижение предела выносливости сварного соединения низкоуглеродистой стали происходит в 3 раза, то для сварного соединения высокопрочной стали только в 1,5. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о повышении пределов выносливости сварных соединений с увеличением прочности стали в исследованном диапазоне изменения предельных установившихся ОН.

Кроме того, если представить приведенные на рис. 1 ДПНЦ исследуемых сварных соедине-

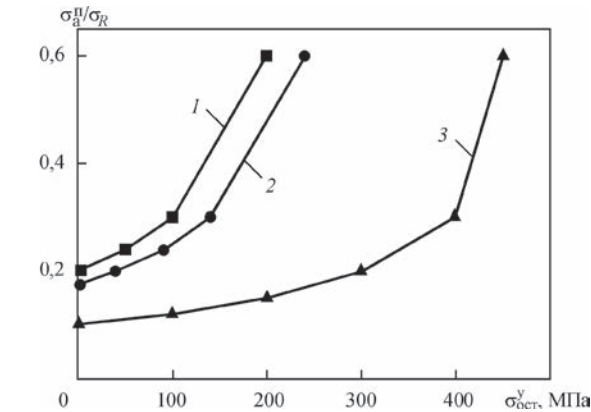


Рис. 3. Зависимости между отношением минимальной предельной амплитуды цикла к пределу выносливости и предельными установившимися ОН в стыковых сварных соединениях сталей СтЗсп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3)

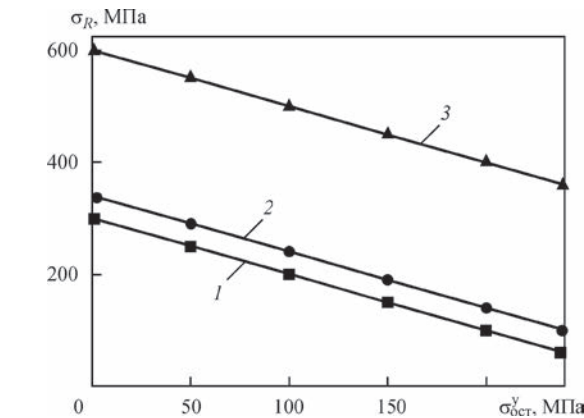


Рис. 4. Зависимости пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей СтЗсп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3) от предельных установившихся ОН

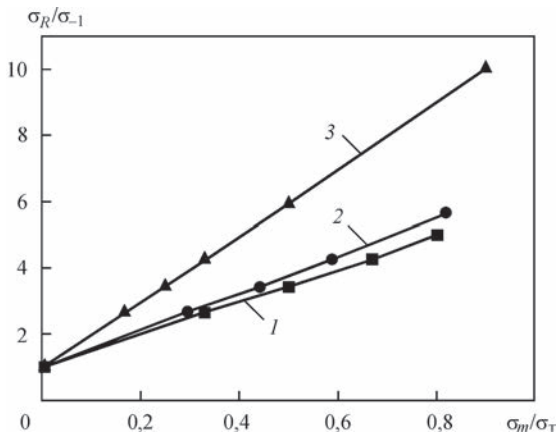


Рис. 5. Зависимости между относительными значениями пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей Ст3сп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3) и средних напряжений цикла

ний в относительных координатах (рис. 5), можно увидеть, что уже изначально при одинаковых относительных значениях средних напряжений от внешней нагрузки σ_m/σ_T они расходятся. При этом сварные соединения стали большей прочности имеют более высокие относительные значения предела выносливости, меняя угол наклона диаграммы в большей степени. Представление данных в таком виде позволяет, учитывая механические свойства исследуемых сталей, анализировать полученные результаты в сопоставимых условиях испытаний. В общем виде уравнение каждой прямой можно записать как

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_{-1}} = 1 + K \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right), \quad (4)$$

где $K = \sigma_{Ti}/\sigma_{-1}$ — угол наклона прямой; σ_{Ti} — предел текучести материала соответствующей стали.

Это дает возможность определения ДПНЦ сварных соединений исследуемых сталей, зная уравнение одной из них. Достаточно записать уравнение диаграммы предельных напряжений цикла, например, сварного соединения стали Ст3сп (прямая 1) в виде

$$\frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{-1}} = 1 + \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{-1}} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right) \quad (5)$$

и решив его относительно σ_m/σ_T , определить уравнение ДПНЦ сварного соединения стали другой прочности, которое будет иметь вид

$$\sigma_{Ri} = \sigma_{-1} + \frac{\sigma_{Ti}}{\sigma_{T1}} (\sigma_{R1} - \sigma_{-1}). \quad (6)$$

В качестве примера в табл. 2. приведены, согласно формулам 5 и 6, расчетные значения пределов выносливости сварных соединений исследуемых сталей при различных значениях σ_m/σ_T . Анализ табличных данных показал, что при одинаковом отношении σ_m/σ_T , т. е. при испытаниях в сопоста-

Таблица 2. Пределы выносливости сварных соединений исследуемых сталей

Сталь	Пределы выносливости σ_R , МПа при разных σ_m/σ_T				
	0	0,1	0,3	0,5	0,7
Ст3сп	65	95	155	215	275
09Г2С	65	100	167	235	305
14ХНДФР	65	125	245	365	485

вимых условиях, по мере повышения прочности стали предел выносливости увеличивается. Причем, с увеличением этого отношения разница между пределами выносливости возрастает.

Пользуясь данными, приведенными на рис. 4 и 5, можно определить значения среднего напряжения цикла, при котором в сварных соединениях исследуемых сталей действуют одинаковые установившиеся ОН и наоборот. Например, при $\sigma_{ост}^y = 150$ МПа σ_m в сварных соединениях сталей Ст3сп, 09Г2С и 14ХМНДФР равно 85, 120 и 380 МПа, соответственно. В свою очередь, при $\sigma_m/\sigma_T = 0,5$ значения $\sigma_{ост}^y$ в сварных соединениях по мере увеличения механических свойств материала составляют 85, 100 и 230 МПа, что соответствует 0,28...0,38 предела текучести соответствующей стали. Кроме этого, при отсутствии полномасштабных исследований также нетрудно определить ДПНЦ исследуемых сварных соединений. Для этого путем совместного решения зависимостей (2) и (4) для заданного значения σ_m достаточно определить величину установившегося ОН как

$$\sigma_{ост}^y = \frac{\sigma_{-1m} - \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m}{\psi_\sigma}, \quad (7)$$

а затем по формуле 2 определяются пределы выносливости сварных соединений исследуемых сталей с имеющимися $\sigma_{ост}^y$.

Таким образом, полученные данные позволили сопоставить предельные напряжения в сварных соединениях сталей разной прочности при одинаковом уровне как установившихся ОН, так и относительных действующих напряжений от внешней нагрузки, что может помочь в выборе стали при известных условиях эксплуатации.

Выводы

1. Предложена методика определения диаграмм предельных напряжений цикла стыковых сварных соединений сталей разного класса прочности, позволяющая устанавливать закономерности изменения пределов выносливости сварных соединений при одинаковом уровне предельных установившихся остаточных напряжений и относительных напряжений от внешней нагрузки.

2. Установлено, что при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла сварные соединения более прочных сталей содер-

жат большие установившиеся остаточные напряжения и имеют более высокие значения предела выносливости. С повышением относительных значений средних напряжений цикла пределы выносливости сварных соединений более прочных сталей повышаются более интенсивно.

3. Показано повышение пределов выносливости сварных соединений с увеличением прочности стали в исследованном диапазоне изменения предельных установившихся остаточных напряжений.

Список литературы

1. Кныш В.В., Соловей С.А. (2017) *Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями*. Киев, КПИ им. Игоря Сикорского.
2. (2014) *Сталеві конструкції*. Норми проектування ДБН В.2.6-198.
3. Дегтярев В.А. (2016) Прогнозирование предельных амплитуд цикла напряжений сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями. *Автоматическая сварка*, **10**, 16–21.
4. Труфяков В. И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
5. Трошенко В. Т., Цыбанев Г. В., Грязнов Б. А., Налимов Ю. С. (2009) *Прочность материалов и конструкций: Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия*. Киев, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Т. 2.
6. Крижановский В. И., Касперская В. В., Погребняк А. Д. (2008) Оценка предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением сжатием, изгибом и кручением. *Проблемы прочности*, **5**, 81–88.
7. Golub V. P. (2001) Experimental analysis of high-temperature creep, fatigue and damage. 1. Analysis methods. *Int. Appl. Mech.*, **37**, 4, 425–455.
8. Павлов В. Ф., Кирпичев А. А., Иванов В. Б. (2008) *Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений*. Самара, ООО «Издательство СНЦ».
9. Мюнзе В. Х. (1968) *Усталостная прочность сварных стальных конструкций*. Москва, Машиностроение.
10. Одинг И. Л. (1962) *Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов*. Москва, Машгиз, 260 с.

References

1. Knysh, V.V. Solovej, S.A. (2017) *Improvement of service life of welded joints with fatigue damages*. Kiev, KPI [in Russian].
2. (2014) *Steel structures*. Design standards DBN V.2.6.-198 [in Russian].
3. Degtyarev, V.A. (2016) Prediction of limiting amplitudes of cycle stresses of welded joints with steady residual stresses. *The Paton Welding J.*, **10**, 14-19.
4. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Troshchenko, V.T., Tsybanev, G.V., Gryaznov, B.A., Nalimov, Yu.S. (2009) *Strength of materials and structures. Fatigue of metals. Influence of surface state and contact interaction*. Kiev, IPS, Vol. 2 [in Russian].
6. Krizhanovsky, V.I., Kasperskaya, V.V., Pogrebnyak, A.D. (2008) Evaluation of limit state of structural steels under asymmetric multicycle loading by tension, compression, bending and torsion. *Problemy Prochnosti*, **5**, 81-88 [in Russian].
7. Golub, V.P. (2001) Experimental analysis of high-temperature creep, fatigue and damage. 1: Analysis methods. *Int. Appl. Mech.*, **37**, 4, 425-455.

8. Pavlov, V.F., Kirpichyov, V.A., Ivanov, V.B. (2008) *Residual stresses and fatigue resistance of strengthened parts with stress concentrators*. Samara, ООО Izd-vo SNTs [in Russian].
9. Myunze, V.Kh. (1968) *Fatigue strength of welded steel structures*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Oding, I.L. (1962) *Acceptable stresses in machine-building and cyclic strength of metals*. Moscow, Mashgiz [in Russian].

В. О. Дегтярев

Институт проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.
01014, м. Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2.
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

ОПР ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ З УСТАЛЕНИМИ ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

В роботі запропоновано порівняльний аналіз діаграм граничних напружень циклу зварних з'єднань низьковуглецевих та низьколегованих сталей різної міцності при умові, що вони містять однаковий рівень усталених залишкових напружень. На прикладі досліджень стикових зварних з'єднань сталей Ст3сп, 09Г2С та 14ХМНДФР показано, що зварні з'єднання з більшими механічними властивостями мають більш високі границі витривалості у всьому дослідженому діапазоні змінювання граничних усталених залишкових напружень. Встановлено, що при однаковому відносному значенні середнього напруження циклу зварні з'єднання більш міцних сталей також мають більш високі значення границі витривалості, які підвищуються більш інтенсивно з підвищенням відносних значень середнього напруження циклу. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: зварне з'єднання, амплітуда напружень циклу, середня напруга циклу, межа текучості, усталене залишкове напруження, межа витривалості, діаграма граничних напружень циклу

V. A. Degtyarev

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength.
2 Timiryazevskaya Str., Kyiv, 01014. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

FATIGUE RESISTANCE OF STEEL WELDED JOINTS OF DIFFERENT STRENGTH WITH FINAL RESIDUAL STRESSES

A work proposes a comparative analysis of the diagrams of cycle limit stresses in welded joints of low carbon and low alloy steels of different strength under condition that they have the same level of final residual stresses. By the example of testing of St3sp (killed), 09G2S and 14KhMNDFR steel butt welded joints it is shown that the welded joints with high mechanical properties have higher endurance limits in all investigated range of change of the limit final residual stresses. It was found that welded joints of stronger steels have also higher values of endurance limit at the same relative value of average cycle stress. They rise more intensively with increase of the relative values of cycle average stress. 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: welded joint, cycle stress amplitude, average cycle stress, yield limit, final residual stress, endurance limit, diagram of cycle limit stresses

Поступила в редакцию 23.01.2018

ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ22

С. Л. ШВАБ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО, С. В. АХОНИН

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

В статье приведены результаты исследований влияния фторидов редкоземельных металлов на структурные изменения металла шва титанового сплава ВТ22 с целью использования их в составе флюсового наполнителя опытной порошковой проволоки для сварки этого сплава. Показано, что в швах, выполненных аргонодуговой сваркой на сплаве ВТ22 по флюсу, состоящему из фторидов редкоземельных металлов, наблюдается измельчение β -зерен. Введение LaF_3 в сердечник опытной порошковой титановой проволоки ППТ-22 в комплексе с термической обработкой позволило повысить ударную вязкость сварных швов при аргонодуговой сварке сплава ВТ22 в 2 раза — до 30,6 Дж/см². Библиогр. 8, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ22, фториды редкоземельных металлов, порошковая проволока

Аргонодуговая сварка (АДС) является наиболее универсальным способом соединения конструкций из титановых деталей, так как позволяет осуществлять сварку в различных пространственных положениях, быстро переналаживать оборудование при изменении типа соединения и толщины свариваемого металла [1, 2]. В связи с высокой химической активностью титан при повышенных температурах и особенно в расплавленном состоянии активно поглощает кислород и азот, что приводит к резкому снижению пластичности. Поэтому качество сварных соединений определяется, главным образом, надежностью защиты зоны сварки, а основной трудностью при сварке титана является обеспечение надежной защиты от атмосферы не только сварочной ванны и корня шва, но и остывающих участков сварного соединения, нагретых выше 400 °С, т. е. до тех температур, при которых начинается заметное взаимодействие титана с газами — кислородом, водородом и азотом.

Одним из преимуществ сварки титана с использованием флюсов является наличие оболочки расплавленного флюса, покрывающего зону сварки и защищающего ее от вредного влияния O_2 , H_2 и N_2 . В процессе сварки протекают металлургические реакции, которые могут привести к обогащению шва этими вредными примесями. Поэтому одно из требований при сварке титана к флюсовым системам — это отсутствие оксидов в них. Доказано [3], что удаление из флюса оксидов позволяет ограничить в наплавленном металле содержание кислорода менее 0,1 %.

Основные требования, предъявляемые к флюсу для сварки титана, определяются, в первую очередь, сравнительно высокой температурой плавления титана, поэтому сварочные флюсы для него должны отличаться повышенной тугоплавкостью

[3]. Во избежание насыщения шва водородом флюс должен иметь минимальную гигроскопичность; обеспечивать стабильность дугового разряда в процессе сварки, а после окончания ее — легкую отделимость шлаковой корки от застывшего металла шва, что является одним из критериев технологичности флюсовой системы.

С точки зрения технологичности ни один из фторидов щелочных и щелочноземельных металлов не пригоден в качестве однокомпонентного флюса. Поэтому в качестве флюсов при сварке титана применяют многокомпонентные системы, состоящие из фторидов щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов, а также хлоридов щелочноземельных металлов [3].

Применение фторидных флюсов при АДС титана приводит к уменьшению размеров сварочной ванны, сокращению времени существования металла в расплавленном состоянии, а также связывает водород в нерастворимые в металле соединения TiF_xH_y , что снижает вероятность возникновения зародышей газовой фазы в сварочной ванне и тормозит образование пор в жидком титане.

Важное свойство фторида кальция во флюсовой системе — это способность интенсивно взаимодействовать с водяным паром с образованием фтористого водорода. Возможность удаления влаги из зоны сварки и, благодаря этому, защиты металла шва от насыщения водородом и кислородом является важной особенностью сварки титана под флюсом на основе CaF_2 . Поэтому, за основу флюсовой системы авторами данной работы был выбран этот компонент.

Экспериментальным методом было установлено, что при сварке с BaF_2 отмечается характерная особенность шлаковой корки. Она легко скалывается целыми кусками с поверхности соединения. С этой целью необходимо введение этого компонента во флюсовую систему.

Таблица 1. Физические свойства компонентов флюсовой системы

Свойства компонентов	CaF ₂	SrF ₂	BaF ₂
Температура, °С плавления кипения	1411 2500	1473 2460	1280 2260
Плотность, г/см ³	3,18	4,18	4,83
Теплота образования, кДж/моль	608	1222	599,1

Для повышения тугоплавкости флюсовой системы необходимо ввести компонент с повышенной температурой плавления (табл. 1). Известно [4], что системы CaF₂–BaF₂, CaF₂–SrF₂ и SrF₂–BaF₂ представляют собой непрерывный ряд твердых растворов. Наиболее тугоплавкая из них — система CaF₂–SrF₂. Следовательно, переход от двухкомпонентной системы CaF₂–BaF₂ к системе CaF₂–SrF₂–BaF₂ должен привести к повышенной температуре плавления флюса.

Изучив влияние фторидов щелочных и щелочноземельных металлов на процесс сварки титана, авторами данной работы была выбрана система CaF₂–SrF₂–BaF₂, которая послужила флюсовой основой в сердечнике порошковой проволоки ППТ-22 для сварки титанового сплава ВТ22. Данная проволока состоит из оболочки из титанового сплава ВТ1 и сердечника (гранулы из сплава ВТ22 и флюсовая составляющая) [5].

В работе [3] была исследована возможность рафинирования металла шва введением во флюс таких активных к кислороду и азоту элементов, как церий, лантан, иттрий в виде фторидов. Наиболее активное рафинирующее действие оказывает иттрий, наименьшее — церий, промежуточное положение занимает лантан. Установлено, что для рафинирования металла шва во флюс следует вводить не более 10 % этих фторидов. Тогда содержание кислорода в металле шва составит 0,09 % и с дальнейшим повышением количества LaF₃ или YF₃ во флюсе останется постоянным.

Авторы работы [6] исследовали возможность модифицирования металла швов с помощью флюсов, содержащих фториды редкоземельных металлов. В работе показано, что при сварке титанового β-сплава ВТ15 под флюсом, содержащим LaF₃, наблюдается измельчение структуры шва, повышение механических свойств металла шва и снижение в нем содержания кислорода. При этом отмечено повышение его пластических свойств и ударной вязкости. Химико-спектральным методом было установлено, что металлургическое взаимодействие жидкого металла и расплавленного флюса, в состав которого входит LaF₃, сопровождается переходом лантана в металл шва.

В настоящей работе было исследовано влияние фторидов редкоземельных металлов на структурные изменения металла шва сплава ВТ22 с целью

использования их в составе флюсового наполнителя порошковой проволоки ППТ-22.

Особенности воздействия фторидов редкоземельных металлов при сварке на структурные изменения в металле швов сплава ВТ22. Исследования осуществляли на сварных образцах толщиной 6 мм из сплава ВТ22, полученных методом АДС по флюсу за один проход и без применения флюса. Эксперименты проводили с фторидами редкоземельных металлов LaF₃ и YF₃ на режиме: $I_{\text{св}} = 200 \text{ А}$, $v_{\text{св}} = 8 \text{ м/ч}$, $L_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $U_{\text{д}} = 12,5 \dots 13,0 \text{ В}$.

Сравнение макроструктуры полученных наплавов показало, что при сварке по флюсам LaF₃ и YF₃ формы швов между собой не отличаются, ширина шва в обоих случаях составляет 13,5 мм. В шве, выполненном АДС без флюса, максимальная глубина проплавления составляет 2,5 мм и ее максимум находится по оси шва, а в случае АДС по флюсам LaF₃ и YF₃ проплавление находится на этом же уровне и практически одинаково по всей ширине шва (рис. 1).

Во всех трех вариантах после сварки металл шва состоит из зерен β-фазы разного размера и формы. Большинство β-зерен имеют неравноосную форму, коэффициент формы зерна (отношение длины к ширине) составляет от 1 до 5, зерна вытянуты в вертикальном или же близком к вертикали направлении (рис. 2, а, в, д).

Известно [7], что межосевые и междендритные промежутки в металле шва в большей степени обогащены β-стабилизаторами, чем внутренние объемы осей, поэтому наиболее интенсивный распад β-фазы происходит во внутренних объемах как наименее стабильных участках. Наиболее интенсивный распад β-твердого раствора после сварки произошел в шве, выполненном АДС без применения флюса (рис. 2, д). Очевидно, что условия охлаждения металла швов, выполненных с применением флюсов, отличаются от условий охлаждения металла швов, выполненных без применения флюсов.

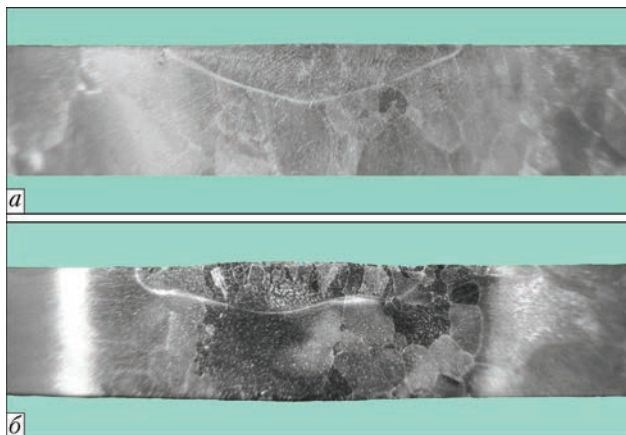


Рис. 1. Макрошлифы сварных соединений сплава ВТ22, выполненных АДС: а — без применения флюса; б — по флюсу YF₃

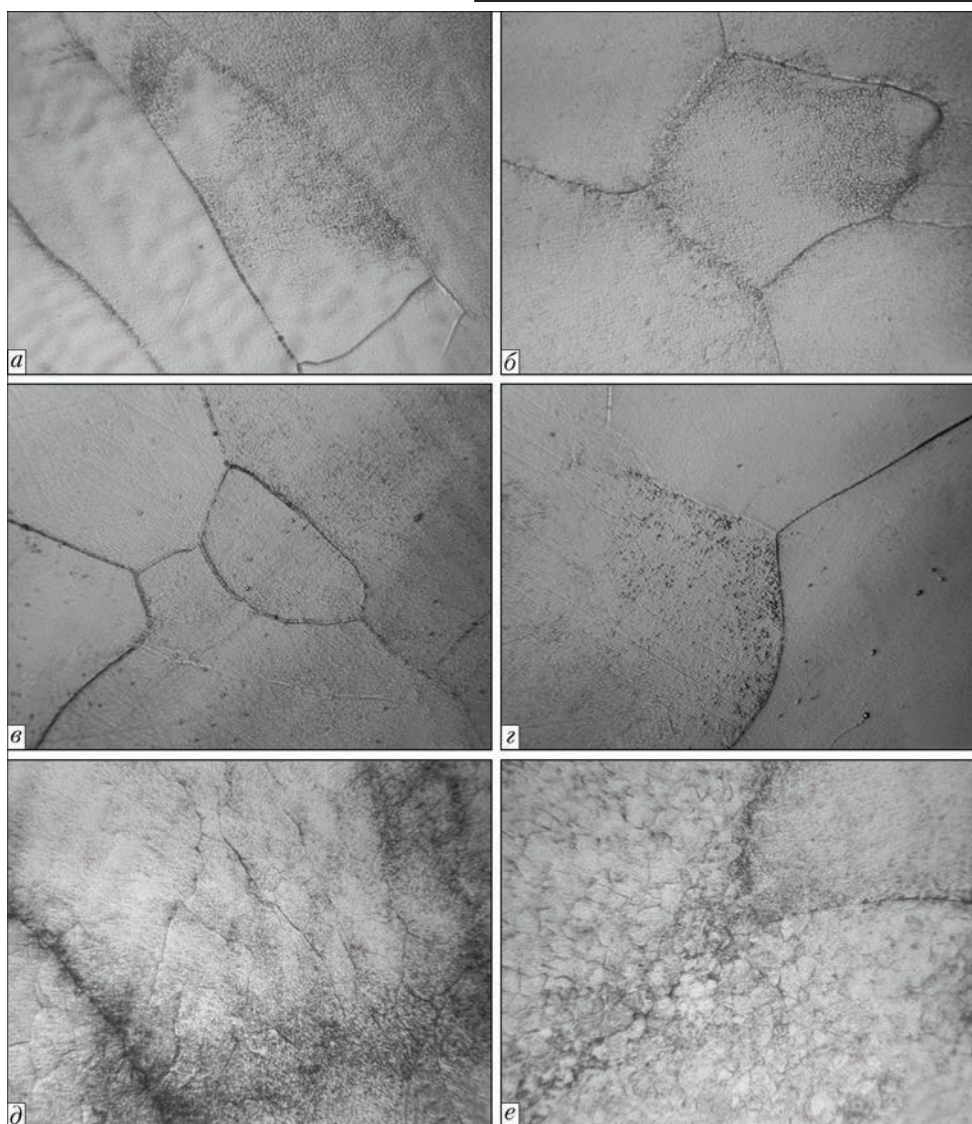


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) сварных соединений: *а* — шов, выполненный АДС по флюсу YF_3 ; *б* — ЗТВ образца с YF_3 ; *в* — шов, выполненный АДС по флюсу LaF_3 ; *г* — ЗТВ образца с LaF_3 ; *д* — шов, выполненный АДС без флюса; *е* — ЗТВ образца без флюса

Интенсивность распада β -фазы в швах сплава ВТ22 зависит от скорости охлаждения после сварки, и чем выше скорость охлаждения, тем ниже интенсивность распада. Например, в швах сплава ВТ22, выполненных ЭЛС и характеризующихся очень высокой скоростью охлаждения, фиксируется метастабильная β -фаза, в то время как в швах, выполненных ЭШС и отличающихся значительно меньшей скоростью охлаждения, происходит значительный распад β -фазы. После АДС с применением фторидов иттрия и лантана интенсивность распада β -твердого раствора меньше, чем после АДС без флюса. Анализ структур подтверждает известный факт, что скорость охлаждения металла шва, выполненного с использованием флюсов, выше.

Помимо различия в интенсивности распада β -фазы в швах, можно отметить, что в нижней части шва и, особенно, в ЗТВ образца, сваренного АДС без флюса, сильно развиты полигонизационные процессы. Крупные зерна β -фазы после АДС

без применения флюса имеют развитую субструктуру (рис. 2, *д*, *е*) в отличие от образцов, сваренных АДС по флюсам LaF_3 и YF_3 (рис. 2, *а–г*). В результате действия сварочных деформаций в крупных β -зернах отдельные фрагменты зерна разворачиваются друг относительно друга на угол в несколько градусов, образуя субструктуру.

Необходимо отметить, что в швах, выполненных АДС по флюсу, состоящему из фторида редкоземельного металла (LaF_3 или YF_3), в состоянии после сварки наблюдается измельчение β -зерен по сравнению с АДС без применения флюса. Анализ распределения зерен в швах по площади их поперечного сечения показал, что микроструктура металла шва, выполненного АДС без применения флюса, состоит из небольшого числа больших β -зерен, а в швах, выполненных с применением фторидов как иттрия, так и лантана, число мелких зерен значительно выше, чем в шве, выполненном без применения флюса. К примеру, в шве, по-

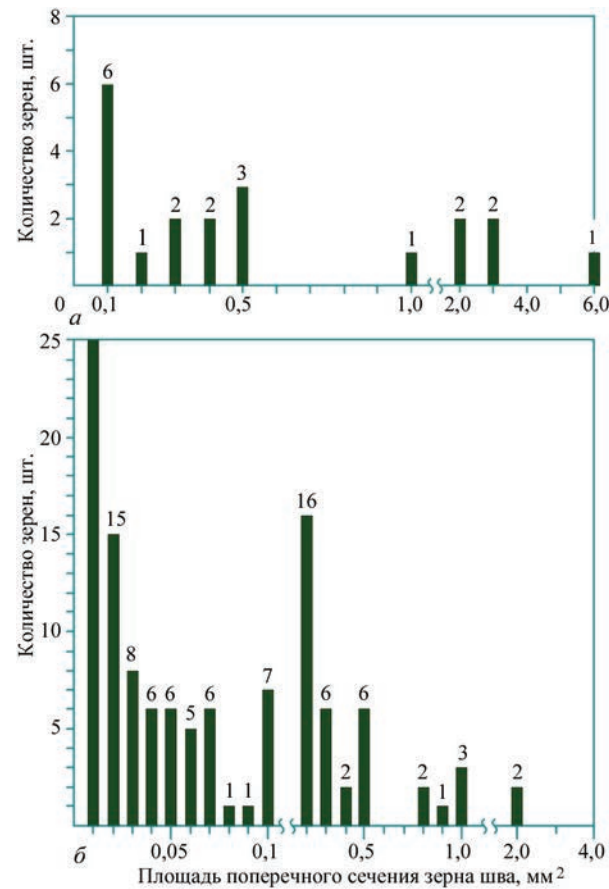


Рис. 3. Гистограммы распределения количества зерен в швах сплава ВТ22 в зависимости от площади их поперечного сечения: а — АДС без флюса; б — АДС по флюсу YF₃

лученном с фторидом редкоземельного металла, проявляется в 10 раз больше зерен площадью до 0,1 мм², в сравнении с таким же участком шва, полученном без участия лантана или иттрия (рис. 3).

Показатели микротвердости (рис. 4) швов, выполненных с LaF₃ и YF₃, находятся на уровне 3450 МПа, что на 150 МПа выше от показателей

Таблица 2. Параметры режимов сварки образцов

Номер прохода	I _{св} , А	U _д , В	v _{св} , м/ч	v _{под} , м/ч
1	180	10,5	9	24
2, 3	200	12,0	9	30

швов, выполненных без введения редкоземельных элементов и ближе к значениям микротвердости основного металла (3800 МПа).

Таким образом, применение редкоземельных элементов при сварке двухфазного (α+β)-титанового сплава ВТ22 при значениях микротвердости шва, близких к основному металлу, приводит к измельчению β-зерен шва, что, в свою очередь, дает предпосылки к увеличению пластичности сварного шва. Поэтому авторы данной работы исследовали введение фторидов редкоземельных элементов во флюсовую содержащую порошковой проволоки для сварки титанового сплава ВТ22.

Сварка и термическая обработка сплава ВТ22 с присадочной проволокой, содержащей редкоземельные элементы. Сварку выполняли на пластинах из сплава ВТ22 толщиной 8 мм, в три прохода с разделкой кромок в 90° (табл. 2). При сварке использовали внешнее поперечное переменное магнитное поле (частота 20 Гц, величина магнитной индукции 4 мТл) для перемещения столба дуги и, соответственно, сварочной ванны поперек шва. В качестве присадочного материала применяли опытную порошковую проволоку ППТ-22 диаметром 2,9 мм. Во флюсовый наполнитель проволоки был введен флюс системы CaF₂-SrF₂-BaF₂-LaF₃.

Результаты механических испытаний сварного соединения (табл. 3) показали, что предел прочности металла шва с участием LaF₃ ниже, чем без него, однако ударная вязкость сварного соединения с LaF₃ выше на 30 %, что может быть обусловлено мелкозернистой структурой металла шва. Следует отметить, что все образцы на растяжение разрушились не по шву, а за его границами, по ЗТВ.

Для повышения механических свойств сварных соединений из титанового сплава ВТ22 их подвергают термической обработке (ТО). ТО титановых сплавов основана главным образом на полиморфном α↔β-превращении. В результате ТО структура стабилизируется, значительно по-

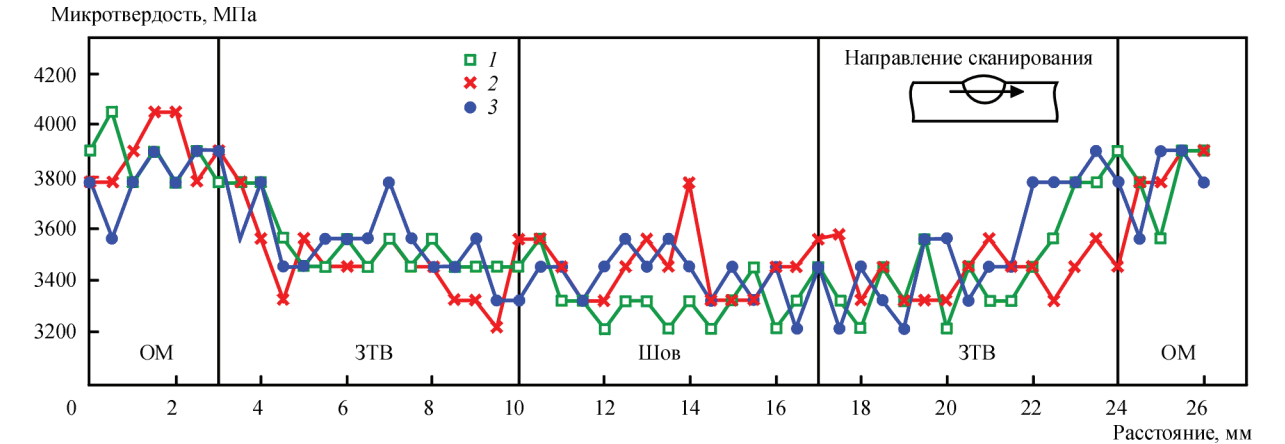


Рис. 4. Микротвердость сварных соединений, выполненных АДС без флюса (1), по флюсу YF₃ (2) и по флюсу LaF₃ (3)

Таблица 3. Результаты механических испытаний сварных соединений после сварки

Место испытаний	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
Основной металл	1039,7*	32,6
Сварное соединение с LaF ₃	865,3	8,9
Металл шва без LaF ₃ [5]	1065,1	5,9

* Приведены результаты испытаний трех образцов.

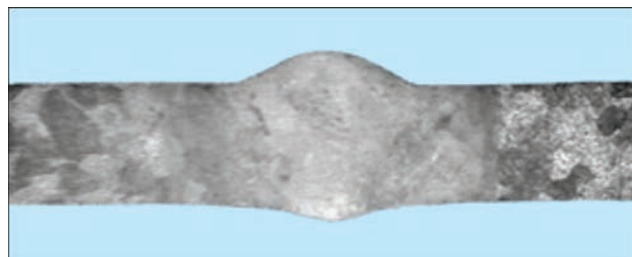


Рис. 5. Макрошлиф сварного соединения, полученного с порошковой проволокой ППТ-22 после двухступенчатой ТО.

вышается пластичность и ударная вязкость швов. Одновременно с этим снижаются внутренние напряжения, возникающие в процессе сварки.

У сплава BT22 со значительным содержанием β -фазы при ТО происходят не только процессы рекристаллизации, но и существенно изменяется фазовый состав. Это в значительной степени влияет на механические свойства. Изменения фазового состава регламентируются скоростями охлаждения, а также различными ступенчатыми циклами нагрева.

При выборе режима ТО необходимо учитывать температуру рекристаллизации, влияющей на характер фазовых превращений. Исходя из анализа литературных данных [7, 8], был выбран достаточно технологически простой процесс ТО сварных соединений, выполненных с использованием присадочной порошковой проволоки: выдержка в печи при температуре 750 °С в течение 1 ч, охлаждение с печью.

Исследование макроструктуры металла шва после отжига показало, что отжиг способствовал формированию однородной и равномерной структуры металла по высоте шва (рис. 5).

Анализ полученных результатов механических испытаний образцов показывает положительное суммарное влияние ТО при введении LaF₃ во флюсовый наполнитель. В результате при незначительном уменьшении прочности (на 10 %), в сравнении с образцами без введения редкоземельных элементов, ударная вязкость соединения с LaF₃ в 2 раза выше, чем без его введения, и на 35 % выше показателей основного металла (табл. 4).

Результаты исследований показывают, что введение редкоземельных элементов во флюсовую составляющую порошковой проволоки для сварки титанового сплава BT22 оказывает влияние на

Таблица 4. Результаты механических испытаний после ТО основного металла и сварного соединения

Место испытаний	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
Основной металл	1057,5*	19,6
Сварное соединение с LaF ₃	955,4	30,6
Сварное соединение без LaF ₃ [5]	1121,6	14,8

* Приведены результаты испытаний трех образцов.

структурные особенности формирования сварного шва, а именно, увеличение количества мелких зерен. Показано, что ТО сварных соединений из сплава BT22, выполненных многопроходной сваркой с опытной присадочной проволокой ППТ-22, способствовала увеличению ударной вязкости соединений в 2,5 раза. Введение в проволоку LaF₃ позволило добиться увеличения ударной вязкости еще в 2 раза (до 30,6 Дж/см²), что выше показателей основного металла.

Список литературы

- (2003) *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Leyens C., Peters M. (ed.). Wiley-VCH, Germany.
- Иноземцев А. А., Башкатов И. Г., Коряковцев А. С. (2010) *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. Москва, ВИАМ.
- Гуревич С. М., Замков В. Н., Блашук В. Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд., доп. и перераб. Киев, Наукова думка.
- Посыпайко В. И., Алексеева В. А. (ред.) (1977) *Диаграммы плавления солевых систем. Справочник*. Ч. 1. Москва, Металлургия.
- Прилуцкий В. П., Шваб С. Л., Петриченко И. К. и др. (2016) Аргодуговая сварка титанового сплава BT22 с использованием присадочной порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*, 9, 10–14.
- Гуревич С. М., Замков В. Н., Загребенюк С. Д., Кушнirenко Н. А. (1964) Влияние флюсов, содержащих редкоземельные элементы, на структуру и свойства сварных швов сплава BT15. *Автоматическая сварка*, 4, 93–94.
- Грабин В. Ф. (1975) *Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Лясцкая В. С. (2003) *Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов*. Москва, Экомет.

References

- (2003) *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Ed. by C. Leyens. Germany, Wiley-VCH.
- Inozemtsev, A.A., Bashkatov, I.G., Koryakovtsev, A.S. (2010) *Modern titanium alloys and problems of their development*. Moscow, VIAM [in Russian].
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. 2nd ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- (1977) *Diagrams of meltability of salt systems: Refer. book; Pt 1*. Ed. by Posypajko, V.I. et al. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Prilutsky, V.P., Schvab, S.L., Petrychenko, I.K. et al. (2016) Argon arc welding of titanium VT22 alloy using filler flux-cored wire. *The Paton Welding J.*, 9, 9–13.
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Zagrebenyuk, S.D. et al. (1964) Influence of fluxes containing rare-earth elements on structure and properties of welds of VT15 alloy. *Avtomatic. Svarka*, 4, 93–94 [in Russian].
- Grabin, V.F. (1975) *Basics of physical metallurgy and heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

8. Lyasotskaya, V.S. (2003) *Heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Moscow, Ekomet [in Russian].

Ключові слова: титановий сплав BT22, фториди рідкісноземельних металів, порошковий дріт

С. Л. Шваб, І. К. Петриченко, С. В. Ахонін

S.L. Schwab, I.K. Petrychenko, S.V. Akhonin

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

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ФЛЮСІВ, ЩО МІСТЯТЬ З'ЄДНАННЯ
РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НА СТРУКТУРУ
І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ
ТИТАНОВОГО СПЛАВУ BT22

INFLUENCE OF RARE-EARTH ELEMENTS
ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDS
OF TITANIUM ALLOY VT22

У статті наведено результати досліджень впливу фторидів рідкісноземельних металів на структурні зміни металу шва титанового сплаву BT22 з метою використання їх у складі флюсового наповнювача дослідного порошкового дроту для зварювання цього сплаву. Показано, що в швах, виконаних аргонодуговим зварюванням на сплаві BT22 по флюсу, що складається з фторидів рідкісноземельних металів, спостерігається подрібнення β -зерен. Введення LaF_3 в осердя дослідного порошкового титанового дроту ППТ-22 в комплексі з термічною обробкою дозволило підвищити ударну в'язкість зварних швів при аргонодуговому зварюванні сплаву BT22 у 2 рази — до 30,6 Дж/см². Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 5.

The article presents the results of investigations of influence of rare-earth metal fluorides on structural changes in the metal of a titanium alloy VT22 for the purpose of using them in the flux filler of an experimental flux-cored wire for welding this alloy. It was shown that in welds made by argon-arc welding on VT22 alloy along the flux consisting of fluorides of rare-earth metals, the refinement of β -grains is observed. The introduction of LaF_3 into the core of the experimental flux-cored titanium wire PPT-22 in combination with heat treatment allowed increasing the impact toughness of welds in argon-arc welding of VT22 alloy by 2 times — to 30.6 J/cm². 8 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: titanium alloy VT22, rare-earth metals fluorides, flux-cored wire

Поступила в редакцію 31.01.2018

Вниманию читателей!

Вышел в свет первый выпуск информационного бюллетеня ассоциации «Электрод» (www.assotitacion-electrode.com) за I кв. 2018 г.

В номере:

Семинар в ИЭС им. Е.О.Патона (по результатам участия в выставке «Schweissen & Schneiden 2017»)
XVI Международный промышленный форум-2017
Конференция Общества сварщиков Украины
Мазур А.А., Липодаев В.Н., Пустовойт С.В. Петрук В.С.
Современное состояние рынка сварочного оборудования и материалов в Украине
Белый А.И., Жудра А.П., Дзыкович В.И. Разработка электродов для наплавки композиционных сплавов
Зверева И.Н., Картунов А.Д., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емельюшин А.Н. Особенности структуры и свойств сварных швов трубной стали, выполненных электродами различных марок
Поздравляем! Именинники января, февраля, марта
Представляем новых членов Ассоциации:
(интервью с Генеральным директором ОЗСО ИЭС им. Е.О.Патона А.В. Степахо)
Сварочный календарь событий
Календарь выставок и конференций в 2018 г.



Информационная поддержка — журнал «Автоматическая сварка».

О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (ОБЗОР)

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ¹, М. В. АГЕЕВА²

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет».

87500, Донецкая обл., г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: razmyshljaev@rambler.ru

²Донбасская государственная машиностроительная академия.

84313, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Академическая, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Целью работы является анализ имеющихся литературных данных о механизме измельчения структуры швов при дуговой сварке с воздействием управляющих магнитных полей. Показано, что в настоящее время различные авторы по-разному объясняют факты измельчения структурных составляющих металла шва либо наплавленного металла при дуговой сварке с воздействием продольного магнитного поля. Нет единого мнения авторов о важнейших факторах, определяющих измельчение структурных составляющих металла шва при сварке с воздействием продольного магнитного поля. Показано, что необходимо также изучить особенности влияния продольного магнитного поля на формирование вторичных структур в шве при дуговой сварке. Не установлено, на какой стадии происходит измельчение структуры сварных швов при воздействии магнитных полей: при первичной кристаллизации, либо при вторичных превращениях или одновременно на этих двух стадиях. Необходимо выполнение исследований в этом направлении с целью разработки оптимальных параметров внешних магнитных полей для измельчения структуры швов при дуговой сварке. Библиогр. 20, рис. 1.

Ключевые слова: измельчение структуры металла шва, кристаллит, внешние магнитные поля, фактор измельчения

Как известно, уменьшение размера зерна приводит к повышению предела текучести металла в соответствии с соотношением Холла–Петча [1]. Имеется значительное количество публикаций, в которых установлено, что при дуговой сварке с воздействием продольных магнитных полей (ПРМП), либо поперечных магнитных полей (ПОМП), происходит измельчение структуры металла шва (наплавки) и повышение механических свойств сварных швов. Однако воздействие указанных полей при сварке не всегда приводит к измельчению металла шва. Авторы по-разному объясняют влияние магнитных полей (МП) на величину структурных составляющих металла сварного шва, образующегося при его кристаллизации.

Рассмотрим существующие представления (гипотезы) некоторых авторов о механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием МП.

Следует отметить, что имеются фундаментальные работы по теории кристаллизации металла в процессе его затвердевания [2, 3]. Однако эти работы относятся к литейным процессам, либо к получению сверхчистых монокристаллитов. Условия кристаллизации металлов, описанные в них, существенно отличаются от условий кристаллизации металла в сварочной ванне, и частично могут быть применены к условиям сварочного процесса.

Целью настоящей работы является анализ имеющихся публикаций по установлению механизма измельчения первичной и вторичной структуры швов при сварке с воздействием магнитных полей.

В одной из первых работ [4] применительно к сварке титанового сплава ОТ4-1 толщиной 1,5 мм и жаропрочного аустенитного сплава типа нимо-ник толщиной 10 мм с воздействием ПРМП высказано предположение о том, что малозаметное измельчение структуры швов сплава ОТ4-1 связано с тем, что фронт кристаллизации имеет относительно ровную поверхность, а значительное измельчение шва аустенитного сплава связано с тем, что фронт кристаллизации представляет собой массу растущих игл, дробление которых требует меньших затрат энергии, т. е. механизм влияния детально не указан.

Позже, в публикации [5] этих авторов указано, что основное значение для измельчения структуры имеют диффузионные процессы и температурные колебания жидкой фазы, периодически меняющие степень концентрационного переохлаждения. При этом важны не механические, а температурные колебания жидкой фазы в ванне. Но решающую роль при этом имеет концентрационное переохлаждение.

В работе [6] установлено, что низкочастотная вибрация сварочной ванны при сварке не приводит к звуковому резонансному воздействию и не

может разрушить растущие кристаллы. Полагают, что в расплаве возникают волны давления. Это создает мгновенные градиенты температур между соседними точками в остывающем расплаве, что приводит к увеличению числа дислокаций и к измельчению зерна.

Вопрос о возможности дробления растущих кристаллов движущимся под воздействием ПРМП (либо ПОМП) жидким металлом является дискуссионным. В одной из работ [7] утверждается, что такое дробление происходит, а в другой работе [8] утверждается, что не происходит.

В работе [9] проводили киносъемку процесса кристаллизации при сварке никеля с воздействием ПРМП. Установлено, что кристаллизация начинается на оплавленных зернах основного металла, затем происходит продвижение плоского фронта кристаллизации. Скопление примесей перед движущимся плоским фронтом стимулирует концентрационное переохлаждение, что приводит к распаду этого плоского фронта и образованию ячейки на межфазной поверхности. В результате выравнивания температур в объеме сварочной ванны при сварке с воздействием ПРМП перед фронтом кристаллизации повышается температурный градиент [10–12].

В работе [11] рассмотрены нетравленные поверхности фронта кристаллизации, выявленные при выплеске жидкого металла ванны в процессе сварки титана и его сплавов. Обнаружено уменьшение поперечных размеров кристаллов при воздействии ПРМП. Это наблюдали также при сварке с воздействием ПРМП хромоникелевых сталей под флюсом и в среде аргона. При сварке с воздействием ПРМП всегда повышалась однородность структуры и снижалась химическая неоднородность структуры швов. Это объяснялось изменением кинетики кристаллизации, обусловленной периодическими изменениями параметров зоны концентрационного переохлаждения перед межфазной поверхностью, зависящей от градиента температур у фронта кристаллизации. Выделяют два полупериода колебания температур у этого фронта: горячий и холодный. В первый (горячий) полупериод фронт кристаллизации перегрет в головной части ванны, жидкий металл омывает его и повышает, при этом, градиент температур у фронта по сравнению с его величиной при сварке без воздействия ПРМП. Это приводит к уменьшению скорости роста кристаллитов, уменьшает размер двухфазной области, сокращает протяженность зоны концентрационного переохлаждения. Во втором (холодном) полупериоде кристаллизации градиент температур в зоне кристаллизации снижается до значений, меньших, чем при сварке без воздействия ПРМП. При этом увеличивается

размер зоны концентрационного переохлаждения, ускоряется кристаллизация, измельчаются структурные составляющие. При воздействии знакопеременного ПРМП максимальные скорости кристаллизации в 1,5...10,0 раз превышают скорость кристаллизации, характерную для процесса сварки без воздействия ПРМП. Высказанные представления этих авторов достаточно убедительны. Однако для повышения их достоверности желательно установить, имеется ли чередование слоев более мелких и крупных кристаллитов, которые по очертаниям должны повторять границы хвостовой части ванны.

В работе [13] показано, что в условиях дуговой сварки в процессе кристаллизации при температурных флуктуациях возле фронта кристаллизации неизбежно оплавление затвердевшего металла. При этом в первую очередь оплавляются участки твердой фазы, которые имеют большее содержание легирующих элементов, а следовательно, более низкую температуру плавления. У дендритов такими участками являются основания ветвей второго порядка. При флуктуациях температуры вблизи межфазной поверхности происходит отделение ветвей дендритов от главного ствола. Отделившаяся дендритная ветвь может образовать новый кристалл без дополнительного зародыша. За время паузы (при воздействии знакопеременного ПРМП с паузами) фронт кристаллизации должен продвинуться на расстояние, равное толщине двухфазной области. Такой подход позволил получить оптимальную частоту следования и жесткость импульсов знакопеременного ПРМП, необходимые для измельчения зерна. Установлено, что оптимальной является частота ПРМП в пределах 0,6...15,0 Гц, что совпадает с рекомендованными значениями частот во многих работах. Утверждается также, что при сварке чистых металлов и сплавов с низким интервалом кристаллизации измельчение первичных кристаллов практически не происходит (при сварке с воздействием ПРМП). Это связано с малой толщиной двухфазной зоны и неразвитостью осей дендритов второго порядка. На наш взгляд, при дуговой сварке и наплавке, когда чаще всего наблюдается дендритная кристаллизация, этот механизм измельчения структуры возможен. Он указан также в работе [12]. Однако следует учитывать, что если более легкоплавкие фрагменты ветвей второго порядка будут вынесены в более горячий жидкий металл ванны перед фронтом кристаллизации, то они расплавятся, и не будут играть роль центров кристаллизации.

Когда идет речь о направлении роста кристаллитов в ванне, то для случая дуговой сварки без внешних воздействий общепринято, что направ-

ление это описывается уравнением, предположенным В. М. Шаманиным [14–16] (рис. 1, а):

$$v_k = v_{cb} \cos \alpha,$$

где v_{cb} — скорость сварки, м/с; α — угол между направлением роста кристалла в каждый определенный момент кристаллизации и направлением перемещения источника тепла (ось Ox).

В точке А угол $\alpha = 90^\circ$, т. е. скорость роста кристалла v_k у боковых кромок ванны равна нулю. В точке С при завершении роста кристалла угол $\alpha = 0$ и тогда v_k становится равной скорости сварки. Направление оси кристалла (линия АВС) ортогонально к линии AD (рис. 1, а).

При дуговой сварке и наплавке под флюсом, когда $I_{cb} = 500 \dots 1000$ А, скорость сварки $v_{cb} = 20 \dots 40$ м/ч и выше (как показало изучение выплесков сварочной ванны) форма ванны соответствует форме, приведенной на рис. 1, б, т. е. ванна имеет значительную длину ($L_b = 50 \dots 100$ мм и выше). Боковые кромки ванны (у точки А) почти параллельны оси Ox . Если сместить линию AD влево на определенный шаг (линия А'D' на рис. 1, б), точки А, В, С также сместятся на такой шаг (линия А'В'С'), т. е. точка А также сместится на такой шаг и тогда скорость кристаллизации в точке А $v_k = v_{cb}$ и кристалл в этой точке должен расти в направлении сварки (оси Ox) со скоростью v_{cb} . В связи с этим неизвестно как зарождаются и растут кристаллы на боковых участках ванны (на участке АА') и первого или второго порядка будут оси дендритов (кристаллов) в этой зоне. Аналогично и в промежуточной точке В. Это обстоятельство не учитывается формулой и не рассмотрено во всех цитируемых выше работах и учебниках [14–16]. Это требует более обстоятельного исследования.

В работе [13], как и в работе [5], придерживаются мнения, что величины сил, возникающих в ванне при воздействии ПРМП, явно недостаточно для дробления растущих кристаллов. Как и авторы работы [11] они полагают, что ведущим фактором измельчения структуры является концентрационное переохлаждение.

В упомянутых выше работах рассматривалось влияние ПРМП при сварке на измельчение первичной структуры. Однако можно предположить, что потоки жидкого металла, инициируемые при сварке воздействием ПРМП, влияют на формирование (измельчение) вторичных структур.

В работах [17, 18] показано, что ПРМП при дуговой сварке влияет на образование границ кристаллов. Это происходит за счет дополнительного динамического давления на фронт растущих кристаллов расплавленным металлом ванны, что создает напряжения и упругие деформации в твердой фазе, приводит к образованию значительного количества дислокаций. Такой механизм измель-

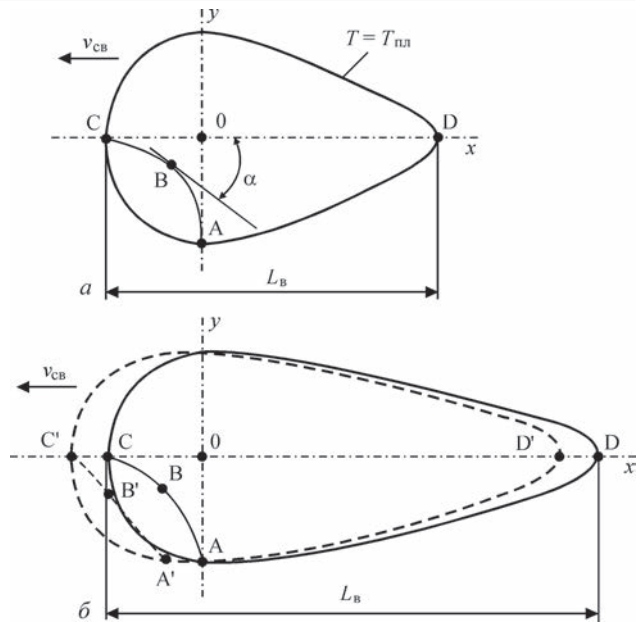


Схема определения направления роста кристаллитов: а — короткая ванна; б — форма ванны применительно к сварке на форсированных режимах

чения структуры происходит, по мнению авторов работы [18], при сварке технически чистых металлов, в частности, титана и никеля при сварке с воздействием ПРМП.

Общеизвестным является то, что для сварных швов характерна периодичность кристаллизации. Этот факт объясняется наличием слоистости при кристаллизации сварных швов [14], обусловленной остановками кристаллизации в период выделения скрытой теплоты кристаллизации.

В работах [19, 20] показано, что для сверхчистых (и технически чистых) металлов, когда реализуется термическое переохлаждение, а также при кристаллизации сплавов (при наличии примесей), когда реализуется не только термическое, но и концентрационное переохлаждение, наблюдается слоистое строение при кристаллизации швов в процессе сварки без внешних воздействий. Показано, что частота естественной кристаллизации швов зависит от скорости сварки, химического состава свариваемого металла и его толщины. Авторы работ [19, 20] предлагают метод измельчения структуры швов за счет согласования частоты внешних возмущений (в том числе и действия ПРМП) с собственной частотой кристаллизации, чтобы наступил резонанс. Однако механизм достижения измельчения структур при достижении резонанса, изложенный авторами, на наш взгляд, не является убедительным. Необходимо проведение дополнительных исследований для подтверждения действия указанного механизма измельчения структурных составляющих швов.

Выводы

1. В настоящее время существует много гипотез о механизме измельчения структуры швов с воздействием управляющих МП. Необходимо выполнение дальнейших исследований по установлению ведущих факторов, определяющих измельчение структуры сварных швов при сварке с воздействием МП.

2. Не установлено, на какой стадии происходит измельчение структуры сварных швов при воздействии МП: при первичной кристаллизации, при вторичных преобразованиях, либо одновременно на этих двух стадиях. Необходимо выполнение исследований в этом направлении с целью разработки оптимальных параметров ПРМП (ПОМП) для измельчения структуры швов при дуговой сварке.

Список литературы

1. Лахтин Ю. М. (1977) *Металловедение и термическая обработка металлов*. Москва, Металлургия.
2. Чалмерс Б. (1968) *Теория затвердевания*. Москва, Металлургия.
3. Флемингс М. (1977) *Процессы затвердевания*. Москва, Мир.
4. Болдырев А. М., Дорофеев Э. В., Антонов Е. Г. (1971) Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением. *Сварочное производство*, **6**, 35–37.
5. Болдырев А. М. (1976) О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Там же*, **2**, 53–55.
6. Сутырин Г. В. (1975) Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны. *Автоматическая сварка*, **5**, 7–10.
7. Черныш В. П., Пахаренко В. А. (1979) Кинетика кристаллизации ванны при сварке с электромагнитным перемешиванием. *Там же*, **3**, С. 5–7.
8. Аристов С. В., Руссо В. Л. (1982) Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава. *Сварочное производство*, **11**, 42–44.
9. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У., Кулуашев А. Т. (1977) Особенности кристаллизации металла сварочной ванны в условиях электромагнитного перемешивания. *Автоматическая сварка*, **8**, 7–11.
10. Малинкин И. В., Черныш В. П. (1970) Выбор режимов электромагнитного перемешивания сварочной ванны. *Там же*, **7**, 14–16.
11. Черныш В. П., Кузнецов В. Д., Брисман А. Н. и др. (1983) *Сварка с электромагнитным перемешиванием*. Киев, Техника.
12. Кораб Н. Г., Кузнецов В. Д., Черныш В. П. (1990) Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 33–36.
13. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. (1982) О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии. *Там же*, **2**, 18–21.
14. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. (1976) *Теория сварочных процессов*. Киев, Вища школа.
15. Фролов В. В. (ред.) (1970) *Теоретические основы сварки*. Москва, Высшая школа.
16. Фролов В. В. (ред.) (1988) *Теория сварочных процессов*. Москва, Высшая школа.
17. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. (1975) Кинетика образования вторичных границ и развитие горячих трещин при сварке никеля. *Автоматическая сварка*, **2**, 31–34.
18. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. (1980) Некоторые особенности формирования вторичных границ в свар-

ных швах при электромагнитном воздействии. *Там же*, **2**, 12–18.

19. Морозов В. П. (2006) Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известия вузов. Машиностроение*, **8**, 41–54.
20. Морозов В. П. (2011) Влияние синхронизации собственной частоты колебательного механизма кристаллизации шва и частоты внешнего периодического воздействия на технологическую прочность в процессе сварки. *Наука и образование*, **12**, 1–14.

References

1. Lakhtin, Yu.M. (1977) *Physical metallurgy and heat treatment of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Chalmers, B. (1968) *Theory of solidification*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Flemings, M. (1977) *Processes of solidification*. Moscow, Mir [in Russian].
4. Boldyrev, A.M., Dorofeev, E.V., Antonov, E.G. (1971) Control of crystallization of metal in fusion welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 35-37 [in Russian].
5. Boldyrev, A.M. (1976) On mechanism of formation of weld metal structure by introduction of low-frequency oscillations to weld pool. *Ibid.*, **2**, 53-55 [in Russian].
6. Sutyurin, G.V. (1975) Study of mechanism of impact of low-frequency vibration on crystallization of weld pool. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 7-10 [in Russian].
7. Chernysh, V.P., Pakharenko, V.A. (1979) Kinetics of crystallization of pool in welding with electromagnetic stirring. *Ibid.*, **3**, 5-7 [in Russian].
8. Aristov, S.V., Russo, V.L. (1982) Crystallization of weld metal in low-frequency oscillations of melt. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 42-44 [in Russian].
9. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U., Kuluashev, A.T. (1977) Peculiarities of crystallization of weld metal pool under electromagnetic stirring conditions. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 7-11 [in Russian].
10. Malinkin, I.V., Chernysh, V.P. (1970) Selection of modes of welding pool electromagnetic stirring. *Ibid.*, **7**, 14-16 [in Russian].
11. Chernysh, V.P., Kuznetsov, V.D., Briskman, A.N. et al. (1983) *Welding with electromagnetic stirring*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
12. Korab, N.G., Kuznetsov, V.D., Chernysh, V.P. (1990) Evaluation of effect of controllable magnetic field on crystallization in arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 33-36 [in Russian].
13. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U. (1982) On mechanism of refining of weld metal primary structure in electromagnetic action. *Ibid.*, **2**, 18-21 [in Russian].
14. Bagryansky, K.V., Dobrotina, Z.A., Khrenov, K.K. (1976) *Theory of welding processes*. Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
15. (1970) *Theoretical principles of welding*. Ed. by V.V. Frolov. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
16. (1988) *Theory of welding processes*. Ed. by V.V. Frolov. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
17. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U. (1975) Kinetics of formation of secondary boundaries and propagation of hot cracks in welding of nickel. *Avtomatich. Svarka*, **22**, 31-34 [in Russian].
18. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U. (1980) Some peculiarities of formation of secondary boundaries in welds in electromagnetic impact. *Ibid.*, **2**, 12-18 [in Russian].
19. Morozov, V.P. (2006) Analysis of conditions of refined structure formation in crystallization weld pool metal with periodic oscillation superposition. *Izv. Vuzov. Mashinostroenie*, **8**, 41-54 [in Russian].
20. Morozov, V.P. (2011) Effect of synchronization proper frequency of oscillation mechanism of weld crystallization and frequency of external periodic impact on technological strength during welding. *Nauka i Obrazovanie*, **12**, 1-14 [in Russian].

О. Д. Размышляев¹, М. В. Агеева²

A. D. Razmyshlyayev¹ and M. V. Ageeva²

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».
87500, Донецька обл., м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.
E-mail: razmyshljayev@rambler.ru

¹SHEI «Pryazovskyi State Technical University».
7 Universitetskaya Str., Mariupol, 87500, Donetsk region.
E-mail: razmyshljayev@rambler.ru

²Донбаська державна машинобудівна академія.
84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
E-mail: maryna_ah@ukr.net

²Donbass State Engineering Academy.
72 Akademicheskaya Str., Kramatorsk, 84313, Donetsk region.
E-mail: maryna_ah@ukr.net

ПРО МЕХАНИЗМ ПОДРІБНЕННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВА ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ З ДІЄЮ МАГНІТНИХ ПОЛІВ (Огляд)

ON MECHANISM OF WELD METAL STRUCTURE REFINEMENT IN ARC WELDING UNDER EFFECT OF MAGNETIC FIELDS (Review)

Метою роботи є аналіз наявних літературних даних щодо механізму подрібнення структури швів при дуговому зварюванні із дією керуючих магнітних полів. Показано, що в теперішній час різні автори по-різному пояснюють факти подрібнення структурних складових металу шва або наплавленого металу при зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля. Немає єдиної думки авторів щодо найважливіших факторів, що визначають подрібнення структурних складових металу шва при зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля. Показано, що необхідно також вивчити особливості дії поздовжнього магнітного поля на формування вторинних структур в шві при дуговому зварюванні. Не встановлено, на якій стадії відбувається подрібнення структури зварних швів при дії магнітних полів: при первинній кристалізації, або при вторинних перетвореннях, або одночасно на цих двох стадіях. Необхідно виконання досліджень в цьому напрямку з метою розробки оптимальних параметрів зовнішніх магнітних полів для подрібнення структури швів при дуговому зварюванні.

Aim of the work is the analysis of available references on mechanism of refinement of weld structure in arc welding under effect of controlling magnetic fields. It is shown that today different authors have various explanations of the facts of refinement of weld metal structural constituents or deposited metal in arc welding under effect of longitudinal magnetic field. There is no single solution between the authors on the most important factors determining refinement of the weld metal structural constituents in welding under effect of a longitudinal magnetic field. It is shown that peculiarities of effect of the longitudinal magnetic field on formation of secondary structures in a weld during arc welding also require investigation. It is not determined what is the stage where the weld metal structure refinement takes place under the effect of magnetic field, namely during primary solidification or during secondary transformations or simultaneously during these two stages. It is necessary to carry out investigations in this direction in order to develop the optimum parameters of the external magnetic fields for weld structure refinement in arc welding. 20 Ref., 1 Fig.

Ключові слова: подрібнення структури металу шва, кристаліт, зовнішні магнітні поля, фактор подрібнення

Keywords: weld metal structure refinement, crystalline particle, external magnetic fields, refinement factor

Поступила в редакцію 13.01.2018

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»

**Міжнародна конференція
«ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»**

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов
НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ НА МЕЖЗЕРЕННОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ВЫСОКООЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ В СТАЛЬ

Т. Б. МАЙДАНЧУК, В. М. ИЛЮШЕНКО, А. Н. БОНДАРЕНКО

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

Приведены результаты исследований влияния параметров процесса дуговой наплавки на сталь порошковой проволокой марки ППБрОФ10-1 под флюсом и покрытыми электродами АНБО-2, обеспечивающих получение наплавленного металла, по составу соответствующего литейной бронзе марки БрО10Ф1Л, на образование межкристаллитных проникновений бронзы в сталь. Показано, что на образование межкристаллитных проникновений наиболее существенное влияние оказывают значение тока и скорость наплавки. На основании металлографических исследований установлено, что отсутствие межкристаллитных проникновений бронзы в сталь достигается при ограничении эффективной погонной энергии дугового процесса наплавки как порошковой проволокой, так и покрытыми электродами значением 450 кДж/м. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: высокооловянная бронза, покрытые электроды, порошковая проволока, дуговая наплавка, межкристаллитные проникновения

Высокооловянные бронзы находят широкое применение в узлах трения, работающих в особо тяжелых условиях при высоких нагрузках [1, 2]. Так, например, оловянно-фосфористая бронза БрО10Ф1Л используется в энергомашиностроении для изготовления подшипниковых втулок и поршней ответственного назначения. Этому в значительной степени способствует благоприятное сочетание ее механических и антифрикционных свойств, что обусловлено специфической структурой, состоящей из α -твердого раствора, эвтектоида ($\alpha + \delta$) и фосфидов меди [1, 2]. С целью экономии дефицитной и дорогой бронзы, а также повышения конструктивной прочности деталей перспективным является использование биметалла сталь-бронза. Эта задача во многих случаях может быть решена с помощью применения дуговых способов. Сдерживающим фактором для дуговой наплавки высокооловянных бронз является отсутствие электродных материалов (проволоки, ленты), обеспечивающих необходимый химический состав наплавленного металла. В связи с необходимостью получения биметалла сталь + высокооловянная бронза в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны порошковая проволока марки ППБрОФ10-1 (рекомендуется для автоматизированной наплавки) и покрытые электроды марки АНБО-2 [3, 4]. Эти материалы разрабатывались с учетом требования обеспечить получение наплавленного металла, по составу соответствующего литейной бронзе марки БрО10Ф1Л.

Как известно, оловянные бронзы наиболее склонны из всех медных сплавов к образованию

межкристаллитных проникновений (МКП) бронзы в сталь (при наплавке на сталь и сварке бронз со сталью), которые приводят к снижению ударной вязкости, пластичности, прочности биметаллических соединений бронзы со сталями при динамических и циклических нагрузках [5–7]. На рис. 1 приведен характерный вид данного дефекта при наплавке высокооловянных фосфористых бронз на сталь.

В результате металлографических исследований установлено, что МКП высокооловянной бронзы в сталь по всей протяженности имеют литую структуру и образуют со сталью плотное ме-

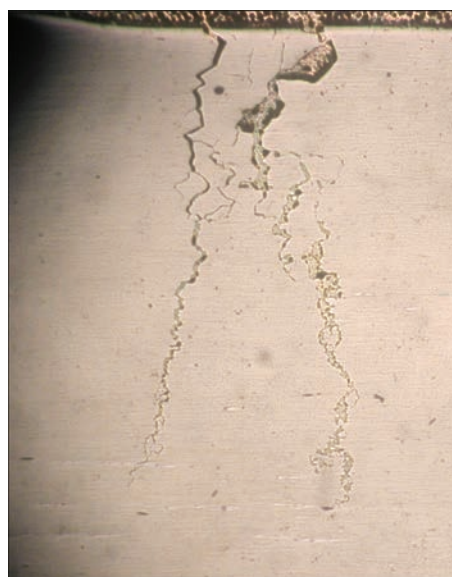


Рис. 1. Микроструктура ($\times 50$) металла зоны сплавления высокооловянной бронзы и стали с МКП бронзы в сталь

Таблица 1. Влияние режимов наплавки порошковой проволокой ППБрОФ10-1 под флюсом и эффективной погонной энергии на склонность к образованию МКП высокооловянной бронзы в сталь

Номер образца	Режимы наплавки	Эффективная погонная энергия, кДж/м	Размеры валика (мм)			МКП	
			Ширина	Высота	Глубина проплавления	Разрез I	Разрез II
Ток, А							
1	200...220	447,2	14,5...15,5	4,5...5,0	≤ 0,2	Отсутствуют	Отсутствуют
2	300...320	602,4	20,...20,5	5,0...5,5	1,5...2,5	2	Отсутствуют
3	380...400	777,6	24...25	5,3...5,5	1,5...2,5	1	2
Напряжение, В							
4	25...26	430,9	14,5...15	5,5...6,0	1,0 ;1,5	Отсутствуют	Отсутствуют
5	30...31	518,4	16,5...17	5,0...5,5	0,5 ;1,0	-"-	2
6	35...36	602,6	19,5...20	5,0...5,2	2,5 ;1,5	2	Отсутствуют
v _н , м/ч							
7	10	842,4	20...21	5,0...5,5	≤ 0,5	3	2
8	14	602,4	19.5...20	5,0...5,2	2,5...1,5	2	Отсутствуют
9	18	369,4	18...18,5	4,0...4,5	≤ 0,5	Отсутствуют	-"-

таллическое соединение. Проникновения начинаются на границе сплавления медный сплав–сталь и проникают в сталь по границам зерен. Они проходят по нескольким границам зерен, имеют разную ширину и длину. Одно и то же проникновение по своей длине может иметь участки с одинаковой или переменной шириной; границы одного и того же проникновения на отдельных участках могут быть параллельными, а могут идти под углом друг к другу.

Механизм МКП медного сплава в сталь при дуговой наплавке достаточно хорошо изучен в работах [5–8]. В тоже время работ, посвященных изучению технологических мер предотвращения МКП, сравнительно мало. Чаще всего для этих целей рекомендуется применять нанесение подслоя из материалов, не склонных к образованию МКП (сплавы с высоким содержанием никеля типа монель и др.).

Приведенные в литературе данные о влиянии режимов наплавки и погонной энергии на образование и развитие МКП носят рекомендательный характер, и в большинстве случаев относятся к процессам наплавки в защитных газах.

Данные о влиянии на МКП режимов наплавки под флюсом и покрытыми электродами любых медных сплавов отсутствуют. Поэтому для оценки влияния на МКП режимов наплавки под флюсом разработанной порошковой проволокой ППБрОФ10-1 и покрытыми электродами марки АНБО-2 выполняли комплекс исследований. В каждом эксперименте один параметр процесса менялся, а другие оставались постоянными. Использовались порошковая проволока диаметром 3 мм, флюс марки АН-60, покрытые электроды диаметром 3 и 4 мм.

Эффективная погонная энергия определялась по формуле:

$$Q_{эф} = 0,24 \frac{U_{д св} I_{п} \eta_{п}}{v_n},$$

где $U_{д св}$ — напряжение, В; $I_{п}$ — ток, А; $\eta_{п}$ — эффективный коэффициент полезного действия процесса нагрева изделия сварочной дугой (для сварки под флюсом $\eta_{п} = 0,8...0,95$, для покрытого электрода $\eta_{п} = 0,65...0,8$); v_n — скорость наплавки, м/ч.

Наличие и характер МКП изучали на протравленных шлифах образцов, взятых из поперечного сечения валика (не менее двух сечений). Фиксировались также размеры поперечного сечения валиков и глубина проплавления основного металла. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что на появления МКП влияют все параметры процесса наплавки, однако значение тока и скорость наплавки в большей степени, чем напряжение на дуге. Какого-либо влияния на МКП глубины проплавления не обнаружено. МКП равновероятны и при проплавлении (до 2,5 мм) и почти при полном его отсутствии (≤ 0,5 мм) — наплавленные образцы 3 и 7. Погонная энергия в данных случаях примерно одинакова. Из табл. 1 также видно, что существует определенное пороговое значение эффективной погонной энергии, ниже которого образования МКП маловероятны. Для процесса наплавки под флюсом порошковой проволокой ППБрОФ10-1 это значение составляет 450 кДж/м.

При наплавке на сталь покрытыми электродами значение эффективной погонной энергии зависит, в основном, от значения тока и скорости наплавки. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют, что значение эффективной погонной энергии 450 кДж/м является критической величиной, при превышении которой в наплавленном металле

Т а б л и ц а 2. Влияние режимов наплавки покрытыми электродами АНБО-2 и эффективной погонной энергии на склонность к образованию МКП высокооловянной бронзы в сталь

Номер образца	Ток наплавки, А	Эффективная погон- ная энергия, кДж/м	Размеры валика, мм			МКП		
			Ширина	Высота	Глубина про- плавления	Разрез I	Разрез II	
$U_d = 23...25 \text{ В}; v_n = 3 \text{ м/ч}$								
1	60	331	5...7	1,5...2,5	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют	
2	80	442	7...9	2,5...2,8	$\leq 0,2$	"-	"-	
3	100	553	10...12	2,8...3,2	$\leq 0,25$	"-	1	
4	120	663	11...14	3,2...3,5	0,5	2	1	
5	160	885	15...18	3,4...3,7	1,0	2	3	
$U_d = 23...25 \text{ В}; v_n = 4 \text{ м/ч}$								
6	60	248	5...6	1,5...2	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют	
7	80	332	6...8	2...2,5	$\leq 0,15$	"-	"-	
8	100	415	8...10	2,5...2,7	0,5	"-	"-	
9	120	498	11...13	2,8...3,1	0,8	"-	1	
10	160	664	14...15	3...3,2	1,5	1	2	
$U_d = 23...25 \text{ В}; v_n = 5 \text{ м/ч}$								
11	60	200	4...5	1...2	$\leq 0,1$	Отсутствуют	Отсутствуют	
12	80	265	5...6	2...2,2	$\leq 0,2$	"-	"-	
13	100	331	7...8,5	2,2...2,5	0,5	"-	"-	
14	120	398	9...11	2,5...2,8	1,5	"-	"-	
15	160	531	10...13	2,8...3	2,0	2	"-	

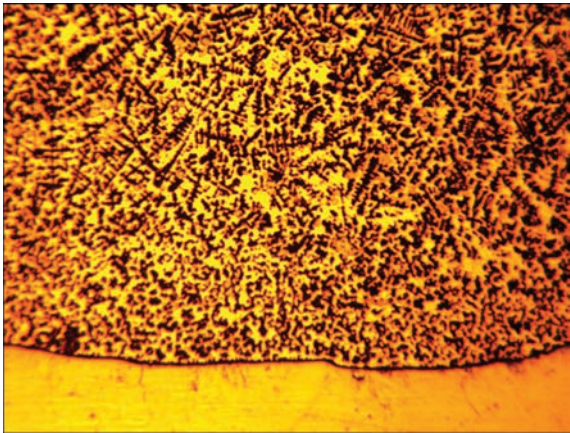


Рис. 2. Микроструктура (×50) металла зоны сплавления сталь + высокооловянная бронза

присутствуют МКП бронзы в сталь. Поэтому при наплавке на сталь (особенно первого слоя) рационально использовать покрытые электроды диаметром 3 мм. В этом случае обеспечивается более стабильный процесс, без обрывов дуги и закорачивания электрода на стальной пластине.

Микроструктура металла зоны сплавления высокооловянной бронзы со сталью, наплавленного на режимах $U_d = 23...25 \text{ В}; v_n = 4 \text{ м/ч}; I_{св} = 80...100 \text{ А}$ электродом марки АНБО-2 диаметром 3 мм приведена на рис. 2.

Металлографическими исследованиями не выявлено дефектов, в том числе МКП бронзы в сталь в зоне сплавления.

В результате проведенных экспериментальных работ установлено, что за счет ограничения эффективной погонной энергии дуговых способов наплавки высокооловянной бронзы на сталь ниже

450 кДж/м возможно минимизировать вероятность образования и значительного развития МКП при использовании в качестве электродных материалов как порошковой проволоки ППБрОФ10-1, так и покрытых электродов АНБО-2.

Список литературы

1. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. (2004) *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник*. Москва, Машиностроение.

2. Davis J. R. (2001) *Copper and Copper Alloys*. ASM International.

3. Ілюшенко В. М., Майданчук Т. Б., Бондаренко А. М., Аношин В. О., Вавілов О. В., Кантор О. Г. *Порошковий дріт для зварювання та наплавлення високоолов'яних бронз*. Україна, а. с. 109622. В23К 35/16 (2006.01).

4. Ілюшенко В. М., Майданчук Т. Б., Аношин В. О., Скорина М. В. *Склад електродного покриття для зварювання та наплавлення олов'яних бронз*. Україна, а. с.106954, В23К 35/365(2006.01).

5. Рыбин В. В., Вайнерман А. Е., Баранов А. В. и др. (2006) Исследование особенностей и разработка прогрессивных технологий сварки медных сплавов со сталями и наплавки медных сплавов на стали. *Вопросы материаловедения*, 1(45), 220–229.

6. Ардентов В. В., Вайнерман А. Е., Захаров В. Ф. и др. (1979) Влияние проникновения медного сплава в сталь на свойства биметалла. *Автоматическая сварка*, 5, 36–38.

7. Вайнерман А. Е., Пичужкин С. А., Чернобаев С. П. и др. (2006) Новые сварочные материалы и технологические особенности сварки и наплавки изделий из медных сплавов и разнородных металлов. *Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Сварочные материалы – 2012»*, сс. 141–147.

8. Вайнерман А. Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Автоматическая сварка*, 6, 22–25, 29.

References

1. Osintsev, O.E., Fedorov, V.N. (2004) *Copper and copper alloys. National and foreign trades: Handbook*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

2. Davis, J.R. (2001) *Copper and copper alloys*. ASM Intern.
3. Ilyushenko, V.M., Majdanchuk, T.B., Bondarenko, A.M. et al. *Flux-cored wire for welding and surfacing of high tin bronze*. In: Author's cert. 109622 UA, Int. Cl. B23K 35/16 (2006.01) [in Ukrainian].
4. Ilyushenko, V.M., Majdanchuk, T.B., Anoshin, V.O., Skoryna, M.V. *Composition of electrode coating for welding and surfacing of tin bronze*. In: Author's cert. 106954 UA, Int. Cl. B23K 35/365 (2006.01) [in Ukrainian].
5. Rybin, V.V., Vajnerman, A.E., Baranov, A.V. et al. (2006) Investigation of peculiarities and development of advanced technologies of welding of copper alloys with steels and surfacing of copper alloys on steel. *Voprosy Materialovedeniya*, 1(45), 220-229 [in Russian].
6. Ardentov, V.V., Vajnerman, A.E., Zakharov, V.F. et al. (1979) Influence of penetration of copper alloy in steel on properties of bimetal. *Avtomatich. Svarka*, 5, 36-38 [in Russian].
7. Vajnerman, A.E., Pichuzhkin, S.A., Chernobaev, S.P. et al. (2006) *New welding consumables and technological peculiarities of welding and surfacing of products from copper alloys and dissimilar metals*. In: Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Welding Consumables – 2012, 141-147 [in Russian].
8. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, 6, 22-25, 29 [in Russian].

Т. Б. Майданчук, В. М. Ілюшенко, А. М. Бондаренко

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

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА УТВОРЕННЯ МІЖЗЕРЕННИХ ПРОНИКНЕНЬ ВИСОКООЛОВ'ЯНОЇ БРОНЗИ В СТАЛЬ

Наведено результати досліджень впливу параметрів процесу дугового наплавлення на сталь порошковим дротом марки ППБрОФ10-1 під флюсом і покритими електродами АНБО-2, які забезпечують отримання наплавленого металу, за складом відповідного ливарній бронзи марки БрО10Ф1Л, на утворення міжкристалічних проникнень бронзи в сталь. Показано, що

на утворення міжкристалічних проникнень найбільш істотно впливають значення струму і швидкість наплавлення. На підставі металографічних досліджень встановлено, що відсутність міжкристалічних проникнень бронзи в сталь досягається при обмеженні ефективної погонної енергії дугового процесу наплавлення як порошковим дротом, так і покритими електродами значенням 450 кДж/м. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: високоолов'яна бронза, покриті електроди, порошковий дріт, дугове наплавлення, міжкристалічне проникнення

T.B. Maidanchuk, V.M. Ilyushenko, A.N. Bondarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

INFLUENCE OF ARC SURFACING MODES ON INTERGRANULAR PENETRATION OF HIGH TIN BRONZE INTO STEEL

The paper gives the results of studying the influence of the parameters of the process of submerged-arc surfacing of steel with flux-cored wire of PPBrOF10-1 grade and with coated electrodes ANBO-2, providing deposited metal of the composition, corresponding to cast bronze of BrO10F1L grade, on formation of intercrystalline penetrations of bronze into steel. It is shown that formation of intercrystalline penetrations is the most significantly influenced by values of current and deposition rate. Based on metallographic studies, it is found that absence of intercrystalline penetrations of bronze into steel is achieved at limitation of effective heat input of the process of arc surfacing both with flux-cored wire and with coated electrodes to the value of 450 kJ/m. 8 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: high tin bronze, coated electrodes, flux-cored wire, arc surfacing, intercrystalline penetration

Поступила в редакцию 10.02.2018

Издательский Дом «Патон»

Предлагаем отпечатать Вашу статью, опубликованную в журнале «Автоматическая сварка» и на английском языке в журнале «The Paton Welding Journal», отдельным оттиском определенного тиража. Оттиск статьи может быть оформлен в соответствии с пожеланиями. Размещение рекламы в нем также возможно.

Для получения дополнительной информации просьба обращаться в редакцию журнала: 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича 11, тел./факс: (38044) 200-82-77.
journal@paton.kiev.ua, www.patonpublishinghouse.com



ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕКТРОДОМ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, П. П. ОСЕЧКОВ, В. В. ОСИН

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

При торцевой электрошлаковой наплавке исследовано влияние на проплавление основного металла различных схем подключения электрода к одному или двум источникам питания постоянного тока. Установлено, что для получения минимального и равномерного проплавления могут быть применены схемы подключения электрода как к одному, так и двум источникам питания постоянного тока. Уменьшение расстояния наплавляемой поверхности (торца заготовки) относительно токоведущей секции токоподводящего кристаллизатора приводит к повышению производительности наплавки и к уменьшению удельного расхода электроэнергии. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: торцевая электрошлаковая наплавка, электрод большого сечения, токоподводящий кристаллизатор, источники питания постоянного тока, наплавляемая поверхность, проплавление основного металла

Традиционно для питания электрошлаковых печей (процессы электрошлакового переплава (ЭШП), электрошлакового литья (ЭШЛ)), сварочных и наплавочных установок (процессы электрошлаковой сварки (ЭШС), электрошлаковой наплавки (ЭШН)), используют переменный ток промышленной частоты [1, 2]. Для печей этот выбор обусловлен простотой электротехнического оборудования и высоким качеством выплавляемого металла. Для сварочно-наплавочных установок определяющим фактором также является меньшая стоимость и простота электротехнического оборудования. При этом, например, устойчивость процесса ЭШС на переменном токе не хуже, чем на постоянном, а в случае работы на постоянном токе при больших его значениях, электролизные явления, происходящие в шлаковой ванне, могут нарушать устойчивость процесса.

Однако на начальном этапе развития ЭШП за рубежом достаточно широко использовали постоянный ток. И в настоящее время по разным причинам (производственным, металлургическим и экономическим) могут применять как комбинированный ток с наложением постоянного тока на переменный, так и чисто постоянный различной полярности [3–7]. В работе [6] обобщены некоторые особенности электрошлакового процесса на постоянном токе. Имеющиеся преимущества постоянного тока (в зависимости от полярности) по сравнению с переменным следовало проверить при ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе (ТПК).

Данная работа является продолжением исследований торцевой ЭШН электродами большого сечения (диаметром 40...130 мм) с использованием ТПК диаметром 180 мм) [8, 9]. Ее целью яв-

ляется оценка перспективности применения при ЭШН постоянного тока при использовании одного или двух источников и различных схем подсоединения электрода, изделия и токоведущей секции кристаллизатора. Металлургию электрошлакового процесса на постоянном токе в данной статье не рассматривали.

Методика выполнения экспериментов отличалась от принятой в работе [9] тем, что эксперименты выполняли только электродом диаметром 90 мм на жидком старте, а источниками питания являлись ВДУ-1202 и ВДМ-5000. Измерение, а также запись токов и напряжений проводили с помощью аппаратуры и программного обеспечения, указанных в работе [9]. На рис. 1 представлена структурная схема электрических соединений при проведении экспериментов для одноконтурной (а, б) и двухконтурной (в) ЭШН.

Прежде всего, перед началом выполнения экспериментов следовало уточнить возможность работы ТПК на обратной полярности. Еще в начале изучения электрошлакового процесса в обычном кристаллизаторе было установлено [10], что при использовании неплавящегося медного водоохлаждаемого электрода и флюсов различного химического состава устойчивый процесс наблюдался лишь в случае, когда электрод служил катодом (прямая полярность). Процесс на обратной полярности удалось осуществить лишь с использованием шлаков, не содержащих SiO_2 , в частности, с химически чистым CaF_2 . Однако в этом случае наблюдалось интенсивное разрушение поверхности электрода. В случае применения угольного электрода устойчивость процесса не отличалась от имевшей место при плавлении плавящихся ме-

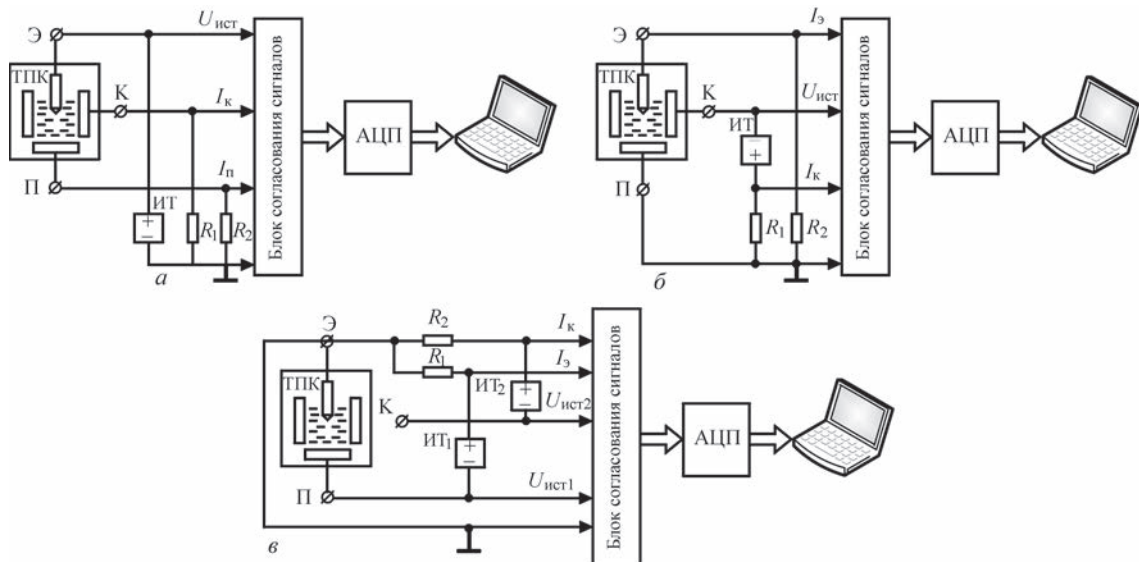


Рис. 1. Структурная схема электрических соединений для проведения экспериментальных наплавки для одноконтурной (а, б) и двухконтурной (в) ЭШН: Э, К, П — клеммы подсоединения электрода, токоведущей секции кристаллизатора и поддона с изделием, соответственно; ИТ (ИТ1 и ИТ2) — источник постоянного тока; R_1 и R_2 — измерительные токовые шунты; $U_{ист}$ ($U_{ист1}$ и $U_{ист2}$), I_k , I_p и I_z — сигналы, пропорциональные напряжению источника тока, току кристаллизатора, поддона электрода, соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

таллических электродов (стальных, медных, вольфрамовых, молибденовых и т. п.).

Следует отметить, что один из разработчиков конструкции ТПК также утверждает, что токоподводящий кристаллизатор может эксплуатироваться только при подведении к нему постоянного тока прямой полярности. При обратной полярности электрошлаковый процесс постепенно прекращается [11]. Как видно, имеется некоторое противоречие информации в работах [10, 11]. В первом случае электрошлаковый процесс с угольным электродом стабильно осуществляется на постоянном токе любой полярности, как это происходит при плавлении расходующих электродов. В случае же использования ТПК, медная токоведущая секция которого защищена графитовой (угольной) футеровкой, через которую ток протекает в шлаковую ванну, процесс на обратной полярности не только не стабилизируется, но и прекращается.

В связи с тем, что при наведении в кристаллизаторе шлаковой ванны наряду с жидким стартом в ряде случаев используется и твердый, изучали электрошлаковый процесс в условиях, когда водоохлаждаемый электрод (с графитовой насадкой на его рабочем торце) и токоведущая секция ТПК (имеющей графитовую защитную футеровку) были, соответственно, анодом и катодом по отношению к поддону с заготовкой. В экспериментах использовали источник питания ВДМ-5000 и флюс АНФ-29, ранее не применявшийся в названных выше работах.

Опыт с водоохлаждаемым электродом и графитовой насадкой осуществляли путем наведения шлаковой ванны в формирующей секции ТПК, без подведения напряжения к его токоведущей

секции, т. е. ТПК в данном эксперименте являлся обычным кристаллизатором. Шлаковая ванна формировалась лишь у поверхности насадки в виде кольца шириной примерно 30 мм и даже при увеличении тепловой мощности, вводимой в ванну, эта зона существенно не изменяла свои размеры. Кроме того, на верхней границе раздела шлак — поверхность насадки по всему периметру наблюдали микродуги, похожие на те, что описаны в работе [10]. Процесс пришлось прекратить. Осмотр рабочей части насадки показал следующее. На ее торце образовалась полоса шириной около 5 мм и глубиной 3...5 мм. Причем вся эта «траншея» покрыта мелкими язвочками, которые, по-видимому, являются местами возникновения микродуг. В области же, где микродуги наблюдались на поверхности шлака, никаких видимых изменений поверхности насадки не обнаружено. Схема износа насадки и ее внешний вид после испытания представлены на рис. 2.

Проверку работоспособности ТПК на обратной полярности выполняли путем заливки расплавленного и перегретого в отдельной емкости шлака вовнутрь того же самого кристаллизатора, но с подводом напряжения к его токоведущей секции. Уже через несколько секунд после заливки шлаковая ванна стала подстывать; лишь в локальных ее зонах было замечено яркое свечение и некоторое движение шлака. Затем охлаждение ванны произошло по всей ее поверхности со снижением значения тока до нуля.

Таким образом, как водоохлаждаемые графитовые электроды, так и токоведущие секции ТПК, имеющие защитную графитовую футеровку, не позволяют на обратной полярности осуществлять стабильный электрошлаковый процесс.

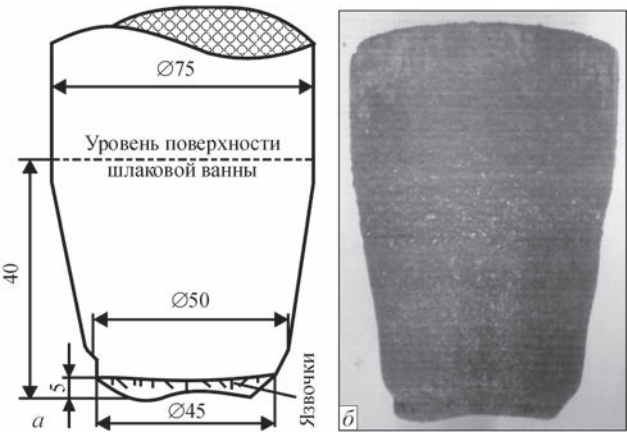


Рис. 2. Схема износа насадки (а) и ее внешний вид после испытания (б)

Исходя из полученных результатов, наплавки в ТПК необходимо выполнять на прямой полярности. Однако следует внести некоторые терминологические пояснения. В сварочной науке принято полярность оценивать в относительном виде [12]. Это предполагает наличие следующих отношений: если с клеммы (+) источника питания напряжение подается на изделие, а с клеммы (–) на электрод, то полярность считается прямой. В случае обратного подключения имеет место обратная полярность. Именно исходя из такого подключения к источнику питания, в работе [6] рассматриваются особенности электрошлакового процесса при разной полярности.

Если же во время электрошлакового процесса шлаковая ванна контактирует не с одним, а с двумя электродами (расходуемый электрод и токоведущая секция ТПК), то возникает неопределенность при оценке типа подключения кристаллизатора относительно расходуемого электрода. Чтобы исключить эту неопределенность, в дальнейшем при рассмотрении различных электрических схем подключения источника (источников), будем использовать лишь обозначения символов (+) или (–), не уточняя полярность процесса наплавки.

В таблице приведены результаты экспериментов по исследованию влияния электрических параметров процесса ЭШН на постоянном токе в ТПК (при использовании разных схем его подключения) на проплавление основного металла.

Проведены три эксперимента с одноконтурной схемой подключения источника тока ОС1 (рис. 1, а), ОС2 (рис. 1, б) и с двухконтурной ДСЭ (рис. 1, в). При этом предварительно выполненные эксперименты с ЭШН по схеме ОС1 с подключением электрода к клемме (–), а также ОС2 с подключением токоведущей секции ТПК к клемме (+), показали отрицательные результаты, процесс шел вяло с постепенным его прекращением, что связано с наличием «вентильного эффекта» при ЭШН. Поэтому эксперименты 45М и 47М выполнялись с подключением расходуемого электрода к клемме (+).

Было установлено, что образцы, полученные в экспериментах 45М и 47М, имеют, практически, одинаковые показатели качества наплавки. При этом у образца эксперимента 45М несколько лучшие значения показателей по производительности и удельному расходу электроэнергии. Кроме того, схема ДСЭ (рис. 1, в) более сложная в реализации из-за наличия двух источников питания. Из этого следует, что торцевые электрошлаковые наплавки на постоянном токе с одноконтурной схемой подключения источника тока, по сравнению с двухконтурной схемой, более предпочтительны. Макрошлиф биметаллического образца эксперимента 45М представлен на рис. 3.

Из трех проведенных экспериментов эксперимент 46М показал наихудшие результаты как по производительности процесса, так и по удельному расходу электроэнергии. Эксперимент по схеме ОС2 приводит (по сравнению с ОС1) к уменьшению G в 4 раза, увеличению Q в 3,8 раза, увеличению $H_{ср}$ с 1 до 3 мм и $\Delta_{ср}$ с 0,8 до 2,0 мм. Такие результаты объясняются тем, что через ТПК проходит наибольший ток, равный сумме токов на электроде и изделии. Из-

Показатели торцевых электрошлаковых наплавов в ТПК на постоянном токе

Но- мер эксперимента	Диаметр электрода, мм	Схема подключения	Ток, кА		Напряжение, В			N_0 , кВт·А	N_k/N_0 , %	$V_э$, мм/мин	G , кг/ч	h , мм	Q , кВт·ч/кг	Качество наплавки		
			К	Э	К	Э	П							$H_{ср}$, мм	$\Delta_{ср}$, мм	КНП
45М	90	ОС1	2,3	2,6	0	43	0	110	88	34	83	44	1,3	1	0,8	Удов.
46М	90	ОС2	2,94	1,09	0	36	36	106	100	14	21	44	5	3	2	Хор.
47М	90	ДСЭ	0,74	1,87	6	62	0	111	40	42	69	44	1,6	1	0,8	Хор.

Примечание. ОС1и ОС2 — одноконтурные схемы подключения ТПК, первая с одинаковыми потенциалами на изделии и токоведущей секции ТПК, вторая с одинаковыми потенциалами на изделии и электроде, соответственно; ДСЭ — двухконтурная схема подключения ТПК с общей точкой подключения обоих источников на электроде; N_0 — общая мощность, потребляемая ТПК; N_k/N_0 — соотношение мощностей на кристаллизаторе и общей; $V_э$ — скорость движения электрода; G — производительность наплавки; h — расстояние от наплавляемой поверхности до верха формирующей секции; Q — удельный расход электроэнергии; $H_{ср}$ — средняя глубина проплавления; $\Delta_{ср}$ — средняя неравномерность проплавления; КНП — качество формирования наплавляемой поверхности (экспертная оценка).

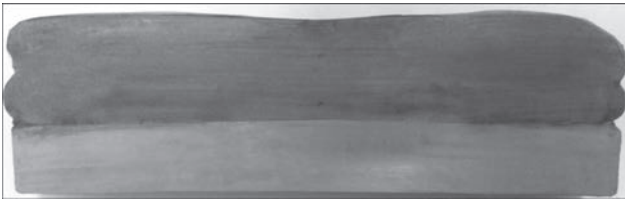


Рис. 3. Макрошлиф биметаллической заготовки эксперимента 45М

за этого доля мощности, расходуемая на плавление электрода и нагрев металлической ванны, уменьшилась и, соответственно, упала производительность, повысился расход электроэнергии. Исходя из результатов эксперимента 46М по схеме с одинаковыми потенциалами на заготовке и электроде, можно сделать вывод, что наплавки с такой схемой подключения не следует использовать для получения качественной ЭШН.

Интересно сравнить результаты экспериментов, проведенных с использованием источника переменного тока [9] и источника постоянного тока при одинаковых схемах подключения и с одинаковыми диаметрами электродов, но с различным расположением наплавляемой поверхности относительно верха формирующей секции. Эксперимент 22М [9] проводился с $h = 85$ мм, а 45М с $h = 44$ мм. Уменьшение в 2 раза расстояния между наплавляемой поверхностью и верхом формирующей секции привело к повышению производительности процесса ЭШН в 1,7 раза, а также снизило энергопотребление в 1,8 раза, значение средней глубины проплавления основного металла с 7 до 1 мм и значение средней неравномерности проплавления с 3,0 до 0,8 мм.

В работе [9] рассматривалась перспективность исследования ЭШН по двухконтурной схеме питания с общей точкой подключения обоих источников на электроде, имеющей, предположительно, более высокую производительность, чем схема с общей точкой подключения на изделии. В данной работе эксперимент 47М проведен с подключением двух источников постоянного тока, имеющих общую точку подключения на электроде (рис. 1, в). При этом расходуемый электрод и токоведущая секция ТПК подключены к клеммам (+).

На электроде потенциал по отношению к изделию +62 В (см. таблицу), а на токоведущей секции кристаллизатора +6 В, соответственно. Потенциал на токоведущей секции кристаллизатора, по отношению к электроду, составляет –56 В, т. е. через токоведущую секцию кристаллизатора на изделие ток практически не проходит, что должно, по нашему мнению, снизить эффективность процесса при данной схеме подключения источников. Эксперимент 25М [9] проведен с подключением двух источников переменного тока, имеющих общую точку подключения на изделии. Напряжение на

электроде приблизительно 68 В, на токоведущей секции кристаллизатора около 37 В. Сравнение результатов рассматриваемых экспериментов показывает преимущество способа ЭШН на постоянном токе. Так, эксперимент 47М, в отличие от 25М, дает увеличение производительности процесса, уменьшение удельного расхода электроэнергии и улучшение качества сплавления. Предположительно это связано с тем, что на электроде, являющемся анодом, создается повышенное прианодное падение потенциала, которое способствует увеличению скорости плавления электрода. Кроме того, через изделие проходит ток 1,13 кА (ток на электроде минус ток на изделии). Это составляет 60 % общего тока, протекающего через электрод, что способствует хорошему сплавлению основного и наплавленного металлов.

Выводы

1. Установлена возможность выполнения торцевых ЭШН при различных электрических схемах подключения электродов от одного или двух источников питания постоянного тока и исследовано влияние электрических и технологических параметров на проплавление основного металла.

2. Установлено, что для получения минимального и равномерного проплавления могут быть применены схемы подключения электрода как к одному, так и двум источникам питания постоянного тока. Однако наплавки на постоянном токе с двухконтурной схемой подключения источников тока, по сравнению с одноконтурной схемой, менее предпочтительны из-за сложности в реализации (наличие двух источников питания).

3. Уменьшение расстояния наплавляемой поверхности (торца заготовки) относительно токоведущей секции ТПК приводит к повышению производительности наплавки и к уменьшению удельного расхода электроэнергии.

4. Эксперименты показали, что ЭШН на постоянном токе по схеме с одинаковыми потенциалами на изделии и электроде, не позволяет получать качественную наплавку.

5. Как предполагалось в работе [9], ЭШН по двухконтурной схеме питания с общей точкой подключения обоих источников на электроде имеет более высокую производительность и более низкий удельный расход электроэнергии, чем схема с общей точкой подключения источников на изделии.

6. Полученные результаты могут составить банк данных для построения системы автоматического регулирования проплавления основного металла при торцевой ЭШН.

Список литературы

1. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.

2. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б. Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
3. (1982) *Электрошлаковая технология за рубежом*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
4. Чен Ч. С., Гао Р. Ф. (1989) Исследование электрошлакового переплава в составном кристаллизаторе с футерованной верхней частью. *Проблемы спец. электрометаллургии*, **4**, 42-47.
5. Латаш Ю. В., Матях В. Н. (1987) *Современные способы производства слитков особо высокого качества*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Миронов Ю. М. (2002) Влияние рода тока на процессы в электрошлаковых установках. *Электрометаллургия*, **4**, 25-32.
7. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
8. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **12**, 40-45.
9. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В. (2018) Электрошлаковая наплавка торцов заготовок с использованием расходного и нерасходуемого электродов. *Там же*, **2**, 48-52.
10. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. (1958) Влияние рода тока и полярности на металлургические процессы при электрошлаковой сварке. *Там же*, **3**, 69-78.
11. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электрометаллургия*, **27**, 32-40.
12. Патон Б. Е. (ред.) (1974) *Технологии электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.

References

1. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. (1982) *Electroslag technology abroad*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Chen, Ch.S., Gao, R.F. (1989) Investigation of electroslag remelting in composite mold with lined upper section. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 42-47 [in Russian].
5. Latash, Yu.V., Matyakh, V.N. (1987) *Modern methods of production of especially high quality ingots*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Mironov, Yu.M. (2002) Effect of current type on processes in electroslag installations. *Elektrometallurgiya*, **4**, 25-32 [in Russian].
7. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Zhdanov, V.A. (2017) Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **12**, 29-32.
9. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Osechkov, P.P., Osin, V.V. (2018) Electroslag surfacing of billet end faces with application of consumable and nonconsumable electrodes. *Ibid.*, **2**, 38-41.
10. Dudko, D.A., Rublevsky, I.N. (1958) Effect of current type and polarity on metallurgical processes in electroslag welding. *Avtomatich. Svarka*, **3**, 69-78 [in Russian].

11. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold providing rotation of slag pool. *Spets. Elektrometallurgiya*, **27**, 32-40 [in Russian].

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловйов, П. П. Осечков, В. В. Осин

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

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДОМ ВЕЛИКОГО ПЕРЕРІЗУ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

При торцевому електрошлаковому наплавленні досліджено вплив на проплавлення основного металу різних схем підключення електрода до одного або двох джерел живлення постійного струму. Встановлено, що для отримання мінімального і рівномірного проплавлення можуть бути застосовані схеми підключення електрода як до одного, так і двох джерел живлення постійного струму. Зменшення відстані наплавленої поверхні (торця заготовки) відносно струмоведучої секції струмопідвідного кристалізатора призводить до підвищення продуктивності наплавлення і до зменшення питомої витрати електроенергії. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: торцеве електрошлакове наплавлення, електрод великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, джерела живлення постійного струму, наплавляюча поверхня, проплавлення основного металу

Yu.M. Kuskov, V.G. Solovjev, P.P. Osechkov, V.V. Osin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ELECTROSLAG SURFACING WITH LARGE SECTION ELECTRODE AT DIRECT CURRENT IN A CURRENT-SUPPLYING MOULD

The influence of different circuits of electrode connection to one or two d.c. power sources on base metal penetration was studied at electroslag surfacing of end faces. It is established that circuits of electrode connection both to one and to two d.c. power sources can be applied to produce a minimum and uniform penetration. Reduction of the distance of the processed surface (electrode end face) relative to the current-conducting section of the current-supplying mould leads to increase of deposition efficiency and to reduction of the specific power consumption. 12 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electroslag surfacing of end faces, large section electrode, current-supplying mould, d.c. power sources, deposited surface, base metal penetration

Поступила в редакцию 07.10.2017

**5-я Международная научно-практическая конференция
«Эффективная сварка: качество, ресурсосбережение, безопасность».**
27 марта 2018 г. Минск, Беларусь

Контакты: svarka77@inbox.ru

К ВОПРОСУ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Е. А. ПАНТЕЛЕЙМОНОВ

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

Приведены особенности конструкции индукторов с магнитопроводами, применяемые в переносном модуле для термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой. Показано, что форма индуктирующего провода индукторов, расположение магнитопроводов относительно рельса и технология индукционного нагрева токами частотой 2,4 кГц обеспечивают равномерное распределение температурного поля в сварном стыке, низкий перепад температуры между поверхностными и глубинными слоями рельса, а также уменьшение времени нагрева. В результате термической обработки сварных стыков рельсов Р65 из стали К76Ф и рельсов UIC 60 из стали 900А на переносном модуле ИЭС им. Е. О. Патона существенно изменяется микроструктура металла сварных стыков, равномерно распределяется твердость *HRC* по ширине ЗТВ, уменьшается отклонение твердости *HRC* от уровня основного металла. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: рельсы, сварные стыки, термическая обработка, индукторы, микроструктура, твердость

При термической обработке (ТО) сварных стыков железнодорожных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой, применяется технология индукционного нагрева сварных стыков токами высокой частоты с последующей закалкой поверхности катания головки рельса сжатым воздухом. Технология ТО должна обеспечить структурную зональную однородность сварных стыков, выравнивание твердости металла, устранение неблагоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений [1, 2]. Для ТО сварных стыков рельсов в цеховых и путевых условиях на установках типа УИН-001 различной модификации [3] использовалась частота тока источника индукционного нагрева 8,0...16,0 кГц. Нагрев сварных стыков рельсов типа Р65 до температуры 850...950 °С со сварочного тепла выполняется за время 240 с. Установки считаются ресурсосберегающими с точки зрения мощности источника индукционного нагрева [4]. Переносной модуль установок УИН-001, предназначенный для проведения ТО в путевых условиях, не требует специальных приводов и механизмов для размещения на место сварного стыка и перемещения по рельсу [5].

Однако расположение индуктирующих проводников индукторов вдоль рельса в установках УИН-001 приводит к неоправданному увеличению ширины зоны термического влияния (ЗТВ), следовательно, к увеличению времени нагрева сварных стыков. Большое время нагрева при ТО стыков рельсов в условиях рельсосварочных предприятий тормозит темп производства рельсовых плетей.

Для сокращения времени нагрева сварных стыков и уменьшения перепада температуры между

поверхностными и глубинными слоями рельса целесообразно уменьшить частоту тока. В ИЭС испытана модель переносного модуля для ТО сварных стыков железнодорожных рельсов токами частотой 2,4 кГц. Отличительной особенностью переносного модуля является применение индукторов с магнитопроводами. Индуктирующий провод индуктора ориентирован поперек рельса, повторяет изгиб его поверхности и выполнен с увеличенным воздушным зазором над шейкой и перьями рельса. Ширина индуктирующего провода превышает ширину ЗТВ сварных стыков. Магнитопроводы установлены над поверхностью катания головки, боковыми гранями головки, шейкой и нижней поверхностью подошвы рельса [6, 7]. Тем самым, учитывается сложная форма поверхности рельса, улучшается магнитная связь системы индуктор-деталь и достигается необходимое распределение мощности по элементам рельса. Увеличивается часть мощности, передаваемая в головку и в подошву, по сравнению с шейкой, и уменьшается в перья рельса, предотвращая их перегрев.

В настоящей работе приведены результаты испытания переносного модуля при ТО сварных стыков рельсов Р65 из стали К76Ф и рельсов UIC60 из стали 900А. Качество ТО определяли на основании результатов металлографических исследований стыков после сварки и после ТО. Нагрев стыков выполняли при мощности источника индукционного нагрева 90 кВт. Начальная температура стыков 20 °С. Время нагрева сварных стыков 180 с, что существенно меньше времени, принятого на установках типа УИН-001. За это время температура в плоскости соединения стыков достигла следующих значений: на поверхности ка-

Таблица 1. Балл зерна металла сварных стыков рельсов Р65 после сварки и после ТО

Элемент рельса	Балл зерна после сварки			Балл зерна после ТО			Основной металл
	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристал- лизации	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристал- лизации	
Головка	2-3	4-5	6-7	7-8	6	7	7-8 (5-6)
Шейка	3	5	7	7-8	6-7	7	6
Подошва	3	5	7	7-8	6	7	5-6

тания головки 900...920 °С; на глубине 24 мм от поверхности катания головки 850 °С; по центру шейки 870 °С; на глубине 12 мм от низа подошвы 840 °С. Время нагрева поверхности катания головки до температуры точки магнитных превращений 50 с. После ТО сварные стыки охлаждали на спокойном воздухе.

Металлографические исследования сварных стыков проводили на глубине 24 мм от поверхности катания головки, по центру шейки и на глубине 12 мм от низа подошвы. Определяли микроструктуру металла по ширине ЗТВ и распределение интегральной твердости по Роквеллу (*HRC*). Полированные поверхности образцов для исследования совпадали с осью симметрии поперечной плоскости рельса. Вдоль рельса поверхность охватывала основной металл и ширину ЗТВ. Для выявления микроструктуры использовали метод химического травления в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Величину зерна металла определяли по ГОСТ 5639-82. Интегральную твердость *HRC* измеряли на твердомере ТК-2М при нагрузке 150 кг.

Как показали исследования, микроструктура основного металла рельсов Р65 представляет собой сорбит. Имеются участки с баллом зерна 5-6 и 7-8 (табл. 1). После сварки ширина ЗТВ стыков 37...40 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 1, *а*) состоит из сорбита и узких окантовок феррита по границам зерен. Зерно довольно крупное, величина зерна соответствует баллу 2-3 (табл. 1). В зоне крупного зерна, на расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 1, *б*), имеет место практически чистая сорбитная структура с баллом зерна 4-5. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 18...20 мм от линии соединения, наблюдается значительное измельчение сорбитного зерна до балла 6-7. После ТО сварных стыков ширина ЗТВ

55...60 мм. Микроструктура металла по ширине ЗТВ заметно измельчилась. По линии соединения (рис. 1, *в*) она состоит из отдельных выделений сорбита и феррита. Количество феррита увеличилось. Балл зерна 7-8. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 1, *г*) балл зерна 6-7. Аналогичная микроструктура на расстоянии 18...20 мм от линии соединения. Микроструктура металла в зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 30 мм от линии соединения, не отличается от образцов после сварки. Балл зерна 7.

Графики, приведенные на рис. 2, отражают характер распределения интегральной твердости *HRC* вдоль рельса после сварки и после ТО. В стыках после сварки (рис. 2, *а*) твердость по линии соединения в головке *HRC* 31, что выше уровня основного металла (*HRC* 27...28). В шейке и в подошве твердость по линии соединения *HRC* 27...28. В головке рельса, на расстоянии 4...6 мм от линии соединения, твердость увеличилась до *HRC* 35. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 20 мм от линии соединения, твердость уменьшилась до *HRC* 23...24. После ТО сварных стыков изменение структуры металла привело к изменению твердости (рис. 2, *б*). По линии соединения она приблизилась к уровню основного металла. В головке и в шейке твердость *HRC* 26...28, в подошве *HRC* 25. Твердость в зоне крупного зерна в головке *HRC* 32...33. Далее, до зоны неполной перекристаллизации, твердость стабилизировалась до уровня *HRC* 33, что выше уровня основного металла. Твердость на расстоянии 20 мм от линии соединения изменилась от *HRC* 23...24 (после сварки) до уровня *HRC* 33 (после ТО). В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 30...35 мм от линии соединения, твердость не отличалась от стыков после сварки. Следует отметить равномерное распределение

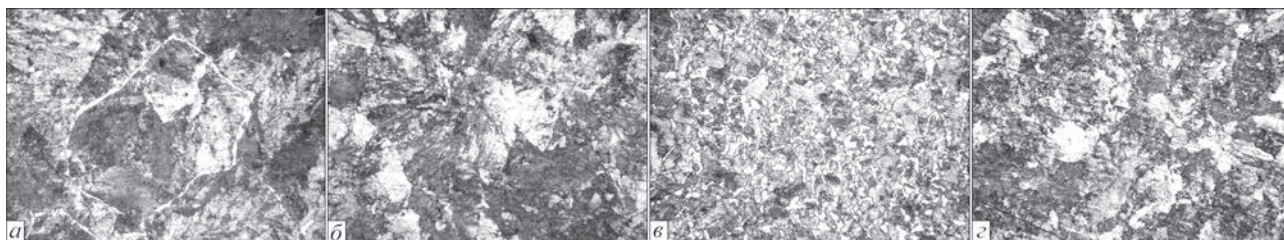


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$) металла сварных стыков рельсов Р65: линия соединения (*а*, *в*); на расстоянии 5 мм от линии соединения (*б*, *г*); после сварки (*а*, *б*); после ТО (*в*, *г*)

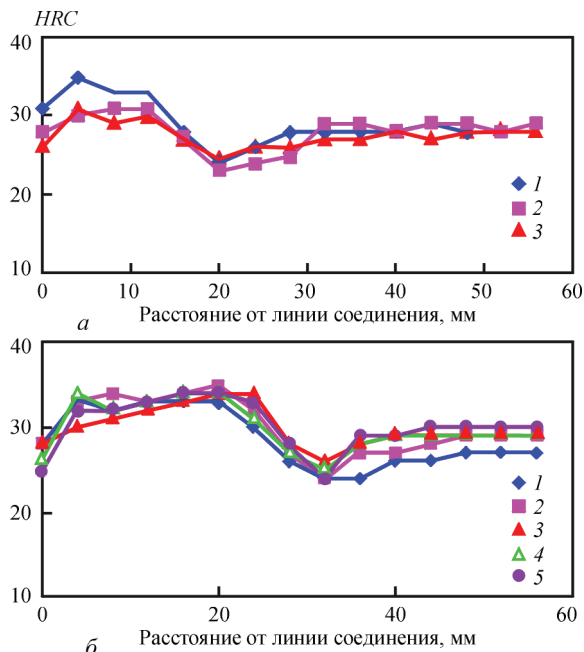


Рис. 2. Распределение твердости HRC по ширине ЗТВ сварных стыков рельсов Р65: а — после сварки (1 — головка; 2 — шейка; 3 — подошва); б — после ТО (1 — центр головки; 2 — переход головка-шейка; 3 — центр шейки; 4 — переход шейка-подошва; 5 — центр подошвы)

температурного поля в сварных стыках рельсов. Уровень твердости в местах перехода головки в шейку (на глубине 40 мм от поверхности катания головки) и шейки в подошву (на глубине 25 мм от нижней поверхности подошвы), в проблемных местах для индукционного нагрева токами высокой частоты, соответствует уровню твердости в головке, в шейке и в подошве рельса.

После ТО сварных стыков уменьшилось отклонение твердости HRC от уровня основного металла (рис. 3). В частности, по линии соединения в головке рельса отклонение твердости уменьшилось от 10 % (после сварки) до 3 % (после ТО), в зоне от 5 до 20 мм до линии соединения — от 20 до 13 %. В зоне неполной перекристаллизации отклонение твердости 17 % (после сварки) и 18 % (после ТО).

В рельсах типа UIC60 из стали 900А микроструктура основного металла представляет собой сорбит с баллом зерна 5-6 (табл. 2). Изменений балла зерна не отмечено. После сварки ширина ЗТВ стыков 40...42 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 4, а) состоит из смеси сорбитообразного и пластинчатого перлита. Про-

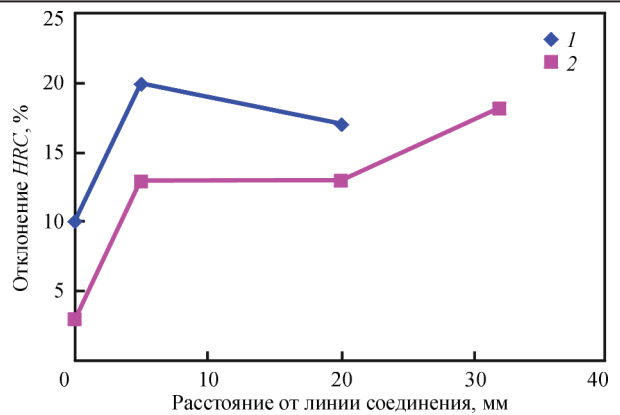


Рис. 3. Отклонение твердости HRC в головке сварных стыков рельсов Р65 от уровня основного металла после сварки (1) и после ТО (2)

являются тонкие прослойки феррита по границам зерен, а также отдельные участки ферритной составляющей. Балл зерна 2-3. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 4, б), в зоне крупного зерна, микроструктура металла в головке и в подошве сорбит, в шейке — сорбит и сорбитообразный перлит. Балл зерна 4-5. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 18...20 мм от линии соединения, наблюдается значительное измельчение структуры сорбита в головке до балла 7-8, в шейке измельчение сорбитообразного перлита до балла 9-10. После ТО сварных стыков рельсов ширина ЗТВ в головке и в подошве 64 мм, в шейке 58 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 4, в) представляет собой мелкозернистую сорбитную структуру с выделениями ферритной составляющей по границам зерен. В подошве ферритных выделений заметно меньше, чем в головке и в шейке рельса. Балл зерна 8. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 4, г) балл зерна 6-7. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 32 мм от линии соединения, микроструктура несущественно отличается от рельсов Р65 после ТО. Балл зерна 7-8.

Твердость основного металла рельсов UIC60 в головке HRC 35, в шейке и в подошве HRC 30. Исследуемые стыки после сварки отличались резким снижением твердости HRC по линии соединения (рис. 5, 6) от уровня основного металла, в головке до HRC 13, в подошве до HRC 15. В зоне крупного зерна, на расстоянии 5 мм от линии соединения, твердость находилась на уровне основного металла. В зоне неполной перекристаллизации,

Таблица 2. Балл зерна металла сварных стыков рельсов UIC60 после сварки и после ТО

Элемент рельса	Балл зерна после сварки			Балл зерна после ТО			Основной металл
	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	
Головка	2-3	4-5	7-8	8	6-7	7	5-6
Шейка	3-4	5	9-10	8	7	7-8	5-6
Подошва	3-4	4-5	9-10	8	6	7-8	5-6

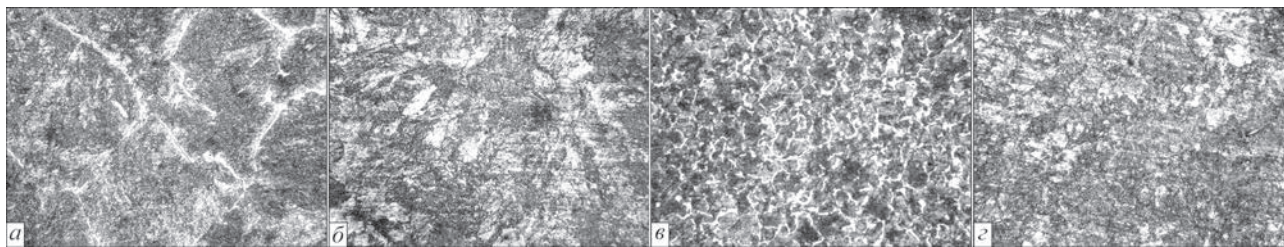


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) металла сварных стыков рельсов UIC60: линия соединения (а, в); на расстоянии 5 мм от линии соединения (б, г); после сварки (а, б); после ТО (в, г)

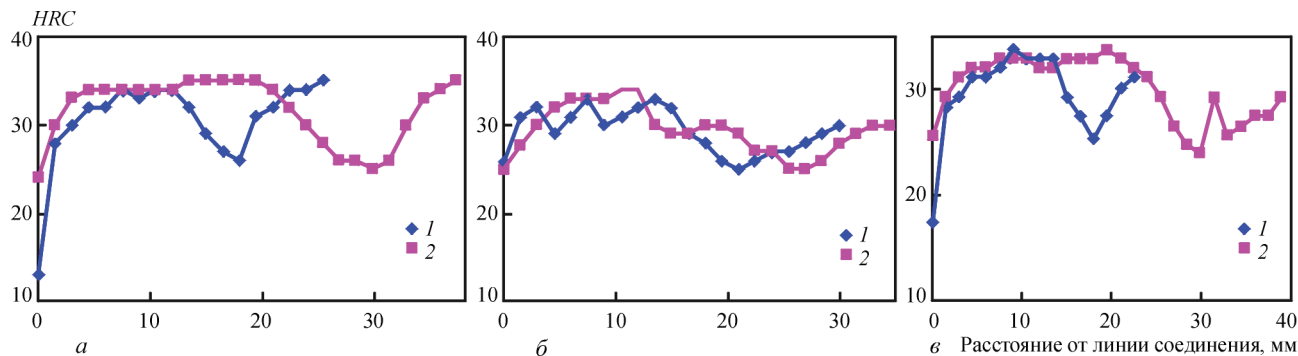


Рис. 5. Распределение твердости по ширине ЗТВ сварных стыков рельсов UIC60 в головке (а), шейке (б) и подошве (в); после сварки (1) и после ТО (2)

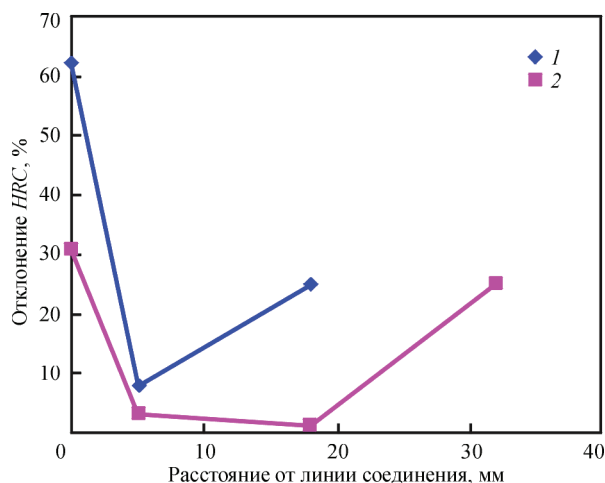


Рис. 6. Отклонение твердости HRC в головке рельсов UIC60 после сварки (1) и после ТО (2)

находящейся на расстоянии 18...22 мм от линии соединения, твердость в головке HRC 26, в шейке и в подошве HRC 23...25. После ТО сварных стыков отклонение твердости уменьшилось. По линии соединения в головке рельсов твердость HRC 24, в подошве HRC 24. На расстоянии 4...6 мм от линии соединения и до зоны неполной перекристаллизации твердость в головке HRC 34...35, что соответствует уровню основного металла. На расстоянии 18...22 мм от линии соединения (зона неполной перекристаллизации после сварки), твердость в головке увеличилась до уровня основного металла. В зоне неполной перекристаллизации снижение твердости не отличалось от стыков после сварки.

В головке рельсов отклонение твердости HRC от уровня основного металла (рис. 6) уменьшилось от 63 % (после сварки) до 30 % (после ТО).

В зоне крупного зерна, на расстоянии до 30 мм от линии соединения, отклонение твердости уменьшилось от 8 до 3 %. В зоне неполной перекристаллизации отклонение твердости HRC 25 % после сварки и после ТО.

Выводы

1. В переносном модуле ИЭС для ТО сварных стыков железнодорожных рельсов применение индукторов с магнитопроводами и технологии индукционного нагрева токами частотой 2,4 кГц обеспечивают равномерное распределение температурного поля в сварных стыках, низкий перепад температуры между поверхностными и глубинными слоями рельса, а также уменьшение времени нагрева.

2. В результате ТО сварных стыков рельсов Р65 из стали К76Ф и рельсов UIC 60 из стали 900А на переносном модуле ИЭС существенно изменяется микроструктура металла сварных стыков, равномерно распределяется твердость HRC по ширине ЗТВ, уменьшается отклонение твердости HRC от уровня основного металла.

Список литературы

1. Генкин И. З. (2003) Термическая обработка стыков рельсов на индукционных установках. *Автоматическая сварка*, **9**, 41–44.
2. Нестеров Д. К., Сапожков В. Е., Левченко Н. Ф. и др. (1990) Термическая обработка рельсовой стали с использованием индукционного нагрева. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **8**, 30–34.
3. Фешуков А. Н. (2016) Установка термической обработки сварных стыков рельсов в путевых условиях. РФ, Пат. 57752, МПК E01B31/18.
4. Резанов В. А., Федин В. М., Башлыков А. В. и др. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*, **2**, 28–33.

5. Федин В. М., Земан С. К., Борц А. И., Николин А. И. (2005) Создание нового технологического оборудования для восстановления старогодных рельсов. *Там же*, **4**, 19–23.
6. Пантелеймонов С. О. *Комплекс для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок в шляхових умовах*. Україна, Пат. 114593, МПК E01B31/18. 10.03.2017.
7. Пантелеймонов Е. А., Губатюк Р. С. (2016) Индукционное устройство для термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, **9**, 41–44.

References

1. Genkin, I.Z. (2003) Heat treatment of rail welded joints in induction units. *The Paton Welding J.*, **9**, 38–41.
2. Nesterov, D.K., Sapozhkov, V.E., Levchenko N.F. et al. (1990) Heat treatment of rail steel using induction heating. *Metallovedenie i Term. Obrabotka Metallov*, **8**, 30–34 [in Russian].
3. Feshchukov, A.N. (2016) *System for heat treatment of rail welded joints in track conditions*. Pat. 57752 RF, Int. Cl. E01B31/18 [in Russian].
4. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. et al. (2013) Differentiated hardening of rail welded joints. *Vestnik VNIIZHT*, **2**, 28–33 [in Russian].
5. Fedin, V.M., Zeman, S.K., Borts, A.I., Nikolin, A.I. (2005) Development of new technological equipment for restoration of used rails. *Ibid.*, **4**, 22–25 [in Russian].
6. Panteleymonov, S.O. *Complex for heat treatment of rail welded joints in track conditions*. Pat. 114593 Ukraine, Int. Cl. E01B31/18; 10.03.2017 [in Ukrainian].
7. Panteleymonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **9**, 41–43.

С. О. Пантелеймонов

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

ДО ПИТАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Наведено особливості конструкції індукторів з магнітопроводами, що застосовуються в переносному модулі для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок, виконаних контактним стиковим зварюванням. Показано, що форма ін-

дукуючого дроту індукторів, розташування магнітопроводів відносно рейки і технологія індукційного нагріву струмами частотою 2,4 кГц забезпечують рівномірний розподіл температурного поля в зварному стикі, низький перепад температури між поверхневими і глибинними шарами рейки, а також зменшення часу нагріву. В результаті термічної обробки зварних стиків рейок Р65 зі сталі К76Ф і рейок UIC 60 із сталі 900А на переносному модулі ІЕЗ ім. Є. О. Патона істотно змінюється мікроструктура металу зварних стиків, рівномірно розподіляється твердість *HRC* по ширині ЗТВ, зменшується відхилення твердості *HRC* від рівня основного металу. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: рейки, зварні стики, термічна обробка, індуктори, мікроструктура, твердість

E. A. Panteleymonov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

TO THE ISSUE OF HEAT TREATMENT OF WELDED BUTTS OF RAILS

The features of design of inductors with magnetic conductors are given, applied in a portable module for heat treatment of welded butts of rails produced by flash-butt welding. It is shown that the shape of the inducing wire of inductors, the location of magnetic conductors relative to the rail and the technology of induction heating by currents of 2.4 kHz frequency provide a uniform distribution of the temperature field in welded butt, low temperature difference between the surface and deep layers of the rail, and also a decrease in the heating time. As a result of heat treatment of welded butts of rails R65 of steel K76F and rails of UIC 60 of steel 900A on a portable module of the E.O. Paton Electric Welding Institute, the microstructure of metal of welded butts changes significantly, the hardness *HRC* is uniformly distributed over the width of HAZ, the deviation of hardness *HRC* from the level of base metal decreases. 7 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: rails, welded butts, heat treatment, inductors, microstructure, hardness

Поступила в редакцию 01.02.2018



Международная инженерная ярмарка

1–5 октября 2018 г.

Брно, Чехия



В рамках ярмарки из пяти выставок будет проведена
24-я Международная выставка сварочных технологий.

Основная тема ярмарки — Индустрия 4.0
(автоматизация, роботизация, цифровые технологии).

СТАБІЛІЗАТОР ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В. В. БУРЛАКА, С. В. ГУЛАКОВ, С. К. ПОДНЕБЕННА

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, Донецька обл., м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.
E-mail: office@pstu.edu

Запропоновано схемне рішення стабілізатора дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів. Відмінною особливістю стабілізатора є використання резонансного підвищення напруги на вторинній обмотці трансформатора для забезпечення повторних підпалювань дуги після кожного переходу струму через нуль. Це дає можливість знизити втрати енергії в стабілізаторі дуги і забезпечити ефективне формування пакетів високовольтих імпульсів для гарантованого пробою дугового проміжку. Застосування запропонованого стабілізатора дуги дозволяє виконувати зварювальні роботи електродами постійного струму при живленні від зварювальних трансформаторів без випрямлячів. Стабілізатор призначений для роботи з трансформаторами, не обладнаними електронними регуляторами – головним чином із трансформаторами з магнітним шунтом типів ТДМ, СТШ. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: електрична дуга, зварювання, підпалення дуги, стабілізація горіння дуги, зварювальний трансформатор, напруга підпалення дуги

При ручному дуговому зварюванні на якість і продуктивність процесу впливає здатність джерела живлення забезпечувати легке підпалення і стабільне горіння дуги. При зварюванні змінним струмом повторна ініціація дуги має відбуватися після кожного переходу зварювального струму через нуль. Для вирішення цієї задачі використовуються пристрої стабілізації горіння дуги, або стабілізатори дуги.

Підпалення дуги пов'язане з необхідністю отримання високої напруги. Для цього можуть бути використані додаткові обмотки зварювального трансформатора [1]; можуть застосовуватися спеціальні схеми з додатковими індуктивними компонентами, які вмикаються паралельно [2] або послідовно з вторинною обмоткою зварювального трансформатора [3–8].

Перший підхід вимагає зміни конструкції трансформатора і непридатний для модифікації існуючого парку зварювальних трансформаторів.

Реалізація другого підходу веде до підвищених габаритів та маси стабілізатора дуги у зв'язку з наявністю додаткових індуктивних компонентів, особливо тих, що включені в зварювальний ланцюг послідовно з вторинною обмоткою трансформатора.

Оригінальним підходом до створення стабілізаторів дуги є використання для повторних підпалень дуги енергії, яка може бути накопичена у полі розсіювання зварювального трансформатора. Зважаючи на те, що трансформатори для зварювання зазвичай мають падаючу вихідну характеристику і підвищене розсіювання, такий підхід представляється перспективним.

У роботах [9, 10] описано стабілізатор дуги змінного струму, який підключається до виводів вторинної обмотки зварювального трансформатора і містить електронний комутатор, підключений до цієї обмотки, і схему управління комутатором.

Схема дозволяє виконувати підпал дуги після переходу мережевої напруги через нуль і повторно підпалювати дугу в разі її обриву, не містить силових індуктивних компонентів, має просте підключення. Недоліками схеми є неможливість формування вихідних імпульсів напруги з підвищеною частотою, оскільки при невдалій спробі пробою дугового проміжку енергія, що накопичена в магнітному полі зварювального трансформатора, розсіюється у вигляді тепла на елементах захисту електронного комутатора від перенапруги. Тому підвищення частоти вихідних імпульсів призведе до перегріву елементів захисту комутатора. Крім того, велика швидкість зміни вихідної напруги веде до генерації радіочастотних завад. Це погіршує споживчі якості стабілізатора дуги.

Авторами удосконалено стабілізатор дуги змінного струму [11], що дозволило знизити втрати енергії в ньому, збільшити тривалість періоду підтримання підвищеної напруги на електроді при ручному дуговому зварюванні та полегшити процес ініціювання дуги, тим самим поліпшити споживчі характеристики і розширити сферу застосування пристрою. Крім того, створено варіант пристрою [12] зі збільшеною вихідною напругою без необхідності застосування силових компонентів з підвищеною робочою напругою.

Ідея полягає в тому, щоб до вторинної обмотки зварювального трансформатора підключити конденсатор, який утворює спільно з індуктивністю

розсіювання трансформатора коливальний контур. Паралельно цьому конденсатору підключаються електронні ключі зі схемою управління, що забезпечує «накачування» контуру енергією. Це призводить до підвищення напруги на конденсаторі та на виході зварювального джерела.

Спрощена схема силової частини пристрою стабілізації дуги змінного струму, що реалізує описаний принцип, наведена на рис. 1.

Формування підвищеної напруги ініціації дуги реалізується за рахунок «накачування» резонансного контуру, утвореного елементами T1 та C_R .

Елементи VD1, S1 працюють на позитивній напівхвилі вторинної напруги зварювального трансформатора T1 (S1 перемикається, S2 вимкнений), елементи VD2, S2 — на негативній напівхвилі (S2 перемикається, S1 вимкнений).

Розглянемо процес на позитивній напівхвилі.

Одразу після переходу вторинної напруги T1 через нуль відкривається ключ S1. На рис. 2 наведено осцилограму напруги на конденсаторі C_R в цьому режимі. Починається накопичення енергії в індуктивності розсіювання T1. Як тільки струм ключа S1 досяг встановленого струму «накачування» (цей струм визначає амплітуду вихідної напруги і енергію розряду), система керування закриває S1 (момент часу t_1). Починається резонансний заряд конденсатора C_R . Через чверть періоду резонансної частоти контуру, утвореного індуктивністю розсіювання T1 і конденсатором C_R , останній заряджається до максимальної напруги, а струм спадає до нуля. Починається розряд C_R на T1. Через півперіоду резонансної частоти напруга на C_R переходить через нуль і стає негативною, а струм досягає мінімального значення. Система керування відкриває S1 при появі негативної напруги на C_R (момент часу t_2), проте це не впливає на процес, адже діод VD2 закрито зворотною напругою.

Через три чверті періоду резонансної частоти напруга на C_R досягає мінімуму, а струм стає близьким до нуля. Починається заряд C_R від вторинної обмотки T1. Коли напруга на C_R перейде через нуль і стане позитивною, струм обмотки

перекинеться через діод VD2 і заздалегідь відкритий ключ S1 (момент часу t_3). Відбудеться додаткове «накачування» індуктивності до встановленого струму, після чого S1 закриється (момент часу t_4) і процес повториться знову. Комутація S1 є «м'якою», адже його відкриття відбувається при негативній напрузі на C_R (коли закритий діод VD2), а закриття відбувається при близькій до нуля напрузі на C_R , тобто швидкість наростання напруги на S1 обмежена дією C_R . На негативній напівхвилі вторинної напруги T1 всі процеси протікають аналогічно.

При роботі схеми можливі два варіанта розвитку подій: при певній напрузі на C_R відбувається ініціювання дуги. При цьому напруга на виході джерела живлення дуги знижується до значення напруги на дуговому проміжку, система управління блокує роботу ключів S1, S2 до наступного переходу напруги вторинної обмотки T1 через нуль. Так забезпечується «м'яке» підпалення і стабілізація дуги; якщо напруга на C_R стає надто великою, схема керування знижує струм «накачування» резонансного контуру T1– C_R і система переходить в установлений режим роботи.

Під час горіння дуги конденсатор C_R через його невелику ємність не чинить значного впливу на процес. Ініціювання дуги відбувається після кожного переходу вторинної напруги зварювального трансформатора через нуль.

Авторами виготовлено пристрої стабілізації дуги з використанням запропонованого технічного рішення. Стабілізаторами були оснащені трансформатори ТДМ-401 та СТШ-250, проведено їх промислові випробування при проведенні ремонтних робіт на металургійних підприємствах м. Маріуполь. Оснащені стабілізаторами дуги зварювальні трансформатори використовувались для зварювання електродами постійного струму типу УОНИ.

Система керування стабілізаторів виконана на однокристальному мікроконтролері і забезпечує виконання наступних функцій: ідентифікацію наявності дуги за результатами аналізу вторинної

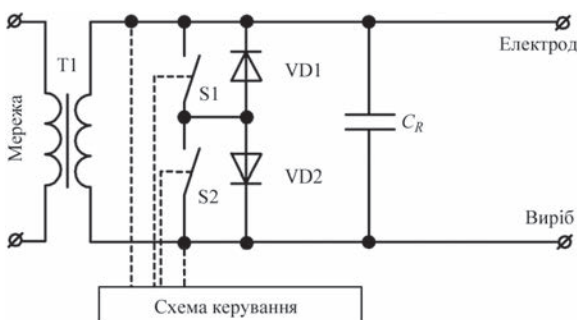


Рис. 1. Схема силової частини пристрою стабілізації дуги змінного струму

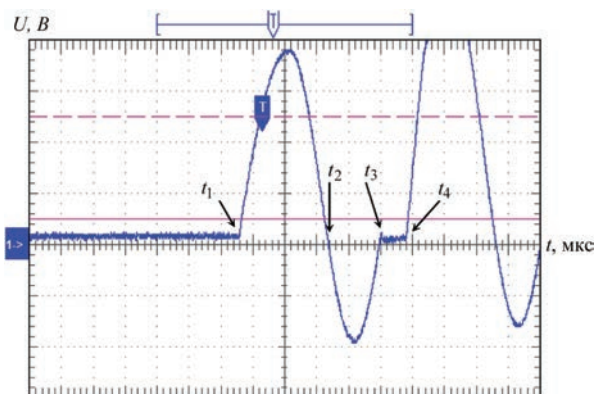


Рис. 2. Осцилограма напруги на конденсаторі C_R (напруга на вторинній обмотці трансформатора) (8 мкс/діл, 50 В/діл)

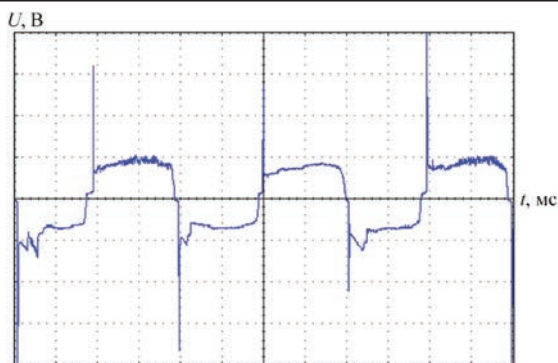


Рис. 3. Осцилограмма напруги на вторинній обмотці трансформатора під час зварювання (5 мс/діл, 50 В/діл)

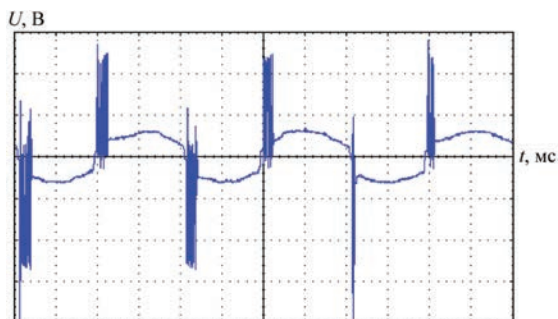


Рис. 4. Осцилограмма напруги на вторинній обмотці трансформатора під час зварювання, видно пакети імпульсів підвищеної напруги (5 мс/діл, 50 В/діл)

напруги трансформатора; стабілізацію напруги збудження дуги; автоматичне налаштування під параметри трансформатора; обмеження часу дії підвищеної напруги при невдалій спробі ініціації дуги; тепловий захист силових елементів схеми.

На рис. 3, 4 показано осцилограми вторинної напруги зварювального трансформатора ТДМ-401 з підключеним стабілізатором дуги при ручному дуговому зварюванні електродами УОНИ-13/55. Видно, що виникають ситуації (рис. 4) коли повторне збудження дуги відбувається не одразу, а після дії декількох імпульсів підвищеної напруги. Амплітуда імпульсів повторного підпалення дуги досягає 200 В, при початковому підпаленні дуги (після замикання електрода на виріб) — до 300 В. Стабілізатори показали стійку роботу у всьому діапазоні регулювання зварювального струму трансформаторів з магнітним шунтом.

Запропонований стабілізатор дуги придатний для роботи зі зварювальними трансформаторами, не обладнаними електронними засобами регулювання зварювального струму, оскільки поява високої напруги з частотою десятки кГц на вторинній обмотці трансформатора може призвести до порушення режиму роботи електронних регуляторів.

Авторами розроблена версія стабілізатора дуги з двопровідним підключенням до трансформатора, тобто живлення системи керування реалізовано від вторинної напруги. Габарити такого стабілізатора дуги складають всього 110×90×48 мм.

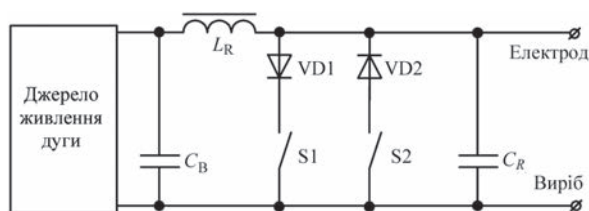


Рис. 5. Схема силової частини пристрою стабілізації дуги з резонансним дроселем

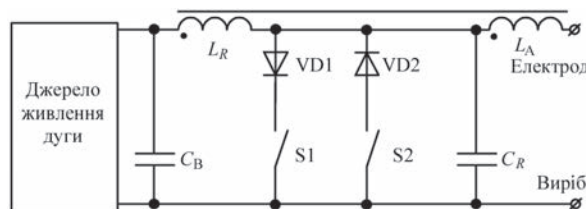


Рис. 6. Силовая часть пристрою стабілізації дуги з підвищеною напругою

Якщо добротність зварювального трансформатора залишає бажати кращого, або не бажано піддавати його вторинну обмотку дії високої напруги підвищеної частоти, доцільно в стабілізаторі дуги застосувати окремий резонансний дросель з відомими характеристиками, а паралельно вторинній обмотці трансформатора встановити високочастотний блокувальний конденсатор. Це, звісно, погіршує техніко-економічні та масогабаритні параметри стабілізатора, оскільки в ньому з'являється силовий індуктивний компонент. На рис. 5 приведена схема силової частини такого варіанту пристрою стабілізації дуги.

Пристрій включається між джерелом живлення дуги і зварювальним електродом, містить резонансний дросель L_R , блокувальний конденсатор C_B і резонансний конденсатор C_R , електронні ключі $S1$, $S2$ і два діоди $VD1$, $VD2$. Ключі можуть бути включені і так, як показано на рис. 1, функціональність схеми залишається тією самою.

Для ТІГ зварювання ключі $S1$, $S2$, діоди $VD1$, $VD2$ і конденсатор C_R повинні бути розраховані на більшу напругу, оскільки для ТІГ процесу необхідно забезпечити підвищену напругу запалювання дуги в порівнянні з ручним дуговим зварюванням. Також для ТІГ зварювання дросель може бути виконаний з додатковою обмоткою (L_A , рис. 6), яка включена послідовно з основною.

Таке «автотрансформаторне» включення дроселя дозволяє отримати підвищену вихідну напругу без необхідності заміни силових компонентів на більш високовольтні. При належному розрахунку параметрів дроселя можна отримати на електроді напругу амплітудою декілька кВ, що може бути використано для безконтактного підпалу дуги при ТІГ зварюванні.

Список літератури

1. Заруба И. И., Андреев В. В., Дыменко В. В. (2001) Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 3, 45–48.

2. Андрианов А. А., Сидоренко В. Н. (2009) Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока. *Електротехніка і електромеханіка*, **2**, 5–8.
3. Махлин Н. М., Коротынский А. Е. (2014) Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги. *Автоматическая сварка*, **1**, 34–44.
4. Махлин Н. М., Коротынский А. Е. (2015) Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета. Ч. 1. *Там же*, **3-4**, 25–36.
5. Махлин Н. М., Коротынский А. Е. (2015) Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета. Ч. 2. *Там же*, **7**, 28–40.
6. Махлін Н. М., Коротинський О. Є., Скопюк М. І. (2014) Пристрій для збудження та стабілізації процесу горіння дуги змінного струму, Україна, Пат. 109334, МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01), № а2014 00292.
7. Бурлака В. В., Гулаков С. В. (2016) Устройство для возбуждения и стабилизации сварочной дуги. *Автоматическая сварка*, **11**, 48–51.
8. Бурлака В. В., Гулаков С. В. (2016) Пристрій стабілізації дуги, Україна, Пат. 115200, МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01), № а2016 08174.
9. Заруба И. И., Андреев В. В., Шатан А. Ф. и др. (2012) Новый тип импульсного стабилизатора горения сварочной дуги переменного тока. *Автоматическая сварка*, **2**, 51–53.
10. Патон Б. Є., Заруба І. І., Андреев В. В., Шатан О. Ф., Москович Г. М., Халіков В. А. (2011) Пристрій для початкового та повторних запалювань зварювальної дуги змінного струму, Україна, Пат. 62596, МПК В 23 К 9/00 (2011.01), № u201014476.
11. Бурлака В. В., Гулаков С. В. (2017) Пристрій стабілізації дуги змінного струму, Україна, Пат. 114990, МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01), № а2016 067.
12. Бурлака В. В., Гулаков С. В. (2017) Стабілізатор дуги змінного струму, Україна, Пат. 114998, МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01), № а2016 08173.
11. Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. (2017) *Device for stabilization of alternating current arc*. Pat. 114990 Ukraine, Int. Cl. B23K 9/067 (2006.01); B23K 9/073 (2006.01); No. a 2016 067 [in Ukrainian].
12. Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. (2017) *Stabilizer of alternating current arc*. Pat. 114998 Ukraine, Int. Cl. B23K 9/067 (2006.01); B23K 9/073 (2006.01), No. a 2016 08173 [in Ukrainian].

В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500, Донецкая обл., г. Мариуполь, ул. Университетская, 7 E-mail: office@pstu.edu

СТАБИЛИЗАТОР ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Предложено схемное решение стабилизатора дуги переменного тока для сварочных трансформаторов. Отличительной особенностью стабилизатора является использование резонансного повышения напряжения на вторичной обмотке трансформатора для обеспечения повторных поджогов дуги после каждого перехода тока через нуль. Это дает возможность снизить потери энергии в стабилизаторе дуги и обеспечить эффективное формирование пакетов высоковольтных импульсов для гарантированного пробоя дугового промежутка. Применение предложенного стабилизатора дуги позволяет выполнять сварочные работы электродами постоянного тока при питании от сварочных трансформаторов без выпрямителей. Стабилизатор предназначен для работы с трансформаторами, не оборудованными электронными регуляторами — главным образом с трансформаторами с магнитным шунтом типов ТДМ, СТШ. Библиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: электрическая дуга, сварка, поджог дуги, стабилизация горения дуги, сварочный трансформатор, напряжение поджога дуги

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebenna

SHEI «Priazovskyi State Technical University».
7 Universitetskaya Str., Mariupol, Donetsk region, 87500.
E-mail: office@pstu.edu

ALTERNATING CURRENT ARC STABILIZER FOR WELDING TRANSFORMERS

Circuit design of an a.c. stabilizer for welding transformers was proposed. A feature of the stabilizer is application of a resonance voltage increase in the secondary winding of the transformer to ensure repeated arc ignition after each current reversal. This enables reducing the power losses in the arc stabilizer, and ensuring efficient formation of high-voltage pulse packets for guaranteed breakdown of the arc gap. Application of the proposed arc stabilizer allows performance of welding operations with direct current electrodes at power supply from welding transformers without rectifiers. The stabilizer is designed for operation with transformers not fitted with electronic regulators, mainly with transformers with a magnetic shunt of TDM, STSH types. 12 Ref., 6 Fig.

Keywords: electric arc, welding, arc ignition, arcing stabilization, welding transformer, arc ignition voltage

Надійшла до редакції 12.01.2018

References

1. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., Dymenko, V.V. (2001) Improvement of transformers for manual arc welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 43–46.
2. Andrianov, A.A., Sydorets, V.N. (2009) Optimization of modes of stabilization of alternating current welding arc. *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*, **2**, 5–8 [in Russian].
3. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E. (2014) Analysis and procedure of calculation of series connection electronic devices for contactless arc excitation. *The Paton Welding J.*, **1**, 30–40.
4. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E. (2015) Asynchronous exciters and stabilizers of arc. Analysis and calculation procedure. Pt. 1. *Ibid.*, **3-4**, 24–35.
5. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E. (2015) Asynchronous exciters and stabilizers of arc. Analysis and calculation procedure. Pt. 2. *Ibid.*, **7**, 26–37.
6. Makhlin, N.M., Korotynsky, O.E., Skopyuk, M.I. (2014) *Device for excitation and stabilization of alternating current arc burning process*. Pat. 109334 Ukraine, Int. Cl. B23K 9/067 (2006.01); B23K 9/073 (2006.01); No. a 2014 00292 [in Ukrainian].
7. Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. (2016) Device for excitation and stabilization of welding arc. *The Paton Welding J.*, **11**, 43–46.
8. Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. (2016) *Device for arc stabilization*. Pat. 115200 Ukraine, Int. Cl. B23K 9/067 (2006.01); B23K 9/073 (2006.01); No. a 2016 08174 [in Ukrainian].
9. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., Shatan, A.F. et al. (2012) New type of pulse stabilizer of alternating current welding arc. *The Paton Welding J.*, **2**, 43–45.
10. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Andreev, V.V. et al. (2011) *Device for initial and repeated welding alternating current arc ignition*. Pat. 62596 Ukraine, Int. Cl. B23K 9/00 (2011.01); No. u 2020 14476 [in Ukrainian].

НОВЫЙ СОСТАВ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

7 марта 2018 г. в большом конференц-зале Национальной академии наук в г. Киеве состоялась сессия Общего собрания НАН Украины, во время которой были избраны действительные члены (академики) и члены-корреспонденты НАН Украины.

Присутствующих проинформировал президент Национальной академии наук Украины академик Борис Евгеньевич Патон о том, что к нынешним выборам президиум НАН Украины, с учетом положения Закона Украины «О научной и научно-технической деятельности» относительно граничной численности членов Национальной академии наук Украины в 200 академиков и 400 членов-корреспондентов. Имеется 22 вакансии академиков и 69 вакансий членов-корреспондентов по 84-м специальностям.

«В основу распределения вакансий между отделениями и определения специальностей была положена необходимость обеспечения приоритетного развития фундаментальных наук, прежде всего по тем направлениям, где украинские ученые имеют результаты мирового уровня. Безусловно, первоочередным условием было наличие по каждой специальности достойных кандидатов к избранию, и не только в институтах нашей Академии, а и в отечественных высших заведениях, отраслевых научных и научно-технических организациях. Важно также, чтобы выбирая новых членов, Академия не ограничивалась преимущественно г. Киевом, а и заботилась об усилении науки в других регионах государства, и, я думаю, что эту необходимость наши отделения в процессе выборов выполнили», — отметил президент НАН Украины.

О значительном интересе научной общественности к этим выборам свидетельствует по его словам, высокий конкурс претендентов. Так, на 22 вакансии академиков было выдвинуто и зарегистрировано 60 кандидатов, т. е. трое на одно место, на 69 вакансий членов-корреспондентов — 229 кандидатов, т. е. более трех на одно место.

Из выдвинутых кандидатов 219 являются работниками учреждений НАН Украины, это 75 % общего количества претендентов, 70 лиц (24,3 %) представляли высшие учебные заведения, научные организации различного ведомственного подчинения и другие организации. Все это свидетельствует о том, что, несмотря на сложные условия текущего времени, авторитет НАН Украины в обществе останется высоким и отражает ее значение как наивысшей научной организации государства.

Список выдвинутых кандидатов был своевременно, более чем за месяц до выборов, опубликован в прессе и электронных средствах массовой

информации для общественного обсуждения, в котором взяли участие советы научных учреждений, высших учебных заведений, отдельные ведущие ученые как Украины, так и других государств, от которых поступило несколько тысяч откликов о научной деятельности кандидатов. В соответствии с Уставом вся подготовка к выборам проходила в условиях полной открытости и свободы обсуждения кандидатур.

На решающей стадии выборной компании — общих собраниях отделений также были созданы все условия для свободного обмена мнениями, критических выступлений, предложений, что безусловно содействует осуществлению наиболее обоснованного, объективного и независимого выбора. Далее, академик Б. Е. Патон проинформировал общее собрание о составе кандидатов в члены НАН Украины.

Из 22 кандидатов в академики 19 — сотрудники НАН Украины, двое — ученые, которые работают в вузах страны, один кандидат представляет другое научное учреждение. Среди 69 кандидатов в члены-корреспонденты 54 работают в учреждениях НАН Украины, 12 — в вузах и двое — в отраслевых и других организациях. 18 кандидатов в академики и 42 — в члены-корреспонденты работают в Киеве, это составляет 66,7 %. Двое кандидатов в академики работают в Харькове и двое — во Львове. Среди кандидатов в члены-корреспонденты было 9 лиц из Харькова, 4 — из Днепра, по трое из Львова и Одессы и по одному — из Николаева, Ивано-Франковска, Тернополя и Славянска Донецкой области, в сумме это 33,3 %.

Средний возраст академиков НАН Украины перед выборами составлял 77,3 года, членов-корреспондентов — 71 год. Средний возраст избираемых кандидатов в академики НАН Украины составляет 65,1 год, а кандидатов в члены-корреспонденты — 63,4 года.

Среди избираемых кандидатов в члены Академии — 8 женщин, это больше чем в предыдущие годы. В настоящее время количество женщин среди академиков немного больше 2 % и около 9 % — среди членов-корреспондентов. Потом результаты выборов, прошедших на общих собраниях отделений НАН Украины, присутствующим доложили академики — секретари отделений.

По результатам голосования в состав членов НАН Украины избраны, в частности, заведующие отделами Института электросварки им. Е. О. Патона В. В. Кныш и В. А. Шаповалов.

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!



*Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и редколлегия журнала «Автоматическая сварка» горячо и сердечно поздравляют **Виталия Васильевича Кныша и Виктора Александровича Шаповалова** с избранием в члены-корреспонденты НАН Украины. Желаем им доброго здоровья, счастья, новых достижений и дальнейших творческих успехов!*



В. В. Кныш — 1952 г. рождения, закончил Киевский государственный университет им. Т. Г. Шевченко; с 1978 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; с 2013 г. — заведующий отделом прочности сварных конструкций; защитил кандидатскую диссертацию в 1982 г., докторскую — в 2012 г.; профессор, лауреат Государственной премии Украины (2015 г.).

В. В. Кныш — известный ученый в области прочности материалов и сварных конструкций. Его основные работы посвящены исследованию сопротивления усталости и циклической трещиностойкости сварных соединений конструкционных сталей и алюминиевых сплавов, оценке остаточного ресурса сварных элементов металлоконструкций, содержащих усталостные трещины, и разработке конструктивно-технологических способов повышения циклической долговечности сварных соединений на стадиях накопления повреждений и развития усталостных трещин.

В. В. Кнышом на основе подходов механики разрушения развиты методы расчетного определения циклической долговечности сварных элементов металлоконструкций, которые содержат усталостную трещину. В его работах предложены и экспериментально обоснованы трехпараметрические кинетические уравнения для скорости роста поверхностных и сквозных усталостных трещин в конструкционных материалах, которые вместе с размахом коэффициента интенсивности напряжений содержат в явном виде коэффициент асимметрии цикла нагружения. На основе этих уравнений разработан метод расчетного определения циклической долговечности сварных элементов конструкций из условий развития усталостной трещины в неоднородных полях остаточных напряжений растяжения.

В. В. Кныш автор свыше 130 научных трудов, в том числе двух монографий и семи патентов Украины, США и Канады.

В. А. Шаповалов — 1950 г. рождения, закончил Ворошиловградский машиностроительный институт; с 1978 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; в 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 2003 г. — докторскую в области плазменно-шлаковой металлургии; в настоящее время заведующий отделом, лауреат Государственной премии Украины в 2013 г., лауреат премии им. Е. О. Патона НАН Украины в 2017 г.

В. А. Шаповалов — известный специалист в области материаловедения и специальной электрометаллургии. Его научные работы тесно связаны с созданием электрометаллургических технологий и получения материалов в различном кристаллическом состоянии от быстро закаленных материалов до монокристаллов и исследованиями их структурообразования. Особенно необходимо выделить его работы по материаловедению и металлургии, которые касаются плазменно-индукционного выращивания и исследования монокристаллов вольфрама и молибдена. Выращивание сверхбольших монокристаллов тугоплавких металлов стало возможным в результате сочетания нескольких факторов: совместного использования плазменно-индукционного нагрева и формирования монокристалла путем послойного наращивания за счет перемещения локальной металлической ванны — типичная 3D-технологии (аналогов в мире нет).

Впервые в мире В. А. Шаповалов решил проблему выращивания крупных ориентированных монокристаллов вольфрама и молибдена с более совершенной структурой и улучшенными физико-механическими свойствами. Он получил и исследовал большие профилированные монокристаллы тугоплавких металлов в виде пластин, используемых для изготовления зеркал сверхмощных лазеров, тел накаливания приборов светотехники, экранов в рентгеновских оптических приборах, анодов мощных рентгеновских ламп, мишеней для распыления и тому подобное.

Результаты научных исследований Шаповалова В. А. нашли отражение в более чем 200 научных работах, в том числе двух монографиях, двух учебниках, 38 авторских свидетельств и патентов.

Польский институт сварки в Гливицах

Начало деятельности Польского института сварки приходится на период непосредственно после окончания Второй мировой войны. Институт был создан в 1945 г., а первым его заданием было обучение газо- и электросварщиков, в которых остро нуждалась разрушенная в результате войны страна.

С 1949 г. Институт начал постепенно превращаться в научно-исследовательское учреждение. Созданы первые исследовательские отделы, которые решали задачи в области сварочных технологий, свариваемых и сварочных материалов.

Решающим шагом в развитии Института было образование в 1954 г. отдела по проектированию сварочного и вспомогательного оборудования, а также отдела прототипов сварочного оборудования. После войны материальная база сварочного производства в Польше состояла только из одного завода по производству сварочных электродов, одной фабрики по изготовлению оборудования для газовой сварки и нескольких десятков предприятий по производству кислорода и ацетилена. Производства электрического оборудования для сварки не существовало вообще, а при изготовлении тяжелых стальных конструкций (котлов для энергетики, судов, кораблей, мостов) самым распространенным способом соединения была клепка.

Оба отдела размещались в помещениях Института. Первыми их достижениями были разработка линейки машин для контактной сварки давлением мощностью 2, 6 и 10 кВ·А проволоки и вентилей баллонов для ацетилена, а также 500-амперный сварочный трансформатор, базирующийся на советском образце того периода. Два года спустя оба отдела были объединены в один под названием отдел по изготовлению сварочного оборудования (ZBUS), который разрабатывал и создавал прототипы сварочного оборудования, машин, автоматов и аппаратов, которые были необходимы для функционирования и развития сварочного производства в Польше. Прототипы, тиражируемые и усовершенствованные, направлялись в серийное производство на создаваемые в Польше промышленные предприятия. В качестве примеров первых прототипов могут служить сварочные трансформаторы, сварочные источники питания на базе двигателей внутреннего сгорания, ацетиленовые генераторы высокого давления, автоматы для электрошлаковой сварки, полуавтоматы для кислородной резки, машины для стыковой контактной сварки стержней и труб, кислородные редукторы, в том числе сетевые, собиратели флюса, устройства для намотки электродной проволоки и многое другое.

Благодаря систематической и целенаправленной работе, в Институте были созданы все условия для успешного развития современного сварочного производства в Польше. В конце 1958–1959 гг. Институт имел эффективную систему подготовки и обучения сварочного персонала, отдел по проектированию и изготовлению сварочного оборудования, коллектив исследователей, проводящих многочисленные исследования в области сварки, а также целый комплекс помещений и лабораторий, оснащенных неплохим оборудованием и аппаратурой для проведения исследований. В тот период руководство страны, проводя оценку работы промышленных исследовательских центров, решило, что Институт сварки должен и далее сохранить за собой статус исследовательского института.

С 1960 г. в Институте проводятся многочисленные, очень интересные и нередко сложные исследовательские работы. В больших объемах разрабатывалось и изготавливалось также различное сварочное оборудование.

Ярким примером может служить поточная линия для автоматической сварки стенок вагонов-углевозов на Вагоностроительном заводе, в состав которой входило 12 сварочных автоматов. Линия была внедрена в производство в 1962 г. В Институте организовывались конференции и встречи специалистов по сварке, во время которых с рефератами выступали



Здание Института сварки в Гливицах

сотрудники Института. Это был период, когда начались также первые зарубежные командировки, в том числе для участия в конгрессах Международного института сварки, в котором Институт сварки в Гливицах является официальным представителем Польши с 1 июля 1956 г.

В период 1966–1968 гг. произошло очередное расширение Института. Ранее существующие и достроенные к ним здания подвергались многократной модернизации также и в более позднее время, однако в той конфигурации и размерах продолжают успешно служить до сих пор.

В 1968 г. Институт был организатором XXI Конгресса Международного института сварки. Председателем организационного комитета был проф. Юзеф Пилярчик, главный основатель Института в 1945 г. и его многолетний директор. В 1967 г. проф. Юзеф Пилярчик решил сконцентрироваться только на работе кафедры сварки Силезского политехнического института в качестве ее руководителя, оставаясь при этом председателем научного совета Института сварки.

1970-е годы принесли много нового. В тот период Польша получила зарубежные кредиты, которые использовались кроме прочего при строительстве многих современных по тем временам предприятий, а также способствовали значительному технологическому прогрессу. В области сварочного производства появился ряд новых способов сварки плавлением и давлением, которыми Институт интенсивно занимался. Проводились исследования по сварке в CO_2 , затем в газовых смесях, плазменной сварке и резке, электрошлаковой и электрогазовой сварке, сварке трением, механизированной и автоматической термической резке и т. п. Параллельно проводился широкий спектр исследований в области свариваемости ряда современных конструкционных сталей, которые изготавливались польскими металлургическими комбинатами, а также предоставлялись консультационные услуги и осуществлялся надзор над выполнением ответственных сварных конструкций при реализации крупных инвестиционных программ. Разрабатывались и внедрялись в промышленное производство многочисленные посты и линии для механизированной сварки и резки. Большие изменения произошли также в области науки благодаря финансированию больших исследовательских проектов в пятилетних циклах, нацеленных на решение так называемых узловых проблем (позднее Центральных исследовательских программ), охватывающих широкую тематику целых отраслей. Институт принимал активное участие в реализации этих программ.

Важным событием в жизни Института была организация и проведение в сотрудничестве с Силезским политехническим институтом курсов по повышению квалификаций инженеров-сварщиков. Лекции и практические занятия для участников курсов проходили в помещениях Института, а обязанности преподавателей выполняли сотрудники Института с богатым научным и производственным опытом. Курсы проводились в течение 10 лет, до 1980 г.

1980-е годы были очень тяжелыми в жизни Института сварки. Объявленное в Польше 13 декабря 1981 г. военное положение, трудная общественная и политическая ситуация, значительное сокращение промышленного производства, потеря и разрыв устоявшихся связей, увольнение большого количества сотрудников, переход на пенсию или уход с работы по состоянию здоровья, все это привело к тому, что работы в Институте протекали рывками, нерегулярно, а финансовая ситуация была очень плохая, что сказывалось на низких зарплатах и отсутствии инвестирования в развитие. Большими были также кадровые проблемы, на что влияло отсутствие приемки на работу молодых инженеров. Последствия этой ситуации чувствовались еще долгое время, так как на протяжении нескольких лет не хватало воспитанных в Институте и заряженных его патриотизмом опытных сотрудников.

Невзирая на трудности, Институт продолжал в 1981–1985 гг. координировать узловую проблему «Способы и средства механизации и автоматизации сварочных работ», а в 1986–1990 гг. Центральную научно-исследовательскую программу «Сварочные технологии». В реализации этих программ кроме Института были задействованы все наиболее значимые научные и исследовательские польские центры, работающие в области сварки.

С 1990 г. Институт начал функционировать в совершенно новых условиях. В 1989 г. Польша свернула на путь свободного развития и перешла от управляемой из центра низкоэффективной социалистической экономики к конкурентной рыночной экономике. Все мечтали о таких изменениях, однако далеко не каждый осознавал принципиальную разницу между жизнью в

скромных, но все-таки социально гарантированных условиях социалистического государства, и жизнью на возможно более высоком уровне в условиях рыночной экономики, что, однако, было связано с тяжелым и ответственным каждодневным трудом.

В 1990 г. Институт был институтом научно-внедренческим. В этом году было опубликовано постановление о таких учреждениях, которое давало им большую свободу деятельности, но одновременно закладывало полное самофинансирование и ответственность за принимаемые решения. Таким образом, на счета институтов перестали поступать средства из бюджета на их функционирование, а соответствующие министерства, обеспечивающие в прошлом жизнедеятельность и распространяющих опеку над этими учреждениями, остались только их учредителями. Очень многие научно-исследовательские институты не сумели выжить в таких новых условиях.

В измененном постановлении о научно-внедренческих институтах указывалось, что новый директор не будет впредь назначаться, а должен будет выбран на должность путем проведения конкурса, кроме того не на неограниченный срок, а на 5-летний период. Директор должен выразить согласие на занятие должности не по приказу, а на основании собственного выбора с полным сознанием того, что судьба Института будет решаться на основании его единоличных решений.

В результате проведенного впервые в истории конкурса директором Института стал 1 ноября 1990 г. проф. Ян Пилярчик, сын проф. Юзефа Пилярчика. Институт начал быстро приспосабливаться к новой ситуации, проходя трудный путь глубокого преобразования и работы в соответствии с принципами свободного конкурентного рынка. Большая перестройка Института охватила организационную структуру, персонал, предметную деятельность, оснащенность аппаратурой и состояние помещений.

Здания Института, построенные в период с 1945 по 1970 гг., были в 1990–2015 гг. подвержены основательной реконструкции, получили новый современный вид и заполнены современной аппаратурой и оборудованием. Отремонтированы были также все элементы инфраструктуры Института. Проводились поиски сотрудников, которые были способны работать по-новому с учетом современных требований.

Была усилена деятельность Института, направленная на развитие и совершенствование различных способов сварки и сварочных технологий, конструкционных материалов, сварочных материалов и оборудования, а также предприняты новые шаги исключительно в области сварки, приносящие доход Институту, такие как обучение сварочного персонала в соответствии с национальными и европейскими программами, надзор над сварочным обучением в Польше, оценка и аттестация предприятий, производящих сварные конструкции, проведение испытаний в сертифицированных и аккредитованных лабораториях, исследование и квалификация сварочных технологий, сертификация сварочных изделий, персонала и систем обеспечения качества, разработка стандартов PN-EN, внедрение в практику правил и правовых актов, а также разработка инструкций и требований. Одновременно Институт прекратил разработку и внедрение в промышленное производство сварочного оборудования, постов и производственных линий для механизированной и автоматизированной сварки и резки. Этими вопросами занялись профессиональные сварочные фирмы, польские и зарубежные, которые начали появляться в Польше.

Основная задача Института — работа в соответствии с принципами и требованиями свободного рынка — было дополнено не менее важным вторым заданием — перестройка функционирования Института с учетом стандартов европейских. В 1992 г. был образован Европейский Союз, в котором Польша получила статус страны-наблюдателя. В рамках Союза возник ряд европейских организаций, одной из которых была Европейская Федерация по Сварке (EWF). Основным заданием Федерации было создание единой системы подготовки и обучения сварочного персонала, признаваемой всеми партнерами. Система эта была затем распространена, благодаря сотрудничеству с Международным институтом сварки, также в странах, находящихся за пределами Европейского Союза, и в 2001 г. была признана в качестве глобальной системы подготовки сварочного персонала. Институт сварки в качестве единственного органа в Польше, был включен в гармонизированную систему обучения, экзаменирования, аттестации и сертификации сварочного персонала и имел право выдачи европейских и международ-

ных дипломов и сертификатов предприятиям и сварочному персоналу. Таких документов выдано уже несколько тысяч. Они позволяют предприятиям функционировать на европейском рынке и бороться за получение экспортных контрактов.

1 октября 2010 г. Институт сварки изменил статус с «научно-внедренческого» на «исследовательский». Это стало возможным благодаря принятию нового распоряжения об исследовательских институтах.

Современное оснащение Института оборудованием и аппаратурой находится на очень хорошем уровне и не уступает тому, которые имеют подобные сварочные институты в мире. В распоряжении Института находится современное оборудование для дуговой сварки, очень хорошие лазеры с широким спектром возможностей для проведения сварки, резки и многих других родственных процессов, новая установка для электронно-лучевой сварки, машины для современной сварки давлением всеми способами, оборудование для пайки, а кроме того широкий спектр контрольной и измерительной аппаратуры, а также установка и программное обеспечение для имитации термических циклов сварки. Институт имеет хорошую информационную базу, которая разрабатывалась в течение последних десятилетий и которая создает хорошие условия работы всем сотрудникам Института, обеспечивая непосредственный контакт со всеми наиболее важными клиентами и внешними партнерами.

Институт реализует целый ряд исследовательских проектов в сотрудничестве с Национальным центром исследований и Национальным центром науки, а также многими промышленными партнерами и зарубежными исследовательскими центрами. Спустя более 70 лет активной деятельности, Институт сварки в Гливицах может гордиться целым рядом весомых достижений. Эти успехи были достигнуты в исследовательских отделах, лабораториях и центрах Института благодаря плодотворному и самоотверженному труду нескольких поколений многих сотрудников Института.

Проф. Ян Пиляричик



16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre
expoSilesia
www.exposilesia.pl

60th
International
Welding Conference
Organizer:
Institute of Welding

ExpoWELDING

IOS

International Welding Fair

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | expowelding@exposilesia.pl

НАК Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Сосновец, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Статья, посвященная выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

ЖУРНАЛЫ



Журнал «Автоматическая сварка», 12 выпусков в год, издается с 1948 г. Тематика: сварка, термическая резка, наплавка, пайка, нанесение защитных покрытий и другие родственные процессы. Подписной индекс 70031, <https://doi.org/10.15407/as>. 12 выпусков в год.



Журнал «The Paton Welding Journal», 12 выпусков в год, издается с 2000 г. (полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык). Подписной индекс 21974, <https://doi.org/10.15407/tpwj>. 12 выпусков в год.

Подписку на журналы можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 выпуска в год, издается с 1989 г. Тематика: методы и разработки в области технической диагностики и неразрушающего контроля. Подписной индекс 74475, <https://doi.org/10.15407/tdnk>. 4 выпуска в год.



Журнал «Современная электрометаллургия», 4 выпуска в год, издается с 1985 г. Тематика: специальные процессы переплава – ЭШТ, ЭЛП, ПДТ, ВДТ, ВИП. Подписной индекс 70693, <https://doi.org/10.15407/sem>. 4 выпуска в год.

СБОРНИКИ



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. — 254 с. Выпуск четвертый.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. — 270 с. Выпуск третий.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. — 324 с. Выпуск второй.



НАПЛАВКА. ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2015. — 402 с.



СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. — 168 с.



СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ / Составители: В.М. Илюшенко, Е.П. Лукьянченко. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2013. — 396 с.



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ / Составители: И.К. Походня, А.С. Котельчук. — Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с.



СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. — 132 с.

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ



I–VIII Международные конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (2002–2016 гг.). (Восемь выпусков).



Труды Международной конференции «Сварочные материалы», 16–18 июня 2014, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 6-7, 2014. — 204 с.



I–VII Международные конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (2003–2015 гг.). (Семь выпусков).



Труды Международной конференции «Наплавка. — Наука. Производство. Перспективы», 15–17 июня 2015, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5-6, 2015. — 160 с.



Труды Международной конференции «Современные технологии сварки», 13–15 июня 2016, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5-6, 2016. — 184 с.



Труды Международной конференции «Роботизация и автоматизация сварочных процессов», 12–14 июня 2017, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5-6, 2017. — 120 с.

Издательский Дом «Патон»,

03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича 11, офис 1606.

E-mail: journal@paton.kiev.ua; тел./факс: +38(044) 200-82-77, 200-81-45

НОВА КНИГА

РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ РИЗИКІВ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ (англ. мовою). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017.

ISBN: 978-620-2-07171-0.

ЗМІСТ

Вступ

Розділ 1. Аналіз та дослідження існуючих підходів і методів виявлення та управління ризиками на підприємстві зварювального виробництва, що здійснюють виготовлення та монтаж конструкцій

Розділ 2. Розробка методики оцінки розпізнавання ризиків в зварювальному виробництві, створення реєстру і ранжування ризиків в зварних конструкціях за допомогою НК і ТД

Розділ 3. Технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів в зварювальному виробництві

Розділ 4. Проблеми забезпечення прийому і мотивації технічних експертів в зварювальному виробництві

Розділ 5. Розробка методики оцінки розпізнавання ризиків в зварювальному виробництві. Створення реєстру і ранжування ризиків в зварних конструкціях

Розділ 6. Проблеми розвитку системи технічного регулювання по НК і ТД та зварювання конструкцій

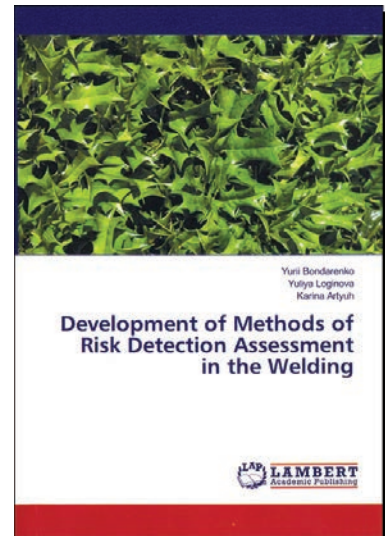
Розділ 7. Проблеми підвищення якості виконання технічних послуг при монтажі та діагностиці в енергетиці з метою забезпечення безпеки зварних конструкцій

Розділ 8. Проблеми забезпечення якості та оцінки зварних конструкцій на основі нових стандартів і технічних регламентів

Розділ 9. Моніторинг ризику утворення дефектів в зварних з'єднаннях при виконанні ремонту і монтажу, зварювання в захисних газах

Розділ 10. Дослідження принципів управління ризиками для якості в зварювальному виробництві

Розділ 11. Оцінка ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів системи управління якістю і проведення випробувань методами НК і ТД



Talk about the fourth industrial revolution or «industry 4.0» was held in Davos since 2011. At that time, an active discussion of the new technological era, which essentially minimizes the contribution of human labor to production processes, and also significantly simplifies life at the household level by the expense of «smart» gadgets and solutions. Today, the turning point of the new industrial era is never closer. For example, the founder of the Davos forum, Klaus Schwab, is convinced that in the near future the world will be captured by artificial intelligence. The need to improve the efficiency of the enterprise (increase productivity, reduce costs, improve quality) makes it necessary to develop effective methods of management and to introduce requirements of quality system standards, moving from the control of finished products (phased control as one of the methods of technical maintenance of functioning) to a process management approach. The requirements of the standards of the quality management system develop in accordance with the requirements of the development of scientific management methods, management system standards and use the concept of risk-based thinking.

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

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
900 грн.	1800 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



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

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Журнал «Автоматическая сварка» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «The Paton Welding Journal» и распространяется по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, 200-54-84, E-mail: journal@paton.kiev.ua).



Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.
В 2018 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2016 гг. в формате *.pdf.

Реклама в журналах «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- ♦ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ♦ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ♦ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ♦ Вклейка А4, 200×290 мм
- ♦ Разворот А3, 400×290 мм
- ♦ А5, 165×130 мм

Стоимость рекламы

- ♦ Цена договорная
- ♦ Предусмотрена система скидок
- ♦ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- ♦ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- ♦ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 27.02.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 8,75. Усл.-отт. 9,04. Уч.-изд. л. 9,64.
Печать ООО «ДИА».

© Автоматическая сварка, 2018

03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

Формирование изделий с помощью 3D технологии

Специалисты компании «Voestalpine Böhler Welding» воспользовались уникальной возможностью — выставкой «Schweißen & Schneiden 2017», чтобы продемонстрировать свои достижения в области 3D-печати с использованием сварочных проволок. Под торговой маркой Böhler Welding представлен инновационный ассортимент специализированных электродных материалов для 3D-печати, разработанный на основе металлургического опыта и ноу-хау в области сварки и наплавки.

Аддитивное производство с помощью дуговой наплавки проволочными материалами (Wire Arc Additive Manufacturing — WAAM), как официально называется эта революционная технология, быстро развивается как гибкая и экономичная технология для создания компонентов (изделий) из специальных сплавов с учетом предъявляемых требований. В технологии используется автоматическая электродуговая сварка для создания любой желаемой формы изделия путем нанесения



слоя наплавленно-го валика на предыдущий слой. Процесс WAAM может быть полностью автоматизирован от разработки идеи детали до ее изготовления в среде компьютерного проектирования, что сокращает время производства и объем человеческого вмешательства, необходимых для изготовления каждого нового продукта.

Задача в WAAM заключается в создании сложных металлических изделий с хорошей геометрической точностью, требующих минимальной обработки, из различных материалов и без потери их при производстве. Это предъявляет высокие требования к проволочному электроду с точки зрения обеспечения согласованных характеристик сварки, таких как подача проволоки, стабильность горения дуги, смачивающие свойства металла и контроля разбрызгивания. Новый критерий в металлургической экспертизе — необходимость сбалансировать химический состав таким образом, чтобы изделия, изготовленные WAAM, приобретали желаемые механические и химические свойства в условиях сварки, подобные микрообъемному литью.

Инновационный ассортимент Böhler Welding 3Dprint состоит из высококачественных сплошных и порошковых проволок с превосходным качеством поверхности и сварочными характеристиками, необходимыми для стабильного процесса 3D-печати. Доступные химические составы проволок покрывают широкий спектр низко- и среднелегированных сталей, различных типов нержавеющей сталей, включая дуплексные стали, сплавы на основе никеля, титана и алюминия.

Дополнительная информация
о номенклатуре проволок Böhler Welding 3Dprint:
<http://voestalpine.com/welding/ru>



X Международная специализированная выставка КИЕВСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА – 2018

3–5 апреля 2018 г.

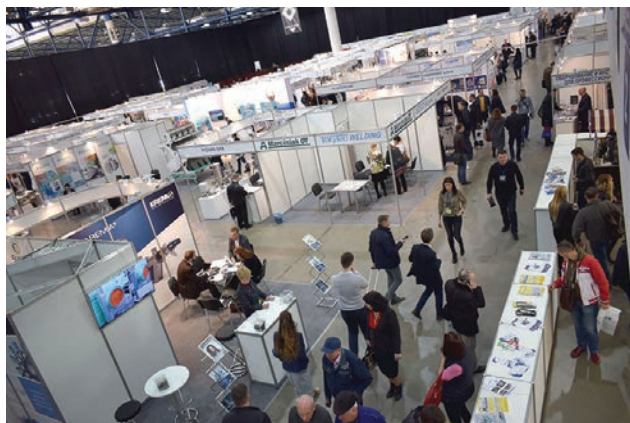
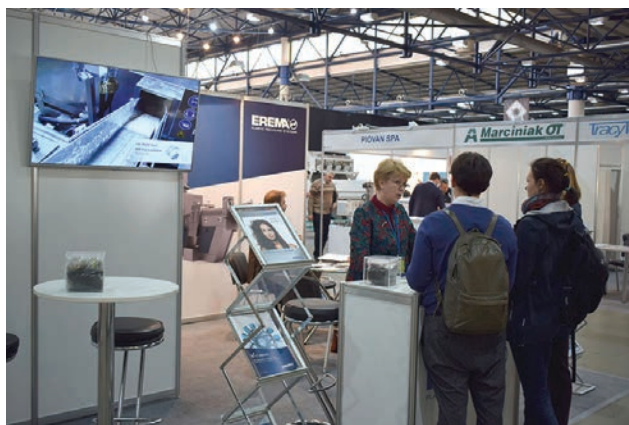
Киев
Международный выставочный центр

С 3 по 5 апреля в Киеве на территории Международного выставочного центра состоится X Международная специализированная выставка «КИЕВСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА – 2018».

Организатором выставки является ООО «Международный выставочный центр».

Главная цель выставки — это демонстрация лучших достижений науки, техники и технологий, необходимых для инновационного развития экономики Украины, а также содействие в установлении деловых, экономических и торговых связей между отечественными предприятиями и странами ближнего и дальнего зарубежья. Специализированная выставка позволяет предприятиям как, с одной стороны, ознакомиться с мировыми новинками в своей области, так и предоставляет возможность продемонстрировать свои собственные разработки, выверить экономическую целесообразность и конкурентоспособность своей продукции.

Киевская техническая ярмарка — это логическое продолжение Международного промышленного форума, крупнейшей отраслевой выставки Украины, которую Международный выставочный центр более 16 лет подряд проводит в последнюю неделю ноября. Контакты, установленные в процессе ознакомления с новыми разработками и технологиями, представленными на Промфоруме, возможно плодотворно развить и закрепить во время весенней Киевской технической ярмарки.



Место проведения: Украина, г. Киев, Международный выставочный центр,
Броварской проспект, 15, станция метро «Левобережная».

Тел.: (044) 201-11-58. E-mail: alexk@iec-expo.com.ua, is@iec-expo.com.ua, www.iec-expo.com.ua

Календарь марта

1 марта 1936



Родился Владимир Рафаилович Рябов (1936–2002) — представитель Патоновской школы, известный ученый и экспериментатор в области сварки разнородных материалов. В его работах были представлены принципы и методические подходы к изучению проблемы свариваемости металлокомпозитов, исследованы процессы, способствующие формированию высокопрочных соединений. Результаты исследования свариваемости разнородных и многослойных металлов и алюмокомпозитов стали весомым вкладом в разработку технологических процессов их сварки, способствовали широкому внедрению указанных материалов в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники. Автор более 310 научных трудов, в том числе 20 монографий.

2 марта 1927

Началось строительство туапсинского участка нефтепровода Грозный–Туапсе. Это был первый крупный советский магистральный нефтепровод из труб среднего диаметра. Строительство велось с 1927 по 1928 гг. Для соединения труб на нефтепроводе впервые в мире была применена электродуговая сварка. Этот метод сварки оказался весьма успешным и в дальнейшем нашел широкое применение.



3 марта 1953

Был выдан один из патентов компании Castolin Eutectic, которая внесла весомый вклад в развитие сварочных технологий. Предприятие было создано в 1906 г. Жан-Пьером Вассерманом в Лозанне, Швейцария. Он открыл способ пайки литого чугуна твердыми припоями. В последующем были разработаны аппараты для напыления, покрытия, сварки и собственные расходные материалы. Компания присутствует с собственными отделениями в более чем 100 странах на всех пяти континентах и имеет высокий международный имидж.



4 марта 1918



Родился Николай Герасимович Остапенко (1918–1965) — представитель Патоновской школы. Он впервые для дуговой сварки угольным электродом применил углекислый газ в качестве защитной среды. Также значителен вклад Н. Г. Остапенко в обосновании расширения области применения процесса стыковой сварки оплавлением на магистральных нефтепроводах за счет использования специальных трансформаторов и решении проблемы стыковой сварки обсадных труб при их спуске в скважину.

5 марта 1870



Родился Евгений Оскарович Патон (1870–1953) — выдающийся ученый в области мостостроения и электросварки, основатель широко известной в мире Патоновской научно-инженерной школы. Герой Социалистического Труда, лауреат Сталинской премии, основатель Института электросварки, который с 1953 г. носит его имя. Его деятельность в мостостроении, строительной механике, электросварке и электрометаллургии навсегда останется в истории мировой науки и техники.

* Материал подготовлен компанией ООО «СТИЛ ВОРК» (г. Кривой Рог) при участии редакции журнала. Календарь публикуется ежемесячно, начиная с выпуска журнала «Автоматическая сварка» № 11, 2017 г.

6 марта 1906

Родился Дэвид Роланд Смит (1906–1965) — американский художник, известный своими большими абстрактными геометрическими скульптурами из стали, представитель абстрактного импрессионизма. Свои произведения создавал из металла. Первый опыт изготовления металлических изделий получил еще будучи студентом в 1925 г., подрабатывая сварщиком на заводе «Студебеккер». Под впечатлением от металлических работ Пабло Пикассо (1881–1973) и Хулио Гонсалеса (1876–1942) Дэвид Смит создает в 1933 г. свою первую скульптуру с использованием сварки.



7 марта 1942

Константин Константинович Хренов (1894–1984) возглавил лабораторию подводной сварки и резки при Московском энергомеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта. В короткий срок была изучена и детально разработана технология подводной сварки и резки, подготовлены соответствующие кадры. К концу 1943 г. сотни подводных сварщиков выполняли работы под водой. Подводная сварка дала возможность проводить ремонт подводной части кораблей без постановки их в доки, иногда прямо в открытом море.



8 марта 1924



Родился Энтони Каро (1924–2013) — известный британский скульптор. Для индивидуальной манеры Каро, начиная с 1960-х гг., характерны абстрактные композиции, создаваемые с помощью сварки. Помимо стальных балок и труб использует в своих произведениях формы, напоминающие «найденные объекты».

9 марта 1943

Начало испытаний танка модификации М6 армии США. Еще 22 мая 1940 г. была сформулирована первоначальная концепция для нового тяжелого танка. В декабре 1941 г. первый экземпляр тяжелого 60-тонного танка был изготовлен на локомотивном заводе в Балдвине. Корпус танка был сварен вручную. В 1944 г. здесь перешли на дуговую автоматическую сварку под флюсом. Сварку бронекорпусов боевых машин выполняли как на переменном, так и на постоянном токах. Стыковые соединения собирали с разделкой кромок с притуплением 2 мм, затем сваривали вручную за несколько проходов. Всего было произведено лишь 40 танков Т1/М6 различных модификаций, которые никогда не участвовали в боях.



10 марта 1986



Скончался Георгий Зосимович Волошкевич (1911–1986) — представитель Патоновской школы. Он принимал непосредственное участие в организации широкого внедрения способов электрошлаковой сварки в производство на заводах тяжелого машиностроения. В 1957 г. Б. Е. Патон и Г. З. Волошкевич вместе с сотрудниками Новокраматорского машиностроительного завода и завода «Красный котельщик» (Таганрог) были удостоены Ленинской премии за создание процесса электрошлаковой сварки и производства на его основе крупногабаритных ответственных изделий. Эта работа получила в 1958 г. Большой приз на Всемирной выставке в Брюсселе. Ряд фирм промышленно развитых стран приобрели лицензии на использование этого высокопроизводительного способа сварки.

11 марта 1818

Родился Анри Сент-Клер Деви́ль (1818–1881) — французский химик. Он в 1850 г. создал горелку, в которой водород и кислород смешивались в специальной камере еще до выхода наружу (подобная схема используется и в современных сварочных горелках). Появление смесительной камеры открыло возможность регулировать состав и температуру газового пламени, изменяя соотношение горючего газа и окислителя.

12 марта 1683

Родился английский естествоиспытатель, ученый Джон Теофил Дезагюлье (1683–1744). В Королевском научном обществе он продемонстрировал первый выдающийся пример холодной сварки давлением (без нагрева). Два свинцовых шара (первый из которых весил 1 фунт, а второй — 2 фунта), с которых были срезаны шаровые сегменты, были руками спрессованы с одновременным скручиванием. Оказалось, что в результате они соединились. Шары присоединились друг к другу так прочно, что поддерживаемый рукой верхний однофунтовый шар отсоединялся от нижнего лишь при нагрузке более 16 фунтов. При осмотре соприкасающихся поверхностей оказалось, что площадь их соединения не превышала площади круга диаметром в 1/10 дюйма, хотя эту поверхность невозможно было в точности измерить вследствие ее неправильной формы.

13 марта 1903

Французский ученый Бушайе разработал конструкцию «дуплекс-электродов» (патент Франции № 330200 от 13.03.1903) для выполнения сразу двух сварных точек. Верхний и нижний электродные узлы имели собственные трансформаторы. При параллельном подключении обмоток трансформаторов получается только одна точка, при последовательном — сразу две. Это изобретение существенно повышало производительность процесса точечной сварки.

**14 марта 1692**

Родился Питер ван Мушенбрук (1692–1761) — голландский физик. К числу наиболее известных достижений Мушенбрука принадлежит создание лейденской банки — первого конденсатора, изобретенного Мушенбруком и его учеником Кюнеусом в 1746 г. в Лейдене. Независимо от Мушенбрука и несколько ранее принцип конденсатора открыт померанским католическим дьяконом Эвальдом фон Клейстом 11 октября 1745 г. Конденсатор широко используется в современной сварочной технике, например, при конденсаторной сварке.

15 марта 1906

Зарегистрирована компания «Роллс-Ройс». Бизнесмены в то время относились к сварке с недоверием. Однако, если сварные соединения были неизбежны, допускалось выполнение их газовой сваркой при обязательном условии, что швы располагаются в местах с низким уровнем ответственности детали. Для деталей, работающих с большой нагрузкой, сварку старались не применять. Все же с развитием технологии предприниматели стали все чаще использовать сварку. И сегодня при производстве новых моделей «Роллс-Ройс» используют полный спектр процессов сварочных технологий.

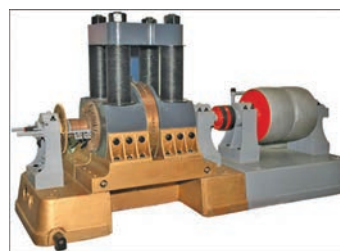


16 марта 1942

Первый пробный запуск ракеты «Фау-2». Именно ракета «Фау-2» стала первым в истории искусственным объектом, совершившим суборбитальный космический полет. Это впоследствии дало толчок для создания и развития ракетостроения. Ракеты «Фау-2» производились в Германии в конце войны в условиях дефицита стратегического сырья. Поэтому в производстве применялось большое количество дешевых заменителей. По этой же причине ракеты в основном были стальными. Такой важный узел, как хвостовая часть, изготавливался из стального листа с помощью точечной сварки. Интересным в техническом отношении был аппарат для точечной сварки отсеков корпуса ракеты, в котором приварка производилась сразу в нескольких точках.

**17 марта 1890**

Николай Гаврилович Славянов (1854–1897) — русский инженер, изобретатель электрической дуговой сварки металлическим электродом — подал прошение о выдаче привилегии России на изобретенный им «метод электрической отливки металлов». Первый генератор, обеспечивающий питание этого процесса сварки «напрямую», был изготовлен Н. Г. Славяновым в 1888 г. Аппарат для сварки с использованием этого генератора проработал на пермских заводах до 1895 г. С его помощью было проведено более 1500 практических сварочных работ.

**18 марта 1917**

Родился Владимир Евгеньевич Патон (1917–1987) — заслуженный изобретатель УССР, талантливый инженер, блестящий конструктор. В 1948 г. разработал универсальный сварочный автомат-трактор ТС-17, не имевший аналогов в отечественной и зарубежной технике. Он внес значительный вклад в создание специализированных аппаратов для сварки и напыления в космосе, для проведения астрофизических экспериментов. В. Е. Патон лауреат трех государственных премий, автор 90 изобретений.

19 марта 1894

Скончался Павел Николаевич Яблочков (1847–1894) — русский электротехник, военный инженер, изобретатель и предприниматель. Известен разработкой дуговой лампы (вошедшей в историю под названием «свеча Яблочкова») и другими изобретениями в области электротехники. В 1875 г. во время одного из многочисленных опытов у Павла Николаевича возникла идея более совершенного устройства дуговой лампы (без регулятора межэлектродного расстояния) — будущей «свечи Яблочкова». Неоднократно сотрудничал с основоположником дуговой сварки угольным электродом Н. Н. Бенардосом, предоставляя ему возможность проводить работы на предприятиях и развивать электросварку.

20 марта 1931

Вступил в строй корабль «Шевалье Поль» — первое французское судно с цельносварным корпусом водоизмещением 2750 т. По совету Альфреда Круппа (1907–1967) для сварки бронированных плит при строительстве корабля начали применять электроды с сердечником из хромомолибденовой стали и покрытием, разработанным английским химиком А. Строменгером. Дуговую сварку широко использовали во Франции также при строительстве крейсеров типа «Дуплекс» и линкоров типа «Дюнкерк».

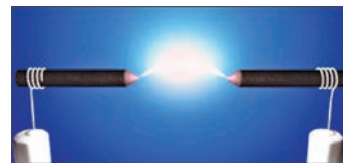


21 марта 1800

В 1800 г. итальянский ученый Алессандро Вольта (1745–1827) информирует Королевское общество в Лондоне о создании источника энергии, более известного как «Вольтов столб». Алессандро Вольта опустил в банку с кислотой две пластинки — цинковую и медную — и соединил их проволокой. После этого цинковая пластина начала растворяться, а на медной стали выделяться пузырьки газа. Вольта предположил и доказал, что по проволоке протекает электрический ток. Так был изобретен «элемент Вольта» — первый гальванический элемент. На заре электротехники именно это устройство стало первым источником для электрической дуги.

22 марта 1892

Огюст де Меритан, французский электротехник (1834–1898), опубликовал французский патент № 123766 (улучшенный магнитный электрогенератор). Его самой известной работой стали опыты с магнитогенераторами. О. Меритан выпустил также первую горелку для дуговой сварки угольным электродом и запатентовал ее в 1881 г. Ее удачно использовали для сварки при производстве кислотных аккумуляторов. Огюст де Меритан также изобрел специальное приспособление для сварочных работ — закрытые капюшоны и трубку для отвода вредных паров. Это были первые средства защиты сварщика.

**23 марта 1942**

Родился Эбботт Лоуренс Паттисон (1916–1999) — американский абстрактный художник. Его скульптура «Стоящие на коленях женщины» выиграла в 1942 г. медаль в области искусств. Для создания своих работ мастер использовал автогенную сварку. Он являлся одним из самых известных художников, работающих в этом направлении.

**24 марта 1888**

Скончался Михаил Гдал-Гершович Бельфор (1920–1988) — представитель Патоновской школы. Он внес значительный вклад в создание основ проектирования сварочного оборудования. Мировое признание получили его разработки автоматов для электрошлаковой и дуговой сварки, которые были классическими образцами современного сварочного оборудования. Помимо внедрения конструкторских разработок средств механизации и автоматизации он пропагандировал передовые способы сварки и оборудования, много энергии отдавал воспитанию молодых конструкторов и исследователей. Автор 8 монографий и 62 зарубежных патентов.

25 марта 1958

Состоялся первый полет RL-201 (Авро CF-105 Эрроу) — истребителя-перехватчика с дельтовидным крылом, создававшегося канадской компанией Avro Aircraft Limited (Canada) в 1953–1959 гг. Конструкция самолета была во многом передовой для того времени. Для соединения самолета применялась сварка в инертных газах вольфрамовым электродом на оборудовании, поставляемом компанией «Lincoln Electric». Внутренней структурой самолета была пространственная рама из сваренных встык труб. Оружейные отсеки были также изготовлены из нержавеющей труб, сварных рам и балок.

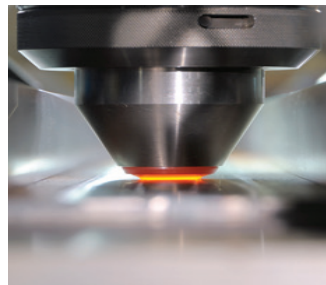
**26 марта 1935**

Выходит один из патентов на сварочный электрод Саразена. Французские изобретатели Р. Саразен и О. Монеирон разработали способ покрытия металлических стержней толстым слоем обмазки, в которую входили соединения щелочных и щелочноземельных металлов (полевого шпат, мрамор, мел и сода). Они имеют низкий потенциал ионизации. Поэтому при использовании электродов с такой обмазкой легче возбуждалась и поддерживалась дуга. Известно, что и Н. Н. Бенардос применял угольные электроды с «фитилем», т. е. электроды, сердцевина которых была заполнена солями натрия и калия.



27 марта 1968

Путем слияния ряда организаций был сформирован Британский институт сварки (TWI). TWI работает для всех отраслей промышленности и для всех аспектов производства. Учреждение также предлагает обучение и экспертизу услуг по неразрушающему контролю, сварке и инспекции по всему миру. С численностью работающих свыше 900 сотрудников институт сотрудничает со сварочными организациями 80 стран мира. История организации начинается с 1923 г. Позже, в 1946 г., была создана British Welding Research Association (BWRA). Одним из выдающихся достижений института является создание способа сварки трением с перемешиванием.

**28 марта 1945**

Образован польский Институт сварки в Гливице. Он является самым большим и важным научно-исследовательским центром в Польше, который проводит работы по исследованию, развитию и внедрению сварочных технологий. Количество сотрудников 170 чел. Важным направлением деятельности института является обучение и подготовка кадров в области сварки и неразрушающего контроля. Институт издает сварочный научно-технический журнал «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa».

**29 марта 1853**

Родился Элиу Томсон (1853–1937) — один из основателей индустрии электричества в США, выдающийся инженер, изобретатель и первопроходец, чьи открытия в области переменного тока привели к открытию им электродвигателя переменного тока. Именно этот ученый по праву считается «отцом контактной сварки», сумевшим внедрить ее в промышленность. Элиу Томсон имел свое собственное видение будущего электричества. Во время своей карьеры, которая продолжалась пять десятилетий, им получено 696 патентов США на изобретения дуговых ламп и генераторов, которые явились основой для создания сварочной техники.

30 марта 1929

Ирвинг Ленгмюр (1881–1957) назвал плазмой ионизированный газ в газоразрядной трубке. При изучении электрического разряда в трубке с разряженным воздухом и была открыта материя, ставшая четвертым состоянием вещества. Лауреат Нобелевской премии по химии (1932 г.) за исследования в области химии поверхностных явлений. В 1962 г. промышленную технологию плазменной резки осуществили ученые Института электросварки К. К. Хренов и Э. М. Эсбиян. Сегодня эта технология по популярности превосходит все остальные методы резки.

31 марта 1948

По инициативе академика Е. О. Патона был основан научно-технический и производственный журнал «Автоматическая сварка» (первые два года сборник «Труды по автоматической сварке под флюсом»). По широте, охвату и глубине освещения опубликованных материалов выпуски журнала за 70 лет его издания часто называют сварочной энциклопедией. Он помог становлению уже нескольких поколений сварщиков.

