

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,  
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
Ю. Н. Ланкин,  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,  
В. Д. Позняков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
П. Зайффарт (Германия)  
А. С. Зубченко (Россия)  
В. И. Лысак (Россия)  
Н. И. Никифоров (Россия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пилярчик (Польша)  
Г. А. Туричин (Россия)  
Чжан Янмин (Китай)  
Д. фон Хофе (Германия)

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

Национальная академия наук Украины,  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАНУ,  
Международная  
ассоциация «Сварка»

**ИЗДАТЕЛЬ:**

Международная ассоциация  
«Сварка»

Адрес редакции:  
03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАНУ  
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623  
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Редакторы:**

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина  
Электронная верстка:  
И. Р. Наумова,  
И. В. Петушков, А. И. Сулима

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни  
утвержденных ВАК Украины  
и Российской Федерации изданий  
для публикации трудов  
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет  
Цена договорная

**СОДЕРЖАНИЕ**

Е. О. Патон — выдающийся ученый, педагог, организатор науки и производства (к 140-летию со дня рождения) .....	3
НОВОСТИ .....	7

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

<i>Кучук-Яценко С. И., Четвертко П. Н., Семенов Л. А., Самоотрясов С. М., Гуцин К. В.</i> Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219 .....	9
<i>Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Логинов В. П., Покляцкий А. Г.</i> Влияние электроимпульсной обработки на остаточное формоизменение тонколистовых сварных конструкций (Обзор) .....	13
<i>Дзянхуа Я., Лианг В., Канли Ч., Чжидзунг Ч., Коваленко В. С.</i> Остаточные напряжения и механические свойства турбинных лопаток после лазерной обработки поверхности .....	18
<i>Бут В. С.</i> Сравнительная оценка методик определения вязкости разрушения металла ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей .....	24
<i>Ланкин Ю. Н., Семикин В. Ф., Суший Л. Ф.</i> Управление бездатчиковыми приводами постоянного тока сварочных установок .....	30
<i>Астахов Е. А., Кудь И. В., Лиходед Л. С., Зяткевич Д. П., Яковлева М. С., Еременко Л. И.</i> Получение порошка сплава системы Ni-Cr-Al-Y, легированного кремнием, методом порошковой металлургии .....	36

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

<i>Романов В. В., Бутенко Ю. В.</i> Сварочное производство в газотурбостроении (Обзор) .....	40
<i>Шлепаков В. Н., Гаврилюк Ю. А., Котельчук А. С.</i> Современное состояние разработки и применения порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей .....	46
<i>Машин В. С., Пашуля М. П.</i> Особенности импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов без применения подкладных формирующих элементов .....	52
<i>Цумарев Ю. А.</i> Контактная точечная сварка со специальной подготовкой свариваемых кромок .....	59

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

По страницам журнала «Welding and Cutting», 2009, № 4 .....	62
---	----

**ХРОНИКА**

А. А. Эннану — 75 .....	64
В. А. Богдановскому — 75 .....	65

ИНФОРМАЦИЯ .....	66
Высокое качество сварки в строительстве .....	67

EDITORIAL BOARD:

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

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,  
A. T. Zelnichenko,  
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,  
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),  
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,  
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),  
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,  
V. I. Makhnenko,  
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,  
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,  
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),  
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Dilthey (Germany)  
P. Seyffarth (Germany)  
A. S. Zubchenko (Russia)  
V. I. Lysak (Russia)  
N. I. Nikiforov (Russia)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ya. Pilarczyk (Poland)  
G. A. Turichin (Russia)  
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

The National Academy of Sciences  
of Ukraine, The E. O. Paton Electric  
Welding Institute,  
International Association «Welding»

PUBLISHER:

International Association «Welding»  
Address of Editorial Board:  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23  
Fax: (38044) 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushlina  
*Electron galley:*  
I. R. Naumova,  
I. V. Petushkov, A. I. Sulima  
State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

This publication and each of the articles  
contained here in are protected  
by copyright  
Permission to reproduce material  
contained in this journal must be obtained  
in writing from the Publisher

## CONTENTS

E. O. Paton — outstanding scientist, teacher, organizer of science and production (towards the 140th anniversary of birthday) .....	3
NEWS .....	7

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Kuchuk-Yatsenko S. I., Chvertko P. N., Semyonov L. A., Samotryasov S. M., Gushchin K. V.</i> Peculiarities of flash-butt welding of high-strength aluminium alloy 2219.....	9
<i>Lobanov L. M., Pashchin N. A., Loginov V. P., Poklyatsky A. G.</i> Effect of electric pulsed treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review) .....	13
<i>Jianhua Y., Liang W., Qunli Zh., Zhijun Ch., Kovalenko V. S.</i> Residual stresses and mechanical properties of turbine blades after laser treatment of surface .....	18
<i>Boot V. S.</i> Comparative evaluation of methods for determination of fracture toughness of HAZ metal of low-alloy steel welded joints .....	24
<i>Lankin Yu. N., Semikin V. F., Sushiy L. F.</i> Control of sensorless d.c drives of welding machines .....	30
<i>Astakhov E. A., Kud I. V., Likhoded L. S., Zyatkevich D. P., Yakovleva M. S., Eryomenko L. I.</i> Producing of powder of Ni-Cr-Al-Y system alloy, alloyed with silicon, using the method of powder metallurgy .....	36

### INDUSTRIAL

<i>Romanov V. V., Butenko Yu. V.</i> Welding manufacturing in gas turbine construction (Review) .....	40
<i>Shlepakov V. N., Gavrilyuk Yu. A., Kotelchuk A. S.</i> State-of-the-art of developments and application of flux-cored wires for welding carbon and low-alloy steels .....	46
<i>Mashin V. S., Pashulya M. P.</i> Peculiarities of pulsed-arc consumable electrode welding of aluminium alloys without application of backing forming elements .....	52
<i>Tsumarev Yu. A.</i> Resistance spot welding with special preparation of edges welded .....	59

### BRIEF INFORMATION

Review of journal «Welding and Cutting», No.4, 2009 .....	62
---	----

### NEWS

A. A. Ennan is 75 .....	64
Bogdanovsky V. A. is 75 .....	65
INFORMATION .....	66
Welding and high-quality in construction .....	67

---

## Е. О. ПАТОН — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, ОРГАНИЗАТОР НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

(к 140-летию со дня рождения)

Евгений Оскарович Патон родился 5 марта 1870 г. в Ницце (Франция) в семье русского консула. Среднее образование получил в гимназии г. Бреслау (Германия), где, наряду с фундаментальной подготовкой по точным наукам, в совершенстве овладел немецким, французским и английским языками. В 1888 г. поступил на инженерно-строительный факультет Королевской Саксонской технической академии (ныне Технический университет Дрездена), который блестяще закончил в 1894 г. По окончании ему было предложено место ассистента в институте. Но молодой инженер, воспитанный в семье в духе патриотизма, твердо решил отдать все силы служению родной стране и в 1895 г. навсегда переезжает в Россию.

Для получения прав на инженерную деятельность в России Е. О. Патон в том же году поступает на 5-й курс Петербургского института инженеров путей сообщения, в течение восьми месяцев сдает 12 экзаменов, выполняет несколько проектов и уже в мае 1896 г. получает диплом русского инженера. По окончании института Евгений Оскарович начал работать ассистентом того же института под руководством профессора Ф. С. Ясинского и в техническом отделе службы пути Николаевской железной дороги. Талантливый профессор оказал большое и благотворное влияние на молодого специалиста. Уже в следующем, 1897 г., Е. О. Патон начинает педагогическую деятельность в только что организованном Московском инженерном училище путей сообщения. Здесь он встретился с профессорами Л. Д. Проскуряковым, Л. Ф. Николаи, Н. А. Белелюбским, М. Н. Герсевановым, совместная работа с которыми благотворно повлияла на формирование молодого ученого.

В возрасте 31 года он защитил диссертацию, получил степень адъюнкта и был назначен профессором училища. Московскому инженерному училищу Евгений Оскарович Патон отдал семь лет. В эти годы он выработал свою методику преподавания, началась его многолетняя работа над созданием учебников и учебных пособий по мостостроению. Он составил для себя жесткий распорядок дня, который начинался в шесть ча-

сов утра, и неукоснительно придерживался его всю жизнь.

Е. О. Патон постоянно работал над собой, тщательно готовился к лекциям, был очень требователен и взыскателен к студентам. Напряженно работал над созданием курсов мостов, скрупулезно обрабатывал массу материалов, многократно проверял и уточнял расчеты. За короткое время вышли из печати два тома курса по железным мостам и примеры расчетов деревянных, железных и каменных мостов. Имя молодого профессора-мостовика Е. О. Патона получило широкую известность, его книги быстро расходились.

В 1904 г. Киевский политехнический институт пригласил молодого профессора возглавить кафедру мостов. Вскоре Евгений Оскарович был избран деканом инженерно-строительного отделения того же института. С большой энергией он взялся за создание музея и кабинета мостов со специальной библиотекой. Помимо преподавания, Евгений Оскарович и здесь отдавал много сил созданию учебников, проектированию и строительству мостов. Под его руководством были построены Мухранский мост в Тбилиси, два моста через реку Рось, киевский пешеходный мост над Петровской аллеей, перекрытия залов КПИ и гостиницы «Метрополь» в Москве и др.

В годы Первой мировой войны Е. О. Патон энергично взялся за проектирование мостов по заданию военного ведомства. Была создана оригинальная конструкция разборных мостов, названных мостами Патона и получивших широкое применение для военных целей.

В 1918 г. Евгений Оскарович издает руководство «Восстановление мостов», работает над проектированием новых мостов. В 1920 г. он организовал Киевскую мостоиспытательную станцию НКПС и десять лет руководил ею. За эти годы под руководством и личном участии Е. О. Патона были проверены и испытаны около 150 мостов разных систем в Украине, Беларуси, Поволжье и Казахстане. Е. О. Патон был собран обширный фактический материал, который использовался в учебной и проектной работе.

В 1920 г. белополяки, отступая, взорвали красивейшее сооружение города — цепной мост через Днепр в Киеве. В 1922 г. Е. О. Патон берется за воссоздание моста, вкладывая всю свою неукротимую энергию в это дело. Евгений Оскарович был не только автором оригинального проекта, но и организатором строительства. Благодаря его изобретательности, умению решать самые сложные задачи и упорно преодолевать трудности мост, которому было присвоено имя Евгении Бош, начал функционировать в июне 1925 г.

В 1925–1929 гг. Е. О. Патон интенсивно работал над проектированием новых мостов, участвовал во всесоюзных и международных конкурсах, заслуженно получая высокие оценки и первые премии. В целом около 35 лет научной, инженерной и педагогической деятельности Евгений Оскарович отдал мостостроению, создал проекты 40 мостов, опубликовал свыше 160 научных работ по различным вопросам мостостроения. Многие его ученики стали известными учеными и инженерами, руководителями производств. Избрание Е. О. Патона академиком ВУАН в 1929 г. было вполне заслуженным. Е. О. Патон не без оснований считается основателем школы мостостроения в Украине.

В проектировании железных мостов к тому времени были достигнуты крупные успехи, но процесс их изготовления оставался весьма трудоемким и несовершенным. Это побудило Е. О. Патона к поиску новых технологий. Подготавливая в 1928 г. к переизданию курс «Железные мосты», Евгений Оскарович включает в него раздел по применению сварки в строительстве мостов.

Именно в новом способе соединения металлов — в электросварке — он видит пути коренного улучшения изготовления пролетных строений мостов. И Е. О. Патон принимает смелое и дальновидное решение — заняться сваркой, базируясь на основах металлургии, металловедения, электротехники и физики, т. е. на новых для мостостроителя вопросах.

Начинать пришлось на голом месте: не было ни оборудования, ни знающих людей, ни помещения. Четыре сотрудника и три комнаты в подвале — вот что представляла собой первоначально электросварочная лаборатория ВУАН. Затем на общественных началах был создан Электросварочный комитет при ВУАН, организатором и бессменным председателем которого был Е. О. Патон. На этой скромной базе развернулась интенсивная работа по исследованию прочности сварных конструкций, по пропаганде и

внедрению электросварки в промышленности, на транспорте и в строительстве. Уже на этом этапе Е. О. Патон выдвинул идею создания специализированного научно-исследовательского учреждения для решения всех задач, возникающих на пути развития сварочного производства. В 1933 г. создание такого института было утверждено президиумом ВУАН, а 3 января 1934 г. правительственным постановлением определен официальный статус Института электросварки.

Изначально Е. О. Патон предусмотрел такую организационную структуру института, которая состояла из научно-исследовательских и экспериментально-производственных подразделов, конструкторского бюро и мастерских. Так возник первый в мире специализированный центр по проведению научно-инженерных работ в области сварки, который в отличие от классических академических организаций не ограничивался выполнением сугубо фундаментальных исследований, а с самого начала был нацелен на комплексное решение реальных народнохозяйственных проблем: от углубленного теоретического поиска до применения научно-технических результатов в производстве.

В институте расширялась область научных исследований. В первую очередь всесторонне изучались сварные конструкции, их прочность в различных условиях эксплуатации, напряжения и деформации.

В отличие от большинства исследований в Западной Европе, проводившихся на малых лабораторных образцах (что значительно проще и дешевле), Институт электросварки стремился проводить опыты на сварных узлах, балках, фермах, близких к натурным. Это потребовало сооружения больших испытательных установок, но зато давало более точные и надежные результаты.

Исследования сварных конструкций, проводимые институтом, сразу привлекли большое внимание и получили положительную оценку.

Вскоре появилось второе важное направление исследований — механизация и автоматизация дуговой сварки. Большой жизненный, научный и производственный опыт подсказал Е. О. Патону, что для успеха нового дела надо сделать очень трудный, но необходимый шаг — механизировать и автоматизировать сварку, заменить руку и мастерство электросварщика сварочным автоматом. Эта задача и сегодня остается актуальной.

Развернутые Е. О. Патонем и его учениками целенаправленные фундаментальные

---

исследования стали теоретической основой науки о сварке, превратили ее в мощный источник технического прогресса, что привело к революционным свершениям во многих отраслях производства. Этому же способствовали вышедшие в свет монографии и статьи сотрудников института. Возникает потребность в квалифицированных инженерах-сварщиках и Евгений Оскарович организует в 1935 г. кафедру сварки в Киевском политехническом институте.

В предвоенные годы в Институте электросварки успешно велась разработка надежного оборудования для автоматической сварки открытой дугой. Однако на начальном этапе сварщики-стахановцы, работавшие вручную, обгоняли сложные и дорогие дуговые автоматы и по качеству сварки, и по производительности. Всесторонне изучив проблему и сконцентрировав научный потенциал института, Евгений Оскарович совместно с коллективом института создает новый способ дуговой сварки под флюсом. Это позволило в несколько раз увеличить производительность и резко повысить качество сварных швов. Сварка под флюсом стала промышленно надежным, экономически выгодным технологическим процессом и получила полное признание уже в 1940 г. Для широкого внедрения нового способа нужно было разработать автоматы, флюсы, проволоки и в кратчайший срок организовать их производство.

Евгений Оскарович Патон обратился к правительству за помощью. В конце 1940 г. он был вызван в Москву. В короткий срок было подготовлено, а затем и принято правительством постановление о широком внедрении автоматической сварки под флюсом. Постановление предусматривало внедрение нового способа на 20 крупнейших заводах, организацию производства необходимого оборудования, флюсов и проволоки, расширение Института электросварки. Е. О. Патон был назначен государственным советником и членом Совета машиностроения при СНК СССР. Это постановление стало историческим в развитии советской сварочной техники.

В марте 1941 г. Е. О. Патон был удостоен Сталинской премии первой степени за разработку метода и аппаратуры для скоростной автоматической сварки. Огромная энергия Е. О. Патона и всего коллектива Института электросварки обеспечила успешное выполнение постановления правительства. Внедрение сварки под флюсом принимало широкий размах.

Начавшаяся 22 июня 1941 г. Великая Отечественная война стала грозным испытанием для всего Советского Союза.

Академия наук УССР и большинство ее институтов были эвакуированы в Уфу. Е. О. Патон обратился к эвакуационной комиссии с просьбой перевести Институт электросварки на Урал. Институт переехал в Нижний Тагил на Уралвагонзавод, ставший арсеналом оружия и боеприпасов для фронта. По настоянию Е. О. Патона институт принимал непосредственное участие в организации производства бронекорпусов танков, сосредоточив свои силы на внедрении сварки под флюсом в производство вооружения и боеприпасов.

Деятельность Е. О. Патона в годы войны была особенно плодотворной. В сложных условиях он развернул поисковые и конструкторские работы, главной целью которых было создание высокоскоростной автоматической сварки броневых сталей для бронекорпусов танков. В тяжелых условиях военного времени под его руководством сотрудники института впервые в мире решили сложнейшие научные и технические задачи, связанные с автоматической сваркой брони: создали надежную технологию (В. И. Дятлов, Т. М. Слуцкая, Б. И. Иванов), исследовали процессы, проходящие в мощной сварочной дуге, горящей под флюсом (А. М. Макара, Б. Е. Патон), разработали новые сварочные флюсы.

На заводе в рекордные сроки был организован выпуск танков, и уже в январе 1942 г. первые грозные машины Т-34 вышли из его ворот.

В конце 1942 г. институтом были разработаны автоматы с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Положенный в основу этих автоматов принцип саморегулирования сварочной дуги позволил упростить конструкцию и облегчить изготовление и обслуживание автоматов, расширить возможности их применения. Кроме танковых заводов, Институт электросварки внедрял автоматическую сварку на других оборонных предприятиях. Впервые в мире с помощью скоростной автоматической сварки под флюсом было организовано поточное производство фугасных авиабомб, реактивных снарядов для катюш, а также другого вооружения и боеприпасов для нужд фронта. К концу 1944 г. автоматическая сварка под флюсом применялась уже на 52 заводах.

За успешное внедрение автоматической сварки под флюсом в производство Евгений Оскарович и ряд сотрудников института были награждены орденами СССР.

2 марта 1943 г. Е. О. Патону, первому из украинских академиков, присваивается звание Героя Социалистического Труда за выдающиеся достижения по обеспечению ускоренного производства танков.

Летом 1944 г. Евгений Оскарович возвращается в родной Киев, освобожденный Советской Армией от фашистских оккупантов.

С этого времени началась вторая жизнь Института электросварки. Ему было предоставлено здание по улице Горького.

Военные годы закалили и укрепили коллектив института, сохранив его высокую работоспособность и увлеченность делом. Используя разработки уральского периода, институт до конца 1945 г. внедрил автоматическую сварку под флюсом на 12 больших предприятиях. В этом же году институту было присвоено имя его основателя и руководителя.

Под руководством Е. О. Патона институт быстро растет и развивается, разворачиваются обширные научные исследования, осуществляются многочисленные разработки, публикуются сборники и монографии по различным проблемам сварки.

Круг вопросов, которыми занимается в эти годы Евгений Оскарович, непрерывно расширяется. К работе по руководству институтом присоединяются все новые общественные и государственные обязанности. Евгений Оскарович избирается вице-президентом Академии наук УССР и отдает много сил ее деятельности. Он дважды избирается депутатом Верховного Совета СССР. Е. О. Патон принимает активное участие в решении государственных дел, проявляет много заботы о своих избирателях. Авторитет и известность Евгения Оскаровича и руководимого им института непрерывно расширяются не только в СССР, но и за рубежом. Институт электросварки по праву занял ведущее положение в мире среди научных учреждений в области сварки.

Ни одна страна, даже такая богатая и развитая, как США, не располагает подобным научно-техническим центром.

Особенно близкой темой для Евгения Оскаровича оставались сварные мосты. Несмотря на огромную нагрузку, он не переставал заниматься ими, разрабатывая и реализуя идеи, вынашиваемые многие годы.

Венцом многолетних трудов Евгения Оскаровича Патона явилось сооружение цельносварного автодорожного моста через Днепр в Киеве вместо разрушенного войной моста им. Евгению Бош. Всего лишь около трех месяцев жизни не хватило Е. О. Патону, чтобы увидеть осуществление своей мечты. Торжественное открытие моста, которому было присвоено имя Е. О. Патона, состоялось 5 ноября 1953 г. Мост представляет собой сооружение с пролетным строением большой длины, причем все его элементы, сваренные автоматами на заводе, соединены на монтаже с применением автоматической сварки под флюсом. Мост им. Е. О. Патона и ныне остается одним из крупнейших в мире цельносварных мостов. В 2003 г. торжественно отмечено пятидесятилетие моста.

Евгений Оскарович Патон прожил долгую жизнь, наполненную непрерывным и неустанным творчеством. Он отличался редким трудолюбием и необычайной энергией. Большая часть прожитых им дней была занята трудом по 12–14 часов.

Вклад Е. О. Патона в научно-технический прогресс, подготовку инженерных кадров, создание научной школы отмечен орденами Российской империи и орденами СССР, а именно орденами Станислава, Анны, двумя орденами Ленина, Золотой Звездой Героя Социалистического Труда, двумя орденами Трудового Красного Знамени, Отечественной войны I степени и Красной Звезды, ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки.

Редколлегия журнала

**МАШИНА ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ МТ-501**

ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА» освоило производство машины МТ-501, предназначенной для контактной точечной сварки изделий из малоуглеродистых и низколегированных сталей на переменном токе. Машина состоит из вертикально расположенного корпуса с силовым блоком и системой пневматического привода сжатия сварочных электродов, а также внешним блоком управления регулятора контактной сварки РКС-801М, предназначенным для управления последовательностью действий машины точечной контактной сварки. Система пневматического привода оснащена регулятором усилия сжатия электродов.

Принцип работы машины основан на протекании сварочного тока через детали, сжатые с необходимым усилием в течение заданного времени.



*Основные преимущества МТ-501 (с пневмоприводом):*

- ◆ компактность и малогабаритность;
- ◆ блок управления выполнен в виде малогабаритного выносного пульта регулятора контактной сварки с безопасным напряжением питания;
- ◆ плавное регулирование длительности прохождения сварочного тока;
- ◆ наличие термозащиты от перегрева;
- ◆ регулировка усилия сжатия и раствора электродов;
- ◆ водяное охлаждение электродов;
- ◆ класс изоляции Н.

Машину можно использовать в серийном производстве при сварке тонколистовых конструкций (корпуса, оболочки, обшивки) в машиностроении, при строительном монтаже (сварка арматуры), а также ремонтно-восстановительных работах.

**41 ЭЛЕМЕНТ ЗА ДВЕ СЕКУНДЫ**

Быстрый и точный анализ металлов на месте можно получить только с помощью ручного рентгенофлуоресцентного спектрометра SPECTRO xSORT (США). Результаты, близкие к лабораторным, измеряют до 41 элемента от Mg до Th за один цикл измерения, который длится лишь 2 с. Для сортировки различных сплавов алюминия и магния необходимо только 10 с. В течение этого процесса даже такие легкие элементы позволяют, как Mg, Si, Al и P измеряются в воздухе без применения сложных технологий — гелиевой продувки или вакуумирования, в десятки раз упрощая работу.

Практичный, компактный

и надежный прибор SPECTRO xSORT, включающий аккумулятор и компактный персональный компьютер, поставляется в надежном корпусе, который защищает от ударов и вибрации. Защитная крышка делает его нечувствительным к влиянию погодных условий. Когда не используется, он может переноситься в чехле, поставляемом вместе с системой. Зарядное устройство может также использоваться как сетевой адаптер для работы от сети.

Программное обеспечение SPECTRO XRF Analyzer SE, базирующееся на Windows Mobile, предлагает простой интерфейс работы на



SPECTRO xSORT, невзирая на многочисленные возможности конфигураций. Система всестороннего мониторинга и контроля ICAI (интеллектуальная калибровочная логика) с функциями диагностики аппаратного и программного обеспечения гарантирует, что прибор всегда находится в состоянии готовности к измерениям. Экран Анализа предоставляет оператору всю необходимую информацию и может выводить результаты измерений в различных видах.

Быстрый режим сортировки доступен в дополнение к режиму анализа, когда все испытуемые образцы сравниваются с первоначально измеренным образцом. Результаты измерений сохра-

няются и позже могут быть выведены на экран, принтер, после переноса на внешний компьютер обработаны с помощью входящей в комплект программы «Result Manager».

#### СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ «POWERMAX»

Система плазменной резки «Powermax» от компании «Hypertherm» (США) является универсальным инструментом. В мастерской, на заводе, в домашних или полевых условиях системы «Powermax» обеспечивают резку и строжку металла самых различных типов, толщины и формы. Большинство моделей поставляется с ручным или механизированным резаком, что увеличивает эксплуатационную гибкость.

Системы плазменной резки «Powermax» обеспечивают оптимальное сочетание качества резки, продуктивности и низких эксплуатационных затрат. Дополнительные функции, обеспечивающие простоту использования, безопасную работу и отличную эксплуатационную гибкость, делают системы «Powermax» предпочтительнее систем газокислородной резки в большинстве случаев.

**Эксплуатационная гибкость** — с помощью плазмы можно резать любые электропроводящие материалы.

**Продуктивность и технические характеристики** — резка с помощью этих систем не требует предварительного нагрева, обеспечивает более высокую скорость (при толщине до 32 мм) и лучшее качество разреза, как правило, без необходимости проведения дополнительной механической обработки. Эти системы легко можно использовать для резки по шаблону или резки нескольких слоев материала.

**Качество резки** — при использовании систем «Powermax», как правило, образуется меньше окалины и меньшая область теплового нагрева, что снижает необходимость проведения вторичной обработки.

**Более низкие эксплуатационные затраты** — более высокая продуктивность, отсутствие необходимости аренды газовых баллонов и затрат, связанных с их доставкой, делают эти системы более дешевыми в эксплуатации.

**Простота использования** — операторам не требуется регулировать состав газовой смеси и поддерживать зазор с заготовкой.

**Безопасность** — воздушная плазменная резка на этих системах не использует горючих или взрывоопасных газов.

**Сравнение плазменной и газокислородной резки.** Скорость резки при толщине 12 мм низкоуглеродистой стали возрастает в 1,2...4,6 раза. В тех местах, где нет постоянного источника электроэнергии, системы «Powermax» могут работать от моторных генераторов, а в качестве источника сжатого воздуха может быть использован переносной компрессор. Высокая эффективность потребления энергии и технология изготовления источника тока, компенсирующая низкое линейное напряжение, обеспечивают высокопроизводительную резку и строжку вне зависимости от места проведения работ.

#### ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

На Челябинском трубопрокатном заводе (ОАО «ЧТПЗ», Челябинская обл.) произведена опытная сварка труб диаметром 530x8 мм с применением лазерного оборудования. Трубы сварены с применением двух лазеров общей мощностью 8,3 кВт с совмещением двух лучей в одну сварочную ванну. Сварку производили с помощью присадочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. На испытательном полигоне путем подачи гидравлического давления до разрушения изделий проведены испытания на двух образцах труб, сваренных лазерной сваркой. Разрушение труб произошло при давлении 203 атм: сварной шов выдержал давление 200 атм.





УДК 621.791:669.71

## ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2219

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, П. Н. ЧВЕРТКО, канд. техн. наук, Л. А. СЕМЕНОВ, С. М. САМОТРСЯСОВ, К. В. ГУЩИН, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены особенности контактной стыковой сварки высокопрочного термически упрочняемого сплава 2219. Показано, что в сварных соединениях дефекты в виде оксидных плен, расслоений отсутствуют. Определены оптимальные условия нагрева зоны пластической деформации при осадке. Разупрочнение зоны термического влияния сварных соединений на 15... 20% практически полностью устраняется послесварочной термической обработкой (закалка с последующим искусственным старением). Предел прочности сварного соединения находится на уровне 93 ... 95 % прочности основного материала.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, высокопрочный алюминиевый сплав, нагрев, дефекты соединений, механические свойства, разупрочнение, термическая обработка соединений

В аэрокосмической промышленности для производства деталей и конструкций различного назначения, которые используются в летательных аппаратах, широкое применение нашли высокопрочные сплавы на основе алюминия. В частности, многие силовые элементы конструкций изготавливают из высокопрочного термически упрочняемого сплава 2219 системы легирования Al–Cu. Для их производства применяют различные способы сварки (дуговую, электронно-лучевую, контактную, трением и пр.), от которых существенным образом зависят эксплуатационные характеристики сварного соединения [1].

Одним из наиболее экономически и технически перспективных процессов изготовления прямолинейных и кольцевых заготовок из пресованных профилей является контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. Этот способ обеспечивает высокое стабильное качество соединений, объединяет в едином цикле сборочные и сварочные операции, не требует применения вспомогательных расходных материалов (электродов, проволоки, флюсов, защитных газов и т. д.) [2].

В этой связи представляют интерес исследования по оценке свариваемости высокопрочного алюминиевого сплава 2219 при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением, степень разупрочнения соединений и вероятности появления в них дефектов.

Исследования и разработку технологии контактной стыковой сварки оплавлением изделий из сплава 2219 (состав, мас. %: 6,45 Cu, 0,31 Mn, 0,14 Zr) проводили на образцах сечением 20×100 мм в состоянии Т851 (закалка, холодная деформация и искусственное старение). Учитывали, что

при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением изделий из сплавов на основе алюминия обычно применяют формирование соединения в процессе осадки (рис. 1). С учетом теплофизических свойств данного сплава и его толщины для достижения оптимального нагрева зоны пластической деформации при осадке использовали до начала непрерывного оплавления предварительный подогрев сопротивлением.

Высокая чувствительность сплава 2219 к термическим циклам потребовала проведения комплекса исследований для определения оптимальных параметров нагрева при сварке.

Оптимальные условия формирования сварного соединения при осадке создаются при условии равенства пределов текучести и прочности свариваемого материала в зоне деформации. В данном случае обеспечивается получение сварных соединений с минимальным уровнем внутренних напряжений при отсутствии микротрещин и других дефектов.

При контактной стыковой сварке с формированием зона интенсивной деформации практически

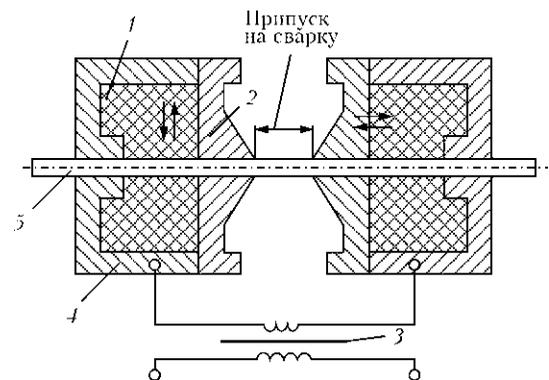


Рис. 1. Схема процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением: 1 — термоизоляционная вставка; 2 — формирующие ножи; 3 — сварочный трансформатор; 4 — токоподвод; 5 — деталь

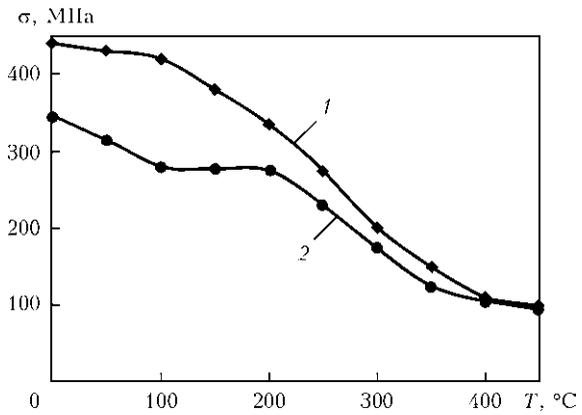


Рис. 2. Механические свойства сплава 2219 при повышенных температурах: 1 —  $\sigma_b$ ; 2 —  $\sigma_T$

ки равна припуску на осадку. Для определения оптимального нагрева перед осадкой проведены исследования механических характеристик (пределов прочности  $\sigma_b$  и текучести  $\sigma_T$ ) сплава 2219 при повышенных температурах (рис. 2).

Из рисунка видно, что оптимальные условия деформации создаются при температуре около 400 °С. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что для получения качественных сварных соединений необходимо обеспечить нагрев приконтактной зоны на участке интенсивной деформации до температуры выше 400 °С.

С целью определения оптимального термического цикла контактной стыковой сварки проведены также исследования влияния температуры нагрева и времени выдержки при ней на механические свойства сплава.

Образцы основного металла нагревали в лабораторной сварочной машине сопротивлением до заданной температуры и выдерживали определенное время. После нагрева, выдержки при заданной температуре и охлаждения на воздухе проводили испытания образцов на растяжение (рис. 3).

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что механические характеристики образцов в большой степени зависят от температуры нагрева и времени выдержки материала при этой температуре. Даже относительно кратковременная выдержка в течение 20...30 с при температуре от 400 до 450 °С приводит к снижению прочностных показателей на 15...25 %.

Такая высокая чувствительность сплава к нагреву требует применения максимально жестких режимов сварки, отличающихся минимальным временем нагрева. Такие режимы обеспечивают получение качественных сварных соединений (практически без разупрочнения) только для малых толщин (до 12 мм). При сварке больших толщин на этих режимах не обеспечивается необходимый нагрев, что приводит не только к возникновению дефектов в сварном соединении и металле ЗТВ (в частности, не достигается требу-

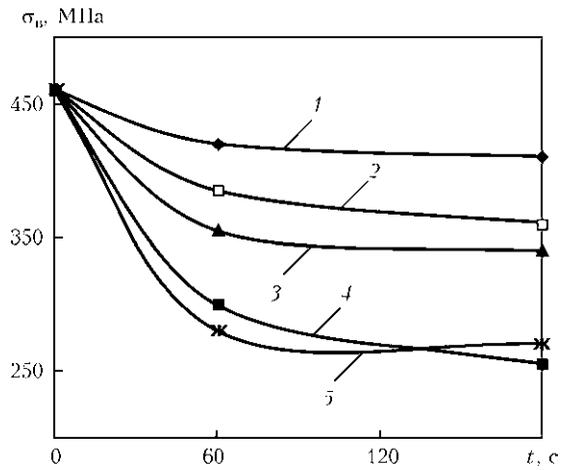


Рис. 3. Зависимость предела прочности от температуры нагрева и выдержки при ней: 1 — 250; 2 — 300; 3 — 350; 4 — 400; 5 — 450 °С

емая деформация при осадке, повышается вероятность образования оксидных плен), но и к снижению прочностных показателей на 20...30 %. Во избежание возникновения упомянутых дефектов при сварке требуется увеличение времени нагрева, что приводит к более высокому разупрочнению металла шва и ЗТВ.

В таких случаях для повышения прочности сварного соединения необходимо применение послесварочной термической обработки.

Сварку выполняли на лабораторной контактной стыковой машине с переоборудованным вторичным контуром мощностью 75 кВ·А на следующих режимах: напряжение оплавления  $U_{2опл} = 6,5...8,0$  В; начальная скорость оплавления 2 мм/с; конечная — 16,0 мм/с; время сварки  $t_{св}$  — до 60 с, из них оплавления  $t_{опл}$  — до 15,0 с. Общий

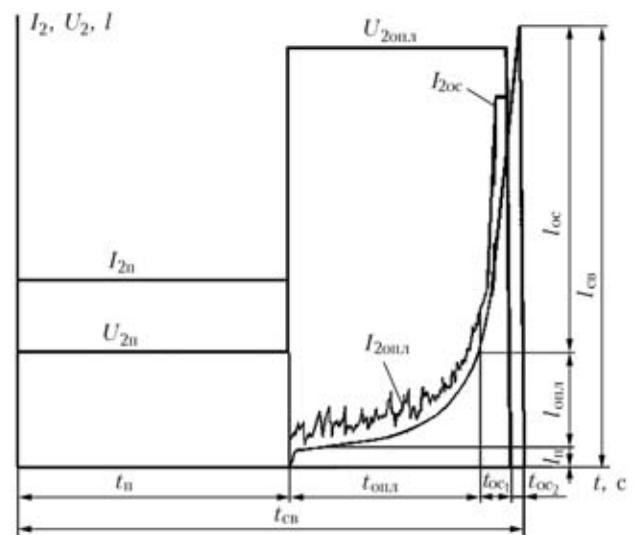


Рис. 4. Циклограмма процесса сварки оплавлением с предварительным подогревом ( $I_{2п}$ ,  $I_{2опл}$ ,  $I_{2ос}$  — ток сварочной цепи подогрева, оплавления и осадки;  $U_{2п}$ ,  $U_{2опл}$  — напряжение сварочной цепи подогрева и оплавления;  $l_{св}$ ,  $l_{п}$ ,  $l_{опл}$ ,  $l_{ос}$  — припуски на сварку, подогрев, оплавление и осадку;  $t_{св}$ ,  $t_{п}$ ,  $t_{опл}$ ,  $t_{ос}$  — время сварки, подогрева, оплавления и осадки)

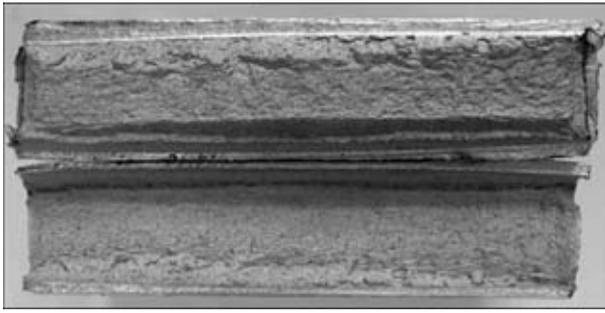


Рис. 5. Внешний вид изломов сварных образцов с надрезом по линии соединения

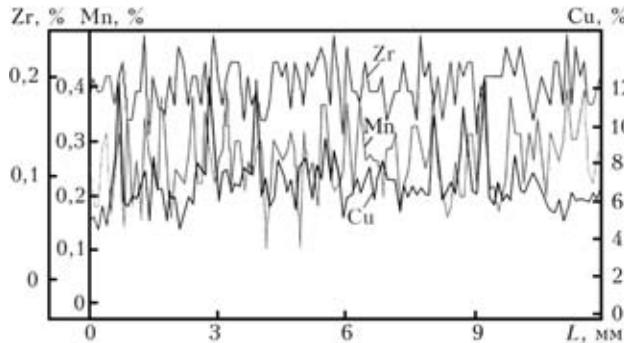


Рис. 6. Распределение легирующих элементов в сварном соединении (ЗТВ основного металла – стык – ЗТВ основного металла)

**Результаты механических испытаний на растяжение основного металла, сварных соединений до и после термообработки**

Образец	Механические свойства			
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Основной металл	339	430,5	11,2	21
Сварное соединение	200...214 208	347,4...350,8 350	4,7...5,8 5,2	13...17 14
Сварное соединение после термообработки	266...297 278	380...422 402	4,7...8,4 6,4	5,2...15,6 8,6

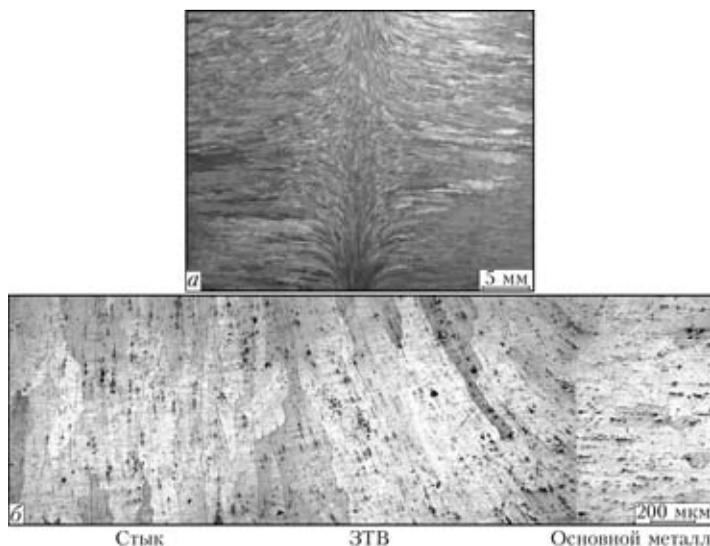


Рис. 8. Макроструктура (а) и микроструктура (б) сварного соединения после термической обработки

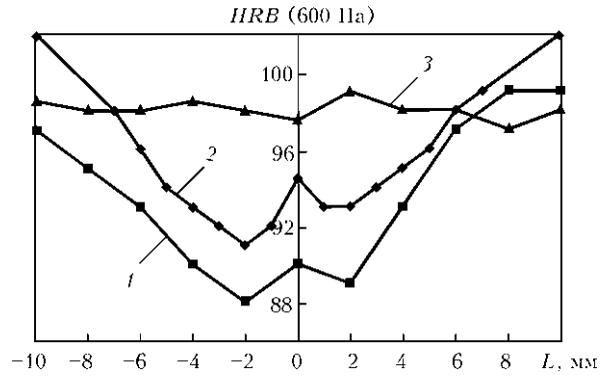


Рис. 7. Распределение твердости в сварном соединении после сварки (1), старения (2) и термической обработки (3)

припуск на сварку  $l_{св} = 60$  мм. Циклограмма процесса приведена на рис. 4.

После сварки часть образцов была термически обработана по режиму: закалка (нагрев до 535 °С, выдержка при данной температуре 2 ч, охлаждение в воду) с последующим искусственным старением (нагрев до 180 °С, выдержка при данной температуре 24 ч).

На изломах сварных образцов с надрезом по линии соединения дефекты отсутствуют (рис. 5).

Механические испытания на растяжение основного металла, сварных соединений до и после термообработки проведены на плоских образцах. Результаты испытаний приведены в таблице.

При контактной стыковой сварке сплава 2219 существенного перераспределения основных легирующих элементов по линии соединения и в металле ЗТВ не наблюдается. В большинстве сварных соединений содержание легирующих элементов практически такое же, как и в основном металле (рис. 6).

Как показали замеры твердости по шкале Роквелла, протяженность ЗТВ составляет

20...25 мм. После сварки в зоне соединения наблюдается довольно значительное снижение твердости (рис. 7, кривая 1), что косвенно свидетельствует о разупрочнении этой зоны. Проведенное искусственное старение позволило повысить твердость шва и металла ЗТВ, но при этом симметрично относительно линии соединения сохраняются участки отжига (рис. 7, кривая 2). Проведение послесварочной термической обработки по приведенным выше режимам позволяет получить распределение твердости в металле ЗТВ, близкое к ее распределению в основном металле (рис. 7, кривая 3).

Проведенные металлографические исследования показали, что в сварном соединении полностью отсутствуют такие дефекты, как оксидные пленки, расслоения и пр. (рис. 8, а). Микроструктура основного металла со-



держит ориентированные различной величины зерна твердого раствора меди в алюминии. В структуре сплава также имеются промежуточные фазы, образовавшиеся в процессе термической обработки (рис. 8, б).

Направление зерен металла шва и близлежащих участков ЗТВ постепенно изменяется на 90° по отношению к исходному направлению зерен основного металла и совпадает с направлением деформации металла в процессе осадки. Расположение интерметаллидных фаз также ориентируется в направлении истечения металла при осадке.

### Выводы

1. В сварных соединениях сплава 2219, выполненных контактной стыковой сваркой, дефекты в виде оксидных плен, расслоений и т. д. отсутствуют.
2. Минимальная температура зоны деформации сплава 2219 должна быть около 400 °С. Крат-

ковременный нагрев до этой температуры в течение 20...30 с приводит к снижению прочностных характеристик на 15...25 %.

3. В металле ЗТВ сварных соединений наблюдается снижение твердости, сопровождаемое разупрочнением на 15...20 %.

4. Старение повышает твердость шва и металла ЗТВ, но при этом сохраняются участки разупрочнения.

5. Послесварочная термическая обработка (закалка с последующим искусственным старением) позволяет приблизить распределение твердости к ее распределению в основном металле и обеспечить прочность на уровне 93...95 %.

1. *Промышленные* алюминиевые сплавы: Справочник / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. — М.: Металлургия, 1984. — 528 с.
2. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.

Peculiarities of flash butt welding of high-strength heat-hardening alloy 2219 were investigated. It is shown that the welded joints have no defects of the type of oxide films and delaminations. Optimal conditions for heating of the plastic deformation zone in upsetting were determined. A 15...20 % weakening of the heat-affected zone in the welded joints can be fully eliminated by postweld heat treatment (hardening with subsequent artificial ageing). Tensile strength of the welded joint is at a level of 93...95 % of that of the base metal.

Поступила в редакцию 26.10.2009

**Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві:** Навчальний посібник. — К.: Основа, 2010. — 240 с.

Данное пособие — первая попытка обобщения в отечественной сварочной науке вопросов охраны труда сварщиков. В ней представлены следующие разделы: вредные и опасные факторы сварочного процесса; гигиена труда в сварочном производстве; производственная санитария; безопасность сварочного производства; средства индивидуальной защиты. Приведен перечень стандартов и нормативных документов по охране труда в сварочном производстве, а также список использованной литературы.

Основное внимание в книге уделено проблемам защиты рабочих от вредных и опасных последствий сварочного процесса в соответствии с международными стандартами, которые начинают внедряться в Украине. Рассмотрены вопросы минимизации воздействия на организм сварщиков вредных веществ, образующихся в результате сварочного процесса; защиты от магнитных полей, создаваемых сварочным оборудованием; применения современных средств местной вентиляции и индивидуальной защиты сварщиков.

Предназначено для инженерно-технических работников сварочного производства, специалистов по охране труда, безопасности жизнедеятельности и экологии, а также аспирантов, студентов, магистров высших учебных заведений с подготовкой специалистов по сварке и родственным технологиям.



Книгу можно приобрести в издательстве «Основа» по адресу:  
01032, г. Киев-32, ул. Жилинская, 87/30; тел./факс: 239-38-95, 239-38-96



## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНОЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ТОНКОЛИСТОВЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (Обзор)

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.,  
**А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена обработка тонколистовых сварных соединений импульсами электрического тока, которая является эффективным способом регулирования остаточного формоизменения сварных конструкций. При электроимпульсной обработке стыковых сварных соединений стали 30ХГСА и алюминиевого сплава АМгб значения прогибов пластин уменьшаются в 3...9 раз. Преимущество указанной обработки состоит в мобильности используемого оборудования, что позволяет применять ее для правки отдельных элементов крупногабаритных тонколистовых сварных конструкций, в том числе при их эксплуатации.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, высокопрочная сталь, алюминиевый сплав, сварные конструкции, стыковые соединения, правка сварных соединений, остаточное формоизменение, стрела прогиба, предварительное растяжение, штамповка, прессование, электропластический эффект, обработка импульсами тока, пластическая деформация

Одной из актуальных проблем сварочного производства является необходимость регулирования остаточного формоизменения сварных конструкций. При производстве новых типов конструкций используют современные материалы и технологии сварки, для которых традиционные способы обеспечения заданной точности изготовления не всегда применимы.

Цель настоящей работы — обобщить современные представления о способах управления формоизменением металлических изделий под влиянием импульсов электрического тока. Предложена и экспериментально проверена возможность использования такого воздействия для правки тонколистовых сварных металлических конструкций.

Традиционные способы регулирования остаточного формоизменения конструкций можно разделить на термические и механические в зависимости от характера воздействия на конструкцию в процессе ее сварки или послесварочной обработки.

В настоящее время использование термических способов обработки с учетом затрат на энергоносители существенно повышает себестоимость производства металлоконструкции, особенно крупногабаритных мостовых [1] и судокорпусных [2], а также изделий из легких сплавов с высокой теплопроводностью. В то же время автоматизация процесса [3] в комплексе с современными расчетными методиками, оптимизирующими тепловое воздействие на конструкцию, позволяет ус-

пешно использовать данный способ обработки в современном производстве. Разработаны математические модели тепловой правки для таких типов конструкций, как тонкостенные оболочки, валы [4], судостроительные панели [5–7], позволяющие минимизировать нагрев изделия при максимальной эффективности операций правки.

При термической обработке отпуском в зажимных приспособлениях [1], основанной на нагреве изделия вместе со сборочной оснасткой, значительная тепловая энергия расходуется на разогрев массивных сборочных устройств, применяемых для фиксации изделия. Учитывая, что эффективность отпуска пропорциональна удельному количеству тепла на 1 т массы конструкции (с учетом оснастки), применение различных схем нагрева для обработки крупногабаритных сварных конструкций становится нерентабельным. Компромиссным решением является местный отпуск отдельных узлов сварной конструкции, но он ограничен в применении и неэффективен для изделий из металлов с высокой теплопроводностью.

Силовые способы правки основаны на приложении к конструкции на различных этапах изготовления механических нагрузок, компенсирующих ее остаточное формоизменение от сварки.

Обратный выгиб является эффективным способом компенсации сварочных деформаций в изделиях с относительно небольшой изгибной жесткостью, например, при вварке фланцев в тонкостенные оболочечные конструкции [8]. Это усложняет технологию сварки, но в ряде случаев является более рациональным решением, чем послесварочная обработка. При этом применение указанного способа не всегда целесообразно из-за высокой стоимости сборочной оснастки.

Сварка с предварительным растяжением является одним из способов снижения сварочных де-



формаций тонколистовых конструкций, который используют при производстве крупногабаритных полотен из легких сплавов [9, 10]. Его недостатком является высокая стоимость специального оборудования для растяжения свариваемых элементов.

Основными недостатками приведенных выше способов правки являются высокий уровень энергопотребления и металлоемкость. В связи с этим возникает необходимость в поиске новых подходов к обеспечению заданной точности изготовления сварных конструкций.

Перспективным подходом, отличающимся простотой применения, малым энергопотреблением и не требующим металлоемкого оборудования, является импульсный способ обработки, реализующий ударно-волновые воздействия, прилагаемые к металлоконструкциям в процессе их производства.

Так, традиционный способ проколачивания сварных швов еще в 1980-е годы нашел свое развитие путем применения ультразвукового ударного инструмента [11, 12], обладающего большими возможностями управления.

Фундаментальные и прикладные исследования, проводимые с 1960-х годов [13], позволили установить резкое повышение пластичности и снижение сопротивления металла деформированию за счет одновременного действия механических напряжений и электрического тока высокой плотности. Это явление было названо электропластичностью [14]. Его практическое применение открыло новые возможности для деформирования металлов и сплавов, включая тугоплавкие, а также для улучшения их свойств после механического формообразования.

Такая закономерность воздействия тока отличается от известного теплового эффекта, лежащего в основе электроконтактного нагрева тем, что проявляется лишь в деформируемом металле, т. е. в образцах, находящихся под влиянием упругих механических напряжений [15, 16] или под нагрузкой выше предела текучести [17]. При этом в момент воздействия импульса тока материал характеризуется нестационарным напряженно-деформированным состоянием, влияющим на изменение геометрических характеристик обрабатываемой детали [18].

Общим для всех способов импульсной обработки металлов является подведение токов большой плотности непосредственно в зону деформации металла и локализация области действия тока. Эти виды обработки, основанные на электропластическом эффекте (ЭПЭ), отличаются от электроконтактного нагрева, используемого при волочении и прокатке. В современных технологиях формообразования конструкционных материалов применяются процессы интенсификации

деформирования заготовок за счет нетермического действия импульсного тока, а именно реализации ЭПЭ. При этом снижаются затраты на нагрев при операцияхковки, штамповки и волочения, а также исключается разогрев технологической оснастки.

На основе ЭПЭ реализуются технологии получения из хрупких материалов (чугуна, бериллия, рения) сверхпроводящих проволок, лент и штампованных деталей с минимальным уровнем технологических остаточных напряжений за счет применения токов высокой плотности в зонах волочения, прокатки, штамповки и после обработки деталей давлением [19]. Указанные способы формообразования металлических материалов имеют ряд общих закономерностей, которые необходимо учитывать при использовании электроимпульсной обработки для правки деформаций, вызываемых сваркой.

Результаты исследований по электропластическому волочению конструкционных сталей [19] показали, что воздействие током позволяет добиться увеличения скорости деформаций волочения. Электроимпульсное воздействие на деформируемую сталь 08Г2С приводит к повышению однородности фрагментированной структуры металла, а пластическое деформирование металла проявляется на более ранних стадиях нагружения при сопутствующем увеличении объемной доли пластической составляющей. Это подтверждают данные, полученные при электродинамической обработке в условиях одноосного растяжения образцов низкоуглеродистой стали и ее сварных соединений [20]. В этом случае интенсивное пластическое течение металла, которое выражено формированием полос Чернова–Людерса, начиналось в упругой области деформирования образцов.

Результаты исследований [19, 21] показали, что ЭПЭ может быть применен для интенсификации процесса листовой штамповки металла при изготовлении деталей летательных аппаратов. Воздействие током позволяет также ликвидировать усталостные трещины и продлить эксплуатационный ресурс деталей, работающих при циклическом нагружении.

Термическая интенсификация, а также электроконтактный нагрев, применяемые в технологических операциях листовой штамповки тонкостенных деталей силового набора и обшивки летательных аппаратов, имеют ряд недостатков: значительные энергозатраты, высокую температуру штамповки, приводящую к росту зерна и ухудшению эксплуатационных показателей полученных деталей, необходимость в послеоперационной термической обработке. Эти недостатки устраняются путем использования во время штамповки электроимпульсных воздействий. Одно- и многоимпульсное воздействие применяли на раз-



личных этапах штамповки деталей летательных аппаратов. При этом задавали определенный уровень удельной электрической энергии, подаваемой на заготовку, количество импульсов тока, степень предварительной деформации заготовки и скорость охлаждения изделия после окончания штамповки.

Установлено, что при оптимальном электроимпульсном воздействии повышаются временное сопротивление материала изделия, предел выносливости и эксплуатационный ресурс без снижения пластических свойств материала. Электроимпульсное воздействие позволяет в ряде случаев увеличивать ресурс летательных аппаратов за счет повышения их коррозионной стойкости. Определено, что время до начала коррозионного растрескивания образцов из алюминиевого сплава Д16 возрастает в 3 раза, а скорость коррозии алюминиевого сплава АМгЗМ снижается на порядок. Установлено, что электроимпульсное воздействие влияет на анизотропию механических свойств заготовок для деталей летательных аппаратов, учитываемую при проектировании изделий авиационной техники.

Для изучения влияния электроимпульсных воздействий на пластические свойства заготовок, используемых для штамповки деталей летательных аппаратов, проводили испытания образцов на растяжение при разной степени относительной деформации [22]. Определено, что многократное электроимпульсное воздействие в процессе штамповки приводит к повышению пластичности сплавов в 3,5...4,0 раза за счет совместного влияния ЭПЭ и теплового эффекта. При этом единичное воздействие импульсами тока после деформации (взамен послеоперационной термообработки) способствует полному восстановлению ресурса пластичности, что недостижимо при традиционной печной термообработке. Единичное электроимпульсное воздействие до начала деформации приводит к увеличению относительного удлинения до 45 %.

Оценку технологических возможностей электроимпульсного воздействия при формоизменении проводили при вытяжке–свертке, отбортовке, гибке листа на малые радиусы, а также при специфических для авиационного производства операциях подсечки и гибки профилей с растяжением, продольной и поперечной обтяжкой листа. На основании полученных результатов [22] установлено, что электропластический эффект может быть использован для интенсификации процессов листовой штамповки металлов и сплавов. На различных этапах штамповки целесообразно применение одно- и многоимпульсного воздействия, при котором задается определенный уровень вводимой в заготовку электрической энергии и количество импульсов тока, а также степень предва-

рительной деформации заготовки. При оптимальном электроимпульсном воздействии в процессе формообразования повышается статическая прочность материала изделия и предел выносливости без ухудшения его пластических свойств, а уровень остаточных технологических напряжений изделия снижается. Особенности электроимпульсного воздействия отрабатывали на сталях марок 12Х18Н10Т, 30ХГСА, титановых ВТ8, ОТ4, ВТ20 и алюминиевых сплавах Д16, 1420, В95Т, АМг6.

На основе анализа исследуемых процессов формообразования конструкционных материалов, можно отметить наличие у них общих закономерностей таких, как изменение параметров технологических напряжений или пластических деформаций за счет стимуляции ЭПЭ под влиянием импульсов тока. При этом снижаются деформирующие усилия при сопутствующем повышении пластичности обрабатываемого материала.

Исходя из работ [13–23] по пластическому формообразованию и регулированию напряженного состояния металлов в условиях воздействий током можно сделать вывод, что технологии формообразования на основе обработки импульсами тока могут быть реализованы для правки сварных конструкций.

При обработке сварного соединения импульсами тока в результате стимуляции ЭПЭ упругая составляющая остаточной деформации формоизменения преобразуется в пластическую, что положительно влияет на геометрические характеристики металлоконструкции.

Электроимпульсная обработка может повышать эффективность способов предварительного силового воздействия таких, как жесткое закрепление [1] или предварительное упругое растяжение [9, 10] свариваемых элементов. При силовых схемах, реализуемых в перечисленных способах обработки, к сварной конструкции прикладывают внешние нагрузки, при которых обработка сварных соединений импульсами тока дает максимальный эффект. Это связано с реализацией ЭПЭ путем преобразования упругих деформаций в элементах конструкций в пластические при обработке их в оснастке. При этом сборочные силовые контуры, применяемые для реализации данных способов, задают геометрические характеристики закрепленного в них изделия с достаточной точностью.

Для обработки образцов сварных соединений импульсами тока разработали и изготовили лабораторное оборудование, основным элементом которого являлась конденсаторная батарея, укомплектованная зарядным и разрядным устройствами, а также регистрирующей аппаратурой.

Перечень и назначение приборов, входящих в состав лабораторного оборудования, а также принцип его работы подробно изложены в [23].

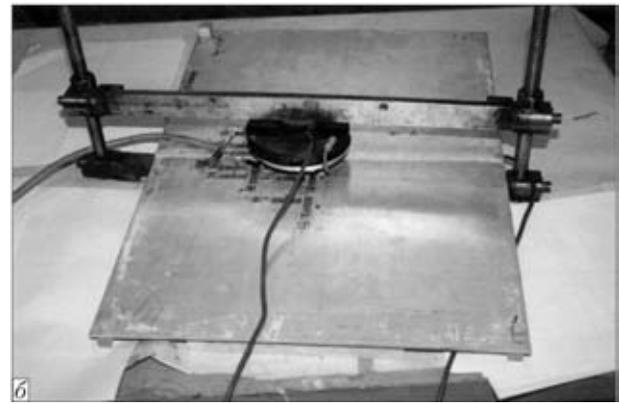
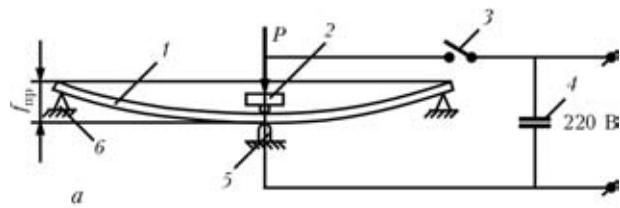


Рис. 1. Электроимпульсная обработка образцов сварных соединений: *а* — схема токоподвода и трехточечного изгиба пластин (*1* — образец; *2* — электрод; *3* — электрический ключ; *4* — батарея конденсаторов; *5* — токоподвод; *б* — опора); *б* — образец стыкового соединения сплава АМгб, закрепленный в нагружающем устройстве

Исследования влияния импульсов тока на регулирование остаточного формоизменения сварных соединений проводили на образцах стыковых соединений стали 30ХГСА и алюминиевого сплава АМгб. Внешнее нагружение реализовывали по схеме трехточечного изгиба пластин вдоль линии шва (рис. 1). Стрелу прогиба пластин  $f_{пр}$  задавали для обеспечения уровня предварительных напряжений в образцах в зоне обработки в диапазоне 10...30 МПа. Изгиб осуществляли при контакте торца электрода конденсаторной машины с поверхностью пластины. После достижения заданных значений стрелы прогиба производили разряд батареи, затем фиксировали параметры режима обработки и определяли энергию разряда. После завершения действия импульса тока определяли

изменения геометрических характеристик пластин, произошедшие в результате обработки.

Измерения стрелы прогиба проводили вдоль продольных и поперечных кромок сварных пластин из стали 30ХГСА размером 200×200 и толщиной 3,5 мм, обработанных импульсами тока. Перед обработкой измеряли начальные прогибы, затем выполняли одноактное воздействие импульса тока с энергией  $E = 300$  Дж и повторно измеряли прогибы. На рис. 2, *а*, *б* показано формоизменение сварных пластин после сварки и электроимпульсной обработки. Из рисунка видно, что до обработки пластина имела продольные прогибы характерной седловидной формы со стрелой 4,3...6,5 на кромках и 6,7 мм на шве. После обработки остаточные прогибы по продольным кромкам уменьшились в 3...5 раз (до 1,2...1,3 мм), а по шву — в 8...9 раз (до 1,1...1,4 мм). При этом отклонения от плоскости по одной диагонали пластины достигли нулевых значений, а по второй — снизились в 2...3 раза (с 6,2...6,8 до 2,2...2,8 мм). Это свидетельствует о том, что максимальный эффект обработки за счет ЭПЭ достигается на том участке шва, где значения остаточных сварочных напряжений максимальны, что подтверждают данные работы [20] по электростимулированию низкоуглеродистой стали.

Для оценки эффективности процесса электроимпульсной обработки проводили измерения общих прогибов пластины из сплава АМгб размером 400×350 и толщиной 4 мм со стыковым швом, обработанным серией импульсов тока, состоящей из четырех электрических разрядов, при  $E = 300$  Дж в направлении от ее середины к краям. Из рис. 2, *в*, *г* видно, что после воздействия импульсами тока знак прогиба меняется на противоположный, а стрела прогиба уменьшается в 4...5 раз (с 2,5 до -0,5 мм). При этом обработка серией импульсов тока более эффективна, чем одиночным электрическим разрядом.

Преимущество электроимпульсной обработки состоит в мобильности применяемого обо-

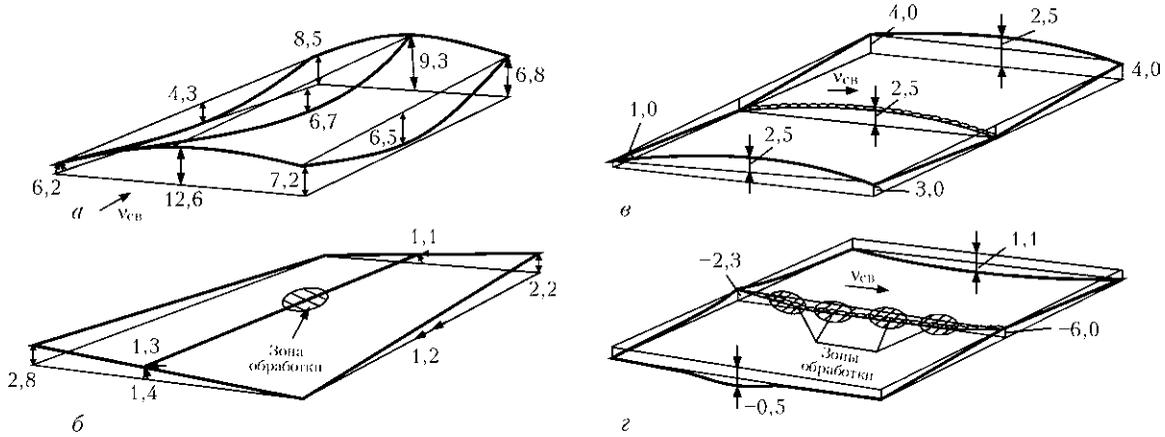


Рис. 2. Остаточные формоизменения образцов стыковых соединений стали 30ХГСА (*а*, *б*) и алюминиевого сплава АМгб (*в*, *г*) после сварки (*а*, *в*) и электроимпульсной обработки (*б*, *г*)



рудования, что делает приемлемым данный способ для правки отдельных элементов крупногабаритных тонколистовых сварных конструкций, в том числе и при их эксплуатации. Для выполнения электроимпульсной обработки нет необходимости в установках большой мощности, поскольку используют электрические разряды длительностью 0,005...1,000 с, а применяемая элементная база обеспечивает следующие рабочие параметры: ток импульса  $I_{\text{имп}} \leq 10$  кА, напряжение  $U_{\text{имп}} \leq 3$  кВ.

Таким образом, анализ современных технологий формоизменения металлических конструкций в условиях электроимпульсного воздействия создает предпосылки использования обработки импульсами тока для правки тонколистовых сварных конструкций.

После обработки импульсами тока образцов стыковых соединений стали 30ХГСА продольные прогибы по шву уменьшились в 8...9 раз, по кромке — в 3...5 раз, отклонение от плоскостности — в 2...3 раза.

При обработке серией импульсов тока образцов стыковых соединений сплава АМгб значения продольных прогибов по линии шва уменьшились в 4...5 раз с изменением знака.

1. *Сварные строительные конструкции* / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, В. И. Труфьяков и др.: В 2 т. — Киев: Наук. думка, 1993. — Т. 1. — 416 с; Т.2. — 1997. — 680 с.
2. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 285 с.
3. *Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Г. А. Цыбулькин и др. // *Автомат. сварка.* — 2003. — № 7. — С. 3–8.
4. *Махненко О. В., Мужиченко А. Ф.* Математическое моделирование тепловой правки цилиндрических оболочек и валов с общими деформациями искривления продольной оси // Там же. — 2007. — № 9. — С. 23–28.
5. *Махненко О. В.* Повышение эффективности термической правки сварных тонколистовых конструкций на основе математического моделирования // Там же. — 2008. — № 9. — С. 10–14.
6. *Махненко О. В.* Комбинированное применение способа термопластичности и способа функции усадки для изучения процесса тепловой правки судостроительных панелей // *Математичні методи та фізико-механічні поля.* — 2008. — 51, № 4. — С. 193–201.
7. *Махненко О. В., Мужиченко А. Ф., Зайферт П.* Использование математического моделирования при термической правке судостроительных панелей // *Автомат. сварка.* — 2009. — № 1. — С. 10–16.

8. *О параметрах* предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко и др. // Там же. — 1988. — № 9. — С. 1–4.
9. *Павловский В. И., Пащин Н. А.* Регулирование напряженно-деформированного состояния при сварке тонкостенных крупногабаритных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов // *Материалы 3-го Всесоюз. симпоз. «Технологические остаточные напряжения»*, г. Кутаиси, сент. 1988 г. — М., 1988. — С. 293–298.
10. *Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов* / Б. Е. Патон, В. Ф. Уткин, Л. М. Лобанов и др. // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 10. — С. 10–18.
11. *Кравцов Т. Г., Рыжков И. Ф., Статников Е. Ш.* Повышение сопротивления усталости наплавленных валов ультразвуковой обработкой // Там же. — 1981. — № 10. — С. 35–38.
12. *Махненко В. И., Кравцов Т. Г.* Толщина пластически деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий // Там же. — 1986. — № 8. — С. 98–110.
13. *Спицын В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металла. — М.: Наука, 1985. — 298 с.
14. *Троицкий О. А., Розно А. Г.* Электропластическая деформация металла // *Физ. твердого тела.* — 1970. — 12, № 1. — С. 203–210.
15. *Влияние* электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов и др. // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 6. — С. 11–13.
16. *Влияние* электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов и др. // Там же. — 2007. — № 7. — С. 10–12.
17. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
18. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // *Пробл. прочности.* — 2004. — № 4. — С. 60–67.
19. *Громов В. Е.* Закономерности электростимулирования пластичности металлов и сплавов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Томск, 1992. — 24 с.
20. *Особенности* формирования пластических деформаций при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Н. А. Пащин и др. // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 10. — С. 10–15.
21. *Вепрев А. А., Попов О. В.* Интенсификация процессов штамповки с воздействием импульсного электрического тока // *Авиац. пром-сть.* — 1992. — № 7. — С. 9–10.
22. *Акустическая эмиссия* при электроимпульсной деформации титановых сплавов / Н. А. Семашко, Р. Ф. Крупский, А. В. Купов и др. // *Материаловедение (Спецвыпуск).* — 2004. — № 7. — С. 29–33.
23. *Влияние* электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. Ю. Скульский и др. // *Автомат. сварка.* — 2006. — № 6. — С. 28–32.

It is shown that treatment of thin-sheet welded joints by electric current pulses is an efficient method for regulation of residual distortions of welded structures. With electric pulse treatment of butt welded joints on steel 30KhGSA and aluminium alloy АМгб, the values of sags decrease from 3 to 9 times. An advantage of this treatment consists in mobility of the equipment employed, this allowing it to be used for straightening of individual elements of large-size thin-sheet welded structures, including those under operation conditions.

Поступила в редакцию 05.10.2009



## ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

**Я. ДЗЯНХУА, В. ЛИАНГ, Ч. КАНЛИ, Ч. ЧЖИДЗУНГ** (Технологический ун-т Жеианга, г. Ханчжоу, Китай),  
**В. С. КОВАЛЕНКО** (Ин-т исследований по лазерной технологии НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Характерным видом механического разрушения участка входной кромки лопаток паровых турбин под воздействием капель воды считается эрозия. Рассмотрены три вида лазерной обработки: лазерная закалка, лазерный переплав и лазерная наплавка для предупреждения эрозии на лопатках из нержавеющей стали 20X13. Сравнены остаточные напряжения и механические свойства лопаток при использовании трех методов обработки. Показано, что поверхностная микротвердость лопаток повышается после лазерной обработки поверхности. При этом повышается прочность материала, однако снижаются удлинение и сужение. Ударные разрушения носят характер хрупких разрушений. Зона лазерного упрочнения содержит остаточные сжимающие напряжения, а зона термического влияния — небольшие поперечные растягивающие напряжения.

*Ключевые слова:* лазерная обработка, лопатки турбин, хромистая сталь, остаточные напряжения, механические свойства

Лопатки паровых турбин являются ответственными компонентами силовых установок, которые преобразуют линейное движение пара высокой температуры и высокого давления, движущегося в сторону снижения давления, во вращательное движение вала турбины [1, 2]. Эрозия под воздействием капель воды является хорошо известным явлением на движущихся лопатках, работающих на стороне паровых турбин с низким давлением. Она инициируется конденсатом «маленьких» первичных капель в объеме переохлажденного пара в потоке, который затем разделяется на поверхности лопатки и приводит к образованию «крупных» капель, вызывающих эрозию [3].

Для улучшения сопротивления эрозии лопаток с низким давлением под воздействием капель воды применяли лазерную наплавку сплавом стеллита, которая приводила к образованию остаточных напряжений на участке наплавки [4]. Причиной их образования является различие в тепловом расширении между сплавом стеллита и основным металлом при охлаждении, тепловой деформации, вызванной различиями в нагреве/охлаждении на разных участках и направленной жесткостью в пределах имеющихся сечений [5].

Для упрочнения лопаток паровых турбин, а также поддержания высокой твердости поверхности, преодоления высоких остаточных напряжений после лазерной наплавки и получения плотного упрочненного слоя с хорошей адгезией использовали лазерную закалку, лазерный переплав и лазерное сплавление [6, 7]. Как один из

вариантов закаливаемых сталей хромистая сталь 20X13 сочетает отличную износостойкость высокоуглеродистых сталей с высокой коррозионной стойкостью хромистой нержавеющей стали. При введении достаточного количества углерода в хромистую нержавеющую сталь последняя приобретает высокие прочность, твердость, при этом обеспечивается необходимая коррозионная стойкость и повышается износостойкость данной стали. Благодаря упомянутым достоинствам сталь 20X13 применяют для изготовления стоматологических, хирургических инструментов, а также лопаток паровых турбин.

В данной работе способы лазерной закалки, лазерного переплава и лазерной наплавки применяли на лопатках паровых турбин из стали 20X13 с целью обеспечения высокой твердости поверхности и низких остаточных напряжений. При лазерной закалке осуществление процесса предусматривает лазерный нагрев и естественное охлаждение. Лазерный переплав является процессом быстрого оплавления и кристаллизации поверхности материала. Благодаря добавлению легирующего материала на поверхность подложки способ лазерной наплавки может обеспечить высокое качество поверхности при сохранении исходных свойств материала в объеме. Эти три способа перспективны применительно к лопаткам различного типа, эксплуатирующихся в различных рабочих средах, в качестве альтернативы традиционным методам упрочнения лопаток. В этом случае срок службы лопаток увеличится при сохранении высокой эффективности работы агрегатов. В настоящей работе исследованы микроструктура, микротвердость, механические свойства



и остаточные напряжения в поверхностном слое лопаток, упрочненном различными способами.

**Методика проведения экспериментов.** В качестве материала подложки использовали сталь 20X13, которую подвергали закалке и отпуску (нагрев до 980...1035 °С, за которым следовала закалка в масле, а затем отпуск при 220...300 °С). Химический состав нержавеющей стали 20X13 следующий, мас. %: 0,16...0,21 С; 12 Сг; <1 Si; <0,8 Mn; <0,03 Si; <0,04 P; остальное — Fe. На рис. 1, а приведена микроструктура нержавеющей стали 20X13, демонстрирующая структуру сорбита отпуска. Поверхность очищали путем обработки ультразвуком в ацетоне или спирте. После этого при лазерной наплавке на нее наносили легирующий порошок, смешанный с некоторым количеством связки. Эти эксперименты проводили с помощью CO<sub>2</sub>-лазерной установки с номинальной мощностью лазера 7 кВт и рабочим столом с ЧПУ. Для упрочнения лопаток паровых турбин из стали 20X13 использовали три различных оптимизированных параметра лазерной обработки (табл. 1). Образцы № 1–3 обрабатывали соответственно путем лазерной закалки, переплава и сплавления. Химический состав материала для лазерного поверхностного сплавления для трех образцов следующий, мас. %: 1,3 Si; 2,86 Сг; 3,29 Ni; 0,98 Fe; 40,24 W; 51,33 Со.

Механические свойства определяли с помощью гидравлической универсальной испытатель-

**Т а б л и ц а 1.** Оптимизированные параметры лазера (сечение луча лазера 2×8 мм<sup>2</sup>)

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость сканирования, мм/мин	Добавленный легирующий порошок
1	1,2	300	Нет
2	1,6	500	»
3	1,6	500	Есть

ной машины WE-30. Микроструктуру и химический состав изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа FEI-SIRION100, оснащенного энергодифракционным спектрометром Thermo NORAN (ЭДС). Картины фазового распределения на поверхности измеряли на Thermo SCINTAG TRA. Микротвердость оценивали с помощью прибора HDX100 с нагрузкой 200 г и временем действия 15 с. Остаточные напряжения определяли с помощью измерителя остаточных напряжений X-350А.

**Результаты и их обсуждение.** *Микроструктура и микротвердость.* После лазерной закалки образца № 1 в слое лазерного упрочнения был обнаружен мелкий мартенсит, расположенный в шахматном порядке (рис. 1, б). В процессе быстрого нагрева и охлаждения при лазерном упрочнении рост зерен аустенита сдерживается и образуется высокодисперсная микроструктура, что приводит к повышению твердости поверхности. После лазерного переплава у образца № 2 по-

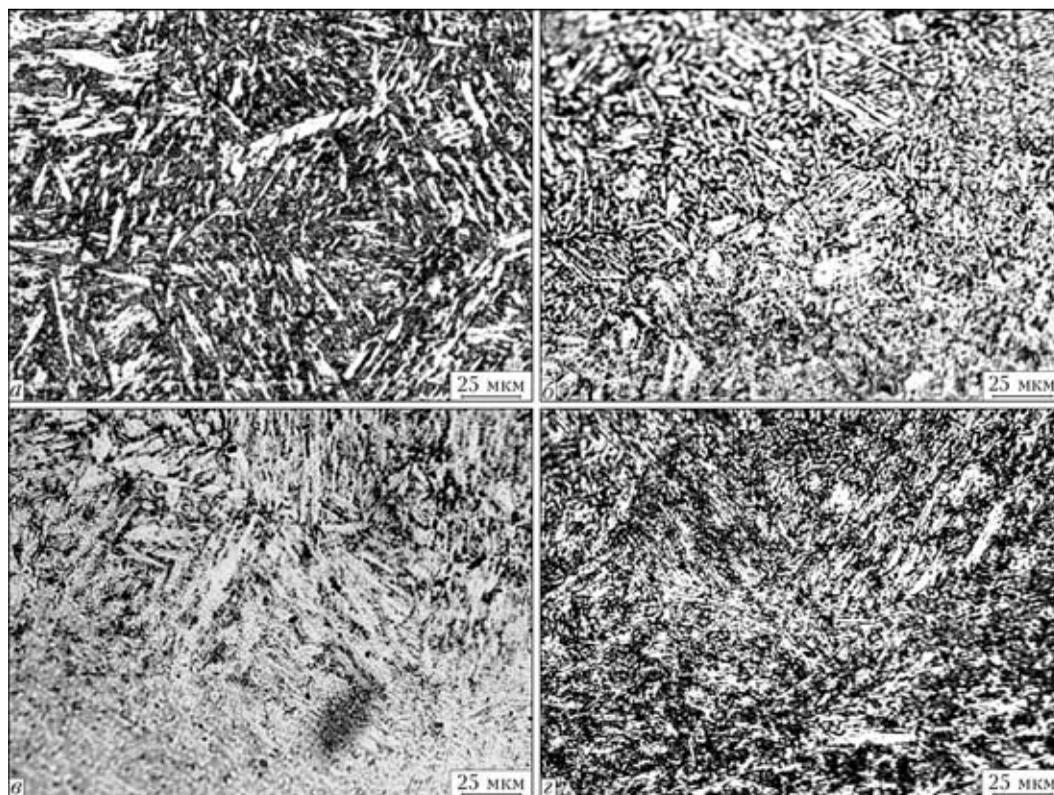


Рис. 1. Микроструктура подложки (а) и средней части слоя лазерного упрочнения: а — подложка (сталь 20X13); б — лазерная закалка (образец № 1); в — лазерный переплав (образец № 2); г — лазерная наплавка (образец № 3)



верхность переплавленного слоя, видимо, имеет литую структуру, а мартенсит в металле ЗТВ крупнее, чем в подложке (рис. 1, в). По сравнению с лазерным переплавом микроструктура после лазерной наплавки намного мельче (рис. 1, з). В процессе лазерной наплавки под влиянием лазерного излучения большой мощности поверхность образца расплавляется, а легирующий порошок сплавляется с расплавленным слоем, что подтверждают результаты ЭДС. Химический состав слоя, полученного лазерным сплавлением, следующий, мас. %: 0,29 Si; 13,78 Cr; 10,59 W; 0,47 Ni; 0,46 V; 1,32 Mo; Fe, остальное — С. Согласно результатам фазового распределения, приведенным на рис. 2, фазы легированного слоя включают WC, Fe<sub>2</sub>C и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (рис. 2). Сильно децетрированные твердые фазы WC будут основной причиной улучшения микроструктуры. Закаливаемость материалов усиливается благодаря присутствию хрома. В то же время твердость повышается благодаря образованию твердых фаз Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Поскольку никель является элементом, обеспечивающим расширение области аустенита, то его добавка предотвращает образование частиц второй фазы и улучшает характеристики сопротивления эрозии поверхности.

Твердость поперечного сечения после лазерного упрочнения испытывали в направлении от поверхности к подложке (рис. 3). Как видно из рисунка, толщина слоя лазерной закалки у образца № 1 равна около 1,2 мм, толщина слоя лазерного переплава у образца № 2 около 0,9 мм, а лазерной наплавки у образца № 3 — около 0,4 мм. Твердость снижается от поверхности к подложке с определенным градиентом. Твердость закаленного слоя образца № 1 ниже, чем у образцов № 2 и 3. Однако глубина закаленного слоя больше, чем у образцов № 2 и 3. Более низкая скорость приводит к большей глубине нагреваемого слоя и преобразованию в более мелкий мартенсит с шахматным расположением, что является основ-

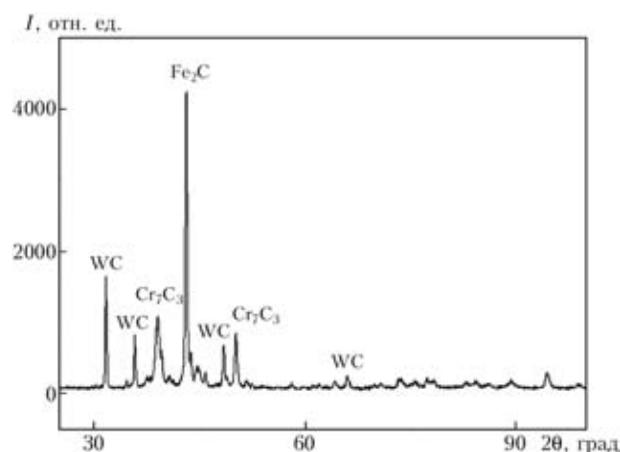


Рис. 2. Картина фазового распределения верхней части поверхности слоя, полученного лазерным сплавлением

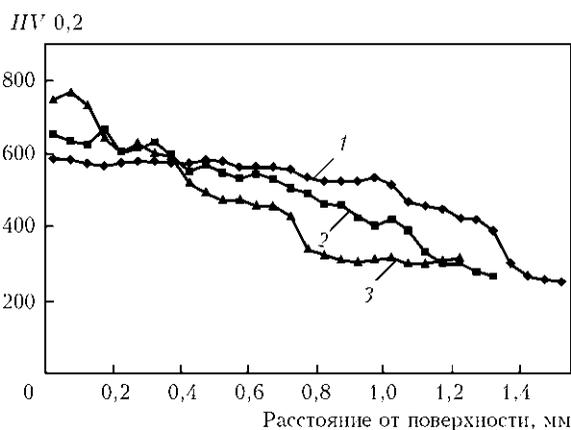


Рис. 3. Твердость поперечного сечения образцов № 1–3 (1–3) после лазерной обработки

ным механизмом упрочнения при лазерной закалке (рис. 2). Из-за более высокой скорости лазерного сканирования и высокой скорости охлаждения упрочненный слой образцов № 2 и 3 тоньше, чем образца № 1. Наибольшее значение твердости обнаружено в образце № 3 из-за добавленного легирующего материала и твердых фаз (WC, Fe<sub>2</sub>C и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) после лазерной обработки.

**Механические свойства.** Результаты испытаний образцов на растяжение после лазерной обработки приведены в табл. 2. После лазерной обработки прочность образцов на растяжение улучшается, а удлинение и сужение поперечного сечения уменьшаются. После лазерной закалки у образца № 1 зерна измельчаются, так что прочность на растяжение немного увеличивается. По сравнению с технологией лазерной закалки лазерный переплав и лазерная наплавка требуют более высокой плотности мощности лазера для расплавления поверхности. Из-за литой микроструктуры пластические свойства несколько ухудшаются.

Результаты испытания на удар после лазерной обработки приведены в табл. 3. Из-за остаточных напряжений и хрупкого мартенсита после лазерного облучения ударная вязкость всех образцов снижается.

На рис. 4 показаны фрактограммы изломов подложки и трех образцов после ударного разрушения. В подложке обнаруживается большое количество плоскостей скола, но есть и частичные

Таблица 2. Результаты испытания образцов на растяжение после лазерной обработки

Номер образца	Прочность на растяжение, МПа	Удлинение, %	Сужение, %
1	881,51	15,93	39,40
2	860,14	13,88	33,43
3	863,88	13,47	32,77
Подложка	850,65	15,97	41,50

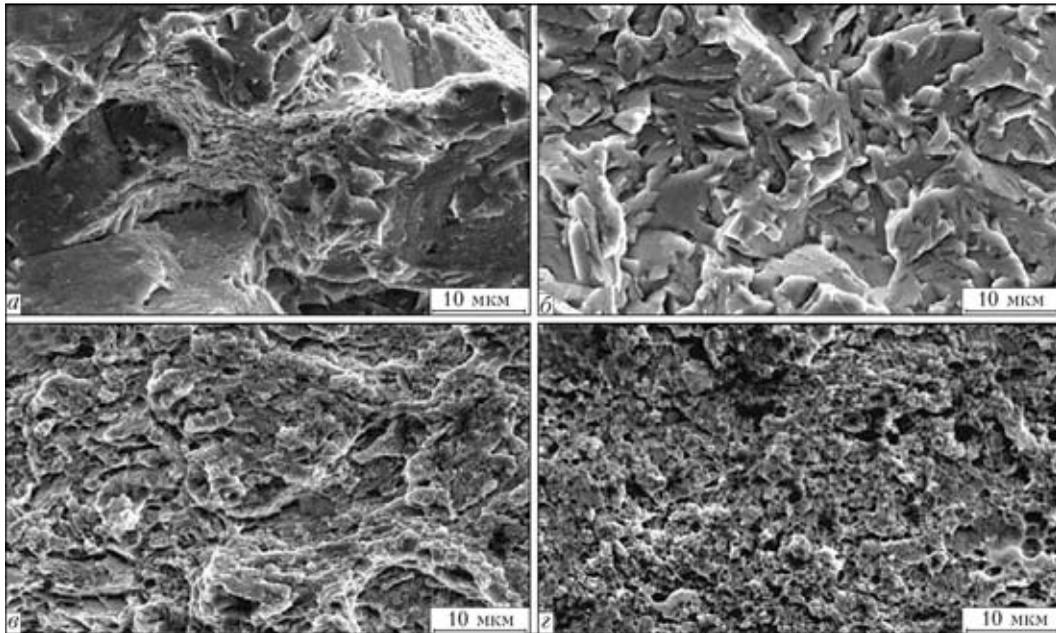


Рис. 4. Фрактограммы изломов упрочненных лазерной обработкой образцов после ударного разрушения: а — подложка; б — лазерная закалка (образец № 1); в — лазерный переплав (образец № 2); з — лазерная наплавка (образец № 3)

ямки. После лазерной закалки у образца № 1 зерна плоскости скола становятся немного меньше. После лазерного переплава и лазерной наплавки у образцов № 2 и 3 также наблюдаются плоскости скола. Из-за более высокой мощности лазера и более высокой скорости охлаждения зерна намного мельче, чем в образце № 1, так что плоскости скола меньше, чем у подложки и образца № 1.

**Остаточные напряжения.** Участок лазерного упрочнения (рис. 5) представляет собой выпуклую поверхность лопаток и подвергается воздействию капель воды на последней ступени паровых турбин. Во избежание интегральной деформации и снижения стоимости для упрочнения было выбрано только локальное сечение. Как видно из рис. 5, точки 1, 3–8 находятся на участке лазерной закалки, точки 2 и 9 — в металле ЗТВ, а точка 10 — в подложке для сравнения.

Распределение остаточных напряжений в лопатках после лазерной закалки и лазерной наплавки приведены на рис. 6. Параметры обработки при лазерном переплаве такие же, что и при лазерной наплавке, так что результаты испытаний на остаточные напряжения после лазерной наплавки рассматриваются приблизительно как такие же, что и при лазерном сплавлении. Поперечное и продольное напряжение на поверхности исходной лопатки (рис. 5, точка 10) равны соответственно 231 и 212 МПа. Поперечное остаточное напряжение в металле ЗТВ представляет собой растягивающее напряжение, а продольное остаточное сжимающее напряжение в металле ЗТВ намного ниже, чем на участке лазерной обработки (рис. 5, точки 2 и 9). Остаточное напряжение точек 2 и 3 аналогично точкам 8 и 9 на рис. 5. Все эти точки находятся возле исходного поло-

Таблица 3. Результаты испытаний на удар после лазерной обработки

Номер образца	Энергия удара, Дж	Вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
1	37,3	46,67
2	37,4	46,83
3	37,0	46,25
Подложка	37,7	47,08

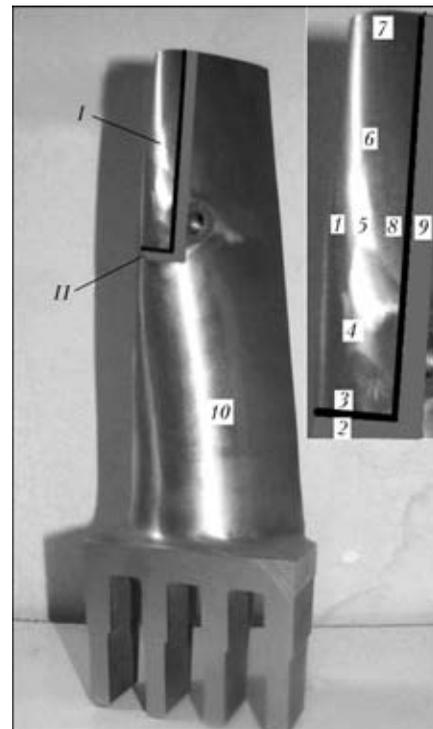


Рис. 5. Места распределения точек испытания (1–10) на остаточные напряжения на участке лазерной закалки: I — участок лазерного упрочнения; II — ЗТВ

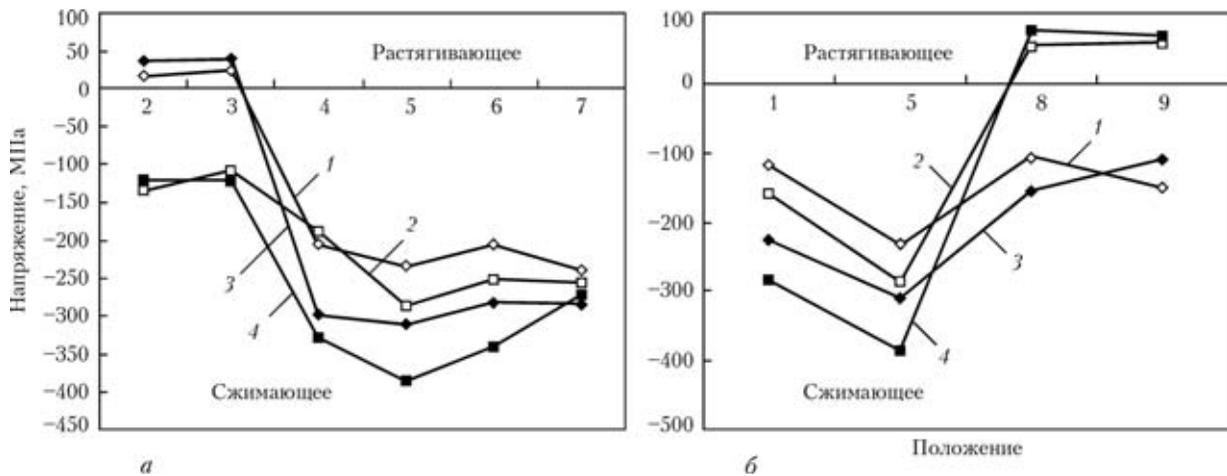


Рис. 6. Распределение остаточных (см. точки 2–7 на рис. 5) (а) и растягивающих (б) (1, 5, 8, 9) напряжений в лопатках: 1, 3 — соответственно поперечное направление; 2, 4 — продольное

жения лазерного сканирования с более низкой энергией лазера, так что эффект отжига со снятием напряжений при более низкой энергии лазерного излучения приводит к состоянию остаточных напряжений, отличающемуся от участка под воздействием высокой излучающей энергии лазера. Все остаточные напряжения на участке с высокой энергией лазерной обработки представляют собой сжимающие напряжения. Очевидно, что сжимающее остаточное напряжение после лазерного сплавления больше, чем при лазерной закалке как в поперечном, так и в продольном направлении. Под влиянием быстрого нагрева лазером и быстрого охлаждения в материале происходят фазовые изменения с преобразованием аустенита в мартенсит при обработке лазерной закалкой, что приводит к расширению объема. Следовательно, на поверхности материала присутствуют сжимающие остаточные напряжения. Для лазерного сплавления необходима более высокая мощность лазера, чтобы обрабатываемый участок поверхности лопатки расплавлялся. При короткой обработке быстрым охлаждением после лазерного нагрева расплавленный материал сразу же кристаллизуется, а исходное напряженное состояние одновременно изменяется [8]. На практике соответствующее сжимающее напряжение является благоприятным, в то время как растягивающее напряжение может привести к снижению усталостной прочности лопаток.

В заключение следует отметить, что упрочненный слой самой большой толщины обнаружен после лазерной закалки, однако твердость его ниже, чем при лазерном переплаве и лазерной наплавке. Мартенсит, распределенный в шахматном порядке, является основной микроструктурой упрочненного слоя после лазерной закалки. Микроструктура после лазерного переплава мельче, чем при лазерной закалке. Лазерная наплавка обеспечивает наибольшую твердость ( $HV_{0,2}$  — 780), но при этом обеспечивается тонкий упроч-

ненный слой. Основными упрочняющими фазами в легированном слое являются WC,  $Fe_2C$  и  $Cr_7C_3$ .

После обработки тремя лазерными способами прочность материала на растяжение улучшается, и в то же время снижаются удлинение и сужение поперечного сечения. Ударная вязкость материала не снижается после лазерного упрочнения. Исходя из анализа ударного разрушения сканирующим электронным методом, ударные разрушения упрочненных слоев содержали большое количество хрупких разрушений. При повышении скорости лазерного сканирования и мощности лазера зерна плоскостей скола постепенно становятся меньше. Наименьшая плоскость скола установлена у образца, полученного при лазерном сплавлении.

После лазерной обработки в зоне лазерного упрочнения присутствуют высокие остаточные сжимающие напряжения в обоих направлениях. Но на кромке зоны лазерного сканирования и в металле ЗТВ присутствуют поперечные растягивающие напряжения и более низкие продольные сжимающие напряжения. По сравнению с поверхностным остаточным напряжением после лазерной закалки остаточное сжимающее напряжение после лазерного сплавления повышается на 35%.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе способа упрочнения поверхности лопаток паровых турбин.

*Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку работы, выполненной в рамках проекта международного сотрудничества Министерства науки и технологий (JG-JD-2008001) и Открытого регионального фонда по теме «Передовые обрабатывающие технологии (АМТ200506-009)».*

1. Failure analysis of the final stage blade in steam turbine / W. Wei-Ze, X. Fu-Zhen, Z. Kui-Long, Shan-Tung Tu // Mater. Sci. Eng. A. — 2006. — 437. — P. 70–74.
2. Steam turbine blade failure analysis / Z. Mazur, R. Garcia-Iglescas, J. Aguirre-Romano, N. Perez-Rodriguez // Eng. Fail. Anal. — 2008. — 15. — P. 129–141.



3. Mann B.S., Vivek Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades // *Wear*. — 2003. — **254**. — P. 652–667.
4. Kathuria Y. P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry // *Surf. Coat. Technol.* — 2000. — **132**. — P. 262–269.
5. Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbine blades for the power industry / P. Bendeich, N. Alamb, M. Brandt et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. — 2006. — **437**. — P. 70–74.
6. Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T7451 aluminum alloy / A. A. Marin de Camargo, H. J. Cornelis, V. M. Odila Hilario Cioffi, Midori Yoshikawa Pitanga Costa // *Surf. Coat. Technol.* — 2007. — **201**. — P. 9448–9455.
7. Fatigue behaviour of laser repairing welded joints / L. P. Borrego, J. T. B. Pires, J. M. Costa, J. M. Ferreira // *Eng. Fail. Anal.* — 2007. — **14**. — P. 1586–1593.
8. Influence of an intermediate layer on the residual stress field in a laser clad / A. Frenka, C. F. Marsdena, J.-D. Wagnie'rea et al. // *Surf. Coat. Technol.* — 1991. — **45**. — P. 435–441.

Erosion is considered to be a characteristic type of mechanical fracture in a region of steam turbine blade edges, which may occur under the effect of water drops. Three types of laser treatment, including laser hardening, laser remelting and laser cladding, intended for prevention of erosion of the blades made from stainless steel 20Kh13 are examined. Residual stresses and mechanical properties resulting from the use of the three surface modification methods are compared. It is shown that laser surface modification causes increase in surface microhardness of the blades and strength of the material, but leads to decrease in elongation and reduction in area. Impact fractures are of a brittle character. Residual compressive stresses form in the laser-hardened zone, and low transverse tensile stresses form in the heat-affected zone.

Поступила в редакцию 06.07.2009

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

20–21 мая 2010 г.

г. Юрга, ЮТИ ТПУ

### **Организаторы конференции**

- Томский политехнический университет
- Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета
- Департамент образования и науки Кемеровской области
- Администрация города Юрги

### **Секции и научные направления конференции**

#### **1. Инновационные технологии получения неразъемных соединений в машиностроении**

- инновационные технологии сварочного производства
- применение сварочной техники в отраслях промышленности
- контроль качества сварных конструкций и сертификация

#### **2. Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении**

- инновационные технологии получения и обработки материалов
- электрометаллургия стали и ферросплавов
- контроль качества и сертификация металлургической продукции
- оборудование механической и физико-технической обработки
- технологии быстрого прототипирования
- конструирование и совершенствование машин и механизмов

#### **3. Автоматизация, информатизация, экономика и менеджмент на предприятии**

- автоматизация производственных процессов и компьютерные технологии
- общие вопросы программного обеспечения
- информационные технологии в управлении
- экономика
- менеджмент, сертификация и маркетинг производственных процессов

#### **4. Защита окружающей среды, безопасность и охрана труда на предприятиях**

- отраслевые, региональные и международные аспекты экологии и БЖД
- решение проблемы отходов и ресурсосбережения
- современные методы защиты в чрезвычайных ситуациях

#### **5. Передовые технологии и техника для разработки недр и землепользования**

- новая техника и технологии освоения подземного пространства
- геология и геомеханика
- инновационные технологии и современные технические средства АПК

#### **6. Научная школа для молодых ученых «Новые и новейшие технологии в машиностроении»**

### **Организационный комитет**

Адрес: ЮТИ ТПУ, 652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26

Тел.: (+7 38451) 6-53-95

Факс: (+7 38451) 6-53-95

www.uti.tpu.ru, utiscience@rambler.ru

Председатель Оргкомитета: Чинахов Дмитрий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент

Секретарь конференции: Фисоченко Елена Геннадьевна



# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В. С. БУТ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований вязкости разрушения металла зоны термического влияния сварных соединений низколегированных сталей с различной схемой формирования надреза. Выполнена оценка существующих способов изготовления образцов и результаты их испытаний на критическое раскрытие трещины при трехточечном нагружении.

*Ключевые слова:* дуговая ручная сварка, сварные соединения, вязкость разрушения, критическое раскрытие трещины, диаграмма разрушения, металлографические исследования, структура, температура испытаний

В настоящее время при оценке работоспособности ответственных конструкций и сооружений, сосудов высокого давления и трубопроводов, работающих в сложных условиях, особое внимание уделяется сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению.

Как показано в работе [1], основными факторами, способствующими возникновению хрупкого разрушения сварного соединения, являются концентрация напряжений, вызванная подрезом (резким изменением сечения, технологическими дефектами сварных швов и основного металла), остаточные растягивающие напряжения у основания надреза, пониженные пластические свойства на указанном участке, низкая температура.

При оценке склонности сварных соединений к хрупкому разрушению, наряду с традиционными критериями (ударной вязкостью, характером излома) все более широко применяется критерий нелинейной механики разрушения — значение критического раскрытия трещины (КРТ)  $\delta_c$  [2]. Отражая количественно сопротивление разрушению материалов и сварных соединений с трещиноподобными дефектами технологического и эксплуатационного происхождения, этот показатель позволяет установить для конструкционных сталей значения критических температур, разделяющих области вязких, квазихрупких и хрупких разрушений. По отношению к сварным соединениям это имеет практическое значение в связи с возможным локальным охрупчиванием металла в зоне шва, а следовательно, с необходимостью ограничения области значений рабочей температуры вязким состоянием [3].

Преимущества метода испытаний на раскрытие трещины (РТ) достаточно полно освещены

в работах [1–4]. К тому же в сварных соединениях некоторых ремонтных конструкций неизбежно имеются концентраторы напряжений, которые могут оказывать влияние не только на образование холодных трещин, но и на стойкость против хрупкого разрушения.

Как правило, охрупчивание металла при сварке конструкционных сталей имеет место на участке крупного зерна зоны термического влияния (ЗТВ). В связи с этим оценку сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению обычно выполняют исходя из результатов испытаний образцов с надрезом в указанной зоне при трехточечном медленном нагружении [5].

Как показывает мировой опыт, при определении допустимых размеров трещиноподобных дефектов в сварных соединениях на основе методики КРТ наиболее достоверные данные показывают образцы с неполным проплавлением притупления (НПП) в разделке соединения, использованные в японской методике [6] (рис. 1, а). Сварку таких образцов выполняют в специальном приспособлении (рис. 1, б), которое ограничивает угловые деформации и позволяет свободно деформироваться в поперечном ко шву направлении. Однако такая методика является трудоемкой, она приспособлена только для сварки штучными электродами, поскольку требует, чтобы граница сплавления многослойного шва была параллельна щелевому зазору.

Изготовление образцов и способ нанесения надрезов, согласно работе [7], позволяет использовать методику КРТ и для других способов сварки. При этом образцы с V-образной разделкой кромок имеют преимущество перед другими вариантами благодаря простоте и небольшой трудоемкости изготовления.

С целью установления адекватности указанных методик и корреляции полученных результатов в данной работе с использованием штучных электродов на одинаковых режимах сварки вы-

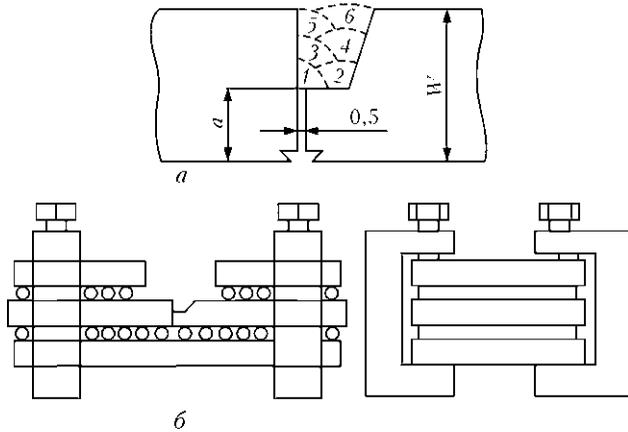


Рис. 1. Схемы сварного образца с НПП кромки (а) и приспособления для его сварки (б): 1–6 — последовательность заполнения разделки

полняли сварные соединения сталей Х60 и 17Г1С с разными формами разделки (рис. 2), химический состав которых приведен в таблице.

На указанных образцах выполняли надрезы механическим способом под углом перпендикулярно и параллельно границе сплавления (рис. 2). Во всех случаях вершина надреза с радиусом кривизны 0,1 мм была расположена на расстоянии 0...0,3 мм от границы сплавления. Кроме того, сваривали образцы с естественным концентратором напряжений, т. е. с НПП в разделке сварного соединения. В этом случае зазор между свариваемыми кромками (рис. 1, а) выбирали согласно рекомендациям [7].

Макрошлифы сварных образцов для испытания на КРТ с различной схемой формирования надреза в ЗТВ показаны на рис 3. Испытание образцов с НПП на изгиб проводили по такой же методике, как и образцов с механическим надрезом в соответствии рекомендациями Британского стандарта BS5762–79 и методики [8]. В данном случае испытания на РТ происходили при контролируемой и относительно медленной скорости увеличения  $v_c$  нагрузки с одновременной регистрацией ее и РТ на двухкоординатном самописце. Испытания заканчивали, когда достигалось неконтролируемое развитие трещины и происходил излом. При этом использовали комплект из трех образцов каждого сварного соединения при одинаковой температуре. Схемы и размеры образцов для определения КРТ приведены на рис. 2, а. При испытании на КРТ строится диаграмма в координатах нагрузка–РТ. Полученные

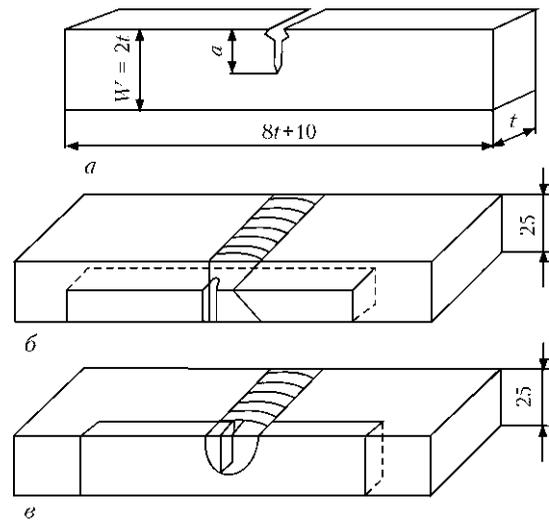


Рис. 2. Схемы образцов, вырезанных из сварных соединений для КРТ, с надрезами различной формы (а–в)

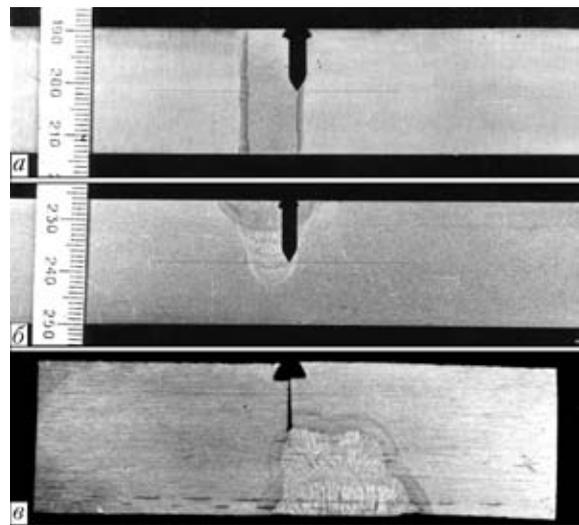


Рис. 3. Макрошлифы с искусственными (механическими) и естественными надрезами в ЗТВ: а — надрез, расположенный параллельно границе сплавления; б — надрез под углом к границе соединения; в — естественный с НПП

кривые, как правило, соответствуют одному из типов разрушения, показанных на рис. 4 [9].

Для проведения испытаний по методике КРТ изготовлено приспособление (рис. 5), основными узлами которого является силовая скоба и обойма с переменной базой опор нагружения, что позволяет испытывать образцы в широком диапазоне толщин (5...30 мм) при трехточечном нагружении. Тензодатчики, которые контролируют уровень нагружения, клеют на внешнюю повер-

**Химический состав исследуемых сталей**

Марка стали	C	Mn	Si	Ni	S	P	V	Nb	Al	C <sub>экв</sub>
Х60	0,12	1,60	0,48	0,20	0,01	0,025	0,08	0,06	0,01	0,42
17Г1С	0,18	1,48	0,39	0,10	0,03	0,022	—	—	—	0,43

Примечание. C<sub>экв</sub> определяли по формуле Международного института сварки.

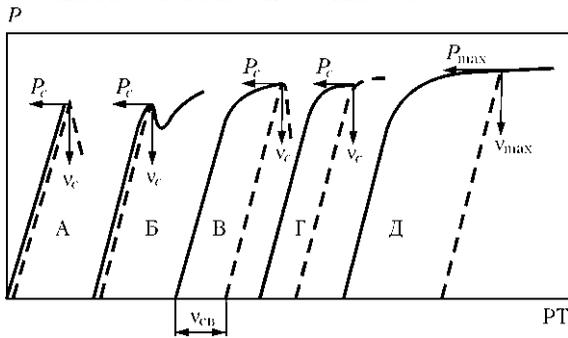


Рис. 4. Типы диаграмм нагрузка–РТ ( $P_c$  — критическая нагрузка)

хность боковых стоек силовой скобы в местах максимальных напряжений изгиба, которые возникают во время нагружения образца. Это повышает чувствительность тензодатчика и обеспечивает пропорциональность по координате у при записи диаграммы нагрузка–РТ. Кроме того, расположение тензодатчиков за пределами охлаждающей среды позволяет повысить их долговечность и надежность при многократных испытаниях в условиях низких температур.

Испытания образцов указанных размеров на трехточечный изгиб при контролируемой скорости нагрузки (2 мм/мин) и температуре  $-30...110$  °С осуществляли на гидравлической машине с усилием 300 кН, оснащенной тензоусилителем с регулируемым блоком питания и двухкоординатным самопишущим планшетным потенциометром. Температуру образцов до  $-70$  °С обеспечи-

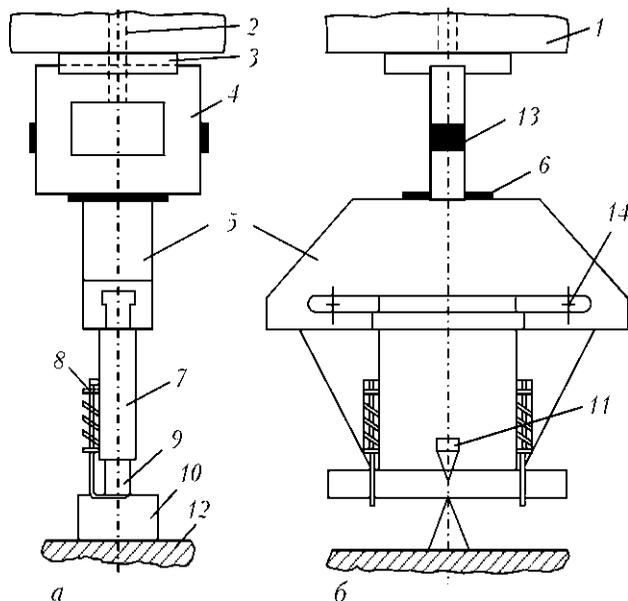


Рис. 5. Схема приспособления для испытаний образцов по методике КРТ: 1 — верхняя траверса; 2 — шток закрепления; 3 — опорная пята; 4 — силовая скоба; 5 — обойма с подвижными опорами; 6 — теплоизолирующая прокладка; 7 — подвижная опора; 8 — прижим; 9 — образец; 10 — неподвижная опора; 11 — датчик РТ; 12 — платформа испытательной машины; 13 — датчик нагружения; 14 — фиксатор

вали раствором твердой углекислоты в бензине. До более низкой температуры образцы охлаждали парами азота. Температуру образцов контролировали с помощью хромель-алюмелевых термопар и милливольтметра. Предварительно строили тарировочный график в координатах температура–напряжение, по которому во время испытаний контролировали температуру охлаждения образца.

При испытаниях образцов получено три типа диаграмм нагрузка–РТ — А, В, Д (рис. 4). Причем при температуре  $-70$  °С образцы с искусственным надрезом разрушались по типу В и Д, а образцы с НПП — по типу А. При понижении температуры до  $-90$  °С образцы с механическим надрезом из стали 17Г1С разрушались по типу А, из стали Х60 — по типу В. При  $-110$  °С все образцы разрушались по типу А.

При повышении температуры испытаний до  $-50$  °С и более образцы НПП разрушались по типу В. По минимальным значениям  $\delta_c$  построены графики изменения этой величины у образцов из исследуемых сталей в зависимости от температуры испытаний и вида надреза в ЗТВ (рис. 6). Из рисунка видно, что схема нанесения надреза механическим способом на участке крупного зерна ЗТВ не влияет на КРТ. Для сравнительной оценки сопротивляемости металла в ЗТВ хрупкому разрушению можно и следует применять образцы, изготовленные по наиболее простой и наименее трудоемкой методике, изложенной в работе [7], в соответствии с которой можно оценивать ЗТВ сварных соединений любого вида, полученных различными способами сварки. Показатель КРТ у образцов с НПП значительно ниже, чем у образцов с искусственным (механическим) надрезом, испытанных при температуре  $-70$  °С и достигает уровня значений КРТ образцов с надрезом при более высокой ( $-40$  °С) температуре испытаний.

В диапазоне  $-70...-80$  °С образцы из стали Х60 с искусственным надрезом в ЗТВ имеют достаточно высокие значения КРТ (0,22...0,31 мм), в то время как у образцов из стали 17Г1С эти значения гораздо ниже, при температуре  $-80$  °С  $\delta_c \approx 0,1$  мм. При снижении температуры испытаний до  $-110$  °С зафиксированы практически одинаковые (минимальные) значения КРТ у образцов из различных сталей с искусственным надрезом в металле ЗТВ сварных соединений. Используя критерии оценки материала ( $\delta_c \geq 0,12$  мм), приведенные в работе [8], можно предположить, что металл ЗТВ (участок крупного зерна) сварных соединений стали Х60 будет разрушаться хрупко при температуре ниже  $-90$  °С, а стали 17Г1С — при более низкой ( $-80$  °С) температуре. Если использовать значения КРТ, полученные на образцах с НПП, то температурный диапазон хрупкого разрушения участков указанной зоны будет на-



ходиться ниже области  $-60$  и  $-45$  °С соответственно для сталей Х60 и 17Г1С.

Сравнение температурных зависимостей  $\delta_c$  в ЗТВ сварных соединений сталей Х60 и 17Г1С (временное сопротивление 540...600 МПа), полученных на образцах с НПП и с искусственным надрезом, показало, что для сталей исследуемых марок обе зависимости достаточно хорошо соответствуют друг другу. Однако значения  $\delta_c$  у образцов с НПП значительно ниже, порог хрупкого разрушения ЗТВ смещается в сторону положительной температуры на 30...35 °С по сравнению с образцами с искусственным надрезом в ЗТВ. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, вершина естественного надреза в образцах с НПП находится на линии сплавления, поэтому он должен быть более острым, чем у образцов с искусственным надрезом; во-вторых, у вершины надреза во время сварки происходит концентрация пластических деформаций и остаточных напряжений. На основании изложенного можно сделать вывод, что для точной и достоверной оценки сопротивляемости сварного соединения хрупкому разрушению вершина надреза должна находиться на участке крупного зерна ЗТВ, однако такой надрез трудно выполнить механическим способом. Образцы с НПП позволяют просто и надежно получить требуемые характеристики, поскольку в этом случае вершина естественного надреза расположена точно на границе сплавления. Значения  $\delta_c$  у образцов с НПП можно использовать для определения допустимых размеров трещиноподобных дефектов в сварных соединениях расчетным методом согласно [10]. Как показали исследования, в то же время при тщательной разметке и точном нанесении искусственного надреза в требуемом участке ЗТВ можно получить удовлетворительные результаты при определении вязкости разрушения. При этом следует учитывать, что температурный диапазон вязкого разрушения расширяется в сторону снижения температуры на 30...35 °С.

За рубежом уже давно при проектировании ответственных конструкций устанавливают требования к вязкости металла и сварным соединениям по критерию  $\delta_c$ , значения которого составляют 0,20...0,25 мм (последнее значение относится к сварным швам). Проявление более высоких требований к сварным соединениям объясняется возможным проявлением дополнительных факторов — большей вероятностью возникновения дефектов в соединениях по сравнению с основным металлом [11].

Учитывая указанные нормативные уровни трещиностойкости сварных соединений, можно заключить, что область вязкого разрушения металла ЗТВ стали Х60 будет находиться выше темпера-

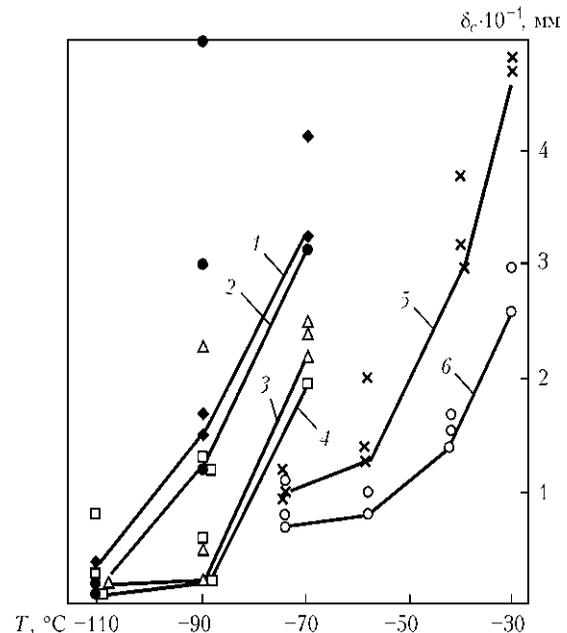


Рис. 6. Зависимость КРТ от температуры испытаний и типа надреза в ЗТВ образцов из сталей Х60 (1, 2, 5) и 17Г1С (3, 4, 6): 1, 3 — надрез параллельно границе сплавления; 2, 4 — перпендикулярно ГС; 5, 6 — образцы с НПП

туры  $-45$  °С, а стали 17Г1С — выше  $-30$  °С. Поскольку наиболее низкая температура для северных газопроводов [12] составляет всего  $-15$  °С (для нефтепроводов еще выше), указанные стали можно рекомендовать для изготовления ремонтных муфт и разрезных сварных тройников [13, 14]. Вместе с тем сталь Х60 позволяет снизить вероятность хрупкого разрушения сварных соединений, что очевидно, связано с металлургическими особенностями выплавки и проката.

Для изучения характера распространения трещин и исследования микроструктуры отдельных участков сварных соединений образцов с НПП вырезали шлифы. Анализ показал, что, как правило, трещины распространяются вдоль границы сплавления на участке крупного зерна (рис. 7, а), в некоторых случаях они берут свое начало на участке крупного зерна и распространяются в металл шва. Следует отметить, что случаи распространения трещин в металл шва как в сварных соединениях стали 17Г1С, так и в соединениях стали Х60 зафиксированы при самой низкой ( $-75$  °С) температуре испытаний. Очевидно, это связано со значительным охрупчиванием металла шва и на участке крупного зерна. Причем распространение трещин в образцах из стали 17Г1С происходит на большую глубину, чем в образцах из стали Х60. На рис. 8 представлена типичная панорама распространения трещин в образцах из стали 17Г1С с НПП. Исследования структуры металла сварных соединений показали следующее. У основного металла она во всех случаях ферритно-перлитная, твердость стали 17Г1С составляет  $HV 190$ , а стали Х60 —  $HV 170$ . Металл шва сварного соединения

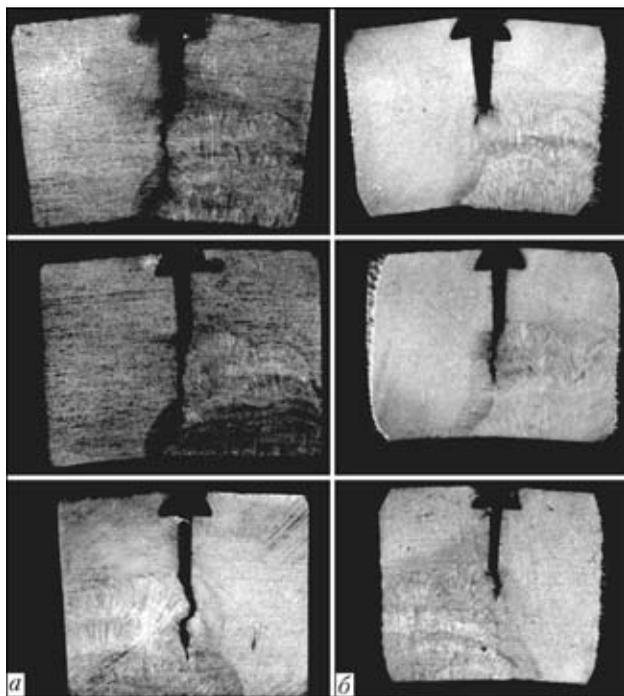


Рис. 7. Характер разрушений образцов из сталей 17Г1С (а) и типа X60 (б)

представляет собой литую смесь доэвтектоидного феррита, перлита и участков бейнита. Структура металла ЗТВ на участке перегрева (крупного зерна) стали X60 бейнитно-перлитная с выделением доэвтектоидного феррита преимущественно по границам зерен, у стали 17Г1С — в основном верхний бейнит, игольчатый феррит и незначительная доля перлита и доэвтектоидного феррита.

Исследования характера распространения трещин показали, что последние в основном проходят через участки верхнего бейнита и игольчатого феррита, в редких случаях — через участки доэвтектоидного феррита. Как правило, трещины останавливались в зонах расположения вязких составляющих.

Одновременно проводили исследования особенностей разрушения металла в ЗТВ образцов с искусственным надрезом по общепринятой методике на электронных микроскопах ДЖЕМ-120 и ДЖЕМ-200СХ.

Для образцов из стали X60, испытанных при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$ , характерен вязкий тип разрушения. Поверхность разрушения в основном имеет ячеистый характер с высокой степенью пластического течения перед разрушением. Зарождение ячеек разрушения происходит в области крупных фазовых выделений. Имеют место также участки вязкого разрушения с меньшей степенью пластического течения перед разрушением (более плоские фасетки) и участки межзеренного разрушения. Межзеренный характер разрушения свидетельствует об охрупчивании на некоторых участках границ зерен. Излом образца из стали 17Г1С также имеет вязкий характер разрушения, однако границы фасеток отрыва свидетельствуют о меньшей степени пластического течения перед разрушением. Обнаружены также зоны хрупкого разрушения (речный узор), однако доля их незначительна.

При температуре испытаний  $-90^{\circ}\text{C}$  изломы образцов из стали 17Г1С имеют в основном вязкий характер с плоскими фасетками или фасетками с более значительным пластическим течением перед разрушением. Обнаружены участки квазивязкого разрушения и хрупкого излома. При аналогичных испытаниях образцов сварных соединений стали X60 определено, что поверхность их излома в ЗТВ имеет более вязкий характер разрушения по сравнению с соединениями стали 17Г1С, что согласуется с данными механических испытаний образцов из сталей исследуемых марок. Имеет место вязкий излом со значительным пластическим течением перед разрушением как в объеме, так и по границам зерен.

Фрактографические исследования изломов образцов из стали 17Г1С при температуре  $-110^{\circ}\text{C}$  показали, что разрушение имеет в основном хрупкий характер с четко выраженным речным узором и гребнями отрыва. Следует отметить, что при указанной температуре чаще всего происходит межкристаллитное разрушение. Характер изломов образцов из стали X60 такой же, как и у образцов из стали 17Г1С, испытанных при той же температуре. Имеются также разрушения, происходящие вследствие хрупкого скола, и незначительная доля участков квазивязкого разрушения. Учитыв-

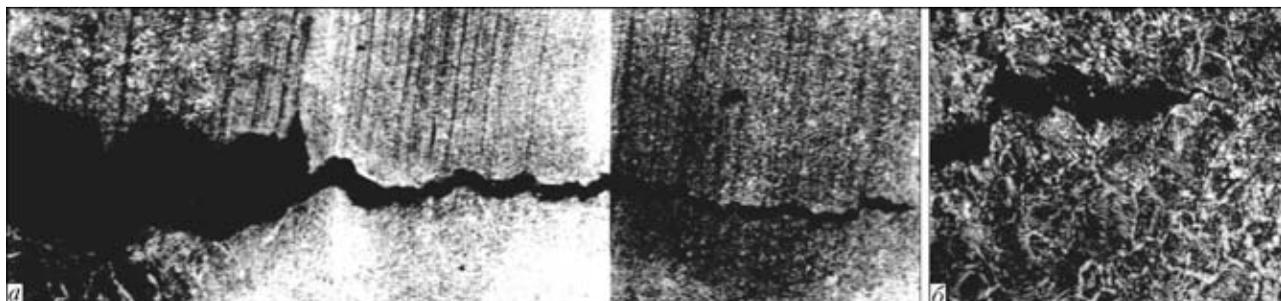


Рис. 8. Панорама типичного распространения трещины в образце из стали 17Г1С с НПП (а,  $\times 63$ ) и фрагменты трещины в зоне остановки (б,  $\times 200$ )



вая, что при температуре испытаний  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$  изломы ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей идентичны, можно считать, что при низкой температуре испытаний влияние легирующих элементов на вязкость разрушения нивелируется.

Исследованы также изломы образцов с механическими надрезами, выполненными перпендикулярно и параллельно границе сплавления. Исходя из результатов фраттографических исследований характер разрушения сварных соединений идентичен даже при различных схемах нанесения надреза на участке крупного зерна ЗТВ. Установлено, что значения  $\delta_c$  не зависят от способа нанесения механического надреза в исследуемой зоне и считаются достоверными, если вершина надреза находится от границы сплавления на расстоянии, не превышающем 0,3 мм.

Проведенные металлографические исследования полностью подтвердили результаты испытаний на КРТ. При этом температурные зависимости  $\delta_c$  металла ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей, полученные на образцах с НПП и с искусственным (механическим) надрезом, хорошо коррелируют. При этом сопротивление хрупкому разрушению металла на участке крупного зерна ЗТВ у стали Х60 выше, чем у 17Г1С.

Таким образом, наиболее простой и наименее трудоемкой является методика нанесения механического надреза в ЗТВ под углом к границе сплавления, что позволяет оценить сопротивление металла ЗТВ хрупкому разрушению сварных соединений, выполненных в широком диапазоне тепловложений погонных энергий сварки, по сравнению с наплавленным и основным металлом.

Значения КРТ при испытаниях образцов с НПП и механическим надрезом показывают хорошую корреляцию. Однако в первом случае порог хрупкого разрушения смещается в сторону положительной температуры на  $30\text{...}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это следует учитывать при установлении темпера-

турного диапазона хрупкого разрушения металла ЗТВ по результатам испытаний образцов с механическим надрезом.

1. *Красовский А. Я., Красику В. Н.* Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 176 с.
2. *Броек Д.* Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
3. *Механика разрушения и прочность материалов:* Справ. пособие. В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наук. думка, 1988. — Т.1. — 388 с.
4. *Gray T. G., McCombe A. A., Shanks W. A.* CTOD testing to BS 5762 // *Metals and Mater.* — 1985. — № 4. — P. 223–285.
5. *Красовский А. Я.* Хрупкость металлов при низких температурах. — Киев: Наук. думка, 1980. — 340 с.
6. *Андо К.* Оценка вязкости разрушения в зоне термического влияния с помощью трехточечного метода испытаний на изгиб образцов с надрезом // *Есэцу чаккайси.* — 1979. — № 5. — С. 55–60.
7. *Dolby R. E.* Welding and fracture initiation in QT low alloy steels // *Metal Constr. and Brit. Weld. J.* — 1971. — № 3. — P. 99–103.
8. *Кирьян В. И.* Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязкости разрушения // *Автомат. сварка.* — 1984. — № 11. — С. 1–6.
9. *Fletcher L.* Practical COD fracture toughness measurement and evaluation // *Australian Weld. J.* — 1979. — № 7. — P. 51–56.
10. *Кошелев П. Р., Егоров Ю. И.* Применение механики разрушения для оценки несущей способности магистральных трубопроводов // *Прочность конструкций, работающих в условиях низких температур.* — М.: Металлургия, 1985. — С. 8–12.
11. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // *Автомат. сварка.* — 1986. — № 10. — С. 61–62.
12. *Патон Б. Е., Труфяков В. М., Кирьян В. И.* Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // *Там же.* — 1982. — № 12. — С. 5–9.
13. *Определение* допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // *Там же.* — 2003. — № 8. — С. 7–12.
14. *Бут В. С., Олейник О. И.* Основные направления развития технологии ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации // *Там же.* — 2007. — № 5. — С. 42–48.

The paper presents the results of experimental studies of fracture toughness of HAZ metal of low-alloyed steel welded joints with different schematic of notch formation. Assessment of the currently available methods of sample preparation and results of their testing for critical crack tip opening displacement at three-point loading was performed.

Поступила в редакцию 17.06.2009



## УПРАВЛЕНИЕ БЕЗДАТЧИКОВЫМИ ПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, В. Ф. СЕМИКИН, канд. техн. наук, Л. Ф. СУШИЙ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны схемы управления реверсивных двигателей постоянного тока со стабилизацией скорости по электродвижущей силе. Разработан микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод, отличающийся жесткими нагрузочными характеристиками, отсутствием коммутирующих контактов для реверса, высокой надежностью, возможностью точного задания скорости до пуска двигателя.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, двигатель постоянного тока, стабилизация скорости, бездатчиковый привод, тиристорный регулятор, транзисторный регулятор, микропроцессор, цифровое управление

Электроприводы являются неотъемлемой частью практически всех сварочных установок для дуговой сварки. Это прежде всего привод подачи электродной проволоки, приводы перемещения сварочной тележки, поперечных колебаний сварочной головки, позиционирования сварочной головки и др. В управляемых электроприводах наибольшее распространение получили двигатели постоянного тока. По сравнению с асинхронными двигателями переменного тока в них гораздо проще управлять скоростью и они имеют существенно меньшие габариты. Кроме того, асинхронные двигатели переменного тока выпускают, как правило, на напряжение питания 220 В и выше, что согласно правилам техники безопасности [1] позволяет использовать их в стационарных и передвижных автоматах. Исключительными массогабаритными и регулировочными характеристиками отличаются современные бесконтактные синхронные машины. Однако и они, и системы их управления имеют очень высокую стоимость.

К приводам подачи электродной проволоки сварочных полуавтоматов предъявляют следующие требования: диапазон регулирования частоты вращения не менее 1:10; стабильность установленной частоты вращения независимо от колебаний напряжения сети +5...+10% и момента нагрузки на валу 0...100% не хуже ±10% [2]. Приводы для сварки с импульсной подачей проволоки, поперечного периодического перемещения сварочной головки, системы автоматического регулирования напряжения сварки неплавящимся электродом и систем автоматического слежения за стыком должны отличаться существенно большим диапазоном регулирования скорости и предельным быстродействием.

Такие характеристики можно получить только при использовании систем управления с отрицательной обратной связью по частоте вращения двигателя. Наилучшие результаты получены у систем с датчиком скорости вращения электродвигателя — тахогенератором постоянного или переменного тока, импульсным оптическим датчиком или датчиком, основанным на эффекте Холла. К сожалению, датчики скорости сложны, дороги и не всегда есть физическая возможность их установить. Например, популярные двигатели Д90 и Д25 Киевского ОАО «Артем-контакт» не позволяют подсоединить датчик скорости к валу с противоположной к редуктору стороны двигателя.

В простейших приводах в качестве сигнала обратной связи используют напряжение тахометрического моста [3, 4], основным недостатком которого является его низкая точность. Реально напряжение тахометрического моста пропорционально не скорости двигателя, а напряжению питания и току двигателя. Такая система эквивалентна системе с отрицательной обратной связью по напряжению питания двигателя и положительной обратной связью по нагрузке (току). Наиболее негативным свойством системы является то, что обратная связь по току является положительной и ее увеличение для повышения жесткости нагрузочной характеристики двигателя приводит к неустойчивости системы. В результате в приводах с обратной связью по сигналу тахометрического моста никогда не удастся получить жесткие характеристики привода, как в системах с датчиками скорости. Соответственно сужается и диапазон регулирования скорости двигателя.

Существенно лучшие результаты показывают бездатчиковые системы с обратной связью по электродвижущей силе (ЭДС) обмотки якоря двигателя [5]. Как известно, ЭДС составляет [6]

$$E_a = C_e n \Phi,$$

где  $C_e$  — конструктивный параметр двигателя;  $\Phi$  — поток возбуждения;  $n$  — скорость вращения

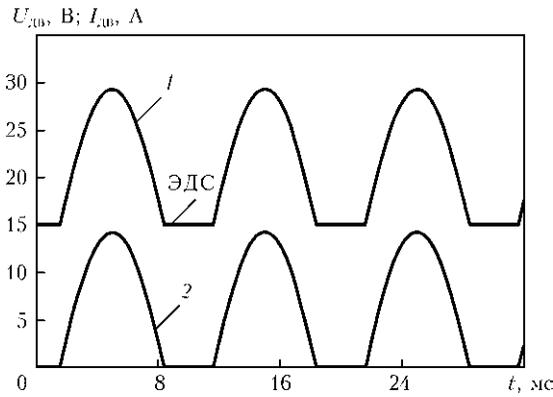


Рис. 1. Осциллограммы напряжения  $U_{дв}$  (1) и тока  $I_{дв}$  (2) двигателя, питаемого от двухполупериодного выпрямителя переменного напряжения с частотой 50 Гц

вала двигателя. Таким образом, ЭДС двигателя не хуже машинного тахометра характеризует скорость двигателя. Проблема состоит в том, как измерить ЭДС.

Значение ЭДС можно измерить, если перевести двигатель в режим генератора, отключив его от источника питания. При кратковременном отключении питания двигатель по инерции продолжает вращаться, а следовательно, напряжением на якоре является ЭДС. Если двигатель питается от регулируемого источника постоянного тока, то система управления должна периодически отключать питание и в образовавшейся паузе измерять напряжение на двигателе. При питании двигателя от выпрямленного однофазного напряжения сети двигатель значительную часть полупериода напряжения сети работает в режиме генератора. Это происходит, когда ЭДС двигателя больше мгновенного напряжения источника питания (рис. 1).

**Тиристорный бездатчиковый привод.** Для проверки принципа регулирования скорости по ЭДС двигателя тиристорного привода создан макет аналоговой системы управления, принципиальная схема которого приведена рис. 2.

Регулятор испытывали с коллекторным двигателем  $M$  постоянного тока типа Д90 мощностью 130 Вт. Питание двигателя производится от управляемого двухтактного выпрямителя на оптронных тиристорах  $VD1, VD2$ . Выпрямитель питается от понижающего трансформатора  $T1$ .

Напряжение якоря двигателя после резистивного делителя  $R1, R2$  поступает на повторитель  $DA2$ , а с его выхода — на аналоговый ключ  $DA4$ , который управляется выходным напряжением компаратора  $DA3$ . На инвертирующий вход компаратора с шунта  $R3$ , включенного в цепь якоря двигателя, подается напряжение, пропорциональное току якоря двигателя  $M$ . В результате, когда через якорь двигателя протекает ток и двигатель работает в режиме генератора, ключ  $DA4$  замкнут и конденсатор  $C2$  заряжается до напряжения, пропорционального ЭДС двигателя. Когда напряжение на якоре двигателя больше ЭДС, через якорь двигателя протекает ток и ключ  $DA4$  размыкается по команде от  $DA3$ . В результате напряжение на конденсаторе  $C2$  на протяжении всего времени остается пропорциональным ЭДС двигателя. После повторителя  $DA5$  это напряжение подается на регулятор  $DA1$ , выход которого соединен с регулятором фазового управления тиристорами на однопереходном транзисторе  $VT2$ . На основе транзистора  $VT1$  и выпрямителя  $VD3$  собрана схема синхронизации работы  $VT2$  с сетью. Задание скорости осуществляется потенциометром  $R4$ .

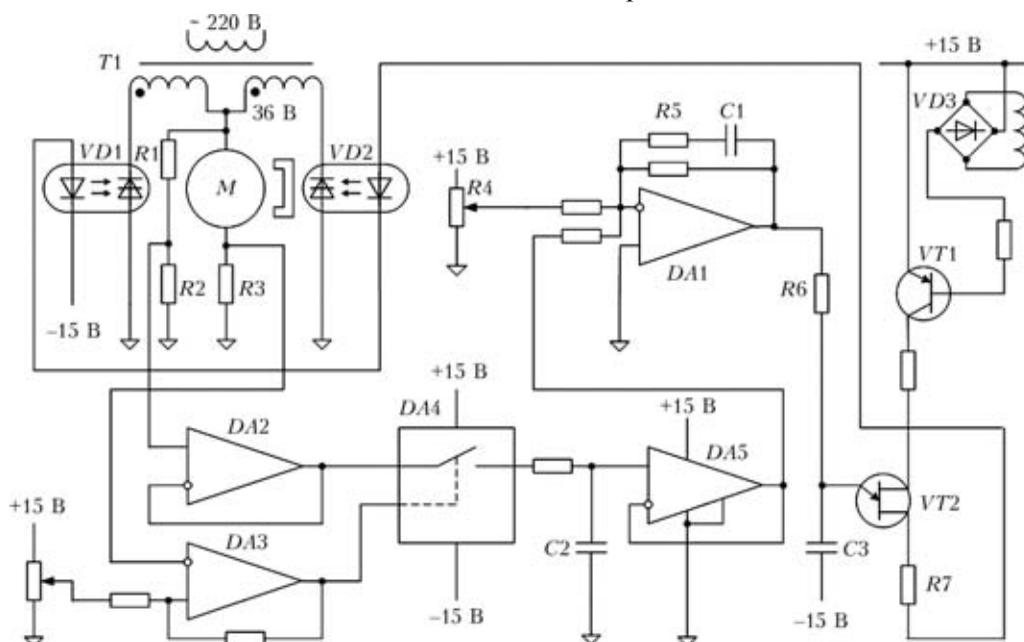


Рис. 2. Принципиальная схема регулирования скорости нереверсивного тиристорного привода с отрицательной обратной связью по ЭДС двигателя постоянного тока



Испытание макета регулятора показало высокую точность стабилизации скорости вращения двигателя в широком диапазоне изменения напряжения питающей сети и нагрузки на валу двигателя. Несомненным достоинством тиристорного регулятора является его предельная простота и надежность, он практически не накладывает ограничений на мощность и питающее напряжение двигателя. Его недостатком является низкий коэффициент мощности, особенно на большой скорости двигателя, обусловленный импульсным характером тока якоря двигателя. В результате действующее значение тока двигателя, определяющее его нагрев, существенно выше среднего значения тока, определяющего момент на валу двигателя.

**Микропроцессорный тиристорный бездатчиковый привод.** Использование микропроцессорной техники в тиристорном приводе позволяет упростить схему устройства и в то же время использовать более совершенные алгоритмы управления. Принципиальная схема микроконтроллерного тиристорного бездатчикового привода постоянного тока приведена на рис. 3.

Использование микроконтроллера позволило применить алгоритм реверсивного управления двигателем и совместить в одной системе, помимо функции управления, также функцию отображения в цифровом виде заданной и реальной скорости двигателя.

В качестве контроллера DD1 в данной разработке использован однокристальный микроконтроллер PIC16F873 фирмы «Microchip» (США).

Потенциометром  $R1$  задается скорость двигателя  $v_{зад}$ . Выходное напряжение потенциометра подается на один из входов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. На другой вход АЦП поступает напряжение с делителей  $R4$  и  $R5$ , которые подключены к якорию двигателя  $M$ . В результате обработки микроконтроллером этого напряжения из него извлекается значение ЭДС двигателя.

Синхронизация с напряжением сети осуществляется схемой, собранной на основе  $R2, R3, VD1, DA1$ . В результате на входе  $RB7$  контроллера DD1 формируются импульсы синхронизации с сетью, запускающие по прерыванию подпрограмму управления приводом в начале каждого полупериода напряжения сети.

Выключателями  $Bn$  (вперед) и  $Hз$  (назад) формируются команды на вращения вала двигателя в соответствующем направлении. Кнопка  $Rs$  служит для ручного сброса микроконтроллера.

На выходах  $RD3$  и  $RD4$  контроллера формируются импульсы включения оптосимисторов  $VS1$  и  $VS2$ . Эти импульсы поступают на базы транзисторов  $VT1, VT2$ , к коллекторам которых присоединены излучающие диоды оптосимисторов. При включении транзисторов  $VT1, VT2$  включается соответствующий оптосимистор в направлении, определяемом выключателями  $Bn$  и  $Hз$ .

Оптосимисторы включены по однофазной схеме двухполупериодного реверсивного выпрямителя с питанием от трансформатора  $T1$ , вторичная обмотка которого имеет отвод от средней точки.

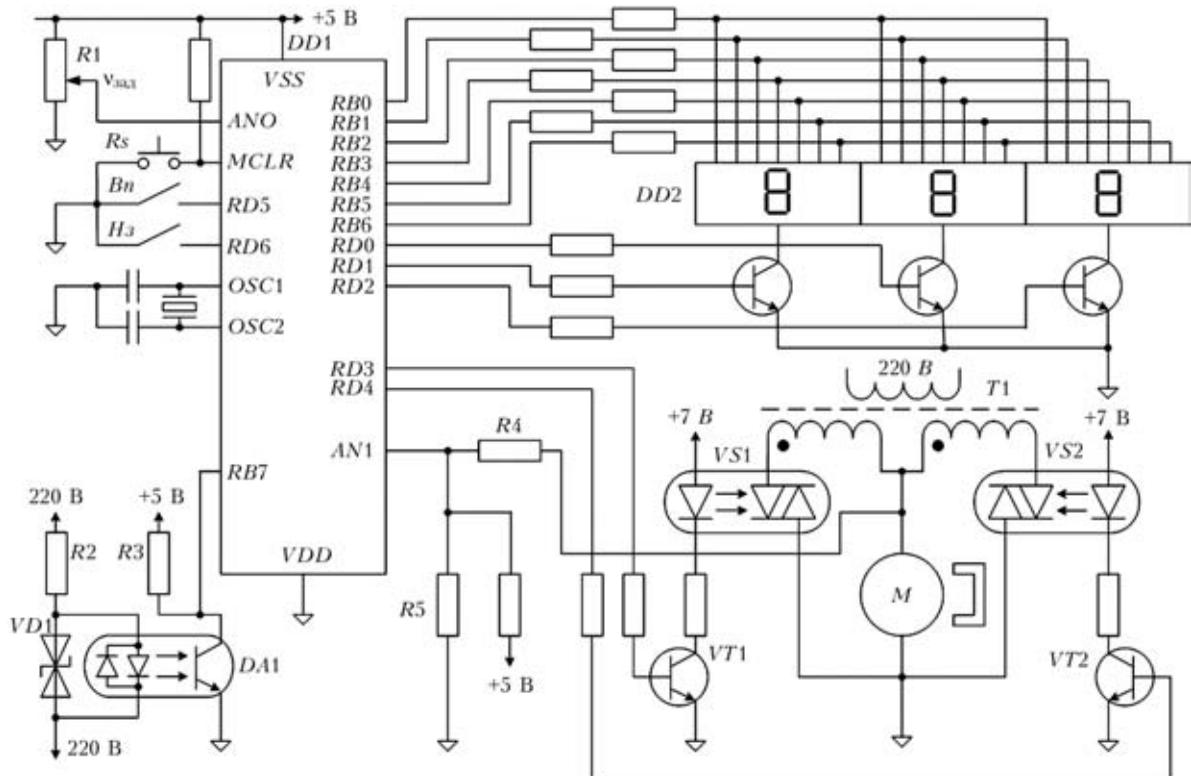


Рис. 3. Принципиальная схема микропроцессорного реверсивного тиристорного бездатчикового привода



Выпрямитель нагружен на якорь коллекторного двигателя постоянного тока  $M$  с возбуждением от постоянных магнитов.

Большое количество выходных регистров микроконтроллера PIC16F873 дополнительно к устройствам управления и регулирования позволяет подключать к нему трехразрядный семисегментный светодиодный индикатор  $DD2$  в режиме динамического управления. При разомкнутых выключателях  $Bn$  и  $Hз$  на индикатор выводится значение заданной скорости двигателя, а при включении вращения двигателя на индикатор — значение измеренной скорости двигателя. Статическая ошибка регулирования скорости отсутствует вследствие применения пропорционально-интегрального дискретного алгоритма управления, и скорость двигателя равна заданной, что позволяет с большой точностью задавать ее значение до пуска двигателя.

**Микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод.** Для питания низковольтных двигателей постоянного тока малой мощности наиболее целесообразно применение транзисторных широтно-импульсных преобразователей. Типовым решением является мостовая схема на силовых полевых транзисторах с изолированным затвором (MOSFET). Высокая частота широтно-импульсного преобразования обуславливает малые пульсации тока якоря двигателя, а работа транзисторов в режиме переключения обеспечивает их минимальный нагрев по сравнению с работой в линейном режиме. Для управления транзисторами моста выбран микроконтроллер PIC16F684, который идеально подходит для этих целей. Он имеет встроенные функции широтно-импульсной модуляции (ШИМ)-управления транзисторным мостом, токовую защиту в каждом периоде ШИМ, функции защиты от сквозных токов моста при реверсе двигателя, содержит флэш-па-

мять и встроенные средства внутрисхемного программирования, что облегчает отладку систем. Указанный микроконтроллер выпускается в 14-ножечном DIP корпусе. Упрощенная схема микропроцессорного бездатчикового транзисторного реверсивного привода постоянного тока приведена на рис. 4.

Силовая часть привода выполнена на мощных комплементарных полевых транзисторах  $VT2$ – $VT5$ . Транзисторы  $VT3$ ,  $VT5$  имеют входы управления логического уровня и управляются непосредственно микроконтроллером. Находящиеся под высоким потенциалом транзисторы  $VT2$ ,  $VT4$  подключены к управляющим выходам микроконтроллера через маломощные согласующие транзисторы  $VT1$ ,  $VT6$ . Направление вращения двигателя задается переключателями  $Bn$  и  $Hз$ .

Для регулирования оборотов двигателя применяется ШИМ-управление, в котором среднее значение напряжения, подаваемого на двигатель, определяет его обороты, при этом изменяется в соответствии со скважностью импульсов питания. По сигналу переключателя  $Bn$  включаются транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , а на затвор транзистора  $VT5$  подается сигнал ШИМ. В результате двигатель вращается в рабочем направлении с заданной скоростью. При реверсе включаются транзисторы  $VT3$ ,  $VT4$ ,  $VT6$ .

Как отмечено выше, ЭДС обмотки якоря двигателя можно измерить в момент, когда на якорь не подается питание и двигатель, вращаясь по инерции, работает в генераторном режиме. Отключение питания производится в каждом периоде ШИМ, а следовательно, измерять ЭДС теоретически можно с частотой ШИМ. Реально это возможно только при сравнительно низкой частоте ШИМ, поскольку электрическая цепь якоря двигателя имеет довольно значительную индуктивность. При отключении питающего напряжения

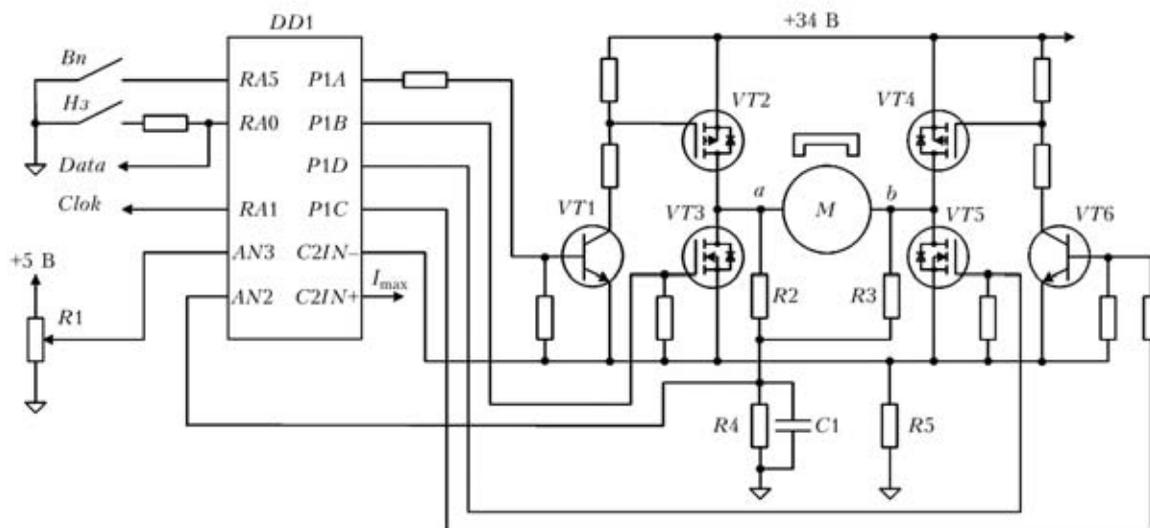


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема микропроцессорного бездатчикового реверсивного транзисторного привода



ток якоря начинает уменьшаться, что вызывает ЭДС самоиндукции, которая вычитается из ЭДС обмотки якоря. Если во время паузы питающего напряжения ток якоря уменьшается до нуля, то после этого на обмотке можно наблюдать ЭДС якоря. Таким образом, для измерения значений ЭДС двигателя с максимальной частотой, т. е. в каждом периоде ШИМ необходима относительно низкая ее частота, обеспечивающая прерывистый ток якоря двигателя. Кроме того, следует ограничить максимальный диапазон относительной длительности импульса ШИМ таким образом, чтобы длительность обязательной паузы ШИМ была достаточной для измерения ЭДС. В связи с этим применен метод периодического кратковременного прерывания питания двигателя при высокой частоте ШИМ.

Прерывания питания двигателя осуществляли в течение промежутка времени, составляющего приблизительно единицы миллисекунд, что достаточно для измерения и обработки значений ЭДС контроллером. Измеряемое значение ЭДС снимается с точек *a* или *b* моста (см. рис. 4) и подается на вход *AN2* (АЦП) микроконтроллера через делители *R2–R4*. На рис. 5 представлены осциллограммы ЭДС электродвигателя типа Д90 в периоды прерываний его питания. Это напряжение приведено к диапазону значений входного напряжения АЦП микроконтроллера (0...5 В).

Задание скорости двигателя осуществляется потенциометром *R1*, выходное напряжение которого подается на вход *AN3* (АЦП) микроконтроллера.

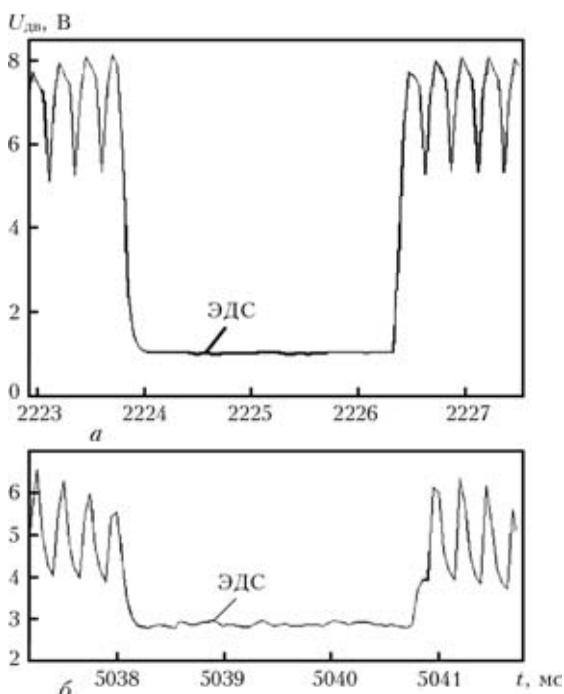


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на якоре электродвигателя при низкой (*a*) и высокой (*b*) скорости вращения

Цикл работы контроллера составляет 10 мс. При этом в течение 7,5 мс на транзисторы моста подается управление, в течение 2,5 мс транзисторы моста отключаются, и двигатель, вращаясь по инерции, работает в режиме генератора. За это время контроллер производит несколько измерений значений ЭДС, их усреднение и вычисление управляющих воздействий — длительности импульса ШИМ. Частоты ШИМ составляют 4 кГц.

С целью стабилизации скорости двигателя использован рекуррентный дискретный закон пропорционально-интегрального (ПИ) управления [6]. Для сокращения времени отработки программного уменьшения скорости отрицательное значение управляющего воздействия реализуется реверсом питающего напряжения двигателя путем соответствующего управления транзисторами моста.

На рис. 6 представлены переходные процессы привода с замкнутой обратной связью по ЭДС якоря двигателя при ступенчатом изменении задания оборотов. Как видно из рисунка, привод обрабатывает 30%-ные изменения задания скорости за 50...60 мс. Без обратной связи по скорости время разгона составляет 300 мс, а торможения — 750 мс.

Благодаря использованию ПИ-регулятора статическая ошибка регулирования скорости равна нулю при изменении как нагрузки двигателя, так и колебаний напряжения питающей сети. В результате диапазон регулирования составляет не менее 1:50, что более чем достаточно для сварочного оборудования.

Напряжение, пропорциональное току якоря, снимается с шунта *R5* и подается на инвертирующий вход *C2IN<sup>-</sup>* встроенного компаратора микроконтроллера. На неинвертирующий вход подается напряжение, пропорциональное заданному максимальному току якоря  $I_{max}$ . Если ток двигателя превышает  $I_{max}$ , питание двигателя отключается до следующего периода ШИМ. Таким образом осуществляется мгновенная защита транзисторов моста по току практически без дополнительных затрат на оборудование и программирование. В результате имеет место эффективное ограничение тока якоря во время переходных процессов при пуске, реверсе, резком изменении нагрузки двигателя и т. п.

Связь с цифровым индикатором скорость/задатчик осуществляется по последовательному интерфейсу  $I^2C$  путем передачи сигналов *Data* и *Clock* через выходы микроконтроллера *RA0* и *RA1*. Обновление информации на индикаторе происходит с интервалом 0,32 с. В режиме остановки на индикатор выводится заданное, а в режиме вращения — измеренное значение скорости, усредненное на интервале обновления информации.

Таким образом, для приводов нестационарных сварочных установок наибольшее распространение

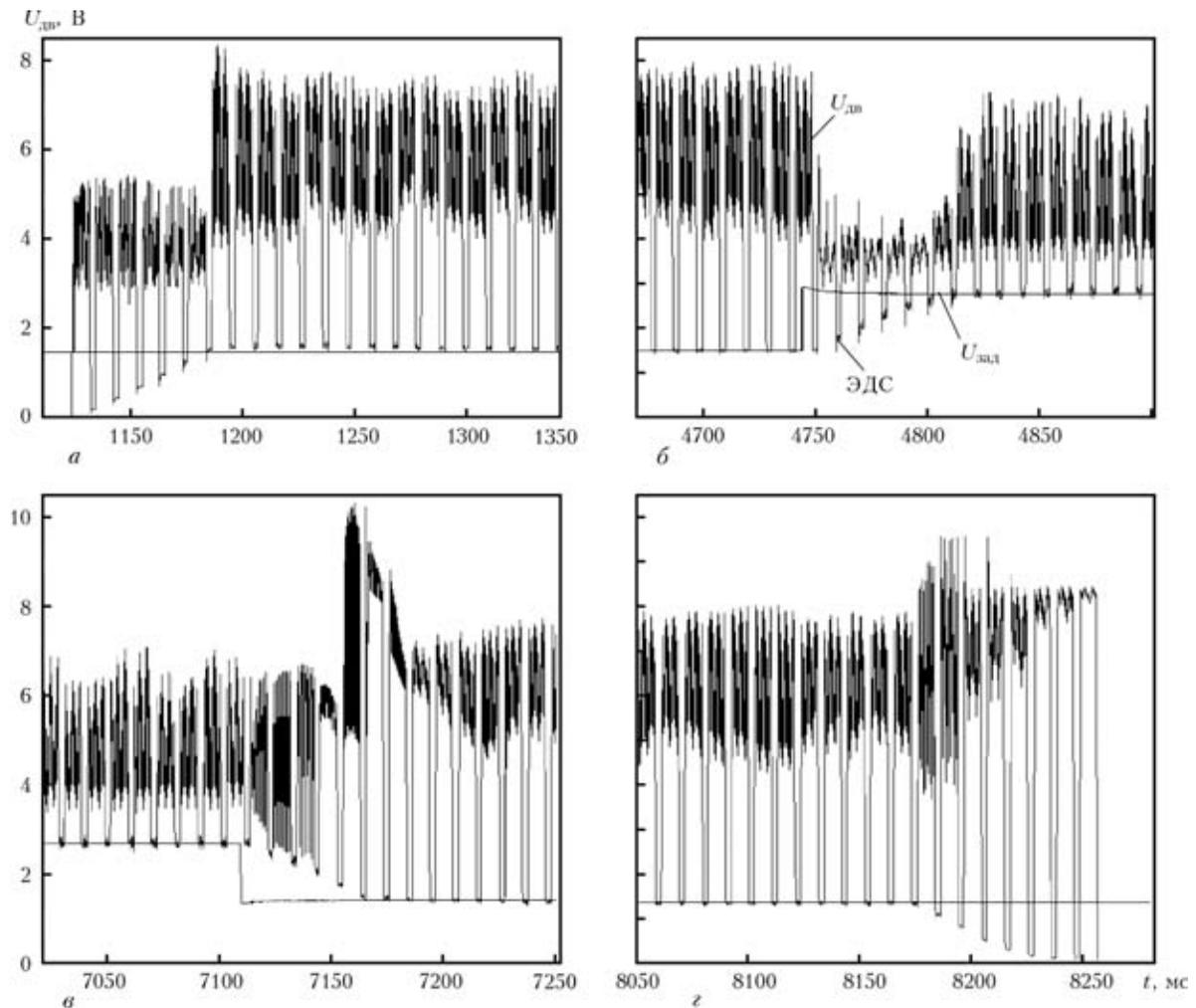


Рис. 6. Переходные процессы в замкнутой системе регулирования при пуске (а), ступенчатых увеличении (б) и уменьшении (в) задания скорости двигателя, а также при его остановке (з)

ние получили двигатели постоянного тока. Применение отрицательной обратной связи по скорости двигателя значительно улучшают стабильность привода, его статические и динамические характеристики. Использование ЭДС якоря двигателя в качестве сигнала отрицательной обратной связи по скорости существенно удешевляет и повышает надежность системы автоматического управления двигателем. Разработанный микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод отличается жесткими нагрузочными характеристиками, отсутствием коммутирующих контактов для реверса, высокой надежностью, малыми габаритами и стоимостью, возможностью точного задания скорости двигателя до его пуска.

Control schemes for reversing DC motors with a speed stabilised by the electromotive force are described. Microprocessor-based sensorless transistor drive was developed, characterised by constant loading characteristics, absence of switching contacts for a reverse gear, high reliability and possibility of precise setting of speed prior to starting the motor.

1. ГОСТ 12.2.007.8–75. Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности. — Введ. 01.01.78.
2. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
3. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Выща шк., 1986. — 296 с.
4. Ланкин Ю. Н., Масалов Ю. А., Байитрук Е. Н. Схема управления приводами сварочных установок // Автомат. сварка. — 2006. — № 7. — С. 57–59.
5. Low-cost bidirectional brushed DC motor control using the PIC16F684. AN 893 // www.microchip.com.
6. Пиотровский Л. М. Электрические машины: В 2 т. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — Т.1. — 512 с.
7. Изерман Р. Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 541 с.

Поступила в редакцию 20.10.2009



## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКА СПЛАВА СИСТЕМЫ Ni–Cr–Al–Y, ЛЕГИРОВАННОГО КРЕМНИЕМ, МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Е. А. АСТАХОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
И. В. КУДЬ, Л. С. ЛИХОДЕД, Д. П. ЗЯТКЕВИЧ, кандидаты техн. наук,  
М. С. ЯКОВЛЕВА, Л. И. ЕРЕМЕНКО, инженеры  
(Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины)

Исследовано твердофазное взаимодействие сплава Ni–Cr–Al–Y с кремнием при температуре до 1100 °С. Установлено, что для получения сплава Ni–Cr–Al–Y+Si целесообразно использовать в качестве одной из исходных интерметаллидных составляющих сплава механолегируемый кремнием никель, что позволяет избежать присутствия свободного кремния в сплаве и гарантирует равномерное распределение кремния по объему порошка.

*Ключевые слова:* детонационное напыление, порошки, жаростойкий сплав Ni–Cr–Al–Y, механическое легирование кремнием, твердофазное взаимодействие, фазовый состав, распределение элементов легирования

Жаропрочные сплавы на основе никеля широко используют для изготовления деталей, работающих в экстремальных условиях при воздействии высоких температур и агрессивных сред [1]. Разработка новых материалов защитных покрытий путем введения в состав стандартных сплавов легирующих добавок для повышения эксплуатационных характеристик таких, как жаро- и коррозионная стойкость весьма актуальна.

В соответствии с диаграммой зависимости жаро- и коррозионной стойкости покрытий от содержания в них хрома [2] выбранный для исследования сплав (состав, мас. %: 79,0 Ni; 15 Cr; 5,8 Al; 0,2 Y) относится к наиболее жаростойким и одним из путей повышения его функциональных характеристик жаро- и термостойкости является легирование активными добавками. Среди легирующих элементов (бор, магний, цирконий, гафний и др.) кремний упоминается не часто, хотя он должен играть важную роль как элемент покрытий, который при окислении образует прочную и плотную самопассивирующуюся оксидную пленку. Некоторые исследователи изучали влияние кремния на стойкость сплавов при повышенных температурах [3, 4], однако эти работы имеют противоречивый характер и не содержат обобщений относительно механизма защиты покрытий, на основании которых можно было бы выбрать количество легирующих добавок или соединений, содержащих необходимые элементы, и назначить способ их введения в сплав.

Цель настоящей работы — исследование твердофазного взаимодействия исходных компонен-

тов сплава Ni–Cr–Al–Y с кремнием в интервале эксплуатационных температур (до 1100 °С). При получении сплавов использован метод порошковой металлургии. Существует несколько способов введения легирующих примесей [5]. Кремний можно добавлять в исходную смесь порошков никеля, хрома и алюминия с последующими операциями порошковой металлургии (смешивание, размол или механоактивация, термообработка и др.) или сначала получить соединения кремния с одной или несколькими исходными составляющими с дальнейшим смешиванием с другими компонентами сплава. Способ легирования определяется технологическими особенностями последующих процессов. В данной работе исследованы несколько методов введения кремния.

Одной из разновидностей введения примеси кремния в сложный сплав на никелевой основе является его добавление в процессе получения порошка стандартного сплава совместно с оксидом иттрия. Оксид иттрия и кремний (до 4 мас. %) добавляется на стадии смешивания к смеси порошков Ni<sub>3</sub>Al и (Cr)Ni, предварительно полученных твердофазным синтезом в вакууме. Затем по технологической схеме, разработанной нами, при вакуумной термообработке следует ожидать прохождения диффузионных процессов взаимодействия между кремнием и основными фазами сплава Ni<sub>3</sub>Al и (Cr)Ni.

После вакуумной термообработки при температуре 1000 °С в течение 2 ч продукты взаимодействия были изучены с привлечением рентгеновского анализа и сканирующей электронной микроскопии. Согласно данным рентгеновского анализа синтезированный материал состоит из смеси основных фаз — Ni<sub>3</sub>Al, (Cr)Ni и кремния, который находится в свободном состоянии. Дан-

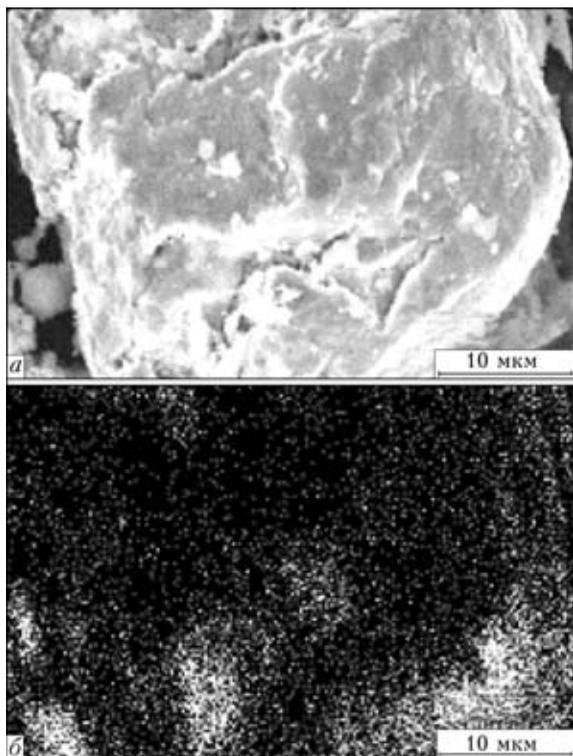


Рис. 1. Микроструктура частицы синтезированного порошка ИПМ (а) и распределение кремния в ней (в отраженных электронах) (б)

ные сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного метода, представленные на рис. 1 и в табл. 1, свидетельствуют о неравномерном распределении кремния по объему. Как видно, максимальное количество кремния сконцентрировано на поверхности частиц.

Элементный состав полученного порошка максимально приближен к составу выбранного стандартного порошка.

Исследования показали, что введение легирующей примеси на стадии смешивания предварительно синтезированных порошков  $Ni_3Al$ ,  $Ni(Cr)$  и  $Y_2O_3$  с последующей термообработкой в вакууме при температуре  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  не обеспечивает полного прохождения диффузионных процессов и получения продуктов без свободного кремния. Это не дает возможности полностью воспроизвести элементный состав материала в покрытиях, получаемых детонационным напылением вследствие фракционирования. В связи с упомянутым выше, а также с учетом данных о довольно значительной растворимости кремния в никеле (5 %) при комнатной температуре с образованием твердого раствора целесообразно было использовать в качестве одного из исходных компонентов сплава никель, легированный в процессе механосинтеза, кремнием. В работе [6] этот раствор идентифицируют как  $\alpha$ -раствор, а в работе [7] — как  $\gamma$ -раствор. В наших исследованиях обозначим его как  $\gamma$ -Ni по аналогии с твердыми растворами аустенитного класса.

Таблица 1. Химический состав порошка сплава Ni-Cr-Al-Y, мас. %

Изготовитель порошка	O	Al	Si	Cr	Ni	Y
ИПМ	0,15	5,38	3,60	14,90	76,15	0,21
Коммерческий (Индия)	0	11,54	0,00	31,91	55,73	0,82

Исследование процесса твердофазного взаимодействия никеля и кремния при механосинтезе (механолегировании) включало оценку процесса от технологических факторов: силовой нагрузки (соотношения массы порошка к массе размольных тел) и продолжительности процесса.

Для изучения механосинтеза смесь порошков никеля и кремния (в расчете на получение 4 мас. % Si в никеле) предварительно смешивали в планетарной мельнице в реверсном режиме в течение 2 ч в спирте для гомогенизации реакционной смеси и после сушки подвергали высокоэнергетической обработке.

Механосинтез представляет собой высокоэнергетическое дробление, в процессе которого в твердом теле возникают внутренние напряжения, что вызывает деформацию межатомных связей, формирование дефектов кристаллического строения, возбуждение электронной подсистемы кристалла. При этом в каждом конкретном случае преобладают определенные каналы релаксации накопленной энергии. Так, при формировании новых граничных поверхностей энергетические затраты для перестройки структуры минимальны, а атомы, находящиеся в поверхностном слое, имеют большой запас избыточной энергии, что создает благоприятные условия для химических превращений контактирующих веществ.

Процесс проведен в импульсном режиме, что способствовало изменению энергии кристаллической решетки за счет формирования различных дефектов структуры (дислокаций, вакансий), в результате чего аккумулированная в системе энергия при определенных технологических параметрах стимулирует диффузионные процессы.

Продукты механосинтеза исследованы при помощи рентгенофазового анализа (табл. 2, рис. 2).

Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о значительном влиянии энергонапряженности процесса, которая при постоянной скорости вращения реактора является функцией технологических параметров. При силовой нагрузке 1:5 независимо от продолжительности процесса продукты размола являются смесью исходных компонентов.

Незначительное изменение характера дифракционных максимумов никеля и кремния свидетельствует о протекании первой стадии деформации порошка (рис. 2, кривая 1). Усиление силовой нагрузки до 1:10 сопровождается частичной аморфизацией кремния, на что указывает резкое



**Таблица 2.** Характеристики продуктов механосинтеза в системе Ni-Si

Силовая нагрузка — соотношение масс порошок:шары	Продолжительность, мин	Фазовый состав	Период решетки никеля, нм
1:5	30	Ni, Si	0,352
	60	Ni, Si	0,353
1:10	30	Ni, Si	0,352
	60	$\gamma$ -Ni, Si	0,350
1:20	30	$\gamma$ -Ni, Si	0,349
	60	$\gamma$ -Ni	0,347

уменьшение и размытость его дифракционных максимумов. Увеличение дефектности и напряженности никеля обнаруживается в расширении на больших углах его дифракционных отображений (рис. 2, кривая 2). Увеличение продолжительности процесса до 60 мин приводит к началу образования твердого раствора кремния в никеле ( $\gamma$ -Ni), о чем свидетельствует изменение периода решетки никеля.

Силовая нагрузка 1:20 сопровождается еще более заметной интенсификацией процесса. Согласно данным рентгеновского анализа изменяется не только количественный состав продуктов взаимодействия, но и наблюдается искривление картины дифракционных максимумов  $\gamma$ -Ni, что свидетельствует о напряженном и неравновесном состоянии системы (рис. 2, кривая 3). При продолжительности процесса 60 мин продуктом механосинтеза является твердый раствор кремния в никеле.

Таким образом, проведенное исследование позволило установить технологический режим механосинтеза, продуктом которого является порошок твердого раствора кремния в никеле ( $\gamma$ -Ni).

Согласно технологическому процессу получение порошка сплава Ni-Cr-Al-Y+Si, который предусматривает использование после низкотемпературного твердофазного синтеза индивидуальных

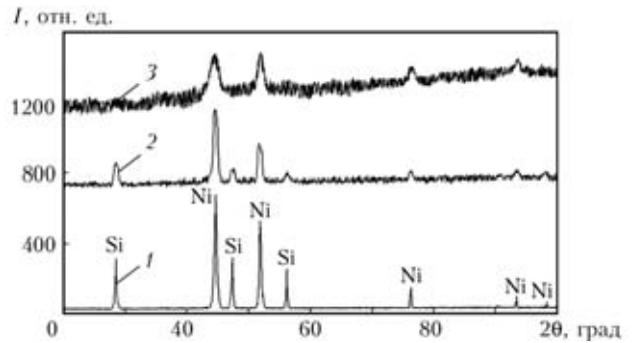


Рис. 2. Дифрактограммы продуктов механосинтеза в системе Ni-Si в зависимости от силовой нагрузки при продолжительности процесса 60 мин: 1 — 1:5; 2 — 1:10; 3 — 1:20

интерметаллидов Ni<sub>3</sub>Al и Ni(Cr) с последующим их смешиванием с оксидом иттрия, грануляцией и термообработкой в вакууме. На стадии получения порошков интерметаллидов в качестве одного из исходных компонентов используется механосинтезированный порошок твердого раствора кремния в никеле. Особое внимание уделено изучению влияния легированного никеля на температурно-временные режимы синтеза интерметаллидных фаз Ni<sub>3</sub>Al, Ni(Cr).

Данные рентгеновского анализа синтезированных в вакууме интерметаллидов Ni<sub>3</sub>Al и Ni(Cr), которые являются основой сплава Ni-Cr-Al-Y+Si, указывают на отсутствие в них свободного кремния.

Фазовый, элементный состав и морфология полученного порошка определена методами рентгеновского анализа, сканирующей электронной микроскопии с использованием энергодисперсионного анализа.

Как видно из рис. 3, а полученный порошок состоит из равноосных частиц, средний размер которых составляет примерно 60 мкм, что отвечает требованиям, предъявленным к порошкам для детонационного напыления.

Микрорентгеновский анализ экспериментально полученного порошка (рис. 4, а, табл. 3) под-

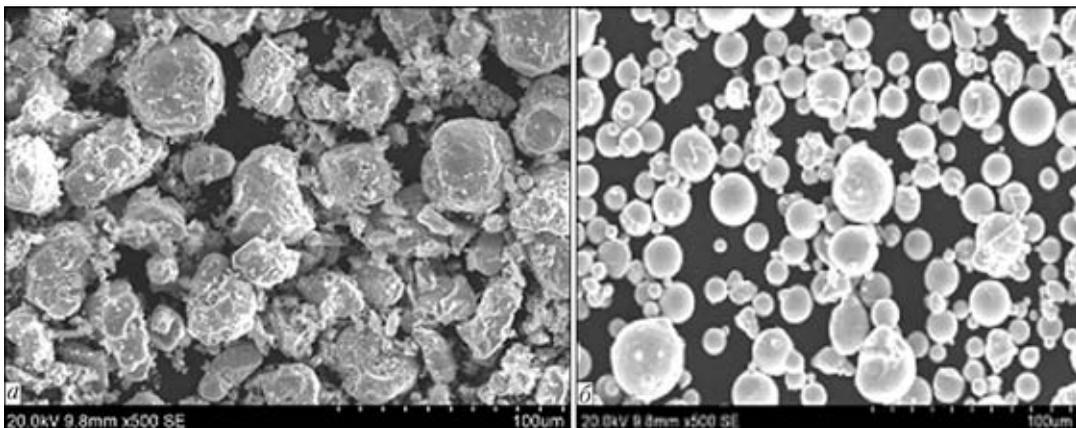


Рис. 3. Морфология порошков, полученных в ИПМ (а) и на фирме «Stark» (б)



Таблица 3. Химический состав порошков, мас. %

Изготовитель порошка	O	Al	Si	Cr	Ni	Y
ИПМ	0,15	5,38	2,6	15,4	76,26	0,21
Фирма «Stark»	—	9,54	—	21,91	67,73	0,82

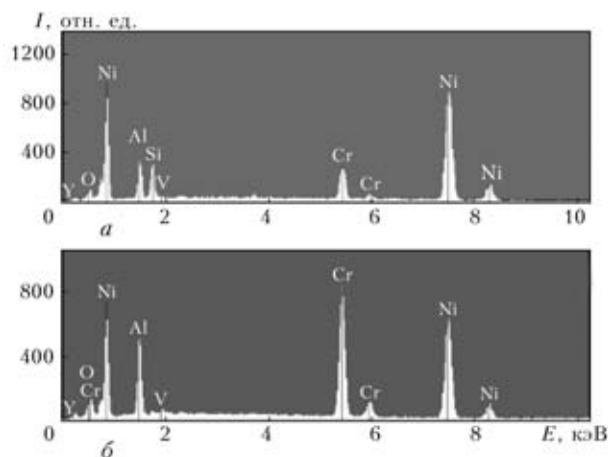


Рис. 4. Элементный состав порошков, полученных в ИПМ (Ni–Cr–Al–Y+Si) (а) и на фирме «Stark» (Ni–Cr–Al–Y) (б)

твердил присутствие в нем кремния. Энергодисперсионное сканирование полученного порошка сплава Ni–Cr–Al–Y, легированного кремнием, указывает на равномерность распределения всех элементов по объему частицы (рис. 5).

Таким образом, проведенная работа по оценке твердофазного взаимодействия исходных компонентов сплава Ni–Cr–Al–Y с кремнием в интервалах эксплуатационных температур (до 1100 °С) позволила установить, что непосредственное легирование кремнием интерметаллидных составляющих Ni<sub>3</sub>Al и Ni(Cr) сплава Ni–Cr–Al–Y при термообработке в вакууме при температуре 1100 °С приводит к нежелательному присутствию свободного кремния в продуктах термофазного взаимодействия, а также к неравномерному распределению его в сплаве. При получении порошков сплава Ni–Cr–Al–Y–Si целесообразно использовать в качестве одной из исходных интерметаллидных составляющих сплава механолегированный кремнием никель, что позволяет избежать нежелательного присутствия свободного кремния в сплаве и

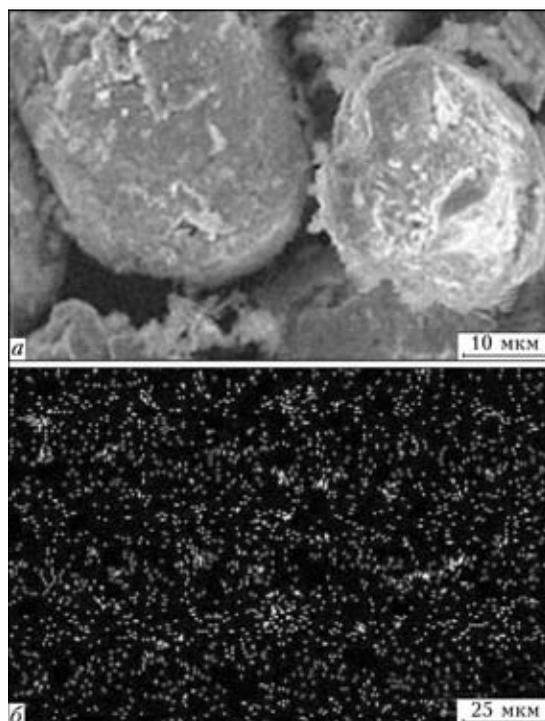


Рис. 5. Микроструктура частиц порошка из механолегированного сплава Ni–Cr–Al–Y (а) и распределение в них кремния (в отраженных электронах) (б)

гарантирует равномерное распределение кремния в объеме порошка.

1. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля. — М.: Металлургия, 1995. — Кн. 1. — 384 с.
2. *Improvement of oxidation resistance of NiCrAlY coatings by application of CrN or CrON interlayer* / W. Z. Li, Y. Yao, Q. M. Wang, X. Jiang et al. // *J. Mater. Res.* — 2008. — **23**, № 2. — P. 341–352.
3. *Brodin H., Eskner M. The influence of oxidation on mechanical and fracture behavior of an air plasma-sprayed NiCoCrAlY bondcoat* // *Surface Coat. Technol.* — 2004. — **187**. — P. 113–121.
4. *Thermal stability of phases in a NiCoCrAlY coating alloy* / J. J. Liang, H. Wei, G. C. Hou et al. // *J. Mater. Res.* — 2008. — **23**, № 8. — P. 2264–2274.
5. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля. — М.: Металлургия, 1995. — Кн. 2. — 384 с.
6. *Самсонов Г. В., Дворина Л. А., Рудь Б. М. Силициды.* — М.: Металлургия, 1979. — 271 с.
7. *Шанк Ф. Структура двойных сплавов.* — М.: Металлургия, 1973. — 760 с.

The influence of solid-phase interaction of Ni–Cr–Al–Y alloy with silicon at up to 1100 °С temperatures was studied. It is established that to produce Ni–Cr–Al–Y+Si alloy it is rational to use nickel mechanically alloyed with silicon as one of the initial intermetallic components of the alloy, thus preventing presence of free silicon in the alloy and guaranteeing a uniform distribution of silicon through powder volume.

Поступила в редакцию 16.06.2009



## СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ГАЗОТУРБОСТРОЕНИИ (Обзор)\*

**В. В. РОМАНОВ**, канд. техн. наук, **Ю. В. БУТЕНКО**, инж.  
(ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект», г. Николаев)

Рассмотрены современные разработки газотурбинных установок и промышленное применение прогрессивных сварочных и родственных технологий — электронно-лучевой сварки, лазерной резки, вакуумной пайки, наплавки и др.

*Ключевые слова:* технологии сварки, газотурбинные установки, новые материалы, дуговая сварка, лазерная резка, электронно-лучевая сварка, электрошлаковая сварка, плазменно-порошковая наплавка, вакуумная пайка

Южный турбинный завод (ныне ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект») создан в начале 1950-х годов с целью разработки и серийного производства газотурбинной техники для боевых кораблей Военно-Морского Флота СССР. В начале 1979 г. предприятием было освоено серийное производство газовых турбин для перекачки природного газа и выработки электроэнергии на передвижных и стационарных электростанциях.

В ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» накоплен огромный опыт создания газотурбинных установок (ГТУ) различного назначения — для привода компрессоров природного газа, энергетики и судовых энергетических установок.

За более чем пятидесятилетнее существование предприятием в конструкторском бюро разработаны 56 типов и модификаций газотурбинных двигателей (ГТД), 38 типов различных редукторных передач, на базе которых созданы более 70 типов газотурбинных агрегатов, которые находились и находятся на вооружении военно-морских сил стран СНГ и ряда стран дальнего зарубежья. Изготовлено свыше 1700 судовых ГТД, которыми к началу 1990-х годов оснащено около 65 % надводных кораблей Военно-Морского Флота СССР. Общая мощность установленных на судах двигателей достигает 17 млн л. с., а их наработка — 3 млн ч.

В настоящее время в эксплуатации на компрессорных станциях находится более 800 ГТУ производства ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект», суммарная наработка которых составляет более 75 млн ч. Предприятие продолжает активно ра-

ботать в направлении совершенствования существующих и создания перспективных ГТУ для газоперекачивающих агрегатов. Одним из перспективных проектов стало создание ГТУ регенеративного цикла номинальной мощностью 16 МВт с КПД более 40 % для привода газоперекачивающих агрегатов.

ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» активно работает над созданием ГТД промышленного типа для энергетики. Отличительными конструктивными особенностями таких двигателей являются двухопорная конструкция ротора, отсутствие газодинамически обособленной (свободной) турбины генератора, высокая (до 500...550 °С) температура газов на выходе из двигателя, возможность ее поддержания на режиме частичной нагрузки за счет регулирования расхода воздуха на входе в двигатель.

В ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» создана энергетическая ГТУ промышленного типа ГТЭ-110 номинальной мощностью 110 МВт с КПД 36 %. На базе этой установки разработаны проекты парогазовых установок (ПГУ) номинальной мощностью 160 и 325 МВт соответственно с КПД 50,2 и 51,5 %.

Изготовлены образцы энергетических установок ГТЭ-45(60) и UGT5000 номинальной мощностью соответственно 60 и 5 МВт, установка ГТЭ-45(60) предназначена для использования в «большой» энергетике в составе ПГУ, а UGT5000 — в составе когенерационных установок.

По сравнению с разработанными ранее установкой UGT5000 имеет ряд принципиальных отличий. Поэтому конструкторы, технологи и производственники решают вопросы, с которыми ранее никогда не сталкивались.

Для изготовления современных ГТД (рис. 1) используют различные материалы — низко- и высоколегированные (жаростойкие и жаропрочные) стали, титановые сплавы, никелевые деформируемые и литейные дисперсионно-твердеющие сплавы. Применение высоколегированных жаростойких и жаропрочных сплавов, а также широкое использование при изготовлении двигателей сва-

\*Публикуется по материалам доклада, представленного на научно-технической конференции, состоявшейся в Национальном университете кораблестроения им. Адмирала Макарова 14–17 окт. 2009 г.

рочных и родственных технологий обеспечили получение высоких технических характеристик ГТД при минимальных массогабаритных характеристиках.

ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» освоены современные технологии лазерной резки, электронно-лучевой сварки (ЭЛС) и электрошлаковой сварки (ЭШС), наплавки, вакуумной пайки и других процессов.

Лазерная резка тонколистового (до 12 мм) материала осуществляется лазерным комплексом «Байстар-3015-3» фирмы «Байстрионик», который состоит из CO<sub>2</sub>-лазера выходной мощностью 3 кВт с высокочастотной накачкой, портала с высокоскоростными приводами, двух рабочих сменных столов для листов размером 1,5×3,0 м, компьютерного блока управления процессом резки и слежения за составом рабочей смеси, блока газовых баллонов для создания рабочей смеси, блока охлаждения лазера с автоматическим поддержанием заданной температуры, блока отсоса из зоны резки аэрозолей и возвращения очищенного воздуха обратно в помещение, блока загрузки листов и снятия вырезанных деталей; имеется также блок вырезки фигурных отверстий на трубах диаметром до 200 мм.

Для генерирования лазерного излучения используют газы высшего сорта — азот технический, диоксид углерода и гелий, а в качестве режущего газа — кислород. При этом обрабатываемые листы должны быть плоскими, гладкими и чистыми.

В настоящее время номенклатура вырезаемых деталей насчитывает много тысяч наименований. Вырезанные лазером детали не требуют механической обработки.

Наиболее широкое распространение при изготовлении статорных и роторных узлов получила ЭЛС. Это обусловлено прежде всего тем, что такой способ сварки сочетает в себе высококонцентрированный источник нагрева и наиболее совершенное средство защиты расплавленного металла — вакуум. Указанные особенности ЭЛС позволяют сваривать с минимальными деформациями легированные, аустенитные и мартенситные стали, никелевые и титановые сплавы толщиной до 100 мм без разделки кромок и использования присадочной проволоки.

Участки ЭЛС созданы на опытно и серийном производстве ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» при сотрудничестве с ИЭС им. Е. О. Патона. Вакуумные камеры и механизмы перемещения разработаны и изготовлены силами предприятия. Для генерации электронного пучка используют энергоблоки У-250А, ЭЛА-15, ЭЛА-30, ЭЛА-60/60, ЭЛА-60Б. Создан типоразмерный ряд установок, позволяющих обеспечить сварку статорных узлов от пакетов лопаток до крупногабарит-

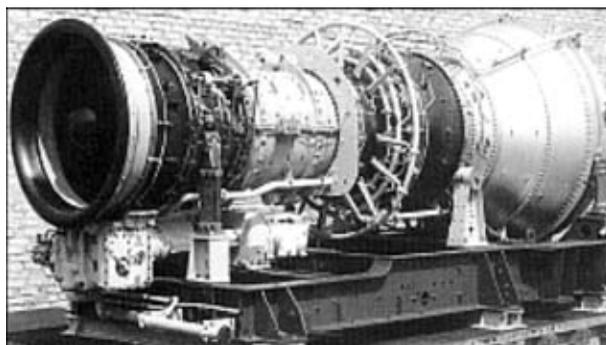


Рис. 1. Внешний вид ГТД ДН-80

ных узлов диаметром 3,5 м, а также валов и барабанов роторов.

Участок серийного производства оснащен устройством «Проток-10» для размагничивания узлов перед сваркой и необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. Указанные участки расположены в непосредственной близости друг от друга, что позволяет оперативно решать возникающие проблемы.

В настоящее время с помощью ЭЛС выполняют около 70 % объема сварочных работ на узлах ГТД, без нее уже немислимо изготовление этих двигателей. Это позволило проектантам газовых турбин разработать и внедрить в серийное производство ряд принципиально новых сварочных конструкций — роторов компрессоров низкого (КНД) и высокого (КВД) давлений, шестерен центральных приводов, валов КВД из материалов ВТ31, ВТ8, ВТ9, ЭП 609, ЭП 517.

Применение новых материалов (ЭП 609Ш, ЭП 866, ЭП 517) для изготовления узлов с большой толщиной стенок потребовало коренного пересмотра технологических приемов ЭЛС. Совместно с ИЭС им. Е. О. Патона проведены работы по созданию, освоению и внедрению систем управления лучом (СУ-65, СУ-29, СУ-259). Внедрен новый технологический процесс — ЭЛС с горизонтально расположенной пушкой с вращением электронного пучка по заданной программе. Все это позволило решить проблему сварки узлов с толщиной стенок до 70 мм.

Жаровые трубы из сплава ЭИ 602 двигателей второго поколения (толщина стенки  $\delta = 2,5$  мм) и из сплава ВЖ 98 двигателей третьего поколения ( $\delta = 1,5$  мм) являются одними из самых «напряженных» элементов, поскольку работают в условиях воздействия высоких термических и вибрационных нагрузок и определяют ресурс жарового узла. Попытки выполнить соединения с помощью аргонодуговой сварки (АДС) к успеху не привели — в корне шва образовывалась хрупкая пленка, способствующая возникновению продольных трещин. Исследования нахлесточных соединений тонкостенных обечаек, полученных ЭЛС, подт-



Рис. 2. Макрошлиф нахлесточного соединения обечаяк жаровых труб, полученного ЭЛС

вердили эффективность этой технологии. Разработан способ ЭЛС жаровых труб с применением развертки электронного пучка специально созданным генератором. Путем подбора амплитуды, частоты и скважности колебаний электронного пучка удалось получить равномерное проплавление в нахлесточном соединении обечаяк жаровой трубы шириной до 8 мм (рис. 2). На рис. 3 представлен внешний вид жаровой трубы, изготовленной с применением ЭЛС.

В структуре металла границы сплавления обечаяк оксидные пленки и другие дефекты отсутствуют. На макрошлифах поперечного сечения шва видно, что при ЭЛС длина зоны термического влияния составляет 1,5...2,5 мм, тогда как при АДС она равна 10...12 мм. Ширина зоны теплового контакта нахлесточного соединения увеличилась в 2...3 раза. ЭЛС жаровых труб позволила продлить срок службы изделий в 4...6 раз.

Сопловые лопатки ГТД работают в особо тяжелых условиях и испытывают воздействия термических и динамических нагрузок, изгибающего и крутящего моментов, а также солевой и сульфидной коррозии, они подвержены также эрозионному износу. Получить качественные соединения сплавов ЭП 539ЛМ, ЧС 70Л, ЭК 9Л, ЧС 104, применяемых для сопловых лопаток корабельных газовых турбин, с помощью дуговых способов сварки не представлялось возможным в связи с низкой технологической прочностью этих сплавов.

На основании результатов экспериментальных исследований определены пути повышения технологической прочности и основные условия получения бездефектных сварных швов пакетов лопаток сопловых аппаратов из сплавов ЭП 539ЛМ, ЭК 9Л и других



Рис. 3. Внешний вид жаровой трубы (сплав ЭИ 602,  $\delta = 2,5$  мм) с пятью кольцевыми швами, выполненными ЭЛС

материалов, выполненных способом ЭЛС на форсированных режимах с применением модуляции электронного пучка (рис. 4). Проведенные на двигателях испытания показали высокую надежность сварных соединений пакетов лопаток сопловых аппаратов.

Роторы компрессоров КНД и КВД с частотой вращения 20000 об/мин при высоком давлении являются особо ответственными узлами компрессоров. Сварная конструкция ротора без закрытых полостей в осевом направлении, в которой диски соединены не штифтами, а ЭЛС, более надежна в эксплуатации и технологична в изготовлении. Поскольку диски на сварку поступают с окончательно обработанными пазами, то трудность изготовления ротора заключается в получении после сварки минимального радиального и торцевого биения узла, не превышающего 0,3 мм.

Для получения узла требуемых размеров сварку и последующую термофиксацию роторов осу-

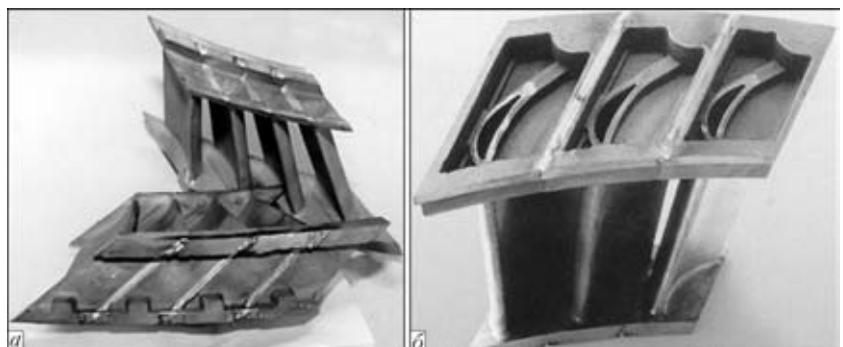


Рис. 4. Пакеты лопаток из сплава ЭК 9Л сопловых аппаратов I ступени после ЭЛС по малой полке (а) и II ступени после ЭЛС по большой полке (б)

ществляют в специально разработанных приспособлениях, которые жестко фиксируют каждый диск по внутренним диаметрам полотен. Соединение дисков выполняют на центрирующей подложке толщиной 5...8 мм. После сварки узел подвергают термообработке для снятия внутренних напряжений и улучшения пластических свойств сварных соединений, а подложку срезают для удаления дефектов в корне шва.

Создание цельносварных роторов газовых турбин из титановых сплавов ВТ31, ВТ8, ВТ9 и сплавов ЭП 609, ЭП 517 способом ЭЛС (рис. 5) является существенным достижением сварочной техники. Испытания сварных роторов, проведенные на стендах и двигателях, показали их высокую работоспособность.

Для изготовления некоторых узлов ГТД необходимы материалы, сочетающие высокую прочность и пластичность, жаропрочность и жаростойкость, горячую твердость и термостойкость в условиях эксплуатации, близких к предельным. Объединить все эти требования в одном материале невозможно. Поэтому разрабатывают изделия, отдельные части которых состоят из различных материалов, наиболее соответствующих условиям эксплуатации. Соединить эти разнородные материалы в одном изделии можно с использованием технологии вакуумной пайки либо пайки в муфеле с проточным аргоном.

ГП НПКП «Зоря»–«Машпроект» освоена технология вакуумной пайки воздушных и топливных фильтров, клеммников, сотовых и металлокерамических уплотнителей, пакетов лопаток спрямляющих аппаратов, обойм, корпусов воспламенителей, штуцеров горелочных устройств и др. Отличные результаты получены при исправлении дефектов литья из жаропрочных никелевых сплавов пайкой, технология которой разработана совместно с Национальным университетом кораблестроения им. Адмирала Макарова (рис. 6).

В производстве используют высокотемпературный порошковый припой ВПр11-40Н и припой собственного изготовления НС-12, НС-12А. Кроме порошковых припоев, применяют фольгированные припои ВПр-4 и ВПр-7. В зависимости от типа припоя температура пайки составляет 1050...1180 °С.

Как в основном, так и в опытном производстве созданы специализированные участки, обеспеченные необходимым вакуумным оборудованием, приспособлениями и оснасткой.

В газотурбостроении необходимо сваривать также детали большого сечения. Например, кольца спрямляющих аппаратов, фланцы КНД, КВД изготавливают из сталей мартенситно-ферритного класса с использованием кованных полуколец с площадью поперечного сечения до 14500 мм<sup>2</sup>.

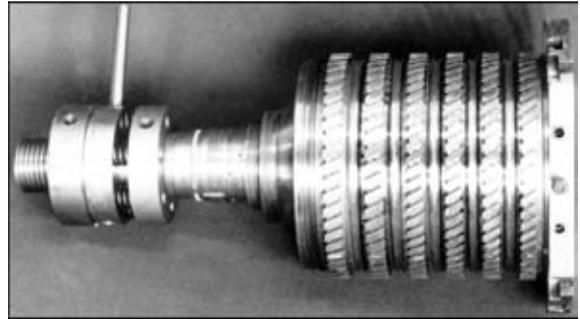


Рис. 5. Внешний вид цельносварного ротора КВД из титанового сплава ВТ31

Практически все узлы, в которых используются кольца, работают при высоких нагрузках и повышенных температурах, поэтому сварные соединения полуколец должны иметь эксплуатационные свойства не ниже уровня основного материала.

Для изготовления полуколец из сталей 20Х13, ЭП 609Ш, ЭИ 961Ш и других марок применяли механизированную сварку в диоксиде углерода ванным способом, однако неоднократные исправления дефектов сварных швов увеличивают затраты на изготовление детали. С целью повышения качества сварки кованных полуколец на предприятии внедрена технология ЭШС. Некоторые особенности ЭШС не позволяли ранее применять данную технологию, поскольку необходимо было создавать технологический «карман» для начала электрошлакового процесса, устанавливать выводные пластины для наварки «прибыли» в конце сварки, применять медные водоохлаждаемые пластины для формирования боковых поверхностей шва.

В результате поисковых работ подготовку деталей к сварке удалось упростить. Введение предварительного подогрева до 500...600 °С позволяет перейти с дугового процесса на электрошлаковый уже на втором проходе, поэтому при наличии припусков необходимость в технологическом кармане отпала.

Усадочная рыхлость в конце сварки достигнута благодаря операции, аналогичной заварке кратера при дуговой сварке. На завершающем этапе останавливается движение сварочной головки, плавно снижаются до нуля сварочный ток и подача проволоки. Таким образом, в наварке «прибыли» нет необходимости.

Вместо медных формирующих пластин, требующих в каждом конкретном случае подгонки свариваемых кромок, используют керамические на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такая керамика выдерживает температуру жидкой ванны и не переходит в шов благодаря наличию тонкого слоя шлака между ней и металлом жидкой ванны. Легкая обрабатываемость керамических пластин и возможность



Рис. 6. Внешний вид деталей и изделий, полученных пайкой: *а* — воздушные и топливные фильтры, клеммники датчика; *б* — лопатки сопловых аппаратов, обоймы поворотных лопаток, корпуса воспламенителей; *в* — пакеты и лопатки сопловых аппаратов после исправления поверхностных дефектов литья; *г* — сотовые и металлокерамические уплотнители

приклеивать их в зоне стыка смесью жидкого стекла с глиноземом делают этот материал удобным заменителем медных пластин, особенно при их большой разнотолщинности.

Сварку мартенситно-ферритных сталей выполняют сварочной проволокой ЭП 609Ш диаметром 4 мм с использованием флюса АН-348А. Химический состав металла шва соответствует требованиям ТУ 14-1-2412-78, механические свойства металла шва и ЗТВ выше аналогичных показателей основного металла.

Ресурс двигателя определяется продолжительностью работы наиболее «ослабленного» узла или детали. Узлы и детали высокотемпературного тракта работают в тяжелых условиях. К числу наиболее нагруженных деталей, определяющих ресурс современных ГТД, относятся рабочие лопатки турбины.

Для рабочих лопаток ГТД в основном применяют жаропрочные сплавы ЧС 70, ЧС 88ВИ, ЧС 88У-ВИ на основе никеля, содержащие хром, вольфрам, молибден, титан, алюминий, бор и другие элементы. Высокая жаропрочность указанных сплавов, обусловленная наличием сложного легированного твердого раствора и максимальным содержанием упрочняющей фазы, сочетается с их удовлетворительной технологичностью. Жаропрочные свойства сплава в значительной степени зависят от его структурного состояния, размера зерна, формы и дисперсности упрочняющих фаз. В процессе эксплуатации контактные поверхности бандажных полок и торцов рабочих лопаток изнашиваются. Уменьшение высоты лопаток способствует осевому перетеканию газа, при этом КПД двигателей снижается на 1,5...3,5%. Появление выработки приводит к образованию зазоров и росту уровня вибрационных нагрузок, что может вызвать поломку лопатки и выход из строя всего двигателя. Срок эксплуатации рабочих лопаток оп-

ределяется степенью износа контактных поверхностей бандажных полок и торцов. Однако несмотря на износ перо лопатки и замок сохраняют свою работоспособность и при упрочнении могут выдержать 3–4 срока эксплуатации. Кроме того, изношенные ранее упрочненные поверхности можно восстанавливать несколько раз.

Согласно существовавшей ранее технологии упрочнение торцов и бандажных полок рабочих лопаток ГТД выполняли наплавкой стеллита дугой в среде аргона неплавящимся электродом. Главными недостатками этой технологии были образование трещин в зоне наплавки (стеллит-основной металл) и неравномерность распределения твердости наплавленного стеллита по площади торца либо бандажной полки лопатки.

По новой технологии из пластифицированного жаропрочного материала КБНХЛ-2 изготавливают электроды трапецеидальной формы (3×2×2×260 мм) в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16-ИЗ. Наплавку ими осуществляют с помощью кислородно-ацетиленового пламени, используя ручную горелку ГО2 (наконечник № 2) и флюс ПВ-200. Наплавляют торцы рабочих лопаток из сплавов ЧС 70, ЧС 88ВИ, ЧС 88У-ВИ.

Кислородно-ацетиленовая наплавка обеспечивает высокое качество металла без внешних и внутренних дефектов со стабильной твердостью *HRC* 60 по всей площади торца либо бандажной полки рабочей лопатки. В настоящее время пластифицированную смесь жаростойкого материала КБНХЛ-2 изготавливают на предприятии.

Внедрение технологии упрочнения торцов и бандажных полок рабочих лопаток ГТД кислородно-ацетиленовой наплавкой жаростойкого материала КБНХЛ-2 позволило исключить брак, обусловленный возникновением трещин и других дефектов. С помощью данной технологии изготовлено более 180 комплектов электродов и про-

изведено упрочнение торцов и бандажных полок более чем на 1000 рабочих лопаток.

Конструкция ГТД предусматривает крепление жаровых труб фиксаторами. Большинство фиксаторов изготавливают из мартенситно-ферритных сталей 14X17H2 и ЭИ 961, а для новых и более мощных двигателей (например, ДН-80) — из аустенитного сплава на никелевой основе ЭП 648.

Для повышения износостойкости цилиндрические рабочие поверхности фиксаторов наплавляют стеллитом. Выбор материала для наплавки обусловлен высокой температурой эксплуатации деталей (450...600 °С), а также наличием значительных контактных нагрузок на эти поверхности. Основные требования, предъявляемые к наплавленному слою, — это отсутствие трещин (ЛЮМ-А контроль) и сложность наплавки ( $HRC \geq 40$ ).

Ранее на заводе наплавку осуществляли ручной АДС литыми прутками диаметром 3...4 мм. Однако этой технологии присущи серьезные недостатки. Во-первых, при наплавке сталей 14X17H2 и ЭИ 961 часто образуются продольные трещины по всей длине наплавки, переходящие в основной металл. У стеллита и мартенситно-ферритной стали (например, 14X17H2) различные значения термического коэффициента линейного расширения, поэтому при остывании наплавленной детали возникают высокие напряжения, а если в наплавке имеют место поры и включения, то они становятся очагами зарождения трещин. Во-вторых, наплавку деталей выполняют в два слоя для обеспечения требуемой твердости наплавленного слоя, поскольку при АДС происходит интенсивное перемешивание стеллита с основным металлом, в результате чего твердость первого слоя не превышает  $HRC 32...35$ . Наплавка в два слоя приводит к перерасходу дорогостоящего

стеллита и увеличению трудоемкости изготовления деталей.

В связи с этим взамен аргонодуговой была применена плазменно-порошковая наплавка цилиндрических поверхностей фиксаторов труб на установке УПМ-150Д («Плазма-Мастер Ltd.»). Наплавку осуществляют высокотемпературной сжатой дугой, получаемой в плазматроне с неплавящимся электродом. Диапазон регулирования тока основной дуги составлял 25...150 А. Присадочным материалом является порошок стеллита марки Stellite 12, химический состав которого идентичен стеллиту ПРВ-ВЗКР. В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газа используют аргон. Конструкция питателя барабанного типа обеспечивает равномерную и строго дозированную подачу порошка. При плазменно-порошковой наплавке фиксаторов диаметром от 8 до 27 мм возможны меньшие припуски на механическую обработку, вследствие чего наплавка имеет хороший внешний вид.

Внедрение на предприятии технологии плазменно-порошковой наплавки стеллита повысило качество наплавленных деталей и снизило трудоемкость изготовления дорогостоящих изделий.

Освоены также технологии электронно-лучевого напыления жаростойких и теплозащитных покрытий, плазменного напыления и многие другие.

Таким образом, в ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» введены в производство современные сварочные и родственные технологии, обеспечивающие разработку и изготовление высокоэкономичных ГТУ различного назначения, конкурентоспособных на мировом рынке. В настоящее время сварочное производство предприятия способно решать разнообразные технологические задачи любой сложности.

The paper deals with modern developments of gas turbine units and commercial application of advanced welding and related technologies: electron beam welding, laser cutting, vacuum brazing, surfacing, etc.

Поступила в редакцию 18.11.2009



## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, Ю. А. ГАВРИЛЮК, А. С. КОТЕЛЬЧУК, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено современное состояние разработки порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Приведены основные характеристики сварочных порошковых проволок, которые разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы, а также свойства металла сварного шва и сварных соединений, выполненных этими проволоками. Перечислены рекомендуемые области применения этих проволок.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка, порошковая проволока, низкоуглеродистые и низколегированные стали, состояние разработок, области применения

За последнее десятилетие механизированная и автоматизированная сварка порошковой проволокой стала основной альтернативой ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами и механизированной сварке проволокой сплошного сечения в защитных газах. Увеличение потребления сварочных порошковых проволок в развитых странах обусловлено объективными технико-экономическими преимуществами, такими, как высокая производительность, отличные оперативные характеристики, стабильное качество и гарантированные механические свойства швов при сварке сталей различного назначения. Обобщенные показатели объемов производства и применения сварочных порошковых проволок оцениваются на уровне 11 % в странах Западной Европы, 19 % в США, 27 % в Японии и свыше 36 % в Республике Корея. Основными областями их применения являются судостроение, сооружение буровых платформ, производство конструкций и строительство мостов, изготовление резервуаров и котлов, промышленное и транспортное машиностроение.

Относительно распределения объемов потребления проволок по классам прочности сталей эксперты дают следующие оценки. Доля проволок для сварки сталей с пределом текучести до 500 МПа составляет 92 %, низколегированных сталей с пределом текучести свыше 500 МПа — 4 %, сталей, предназначенных для эксплуатации при низких температурах, — около 2 %. Доля сталей, устойчивых против атмосферной коррозии, а также прочих специализированных сталей составляет остальное. Заметными темпами развивается потребление порошковых проволок для сварки нержавеющей сталей.

Развитию и применению сварки порошковыми проволоками способствовало создание современной технологии их изготовления, отвечающей международным стандартам качества. Цель настоящей статьи — представить результаты последних разработок отечественных порошковых проволок, а также области их эффективного применения.

**Металлургические, технические и технико-экономические характеристики сварочных порошковых проволок.** Сварочные порошковые проволоки принято разделять на классы в зависимости от того, требуется ли обеспечивать дополнительную газовую защиту расплавленного металла (газозащитные) или в этом нет необходимости (самозащитные). Соответственно по составу сердечника порошковые проволоки разделяют на газозащитные — рутиловые, основные и «metal-core» (с металлическим типом сердечника); самозащитные — карбонатно-флюоритные, оксидно-фторидные и пр. По назначению порошковые проволоки классифицируют на проволоки общего и специализированного назначения (в частности, проволоки для сварки с принудительным формированием шва).

Металлургические преимущества порошковых проволок главным образом заключаются в сравнительно легкой и гибкой адаптации свойств проволоки к составу и свойствам свариваемой стали, в обеспечении возможности управления тепловложением при сварке. Применение специальной обработки компонентов сердечника проволоки, обработки ее поверхности, а также нанесение защитного покрытия позволяет добиться стабильно низкого уровня содержания диффузионного водорода в металле шва ниже  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  [1].

Технологические преимущества порошковых проволок обеспечиваются высокой стабильностью горения дуги, малым разбрызгиванием электродного металла, благоприятной формой швов при сварке в различных пространственных поло-

жениях. Применение самозащитных порошковых проволок в полевых и монтажных условиях обеспечивает простоту ведения процесса сварки, маневренность, которые обусловлены отсутствием необходимости организации дополнительной защиты расплавленного металла. Кроме того, благодаря специальной конструкции оболочки и композиции сердечника самозащитные порошковые проволоки в сравнении с газозащитными имеют более высокую эффективность защиты расплавленного металла при сварке на открытых площадках под воздействием ветровых потоков.

Технико-экономические преимущества порошковых проволок главным образом заключаются в высокой производительности плавления, которая обусловлена высокой плотностью тока, а также дополнительным присадочным материалом сердечника (железным порошком). Производительность плавления порошковых проволок с металлическим сердечником достигает 7,2...9,6 кг/ч. Дополнительный аспект — экономия энергии и затрат тепла, которые оцениваются на уровне 0,5...0,9 кВт·ч/кг наплавленного металла (рис. 1), если сравнивать сварку порошковыми проволоками со сваркой проволокой сплошного сечения. При использовании порошковых проволок достигается более равномерное радиальное проплавление металла [2–4].

Санитарно-гигиенические свойства современных порошковых проволок находятся на уровне свойств проволок сплошного сечения (особенно это относится к порошковым проволокам рутилового типа и проволок типа «metal-core»).

Классификационные требования и показатели свойств порошковых проволок для сварки сталей различных классов, а также технические требования к порошковым проволокам унифицированы в международных стандартах ISO 17632:2004, ISO 17633:2004, ISO 18276:2005, Евростандарте EN 758 и национальных стандартах AWS, DIN, JIS, ГОСТ, ДСТУ и др.

Большинство мировых производителей использует технологию изготовления порошковых проволок из холоднокатаной ленты. При этом собственно изготовление проволоки осуществляется на одной технологической линии, которая включает агрегат формовки оболочки проволоки (различных конструкций) из стальной ленты с непрерывным заполнением смесью порошков сформованного профиля и многократный волочильный стан, где осуществляется редуцирование проволоки до готового размера.

Преимуществами такой технологии является малое количество оборудования и персонала, низкие энергозатраты, возможность изготовления проволок очень широкой номенклатуры с быстрой перестройкой производства (высокая оперативность производства). Эта технология реализована с различными способами редуцирования заготовок и зак-

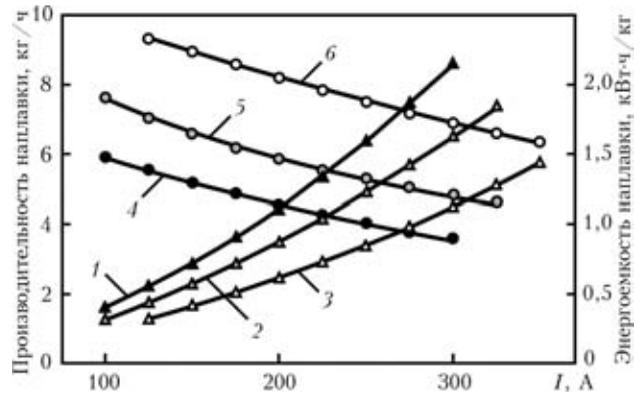


Рис. 1. Типичные показатели производительности (1–3) и энергоёмкости (4–6) наплавки при использовании порошковых проволок и проволок сплошного сечения диаметром 1,2 мм для механизированной сварки: 1, 4 — порошковая проволока с металлическим; 2, 5 — то же с рутиловым сердечником; 3, 6 — проволока сплошного сечения

лючительной обработкой сформованной проволоки. Изготовление порошковой проволоки из трубной заготовки (бесшовной) требует большего количества технологических переделов, что соответственно увеличивает затраты на производство.

Полный цикл технологии изготовления порошковой проволоки при всех схемах включает ряд подготовительных, промежуточных, вспомогательных и заключительных операций, играющих важную роль в получении качественного продукта производства. Готовая порошковая проволока поставляется в соответствии со стандартизованными методами намотки и упаковки (рядная намотка на катушки или провололочные каркасы или в контейнеры типа «Marathon» по стандарту EN 759). Система обеспечения качества (стандарты ISO) предусматривает использование сквозной инспекции со строгим документированием процедур. Этим обусловлено широкое применение современной техники управления, привлечение квалифицированного персонала, хорошее аналитическое оснащение производства. В частности, на ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» используют приборы непрерывного контроля и мониторинга заполнения проволоки для осуществления контрольно-измерительных функций и документирования (рис. 2).

**Порошковые проволоки для сварки в защитных газах.** В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона в соответствии с европейским стандартом EN 758 и ДСТУ (ГОСТ) 26271 разработаны порошковые проволоки нового поколения марок ПП-АН59, ПП-АН63, ПП-АН69 с рутиловым типом сердечника, предназначенные для сварки углеродистых и низколегированных сталей массового назначения, а для сварки высокопрочных низколегированных сталей — ПП-АН61, ПП-АН67. Эти проволоки имеют трубчатую конструкцию и выпускаются диаметрами от 1,2 до 2,0 мм.

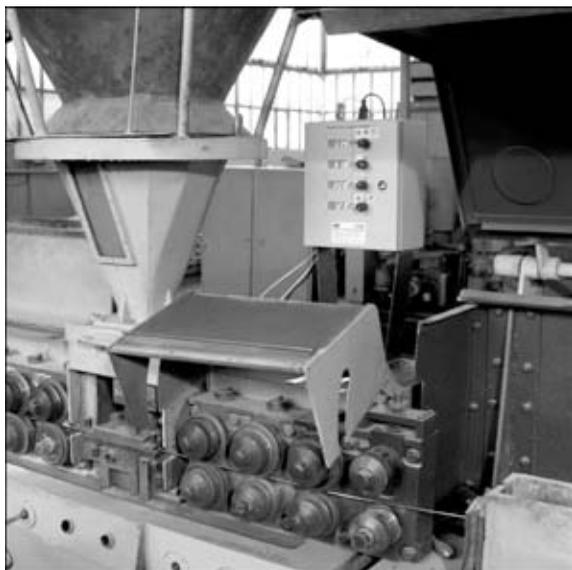


Рис. 2. Прибор контроля заполнения шихтой формуемой оболочки порошковой проволоки двухслойной конструкции на агрегате формовки (ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона»)

Основу мирового рынка составляют проволоки для сварки в углекислом газе или смеси  $Ar + CO_2$  сталей с пределом текучести от 400 до 500 МПа. Созданы проволоки для сварки низколегированных сталей, устойчивых против атмосферной коррозии и эксплуатирующихся при пониженных температурах. С каждым годом возрастают объемы применения проволок для сварки сталей с пределом текучести до 700 МПа и выше.

Расширение применения проволок с металлическим сердечником связано с развитием автоматизированных и роботизированных процессов сварки. Новые проволоки, обеспечивающие хорошую форму швов, малое количество брызг и аэрозолей, пригодны для сварки во всех пространственных положениях. Для автоматизированной и роботизированной сварки в судостроении и машиностроении разработаны проволоки ПП-АН70, ПП-АН70М, ПП-АН72, ПП-АН74 с металлическим сердечником, которые демонстрируют более высокие сварочно-технологические свойства, чем проволока Св-08Г2С. Некоторые характеристики этих порошковых проволок приведены в табл. 1. Производство указанных порошковых проволок освоено на ГП «Опытном заводе сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона».

Газозащитные порошковые проволоки трубчатой конструкции марок ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН72 и ПП-АН74 предназначены для полуавтоматической сварки, а ПП-АН70М, кроме того, — для автоматической (роботизированной) сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Проволоки марок ПП-АН70М, ПП-АН72, ПП-АН74 — проволоки типа «metal-core». При сварке этими порошковыми проволоками для защиты ре-

комендуют использовать газовую смесь  $Ar + CO_2$  (80 + 20 %). При сварке проволоками марок ПП-АН61 и ПП-АН63 в качестве защитного газа можно использовать  $CO_2$  или газовую смесь  $Ar + CO_2$ .

Основные области применения порошковых проволок нового поколения для сварки в защитных газах следующие. Проволоку марки ПП-АН61 используют при изготовлении железнодорожных вагонов, в автомобилестроении, при изготовлении оборудования, предназначенного для эксплуатации в условиях высоких переменных нагрузок и абразивного износа, для сварки сосудов и металлоконструкций различного назначения, а также в судостроении; проволоку марки ПП-АН63, ПП-АН72 и ПП-АН74 — для сварки во всех пространственных положениях в судостроении, строительстве и изготовлении металлоконструкций; проволоку марки ПП-АН70М — при сварке в нижнем положении и на горизонтальной плоскости при выполнении заполняющих швов в машиностроении и изготовлении транспортных средств и металлоконструкций.

#### Самозащитные порошковые проволоки.

Разработкой и производством самозащитных порошковых проволок в промышленных масштабах занимались преимущественно в США и странах СНГ. За последние два десятка лет номенклатура выпуска (по количеству марок) сократилась в результате снижения объемов производства проволок с ненадежными технологическими характеристиками. Интерес мирового рынка к этому классу проволок сохраняется на достаточно высоком уровне. Особенно это касается строительного-монтажных работ (строительство трубопроводов, резервуаров, металлургических агрегатов, мостовых переходов, промышленное строительство, судостроение). Основа производства — это проволоки для сварки сталей с пределом текучести 400...500 МПа. Отдельную группу составляют проволоки для сварки трубопроводов. В ИЭС им. Е. О. Патона, кроме широкоизвестных проволок двухслойной конструкции, созданы также трубчатые самозащитные порошковые проволоки малого диаметра с сердечником фторидно-основного типа. Композиция сердечника позволяет снизить содержание кремния и алюминия в металле шва и обеспечивает требуемую ударную вязкость сварных соединений при низких температурах.

Важной подгруппой этого класса проволок являются проволоки для сварки с принудительным формированием шва (электрогазовая сварка). В настоящее время наблюдается увеличение потребности в таких проволоках в странах СНГ, в частности, России. Основными потребителями являются строители мостов, резервуаров, металлургических комплексов. Налаживается работа комплексов сварки труб «стык» нового поколения (рис. 3).

Таблица 1. Классификационные характеристики и свойства порошковых проволок для сварки в защитных газах

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства					
				$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН61	ПГ-49-А4У Т46 4Z РСМ1 Н5 Е81Т1-К2	1,2	0,06 С	490	580	20	Да	Да	
		1,4	1,3 Mn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0	1,6 Ni						
ПП-АН63	ПГ-44-А2У Т42 2РС1 Н10 Е71-Т1	1,2	0,07 С	440	530	22	Да		
		1,4	1,3 Mn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0							
ПП-АН67	ПГ-59-А3В5 Т59 3 РС1 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	590	650	18	Да		
		1,4	1,2 Mn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0	1,2 Ni 0,3 Cr 0,3 Mo						
ПП-АН70М	ПГ-44-А3В Т42 2 МС3 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	420	540	22	Да		
		1,4	1,4 Mn						
		1,6	0,5 Si						
		2,0							
ПП-АН72	ПГ-48-А3В Т48 5 МС1 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	480	540	24		$KCV_{min} = 47$ Дж/см <sup>2</sup>	
		1,4	1,0 Mn						
		1,6	0,3 Si 2,2 Ni						
ПП-АН74	ПГ-59-А3В Т59 5РС1 Н10 Е71-Т1	1,2	0,06 С	590	680	24		То же	
		1,4	1,3 Mn						
		1,6	0,4 Si 2,5 Ni 0,4 Mo						

В табл. 2 и 3 приведены характеристики некоторых самозащитных порошковых проволок, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона. Самозащитные порошковые проволоки двухслойной конструкции ПП-АН3 и ПП-АН7 предназначены для полуавтоматической сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной более 5 мм. Проволока ПП-АН3 применяется при сварке дорожно-строительных машин, промышленного оборудования, металлоконструкций сооружений, а проволока ПП-АН7 — при сварке промышленного оборудования, в транспортном машиностроении, при строительстве прибрежных конструкций, а также ремонте промышленного оборудования (рис. 4).

Самозащитная порошковая проволока трубчатой конструкции ПП-АН60 рекомендуется для полуавтоматической сварки во всех пространственных положениях при изготовлении технологического оборудования, транспортных и грузоподъемных устройств, сооружений буровых платформ и строительных конструкций.

Самозащитная порошковая проволока двухслойной конструкции ПП-АН19Н, предназначенная для автоматической электрогазовой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной от 8 до 32 мм, главным образом применяется в процессе сварки вертикальных сты-



Рис. 3. Сварочный аппарат комплекса «Стык» нового поколения для автоматизированной электродуговой сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва неповоротных стыков труб большого диаметра (производитель — ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования»)



Таблица 2. Классификационные характеристики и свойства наплавленного металла, выполненного самозащитными порошковыми проволоками

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства наплавленного металла					
				$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН3	ПС-44-А3Н Т42 3ZS3 Н10 Е70-TG	2,8; 3,0	0,09С 1,2Mn 0,35Si	440	560	22		Да	
ПП-АН7	ПС-44-А3В Т42 3ZS3 Н10 Е71-TG	2,4	0,08С 1,1Mn 0,35Si	440	540	22		»	
ПП-АН60	ПС-49-А3В Т49 3ZS3 Н10 Е71-TG	1,2; 1,4; 1,6	0,08С 1,1Mn 1,3Ni 0,8Al	490	590	22			Да

Таблица 3. Классификационные характеристики и свойства специализированных самозащитных порошковых проволок

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства наплавленного металла					
				$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН19Н	ПС-39-А2(Р)ВП Т42 2Z S3 Н5 EG72-TG	2,4; 3,0	0,09С 1,4Mn 0,4Si 0,5Ni	390	520	22	Да		
ПП-АН30	ПС-54-А3УП — соответствует Е81-TG	2,4	0,07С 1,7Mn 0,5Si 0,4Mo 0,07V	540	630	18			Да
ПП-АН30ВС	ПС-57-А3УП — соответствует Е91-TG	2,0; 2,4	0,07С 1,7Mn 0,5Si 0,6Ni 0,5Mo	570	690	18			$KCV_{min} = 47$ Дж/см <sup>2</sup>



Рис. 4. Ремонтная сварка порошковой проволокой ПП-АН7 металлургического оборудования на ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», г. Днепропетровск [5]

ковых соединений способом снизу вверх при изготовлении различных металлоконструкций, включая суда, корабли и баржи, пролетные строения мостов, резервуары и бункера (рис. 5).

Самозащитные порошковые проволоки двухслойной конструкции ПП-АН30 и ПП-АН30ВС разработаны для автоматической монтажной сварки стыковых соединений труб диаметром от 520 до 1420 мм с использованием принудительного формирования шва (электрогазовый процесс). Проволоку ПП-АН30ВС можно применять для сварки стыковых соединений труб из низколегированных сталей класса прочности Х80.

В заключение следует отметить, что интенсивное развитие рынка потребления порошковых проволок свидетельствует о перспективности создания современных производств этого вида сварочного материала. Предпочтение отдают производству проволок с лучшими оперативными характеристиками, малыми потерями металла на разбрызгивание и малым выделением сварочного аэрозоля. При выборе программ производства необходимо учитывать структуру мирового потребления, в котором наибольшие объемы занимают проволоки малых диаметров для сварки сталей



Рис. 5. Сварка порошковой проволокой ПП-АН9Н с принудительным формированием вертикальных стыковых швов пролетных конструкций Подольско-Воскресенского мостового перехода через р. Днепр в г. Киеве

массового применения и сталей повышенной прочности. Благодаря успешному выполнению инновационного проекта, инициированного Национальной академией наук Украины, путем модернизации оборудования и усовершенствования технологического процесса на ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» достигнут уровень производства порошковых проволок, который отвечает современным требо-

ваниям обеспечения качества продукции. По техническим показателям и качеству порошковые проволоки новой номенклатуры соответствуют международным стандартам и конкурентоспособны на мировом рынке. В то же время технология их производства позволяет ориентироваться преимущественно на сырьевую базу Украины.

1. *Походня И. К.* Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 63–75.
2. *Шлепаков В. Н.* Современные методы исследования, прогнозирования и оценки свойств сварочных порошковых проволок // Тр. III Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество». — Днепропетровск, 2004. — С. 27–31.
3. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2005. — № 4. — С. 31–33.
4. *Влияние состава сердечника порошковой проволоки и защитного газа на стабильность процесса дуговой сварки / В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, С. Н. Наумейко, А. В. Билинец // Там же. — 2005. — № 6. — С. 18–22.*
5. *Механізоване ремонтне зварювання порошковым дротом агрегатів металургійного комплексу / В. М. Шлепаков, В. М. Ігнатюк, О. С. Котельчук, Ю. М. Гитин // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. — С. 520–526.*

State-of-the-art of development of flux-cored wires for welding carbon and low-alloyed steels is considered. The main characteristics of flux-cored welding wires, developed at the E. O. Paton Electric Welding Institute over the recent years are given, as well as the properties of the metal of welds and welded joints made with these wires. Recommended applications of these wires are listed.

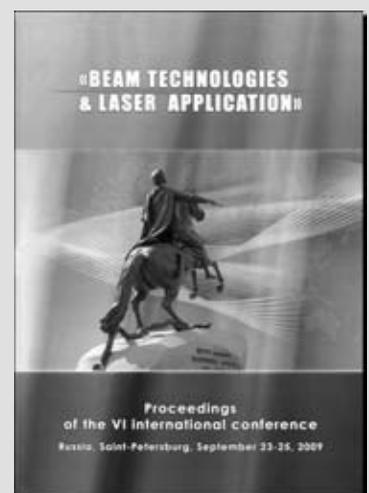
Поступила в редакцию 16.11.2009

**Труды VI Международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» / Под ред. проф. Г. Туричина, 23–25 сент. 2009 г., Санкт-Петербург. — Спб., Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 430 с.**

Книга содержит труды VI Международной научно-технической конференции «Лучевые технологии и применения лазеров», включающие последние достижения в области физических основ и математического моделирования лучевых технологий: лазерной сварки, перфорации, резки и других современных процессов лазерной обработки материалов. Авторами статей являются известные специалисты со всего мира.

#### Книга содержит следующие разделы:

- ✓ физические основы лучевых технологий (9 докладов),
- ✓ нанопотоника (4 доклада),
- ✓ математическое моделирование лучевых технологий (15 докладов),
- ✓ технологии резки, перфорации, маркировки, гравировки и очистки (11 докладов),
- ✓ технологии сварки, пайки наплавки и прототипирования (21 доклад),
- ✓ оборудование для лучевых технологий (8 докладов),
- ✓ контроль качества и безопасность (2 доклада),
- ✓ применение лазеров в медицине (4 доклада),
- ✓ экономические аспекты лазерных и лучевых технологий (1 доклад).





# ОСОБЕННОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДКЛАДНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**В. С. МАШИН**, канд. техн. наук, **М. П. ПАШУЛЯ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы технологические особенности автоматической односторонней импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов АМг6 и 1915Т толщиной до 3 мм без применения подкладных формирующих элементов (сварка «на весу»). Показано влияние модуляции параметров режима сварки на геометрическую форму швов и их макроструктуру. Даны рекомендации по технологии сварки «на весу».

*Ключевые слова:* сварка плавящимся электродом, тонколистовые алюминиевые сплавы, импульсная дуга, модуляция параметров сварки, стыковые соединения, геометрия швов, макроструктура соединений

Известно, что импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в инертных газах (ИДСПЭ) алюминиевых сплавов по сравнению со сваркой плавящимся электродом стационарной дугой (СПЭ) позволяет улучшить формирование швов, увеличить глубину проплавления свариваемого металла, стабилизировать процесс переноса капель электродного металла, уменьшить выгорание (испарение) легкокипящих легирующих элементов с электродной проволоки и повысить механические свойства сварных соединений [1–4].

В последние десятилетия за рубежом для ИДСПЭ стали широко применять сварочные установки, которые включают импульсные источники питания с синергетическим управлением процессом переноса капель электродного металла с поддержанием синхронного процесса — «один импульс—одна капля» и подающие механизмы толкающе-тянущего типа [3–5]. Такие источники питания типа TransPulseSynergic (TPS) предназначены для автоматизированных и роботизированных линий по ИДСПЭ изделий различного назначения и позволяют осуществлять одностороннюю сварку металла малой толщины [5].

При СПЭ и ИДСПЭ конструкций из алюминиевых сплавов для исключения прожога металла и качественного формирования обратной стороны шва используют съемные подкладные формирующие элементы (ПФЭ) из нержавеющей стали с канавками различных размеров сегментной, прямоугольной или треугольной формы [5–7]. В случае невозможности применения съемных ПФЭ из стали используют остающиеся подкладные эле-

менты, изготовленные из листового материала, близкого по химическому составу к свариваемому металлу. Такие ПФЭ приваривают прихватками к одной из сторон стыкуемого листа и после сварки «в замок» они остаются в конструкции.

Для изготовления сварных конструкций очень часто применяют алюминиевые панели. У этих панелей, выполненных методом прессования, с одной стороны уже предусмотрен «выступ», выполняющий функцию остающегося ПФЭ [8]. Однако не все алюминиевые сплавы могут быть подвергнуты прессованию, а сами прессованные панели по себестоимости изготовления намного дороже прокатанного листа. Кроме того, все остающиеся ПФЭ могут существенно повышать массу сварных изделий.

ИДСПЭ без применения ПФЭ (сварка «на весу») можно отнести к ресурсосберегающим технологиям, так как она позволяет исключить затраты на материал ПФЭ, время на его изготовление, а также снизить общее потребление электроэнергии. Основными факторами, сдерживающими широкое применение сварки без ПФЭ, является возможность образования прожогов металла [9] из-за отсутствия специального электросварочного оборудования.

В связи с этим в большинстве случаев соединения алюминиевых сплавов, получаемые «на весу» (особенно при относительно больших и протяженных зазорах в стыках), выполняют ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом (СНЭ) или полуавтоматической СПЭ. При этом сварщик следит за усадкой жидкого металла сварочной ванны и увеличивает длину дуги для снижения сварочного тока и/или повышает скорость сварки. Такие манипуляции рукой держат оператора сварки в постоянном физическом напряжении и не всегда обеспечивают

удовлетворительное внешнее формирование швов при сварке «на весу».

С теплофизической точки зрения прожог соединения при сварке определяется подвижностью жидкого металла, которая зависит от температуры сварочной ванны и действия внутренних и внешних сил — силы тяжести металла ванны и давления сварочной дуги [10]. Единственным противодействием вытеканию жидкой ванны является сила поверхностного натяжения металла и прочность упругой пленки оксидов, образуемой со стороны корня шва. Ее прочность обратно пропорциональна деформации и при определенных условиях равна нулю, что вызывает образование прожога [10, 11]. Экспериментально установлено, что можно подобрать необходимый режим автоматической СПЭ, при котором соблюдается равенство противодействующих сил. Однако такое равновесное состояние является весьма неустойчивым из-за наличия разных по величине зазоров в стыкуемых элементах и действия случайных внешних возмущений. На практике для повышения устойчивости сварочного процесса, выполняемого «на весу», наиболее часто применяют принудительные колебания (модуляцию) его параметров — напряжения дуги (сварочного тока) и скорости сварки. Периодическая модуляция одного из них ведет к изменениям температуры и размеров сварочной ванны, а также давлению дуги [10–13], что позволяет изменять тепловложение в свариваемый металл, управлять скоростью кристаллизации металла ванны и, таким образом, осуществлять сварку без применения ПФЭ.

Наиболее простым способом управления тепловложением в свариваемый металл является модуляция одного из параметров — выходного напряжения источника питания  $U_d$ , скорости сварки  $v_{св}$  или скорости подачи электродной проволоки  $v_{п.пр}$  при сохранении постоянными других параметров сварочного процесса [14].

В настоящее время широкое применение находит оборудование с синергетическим управлением процессом ИДСПЭ, где выходные параметры силового сварочного блока и скорость подачи электродной проволоки электрически взаимосвязаны между собой синергетическим уравнением [4]. Взаимосвязь выходного напряжения источника питания  $U_d$  с  $v_{п.пр}$  может позволить с помощью дополнительного модулятора, включенного в схему электропривода перемещения проволоки, осуществлять периодический переход с большего режима сварки на меньший, и наоборот. Аналогичный процесс сварки можно получить и с использованием источника тока и электропривода подачи сварочной проволоки, электрически не связанных между собой, но синхронизированных по модуляции.

Управление тепловложением в свариваемый металл при сварке без применения ПФЭ может быть достигнуто и при одновременном изменении двух или трех параметров сварочного процесса как при использовании синергетического оборудования, так и обычного оборудования с раздельно работающими функциональными узлами комплекса для ИДСПЭ. Следует отметить, что из-за наличия инерционных звеньев в электрических цепях управления модулированные параметры сварочного процесса изменяются не скачкообразно, а по экспоненциальному закону с учетом постоянной времени их электрических цепей. Разная скорость нарастания (спада) модулируемых параметров, которая влияет на формирование валика сварного шва, требует предварительно длительной настройки режимов сварки. Поэтому управление тремя параметрами сварочного процесса является нерациональным, если положительный эффект может достигаться при меньшем их количестве. Следует отметить, что сам по себе процесс СПЭ тонколистовых алюминиевых сплавов по выполнению намного сложнее, чем процесс СНЭ, и тем более, при сварке металла «на весу» с относительно большими зазорами в соединяемых листах. Поэтому в соответствии с ГОСТ 14806–80, разработанным в начале 1970-х годов и действующим сегодня, процесс СПЭ алюминиевых сплавов может применяться только для элементов толщиной не менее 3 мм для стыковых и тавровых соединений и не менее 4 мм для угловых и нахлесточных соединений.

Целью данных исследований являлось усовершенствование техники и определение особенностей технологии автоматической односторонней ИДСПЭ в аргоне без применения ПФЭ, позволяющих получить удовлетворительное формирование швов в соединениях алюминиевых сплавов толщиной менее 3 мм.

**Методика исследований.** Для проведения исследований применяли алюминиевые сплавы АМг6 толщиной 1,8 мм, 1915Т толщиной 2,8 мм (ГОСТ 4784–74) и сварочные проволоки СвАМг6 (ГОСТ 7871–75) диаметром 1,0; 1,2 и 1,6 мм. В качестве защитного газа использовали аргон высшего сорта. ИДСПЭ стыковых соединений выполняли с использованием источника фирмы «Fronius» TPS-450 на сварочной головке АСТВ-2М. Перед сваркой пластины размером 400×150×8 мм подвергали химическому травлению и зачистке кромок и околошовной зоны шабером с двух сторон. Собранные пластины встык прихватывали по краям ручной СНЭ и устанавливали на приспособление, имеющее канавку размером 50×15 мм, что имитировало сварку «на весу».

Для изучения влияния зазоров на формирование корня шва в пластинах проводили выборку металла со стороны стыкуемых кромок размером

Таблица 1. Режимы сварки сплава АМгб проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ 

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч	$v_{п.пр}$ , м/мин	$w_{п.эн}$ , кДж/см
Модуляция $v_{п.пр}$					
16	57...60	17,1...17,2	18	3,7...4,0	1,440
18	66...70	17,2...17,5	27	4,3...4,6	1,129
20	75...79	17,5...17,7	36	4,8...5,1	0,976
22	85...89	18,0...18,2	45	5,4...5,7	0,907
24	95...99	18,4...18,7	53	5,8...6,1	0,878
Модуляция $v_{св}$					
3	59	17,8	16...18	4,0	1,600
8	70	18,0	25...28	4,6	1,232
10	80	18,3	34...37	5,1	1,069
12	89	18,5	41...44	5,7	1,004
14	96	18,8	47...51	6,0	0,955

0,25×90 и 0,5×90 мм, что соответствовало общему зазору в собранном стыковом соединении 0,5 и 1,0 мм. Расстояние между выборками составляло 50 мм. Это исключало значительное стягивание кромок во время сварки и позволяло поддерживать постоянный зазор в соединениях.

Угол наклона сварочной горелки к металлу составлял 10...12°, расстояние между соплом горелки и свариваемым металлом 10 мм, расход аргона 15...20 л/мин. Геометрические параметры швов (ширину  $B$  и высоту  $H$  выпуклости шва, а также ширину  $b$  и высоту  $h$  корня шва) определяли на поперечных макрошлифах с точностью ±0,1 мм. Значения погонной энергии процесса сварки  $w_{п.эн}$  рассчитывали с учетом того, что эффективный КПД дуги в аргоне составляет 0,72. Определяли также расход сварочной проволоки

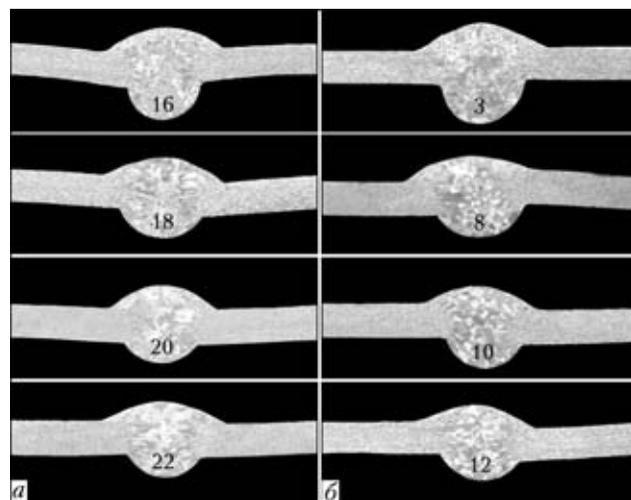


Рис. 1. Макроструктуры (×3) швов в зависимости от режимов сварки сплава АМгб проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  (а) и  $v_{св}$  (б). Здесь и далее цифры на шлифах отвечают номерам образца

$P_{пр}$ , расходуемой при сварке одного погонного метра шва.

Для осуществления модуляции одного или нескольких параметров сварочного процесса было предложено устройство, позволяющее выполнять необходимые коммутации в электрических цепях управления  $U_{д}$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ . Таким устройством служило программируемое электронное реле времени с бесконечным количеством циклов и трехканальным выходом. Каждый выход представлял собой ключ с параллельно подсоединенным к нему переменным резистором, который был введен в разрыв электрической цепи последовательно с основным резистором — органом управления параметрами  $U_{д}$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$  соответственно. При выполнении ИДСПЭ алюминиевых сплавов без ПФЭ применяли два программируемых реле времени РВ-3 и РВ-8 с трех- и восьмиканальным выходом, собранных по схеме «пульс–пара». Период непрерывной модуляции составлял  $2,2 \pm 0,2$  с при продолжительности подъема или спада модулируемых значений  $1,1 \pm 0,1$  с. Частота импульсов сварочного тока  $F_{имп}$ , выдаваемая аппаратом ТПС-450, соответствовала значению  $F_{имп} = KI_{св}$ , Гц, где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от марки и диаметра электродной проволоки и равный 0,9...1,3 Гц/А для проволоки СвАМгб диаметром 1,2 мм.

**Результаты исследований.** В табл. 1 приведены режимы ИДСПЭ сплава АМгб проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ , а на рис. 1 представлены макроструктуры швов, полученных на этих режимах сварки. В диапазоне указанных значений режимов ИДСПЭ изменение  $v_{п.пр}$  на 0,3 м/мин и  $v_{св}$  на  $3 \pm 1$  м/ч (за период модуляции  $2,2 \pm 0,2$  с) позволяет регулировать скорость кристаллизации металла в корневой части шва и получать соединения без прожогов. При этом наиболее удовлетворительное формирование швов на сплаве АМгб толщиной 1,8 мм удается получить при  $I_{св} > 85$  А и  $v_{св} > 45$  м/ч.

Приблизительно такие же зависимости наблюдаются и при ИДСПЭ сплава АМгб проволокой диаметром 1 мм (табл. 2 и рис. 2) с модуляцией  $v_{п.пр}$  (рис. 2, а) и  $v_{св}$  (рис. 2, б). Проанализировав данные, представленные в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2, можно заключить, что за один период модуляции повышение  $v_{п.пр}$  на 0,3...0,4 м/мин приводит к увеличению  $I_{св}$  на 4...5 А и  $U_{д}$  на 0,2...0,4 В. Независимо от параметра сварки, который подвергается модуляции, оптимальное формирование корня шва достигается при  $w_{п.эн} \leq 0,8$  кДж/см с использованием проволоки диаметром 1 мм.

В табл. 3 приведены режимы ИДСПЭ сплава 1915Т проволокой диаметром 1,6 мм без применения ПФЭ и с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ , а на рис. 3 представлены макроструктуры швов, полученных

**Таблица 2. Режимы сварки сплава АМгб проволокой диаметром 1 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$**

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч	$v_{п.пр}$ , м/мин	$w_{п.эн}$ , кДж/см
Модуляция $v_{п.пр}$					
28	56...61	15,4...15,7	20	5,0...5,3	1,175
30	72...78	16,7...17,0	40	6,5...7,0	0,816
31	84...89	17,1...17,5	50	7,5...7,9	0,776
32	94...99	17,6...17,9	60	8,3...8,7	0,742
Модуляция $v_{св}$					
34	61	15,6	19...22	5,3	1,203
35	71	16,6	29...32	6,2	1,002
36	77	17,0	40...43	7,0	0,818
37	89	17,4	48...52	7,9	0,803

на этих режимах сварки. Во всем диапазоне указанных режимов ИДСПЭ изменение  $v_{п.пр}$  на 0,1...0,3 м/мин и  $v_{св}$  на 2...3 м/ч позволяет получать удовлетворительное формирование корня швов без прожогов соединений. Оптимальные геометрические размеры швов удается получить на  $I_{св} \geq 120$  А,  $v_{св} \geq 45$  м/ч и  $w_{п.эн} < 1,15$  кДж/см.

В табл. 4 приведены режимы ИДСПЭ сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $U_{д}$  с одновременной модуляцией двух параметров ( $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ ) и с одновременной модуляцией трех параметров ( $U_{д}$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ ), а на рис. 4 — макроструктуры швов, полученных на этих режимах. При непрерывной модуляции  $U_{д}$  в пределах 0,2...0,4 В (в результате изменения холостого хода источника питания) незначительно снижается значение  $I_{св}$  и увеличивается длина дуги, что позволяет несколько разгладить чешуйчатую поверхность швов. При одновременной модуляции двух или трех параметров процесс формирования швов происходит более стабильно. Не-

**Таблица 3. Режимы сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,6 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$**

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч	$v_{п.пр}$ , м/мин	$w_{п.эн}$ , кДж/см
Модуляция $v_{п.пр}$					
120	72...76	17,1...17,3	20	2,5...2,8	1,650
130	87...92	17,0...17,8	30	2,8...3,1	1,346
140	101...106	17,9...18,1	40	3,4...3,5	1,207
150	115...119	18,5...18,7	49	3,7...3,8	1,151
160	126...130	19,5...19,6	57	4,1...4,2	1,135
Модуляция $v_{св}$					
220	77	17,3	20...22	2,8	1,644
230	92	17,5	30...32	3,2	1,346
240	106	18,4	40...43	3,5	1,218
250	119	18,7	49...52	4,0	1,142
260	131	19,2	54...57	4,2	1,175

зависимо от количества параметров, которые одновременно подвергаются модуляции, оптимальное формирование корня швов на сплаве 1915Т наблюдается при  $w_{п.эн} < 1,1$  кДж/см.

Анализ режимов ИДСПЭ сплавов АМгб и 1915Т, представленных в табл. 1...4, показал, что при любых случайных сбоях скорости подачи электродной проволоки, например, при резком возрастании  $v_{п.пр}$  на 1 м/мин, значение  $I_{св}$  будет изменяться по-разному — для проволоки диаметром 1 мм  $I_{св}$  повысится на 10 А, при диаметре 1,2 мм — на 16 А, а при диаметре 1,6 мм — на 30 А (рис. 5). Чем больше диаметр проволоки марки СВАМгб, тем больше «скачок»  $I_{св}$  и соответственно больше вероятность образования прожога, что является одной из причин, объясняющей целесообразность применения малых диаметров проволок при сварке «на весу».

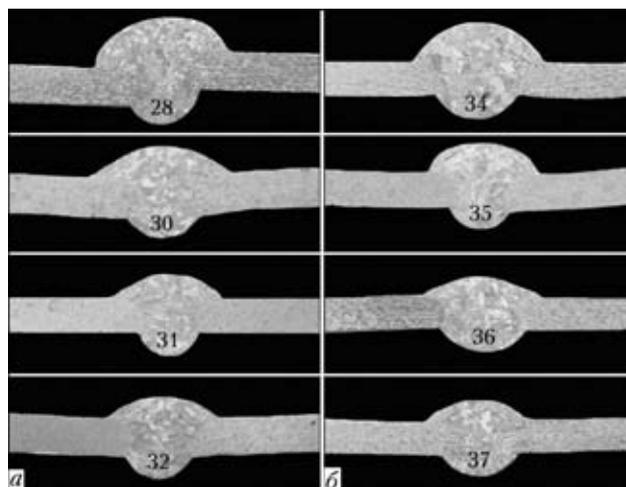


Рис. 2. Макроструктуры (X3) швов в зависимости от режимов сварки сплава АМгб проволокой диаметром 1 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  (а) и  $v_{св}$  (б)

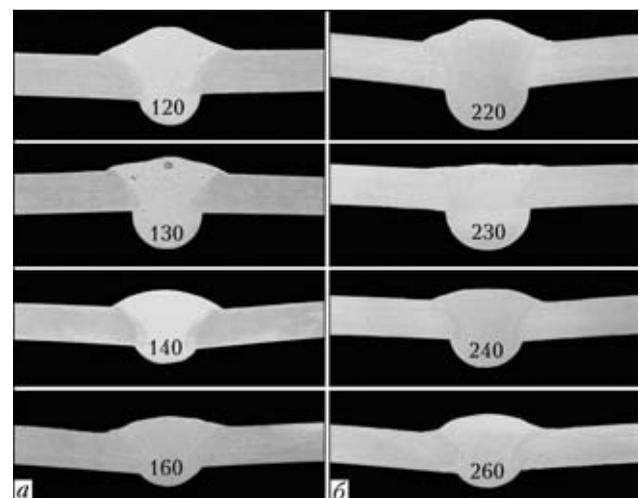


Рис. 3. Макроструктуры (X3) швов в зависимости от режимов сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,6 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  (а) и  $v_{св}$  (б)

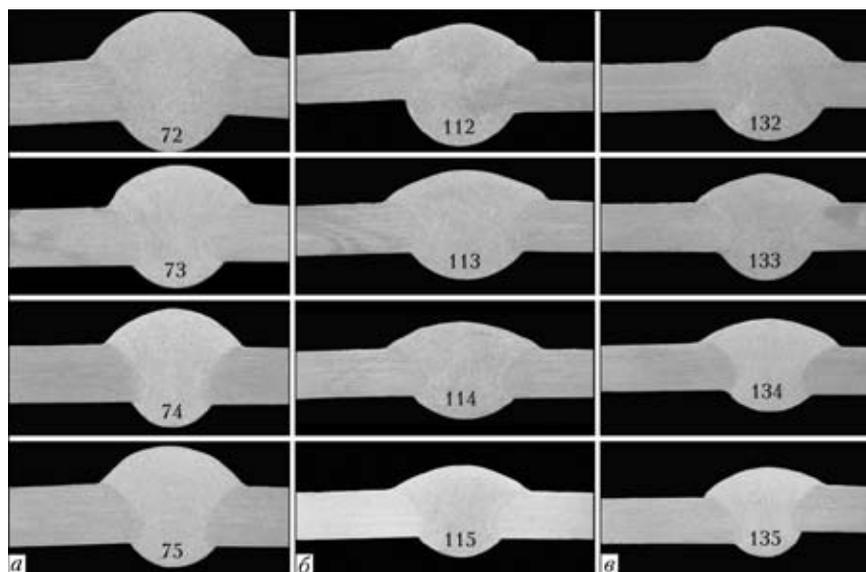


Рис. 4. Макроструктура (×4) швов в зависимости от режимов сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $U_d$  (а), с одновременной модуляцией  $v_{п.пр}$ ,  $v_{св}$  (б) и с одновременной модуляцией  $U_d$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$  (в)

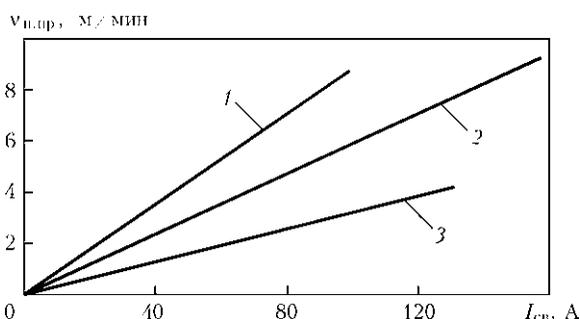


Рис. 5. Взаимосвязь значений сварочного тока и скорости подачи электродной проволоки марки СвАМГб диаметром 1 (1), 1,2 (2) и 1,6 мм (3)

Таблица 4. Режимы сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $U_d$ , с одновременной модуляцией  $v_{п.пр}$ ,  $v_{св}$  и одновременной модуляцией  $U_d$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$v_{св}$ , М/Ч	$v_{п.пр}$ , М/МИН	$W_{п.эп}$ , КДЖ/СМ
Модуляция $U_d$					
72	76...78	16,6...17,0	18	4,9	1,862
73	91...93	17,4...17,8	27	5,7	1,554
74	105...107	18,6...18,9	36	6,5	1,427
75	116...118	20,1...20,3	45	7,3	1,561
Модуляция $v_{п.пр}$ , $v_{св}$					
112	75...79	17,6...17,8	15...18	4,6...4,9	2,141
113	88...92	18,5...18,7	23...27	5,3...5,6	1,736
114	101...105	19,3...19,4	36...41	6,1...6,4	1,338
115	115...118	20,1...20,3	47...49	6,9...7,2	1,265
Модуляция $U_d$ , $v_{п.пр}$ , $v_{св}$					
132	71...75	16,7...17,2	15...18	4,6...4,8	1,938
133	87...89	17,3...17,6	23...27	5,2...5,5	1,588
134	97...101	18,1...18,4	36...41	5,9...6,2	1,213
135	109...111	19,1...19,4	47...49	6,6...6,8	1,140

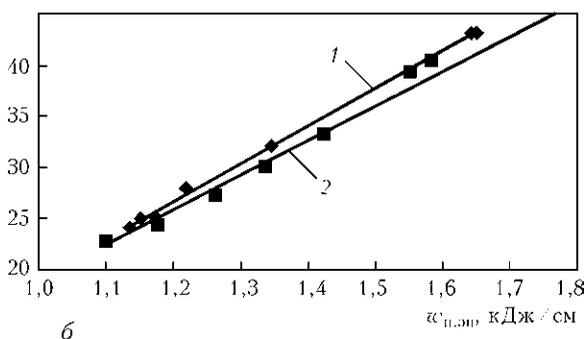
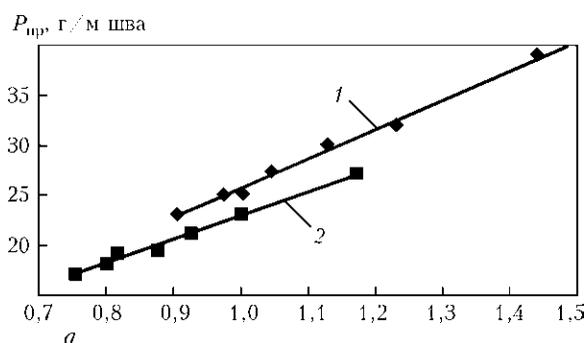


Рис. 6. Влияние погонной энергии процесса сварки и диаметра электродной проволоки на расход наплавленного металла при сварке одного погонного метра шва: а — сплав АМГб, проволока диаметром 1,2 (1) и 1 мм (2); б — сплав 1915Т, проволока диаметром 1,6 (1) и 1,2 мм (2)

Таблица 5. Режимы сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$v_{св}$ , М/Ч	$v_{п.пр}$ , М/МИН	$W_{п.эп}$ , КДЖ/СМ
320	76...79	17,9...18,1	18	4,8...5,1	1,996
330	87...91	18,6...18,8	27	5,4...5,7	1,580
340	101...105	20,0...20,3	36	6,2...6,5	1,490
350	111...115	20,3...20,6	45	6,8...7,1	1,328
360	122...126	21,2...21,4	53	7,3...7,6	1,292

Причиной эффективности применения малых диаметров проволок является также снижение массы жидкого металла ванны и соответственно уменьшение времени кристаллизации металла и снижение «провисания» корня шва под соединением. На рис. 6 показан расход сварочной проволоки при ИДСПЭ одного погонного метра шва в зависимости от  $w_{п.эн}$  и диаметра проволоки. При одинаковом тепловложении в свариваемый металл минимальная масса ванны образуется при использовании проволоки диаметром 1 мм, причем чем выше  $w_{п.эн}$  процесса сварки сплава АМг6, получаемая при минимальных значениях  $I_{св}$  и  $v_{св}$ , тем заметнее это различие.

Особый интерес при ИДСПЭ, тем более тонколистовых алюминиевых сплавов, представляет оценка влияния значения зазоров в стыкуемых соединениях на стабильность формирования корня швов и возникновения сквозных прожогов металла. Сварку «на весу» сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  (табл. 5) и  $v_{св}$  (табл. 6) осуществляли на одинаковых режимах при различной ширине искусственно созданных зазоров в соединениях. Макроструктуры швов, полученных с модуляцией  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$  при различных зазорах, представлены на рис. 7, 8. Установлено, что модулированное управление тепловложением позволяет даже при относительно больших зазорах в соединениях (более 10 % толщины свариваемого металла) удерживать жидкий металл в ванне и исключает его вытекание из корня шва. Независимо от значения  $w_{п.эн}$  зазоры в соединениях приводят к снижению ширины и высоты лицевой выпуклости шва и значительно повышают ширину и высоту его корневой части (рис. 9).

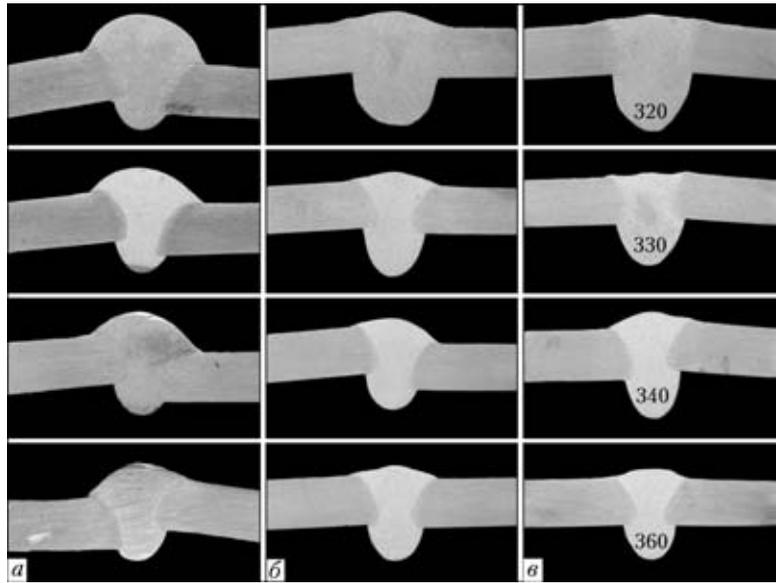


Рис. 7. Формирование швов в зависимости от режимов сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{п.пр}$  в соединениях без зазора (а) и с зазором 0,5 (б) и 1 мм (в)

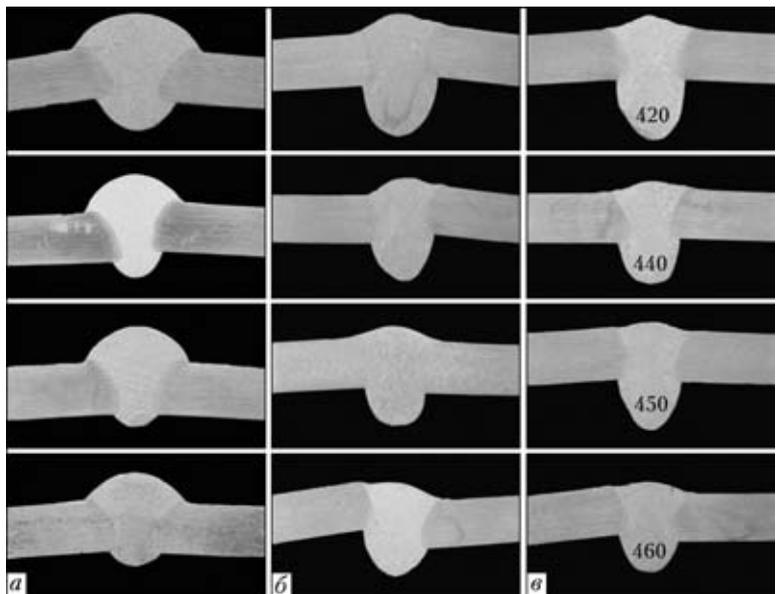


Рис. 8. Формирование швов в зависимости от режимов сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{св}$  в соединениях без зазора (а) и с зазором 0,5 (б) и 1 мм (в)

### Выводы

1. Модуляция основных параметров режима ИДСПЭ тонколистовых алюминиевых сплавов позволяет периодически изменять тепловложение в свариваемый металл, управлять скоростью кристаллизации металла ванны и получать надежное формирование корня шва без применения ПФЭ при сварке «на весу».

2. Электронные устройства, дополнительно подключенные к аппаратам типа TransPulseSynergic, позволяют осуществлять раздельную или сов-

Т а б л и ц а 6. Режимы сварки сплава 1915Т проволокой диаметром 1,2 мм с модуляцией  $v_{св}$

№ образца	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , М/ч	$v_{п.пр}$ , М/МИН	$w_{п.эн}$ , КДж/СМ
420	77	18,3	16...18	5,1	2,148
430	88	19,0	24...27	5,7	1,700
440	102	19,5	33...36	6,3	1,497
450	115	20,6	42...45	7,1	1,411
460	132	21,5	51...53	8,0	1,415

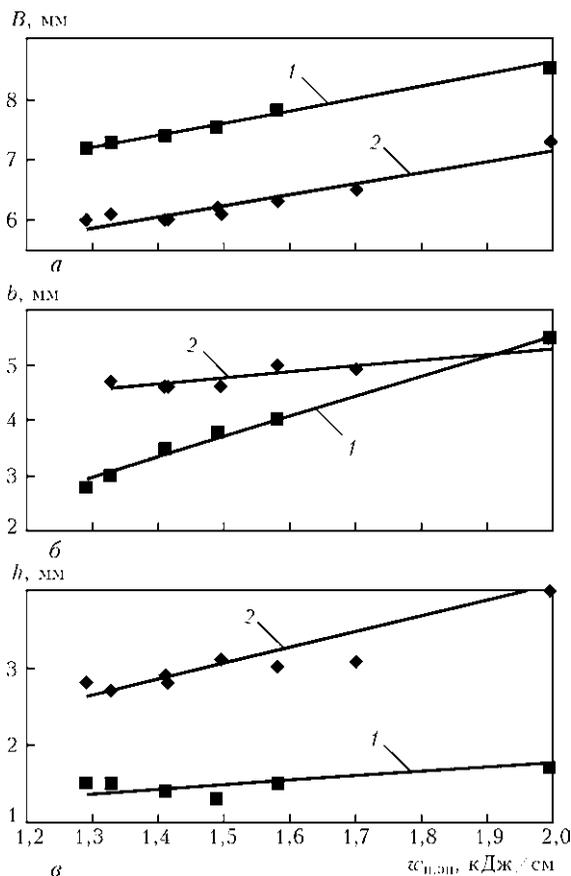


Рис. 9. Влияние погонной энергии процесса сварки сплава 1915Т и зазора (1 — 0 мм; 2 — 1) в стыковых соединениях на ширину выпуклости швов (а), ширину (б) и высоту  $h$  корня проплавления (в)

местную модуляцию параметров режима ИДСПЭ —  $U_d$ ,  $I_{св}$ ,  $v_{п.пр}$  и  $v_{св}$ . Непрерывная модуляция с периодом  $2,2 \pm 0,2$  с дает возможность выполнять автоматическую сварку стыковых соединений «на весу» при наличии протяженных (до 90 мм) локальных зазоров шириной до 1 мм.

3. При ИДСПЭ без применения ПФЭ целесообразно использовать относительно тонкие электродные проволоки — для металла толщиной

2,5...3 мм проволоку диаметром 1,2 мм, а менее 2 мм — проволоку диаметром 1 мм.

1. Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДО на форму и пористость швов / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко, П. П. Шейко // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 57–60.
2. Жерносеков А. М., Андреев В. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор) // Там же. — 2007. — № 10. — С. 48–52.
3. Ищенко А. Я., Машин В. С., Пашуля М. П. Технологические особенности двухдуговой импульсной сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Там же. — 2005. — № 1. — С. 14–18.
4. Воронай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов // Там же. — 1999. — № 6. — С. 26–31.
5. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне тонколистовых алюминиевых сплавов толщиной 1...3 мм / В. С. Машин, М. П. Пашуля, В. А. Шонин, И. Н. Клочков // В печати.
6. Рабкин Д. М., Игнатъев В. Г., Довбищенко И. В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. — 95 с.
7. О некоторых факторах, влияющих на образование окисных включений в сварных швах из сплава АМг6 / Г. Л. Зубриенко, Ф. З. Тэнненбаум, В. М. Петрованов, Ю. И. Ситявин // Свароч. пр-во. — 1977. — № 5. — С. 24–27.
8. TIME TWIN — высокопроизводительный способ сварки // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 39–42.
9. Шнейерсон В. Я. О природе прожога тонколистовых соединений при сварке // Сварщик. — 2008. — № 5. — С. 44–45.
10. Фролов В. В. Теоретические основы сварки. — М.: Высш. шк., 1970. — 392 с.
11. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1980. — 507 с.
12. Средняя температура металла электродных капель при сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко, С. М. Гетманец // Автомат. сварка. — 1994. — № 1. — С. 48–49.
13. Средняя температура металла ванны при дуговой сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко, С. М. Гетманец // Там же. — 1994. — № 11. — С. 15–19.
14. Лебедев В. А. Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. — 2007. — № 11. — С. 26–30.

Technological features of automatic one-sided pulsed-arc consumable-electrode welding in argon of butt joints of thin aluminium alloys AMg6 and 1915T up to 3 mm thick without application of forming backing elements («gravity» welding) were studied. Influence of welding mode parameter modulation on the geometrical shape of welds and their macrostructure was shown. Recommendations on «gravity» welding technology are given.

Поступила в редакцию 06.07.2009

## КОНТАКТНАЯ ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА СО СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКОЙ СВАРИВАЕМЫХ КРОМОК\*

Ю. А. ЦУМАРЕВ, канд. техн. наук (Белорусско-Российский ун-т, г. Могилев, Республика Беларусь)

Показано, что подготовкой кромок соединяемых деталей в виде скосов, обеспечивается наклонное расположение сопрягаемых плоскостей, способствующее снижению мощности при формировании сварной точки, уменьшению вредного влияния изгиба на несущую способность сварного соединения при контактной точечной сварке и снижению степени неравномерности распределения усилий среза и отрыва по сечению литого ядра.

*Ключевые слова:* контактная точечная сварка, подготовка кромок, наклонная плоскость контакта, распределение усилий, разрушающее усилие

Контактная точечная сварка широко применяется в современной промышленности, особенно в автомобиле- и авиастроении благодаря высокой производительности труда, низкой энергоемкости, отсутствию присадочных материалов и защитных сред, а также хорошим гигиеническим условиям труда и сравнительно легкой роботизации процесса. Характерной особенностью этого способа сварки является использование только нахлесточных соединений при сравнительно значительной ширине нахлестки, которая составляет от 7 до 12 толщин соединяемых заготовок [1]. Точечной контактной сваркой обычно соединяют детали толщиной до 6 мм, а иногда этот диапазон расширяется до 10 мм. При большей толщине возникают серьезные затруднения, связанные с сильным шунтированием тока и низкой эксплуатационной стойкостью электродов [1]. Кроме того, возрастает вредное влияние изгибающего момента на работоспособность сварных соединений, обусловленное увеличением эксцентриситета продольных сил, которые приложены к соединяемым деталям. По мере увеличения толщины соединяемых деталей существенно возрастает также мощность оборудования, используемого для их контактной точечной сварки.

Для повышения характеристик работоспособности точечных сварных соединений, в том числе статической и циклической прочности, применяется их упрочнение посредством прослойки клея, вводимого между соединяемыми деталями в области нахлестки [2]. Однако эффективность этого приема быстро снижается с увеличением толщины свариваемых деталей. Если при толщинах 0,5 + 0,5 мм наличие клеевой прослойки повышает статическую прочность в 5 раз, то при толщинах 2,5 +

+ 2,5 мм степень упрочнения составляет всего 70 % [2, 3]. По данным работы [2] при толщине листов более 4 мм статическая прочность от введения клея повышается столь незначительно, что применение его становится экономически нецелесообразным. Это обстоятельство авторы работы [2] связывают с низкой прочностью клеевых сварных швов при их работе в условиях неравномерного отрыва, имеющего место из-за наличия изгибающего момента в соединении нахлесточного типа. Авторы работы [3] считают даже, что при толщинах свариваемых алюминиевых деталей, превышающих 2 мм, клепаные соединения более предпочтительны, чем сварные или клеесварные.

Для частичного устранения вредных явлений, связанных с увеличением толщины свариваемых деталей при контактной точечной сварке, в данной работе предлагается выполнять специальную подготовку кромок в виде скосов по всей области нахлестки. В результате точечное соединение приобретает вид, показанный на рис. 1. Размеры известного соединения приняты по рекомендациям работы [1] для толщины 5 + 5 мм.

Геометрические размеры предлагаемого соединения (рис. 1, б) выбирали таким образом, чтобы в обоих вариантах просвет между рабочими торцами электродов был одинаковым, т. е. равным 10 мм. При этом предполагалось, что такой выбор геометрии и размеров позволит проводить кон-

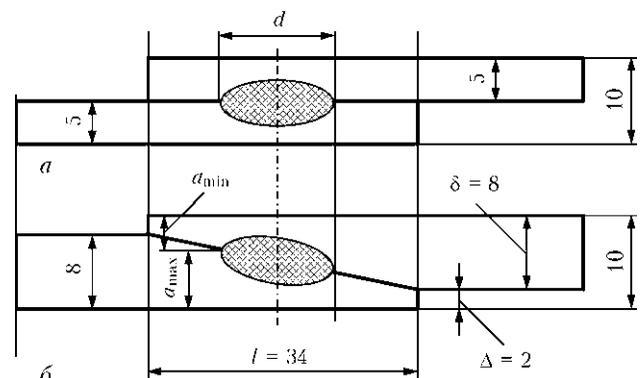


Рис. 1. Схемы сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой без (а) и с подготовкой кромок (б)

\* В порядке обсуждения.

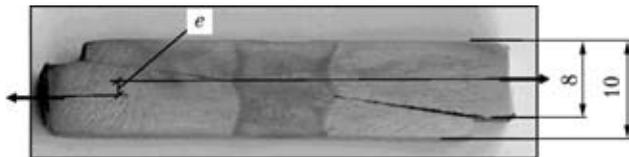


Рис. 2. Макрошлиф (X1) сварного соединения деталей из стали 10 кп толщиной 8 + 8 мм, имеющего скосы по сопрягаемым поверхностям

тактную точечную сварку соединения по варианту 1, б на режимах, которые рекомендуются для сварки пластин толщиной 5 + 5 мм, не имеющих скосов соединяемых кромок.

Наклонное расположение плоскости контакта свариваемых деталей в предлагаемом варианте (рис. 1, б) приводит к нарушению осевой симметрии в процессе нагрева при образовании сварного соединения. В первую очередь это проявляется в том, что участки литого ядра, прилежащие к краям нахлестки, формируются в условиях значительной разницы в толщинах соединяемых элементов (минимальная толщина, обозначенная на рис. 1, б как размер  $a_{\min}$ , не равна максимальной толщине  $a_{\max}$ ). В то же время центральная область литого ядра формируется в условиях, характерных для сварки деталей одинаковой толщины. Это приводит к увеличению плотности тока на периферии сварной точки из-за растекания тока в более толстом элементе [1]. Однако при этом отсутствует явление более сильного притока теплоты в один из охлаждаемых электродов, поскольку оба электрода находятся в одинаковых условиях. Различие в толщинах  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$  можно оценить с помощью следующих формул:

$$a_{\min} = \frac{\delta + \Delta}{2} - \frac{d}{2l}(\delta - \Delta), \quad (1)$$

$$a_{\max} = \frac{\delta + \Delta}{2} + \frac{d}{2l}(\delta - \Delta), \quad (2)$$

где  $d$ ,  $\delta$ ,  $\Delta$  и  $l$  — размеры соединения, показанные на рис. 1, б.

Анализ формул (1) и (2) показывает, что соотношение  $a_{\max}/a_{\min} = 2,5$ , что меньше трехкратного значения, при котором возникают заметные сложности в формировании полноценного литого ядра [1]. Проведенные эксперименты показали, что при контактной точечной сварке заготовок из низкоуглеродистой стали, собранных в соответствии

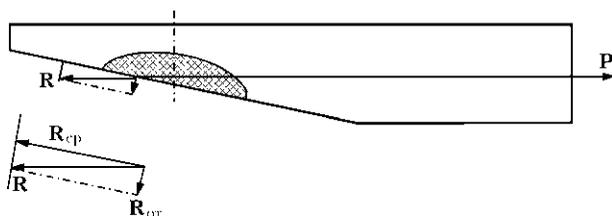


Рис. 3. Схема равновесия одной из деталей предлагаемого сварного соединения

с рис. 1, б, действительно не возникает никаких затруднений, обусловленных наклоном плоскости контакта. Исследование макроструктуры (рис. 2) показало, что литое ядро вытянуто вдоль плоскости контакта заготовок и в сварном соединении отсутствуют какие-либо дефекты, связанные с наличием скосов в соединяемых деталях.

При увеличении диаметра сварной точки  $d$  или уменьшении нахлестки  $l$  будет возрастать разница между значениями  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$ . Если это будет вызывать появление затруднений в процессе образования литого ядра требуемых размеров и формы, можно рекомендовать применение электродов с некруглой рабочей поверхностью, вытянутой в направлении, перпендикулярном размеру  $l$  [4, 5]. При этом будет снижаться и коэффициент концентрации напряжений, обусловленный сгущением силовых линий в основном металле над точкой [6].

Благодаря предложенной подготовке кромок соединяемых деталей уменьшается не только просвет между рабочими торцами электродов, соответствующим образом снижающим требуемую мощность при сварке, но и улучшаются условия формирования сварного соединения. Это улучшение связано с уменьшением эксцентриситета  $e$  продольных сил, приложенных к деталям. В традиционном варианте сварного соединения значение эксцентриситета  $e$  равно толщине каждой из соединяемых деталей, а в предлагаемом  $e = \Delta = 2$  мм. Таким образом, в предлагаемом сварном соединении достигается четырехкратное уменьшение эксцентриситета приложенных сил с соответствующим снижением влияния деформаций от изгиба на работоспособность изделий.

На рис. 3 показано равновесие одной из соединяемых деталей предлагаемого сварного соединения. В соответствии с принципом освобожденности от связей взамен отброшенной связи приложена ее реакция  $R$ , которая по теореме о двух силах может быть приведена к равнодействующей. Важно, что равнодействующая распределенных сил, составляющих реакцию  $R$ , приложена в точке, лежащей на линии действия приложенной силы  $P$ . Поэтому ее точка приложения лежит недалеко от центра тяжести сечения сварной точки. Таким образом, она может быть представлена в виде системы параллельных сил, распределенных практически равномерно по всей плоскости сечения точки.

Реакцию отброшенной связи  $R$  можно разложить на составляющие в соответствии с векторной суммой  $R = R_{cp} + R_{от}$ , где  $R_{cp}$ ,  $R_{от}$  — равнодействующая усилий соответственно среза и отрыва.

Векторы  $R$  и  $R_{от}$  приложены в одной точке, поэтому степень равномерности распределения уси-

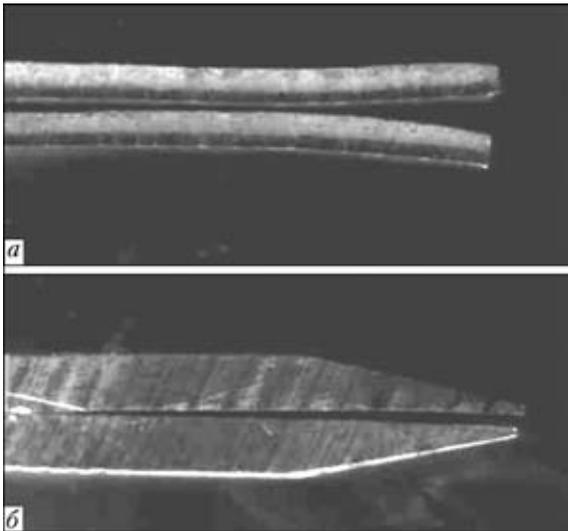


Рис. 4. Внешний вид образцов после проведения механических испытаний на растяжение: *а* — традиционные образцы; *б* — образцы со скосом кромок

лий отрыва столь же высока, как и степень распределения сил, составляющих полную реакцию.

Соответственно будет высокой и степень равномерности распределения системы параллельных сил отрыва, составляющих полную реакцию **Р**. Поэтому предлагаемое сварное соединение не работает в условиях неравномерного отрыва, ухудшающих работоспособность клеевых швов.

В традиционном сварном соединении полная реакция связи не может быть приведена к равнодействующей, так как любое сечение сварной точки лежит в стороне от линии действия приложенной силы. Поэтому степень неравномерности распределения усилий (в том числе и усилий отрыва) будет значительно большей.

Экспериментальную проверку эффективности предложенного технического решения проводили путем сравнительных испытаний на статическое растяжение двух партий образцов по пять штук в каждой партии. Размеры и форма образцов обеих партий соответствовали данным, приведенным на рис. 1. При этом первую партию составляли образцы толщиной  $5 + 5$  мм (см. рис. 1, *а*), образцы

второй партии имели толщину  $8 + 8$  мм со скосом (см. рис. 1, *б*). Результаты испытаний показали, что среднее разрушающее усилие для образцов первой партии составляло 21950 кПа, а для образцов второй партии — 28100 кПа. Таким образом, прочность образцов второй партии, имеющих предлагаемую подготовку кромок, была на 28 % выше, чем у образцов, выполненных по традиционной схеме. Одной из причин, по-видимому, было уменьшение влияния изгиба, обусловленное эксцентриситетом приложенных сил. На рис. 4 показаны части образцов после проведения испытаний. На рис. 4, *а* видно, что в процессе испытаний образцы традиционного сварного нахлесточного соединения приобрели изогнутую форму, тогда как образцы со скосами (рис. 4, *б*) остались прямыми.

В заключение следует отметить, что подготовка кромок соединяемых деталей в виде скосов, обеспечивающих наклонное расположение сопрягаемых плоскостей, снижает мощность оборудования при формировании сварной точки, вредное влияние изгиба на несущую способность сварного соединения при контактной точечной сварке и степень неравномерности распределения усилий среза и отрыва по сечению литого ядра.

1. *Технология и оборудование контактной сварки* / Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, А. А. Чакалев и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 536 с.
2. *Шавырин В. Н., Рязанцев В. И.* Клеесварные конструкции. — М.: Машиностроение, 1981. — 168 с.
3. *Рязанцев В. И., Федосеев В. А., Абин Н. Н.* Технико-экономическая эффективность применения сварных, клеесварных и клепаных соединений // Свароч. пр-во. — 1984. — № 1. — С. 28–29.
4. *Пат. 6379, ВУ (С1).* Электрод для точечной контактной сварки / Е. Ю. Латыпова, Ю. А. Цумарев, И. М. Кузменко, В. А. Балышева. — Заявл. 09.08.2000. — Оpubл. 30.09.2004.
5. *Пат. 6500, ВУ (С1).* Электрод для контактной точечной сварки / В. А. Попковский, Е. Ю. Латыпова, Ю. А. Цумарев, В. А. Балышева. — Заявл. 12.12.2000. — Оpubл. 30.09.2004.
6. *Сварка в машиностроении: Справочник в 4 т.* / Под ред. В. А. Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — Т. 3. — 520 с.

It is shown that beveled edge preparation of the parts to be welded ensures an inclined position of the mated planes, promoting a lowering of power at spot weld formation, reduction of harmful influence of bending on the load-carrying capacity of the welded joint in resistance spot welding and lowering of the degree of non-uniformity of shear and tearing force distribution across the cast nugget section.

Поступила в редакцию 29.12.2009



## ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING and CUTTING», 2009, № 4

*V. I. Badheka, S. K. Agrawal. МИКРОСТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО МЕТАЛЛА ШВА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ NG-GMAW СВАРКЕ*

Технология полуавтоматической дуговой сварки металлическим электродом в узкий зазор в среде защитных газов (NG-GMAW) соответствует высокому уровню производства благодаря низкому объему металла шва, необходимого для соединения. GMAW очень чувствительна к изменениям сварочных условий. Защитные условия при NG-GMAW сварке значительно отличаются от тех, которые предлагает обычная GMAW сварка. Полностью ламинарного потока защитного газа можно не достичь при узких разделках кромок и это может привести к окислению наплавляемого металла и образованию в нем неметаллических включений. Последние могут являться активной основой для образования игольчатого феррита в металле шва. На микроструктуру металла шва влияют несколько факторов, а именно: содержание кислорода в металле шва, состав металла шва, скорость охлаждения и размер зерен аустенита. Наконец, свойства металла шва зависят от доли и типа феррита, процентного содержания различных типов феррита и его распределения. В процессе изучения низкоуглеродистые стальные пластины толщиной

50 мм сваривали при разных амплитудах колебания (0,5; 0,75 и 1 мм) и подвергали микроструктурному исследованию и механическим испытаниям, включая оценку проплавления боковой стенки. Для исследования и записи микроструктуры использовали микроскоп «Neophot». Разновидность микроструктур наблюдали на разных образцах с разным количеством феррита на границах зерен и игольчатого феррита. Результаты показывают, что проплавление боковой стенки разделки и предел прочности сварного соединения увеличивались вместе с повышением амплитуды колебаний.

Показано, что устройство колебаний горелки позволяет эффективно управлять проплавлением боковой стенки разделки, обеспечивая равномерное проплавление с двух сторон. В зазоре соединения можно применять амплитуды колебаний от 0,5 до 1,0 мм при частоте до 0,4 Гц. Металл шва демонстрирует структуру ферритного типа, в том числе в ряде случаев игольчатый феррит. Различия в микроструктурах металла шва может быть обусловлено различными защитными условиями во время сварки.

*K. Bobzin. СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ПАЯНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ИЗНОСА ДЛЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ*

Объемы применения титановых сплавов постоянно возрастают особенно в таких областях, как космическая, химическая и медицина. Однако у этих сплавов есть одно слабое место — сопротивление износу. Для его повышения были разработаны и прошли всестороннее испытание способы повышения стойкости против износа титановых сплавов с помощью паяемых технологий. В основном изучали системы припоев, пасты из твердого материала. С помощью рассмотренных систем возможно создание эффективной защиты от износа для титановых сплавов. Износ можно уменьшить на четыре порядка, что позволит значительно расширить применение титановых сплавов, например, при изготовлении

быстродвижущихся компонентов, ножевых барабанов, ультразвуковых соноотродов, а также титановых мешалок для высоковязких средств, сопел и компонентов шестерен.

Благодаря более низкому износу эксплуатационный срок компонентов можно увеличить в три или четыре раза в идеальном варианте. Это в свою очередь может привести к значительному сокращению расходов на уход и ремонт, а также сократить время простоя.

Одним дополнительным преимуществом разработанного процесса, полученным во время его практического применения, является хорошая пригодность поверхностной пайки также в процессе ремонта изношенных компонентов.

*S. Keitel, J. Neubert. ЛАЗЕРНАЯ ГИБРИДНАЯ СВАРКА GMA ПРИ СООРУЖЕНИИ ТРУБОПРОВОДОВ*

Дуговые процессы, прошедшие испытание и получившие одобрение, на протяжении многих лет применяли при сварке труб большого диаметра для транспортировки сырой нефти и природного газа. В зависимости от продолжительности сооружения трубопровода, толщины стенки индивидуальных труб и материала используются различные процессы соединения труб. Диапазон технологий соединения распространяется от ручной дуговой сварки металлическим штучным

электродом вплоть до применения установок для орбитальной сварки, работающих с головками для сварки МАГ. В этом случае движение дуги не обеспечивается сварщиком вручную, а вместо этого оно полностью механизировано с помощью моторизированной приводной системы и зажимных колец вокруг всей окружности трубы. Если длина трубопровода и профиль местности позволяет, то одновременно используется несколько таких установок. Тогда каждый из



индивидуальных постов, предназначенных для сварки одного или двух проходов, транспортируется к следующему соединению трубы, чтобы выполнить там шов. Во многих случаях такие производственные комплексы работают с несколькими сварочными головками на установку и соответствуют высокому уровню как разработки, так и применения прогрессивной сварочной технологии. При этом они также согласуются с высокой квалификацией персонала и современной техникой. В связи с возрастающим вниманием к расходу энергии в Европе усиливается интерес к новым и экономичным технологиям по строительству трубопровода. Гибридная лазерная сварка GMA относится к таким инновационным процессам.

Акцент делается на увеличение скорости процесса сварки и наплавки. Применение процесса лазерной гибридной сварки GMA создает одну возможную альтернативу, поскольку разработка оптического лазера привела к источнику луча с новыми возможностями использования.

Целью данной публикации являлась демонстрация фундаментальной пригодности гибридной сварки при строительстве трубопровода. Исследовали разные системы процесса, типы дуг и разделки кромок. При данных обстоятельствах нейтральный процесс импульсной дугой с предшествующим процессом лазерного луча и модифицированной разделки Y-шва с притуплением кромки 6 мм использует ток, оптимальный для мощности лазера 4,5 кВт. Лазерную систему в 10 кВт применяли для толщины притупления кромки 8 мм

при мощности 6,5 кВт. Интегрируя второй дуговой процесс для толщины стенки трубы в 10 мм, можно не только выполнять закрытые профили шва, но и ограничивать увеличение твердости металла ЗТВ в области корня шва.

Другой основной фокусной точкой было исследование орбитальной технологии относительно более жестких климатических условий применения. При этом получена необходимая информация о до сих пор существующих недостатках, которые существенно влияют на применимость технологии:

- достигаемые скорости сварки были достаточно низкими;
- сенсорное оборудование не давало необходимой точности, что требовало пересмотра функции сенсора;
- необходима регулировка мощности лазера в зависимости от положения;
- регулировки сварочной системы, связанные с ориентационными изменениями, требующие доработки.

В этом отношении целями конструктивных доработок являются увеличение стабильности орбитального движения вокруг трубы и адаптация к условиям гибридного процесса. В данном случае внимание концентрируется на повышении приводной мощности для возможности достижения скоростей сварки до 3 м/мин.

Следующая фокальная точка исследования тока относится к оптимизации процесса с использованием системы оптического лазера мощностью 12 кВт.

**August 23-27, 2010**

**6-я Международная конференция по математическому моделированию технологии материалов (MMT-2010)**

**Ariel Israel**

## А. А. ЭННАНУ — 75



В феврале исполнилось 75 лет Алимуну Абдул-Амидовичу Эннану, известному ученому, директору Физико-химического института защиты окружающей среды и человека (ФХИЗОСич) МОН и НАН Украины, доктору химических наук, кандидату технических наук, заслуженному деятелю науки и техники Украины, профессору.

А. А. Эннан родился в Одессе. В 1952 г. закончил Одесский политехнический институт и был оставлен лекционным ассистентом на кафедре технологии и автоматизации химических производств, где подготовил и защитил (1964) кандидатскую диссертацию на тему «Исследование акустической коагуляции аэрозолей при непрерывном и импульсном озвучивании применительно к производству гранулированного суперфосфата». На протяжении 1961–1962 гг. работал мастером цеха контрольно-измерительных приборов, начальником смены цехов гранулированного суперфосфата и медного купороса Одесского суперфосфатного завода.

Последующие 39 лет деятельности А. А. Эннана связаны с Одесским государственным университетом им. И. И. Мечникова, где он прошел путь от старшего преподавателя кафедры неорганической химии до заведующего кафедрой химических методов защиты окружающей среды (1973–1986), которую он возглавлял до 1986 г., заведующего объединенной кафедрой неорганической химии и химической экологии (1986–1993) и проректора университета (1988–2001). В 1985 г. А. А. Эннан был назначен научным руководителем Межведомственного центра защиты окружающей среды в сварочном производстве Академии наук УССР и МВССО УССР, с 1988 по 1992 гг. был директором ИЦ «Экология в сварочном производстве» МВССО УССР. С 1992 г. по настоящее время А. А. Эннан — директор ФХИЗОСич.

А. А. Эннан — известный ученый в области химии неорганических фторидов, защиты окружающей среды и человека. Под его руководством выполнены систематические исследования комплексообразования тетрафторида кремния, кремнефтороводородной и фтороводородной кислот с различными классами азот- и кислородсодержащих органических оснований; изучены структурные и термодинамические характеристики, реакционная способность аддуктов; выявлены корреляционные зависи-

мости между основностью лигандов и физико-химическими характеристиками аддуктов. В частности, была экспериментально установлена и теоретически обоснована тенденция стабилизации транс-изомеров гексакоординационных тетрафторокомплексов кремния; определены особенности структурной реорганизации указанных комплексов в ходе реакций дегидрофторирования, которые приводят к образованию мономерных и полимерных производных тетраэдрического кремния с ковалентными связями кремний–азот и кремний–кислород, имеющих важное народнохозяйственное значение.

В последнее время большое внимание уделяется изучению Куяльницкого лимана, уникальная рекреационно-бальнеологическая ценность которого оценивается в более чем 7 млрд дол. США. На основании полученных данных разработаны рекомендации по стабилизации экологического состояния, концепция эффективного использования ресурсного потенциала акватории и прибрежной территории (включая сопредельную с Хаджибеевским лиманом) в интересах социального и хозяйственного развития Одесского региона.

Наиболее полно качества А. А. Эннана как прагматически мыслящего ученого проявились при разработке эффективных методов и средств защиты окружающей среды и производственного персонала от воздействия сварочных аэрозолей: в короткий срок была осуществлена разработка и организовано производство легких пылегазозащитных респираторов «Снежок», установок для подачи кондиционированного воздуха в кабины крановщиков цехов электросварочного и алюминиевого производства, газоанализаторов фтористого водорода «Фторинг», установок для локализации и улавливания сварочных аэрозолей «Мрия», сорбционно-фильтрующих материалов и низкотемпературных катализаторов для улавливания, разложения и окисления токсичных газов.

Результаты научной деятельности А. А. Эннана отражены в пяти монографиях и более чем 500 публикациях, приоритет и оригинальность разработок защищены 106 авторскими свидетельствами СССР, 68 патентами Украины и 16 патентами других стран на изобретения. Под его руководством подготовлены и защищены 22 диссертации, в том числе 3 докторские. В настоящее время А. А. Эннан является заместителем председателя секции «Охрана окружающей среды» Экспертного совета по энергосбережению и природным ресурсам МОН Украины. А. А. Эннан награжден орденом князя Ярослава Мудрого V степени (2005), Грамотой Верховной Рады Украины (2009).



## В. А. БОГДАНОВСКОМУ — 75



В феврале 2010 г. исполнилось 75 лет Валентину Александровичу Богдановскому, известному специалисту в области технологии дуговых сварочных процессов, механизации и автоматизации сварочного производства, лауреату Премии Совета Министров СССР, директору Научно-инженерного центра сварки и контроля

атомной энергетики (НИЦ СКАЭ) Украины НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона».

Вся трудовая и научная деятельность В. А. Богдановского связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, начиная от молодого специалиста до руководителя инженерного центра.

Трудовой и творческий путь В. А. Богдановского на протяжении более 50-ти лет тесно связан с разработкой принципиально новых технологий дуговой сварки плавлением, созданием сварочной аппаратуры и оборудования для автоматизации сварочных процессов во многих отраслях промышленности.

Свою творческую инженерную деятельность он посвятил созданию типовых технологических процессов механизированных способов электродуговой сварки, которые позволили существенно повысить уровень автоматизации и качества сварки в судостроении, автомобильном и сельскохозяйственном, тяжелом и транспортном машиностроении и в других отраслях.

С 1993 г. со дня образования НИЦ СКАЭ, являясь его директором, он активно и успешно решает технологические задачи, связанные с ремонтом теплоэнергетического оборудования и трубопроводов энергоблоков на атомных станциях Украины, разработкой и освоением производства специализированных контейнеров для хранения отработанного ядерного топлива, твердых и жидких радиоактивных отходов, автоматизацией процесса сварки трубопроводов на основе создания орбитальных сварочных автоматов, созданием современных тренажерных комплексов для подготовки и повышения квалификации электросварщиков.

Он — автор более 30 научных работ и 70 авторских свидетельств и патентов.

***Сердечно поздравляем юбиляров и от всей души  
желаем крепкого здоровья, жизненной энергии,  
дальнейших творческих свершений, благополучия.***

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

## ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

\*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

**Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.**

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

### ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала \_\_\_\_\_

Срок подписки с \_\_\_\_\_ **200** г. по \_\_\_\_\_ **200** г. включительно

Ф. И. О. \_\_\_\_\_

Компания \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел., факс, E-mail \_\_\_\_\_



## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$  
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$  
 Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$  
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$  
 Полноцветная (200×290мм) — 340\$  
 Полноцветная (200×142мм) — 170\$  
 Реклама в разделе информации  
 Полноцветная (165×245мм) — 300\$  
 Полноцветная (165×120мм) — 170\$  
 Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади
- При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 18.02.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,94. Уч.-изд. л. 10,45 + 3 цв. вклейки. Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

## ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО СВАРКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ



Электросварка — основной вид соединения элементов металлоконструкций в современном строительстве. Ее наиболее распространенными способами являются сварка покрытым штучным электродом и полуавтоматическая сварка в среде защитных газов. Значительно реже применяется контактная сварка, в основном только для сварки арматурных сеток из низкоуглеродистого прутка. Другие способы сварки — электрошлаковая, флюсовая, полуавтоматическая порошковой проволокой и прочие — находят единичное применение.

Для развития современной сварочной техники характерна тенденция применения в источниках питания сварочной дуги элементов высокочастотной схемотехники. Такие сварочные источники питания называют инверторами. По сравнению с аналогичными по мощности трансформаторами и выпрямителями инверторы имеют значительно меньшую массу (в 2...3 раза, построенные на базе тиристоров, в 4...6 раз — транзисторные), габариты (в 2...8 раз) и лучшие сварочные свойства (даже по сравнению с трехфазными выпрямителями). Инверторы обеспечивают хороший поджиг дуги, процесс сварки отличается малым разбрызгиванием, дуга эластична, электрод используется практически без остатка (экономия около 10 %), благодаря высокой стабильности сварочного тока возрастает эффективность работы сварщика. Кроме того, все инверторные источники имеют плавное регулирование сварочного тока в широком диапазоне. Инверторные преобразователи для сварки штучным электродом применяются повсеместно.

### Ноу-хау сварочного оборудования

Оборудование для дуговой сварки штучным электродом MMA производства компании «Fronius» выпускается со встроенным резонансным преобразователем. Это обеспечивает высокую стабильность дуги и повышенные резервы мощности. Результатом являются практически идеальные характеристики для ручной электродуговой сварки.

Принцип резонансного преобразования считался несовместимым с комплексным контролем дуги до тех пор, пока не была запущена в производство серия «TransPocket 1200-5000», которая применяется при изготовлении оборудования и резервуаров, стальных конструкций, ремонтно-восстановительных работах, сооружении химических установок и в быту. Рекомендуемые основные материалы: конструкционные низколегированные стали, ферритные, хромистые и аустенитные хромоникелевые стали, дуплексные стали, сплавы на никелевой основе, алюминиевые и магниевые сплавы.

Оптимизированные результаты сварки сохраняются даже при неблагоприятных условиях, например, при наличии очень длинных сетевых кабелей.

Моделирование преобразователей вызвало несколько совершенно новых подходов в технологии дуговой сварки. Взаимодействие сварочного трансформатора со специальным набором конденсаторов в качестве накопителя энергии является здесь ключевым фактором. Трансформатор также осуществляет данную функцию накопления при восстановлении электроэнергии с помощью магнитных устройств. Когда трансформатор и конденсатор, настроенные между собой определенным образом, увеличивают заряд друг друга, это называется резонансом. Использование сопряжения резонанса и функции накопления создает полезные резервы энергии, которые при необходимости могут использоваться для дуги. Результатом этого яв-



\* Статья на правах рекламы.

ляется такая вольт-амперная характеристика источника, которая идеальна для дуговой сварки штучным электродом (ММА). То, что здесь кажется очень легким, на самом деле требует концепции высокоинтеллектуального контроля для координации функций накопления — во время сварочного процесса (и в точных пропорциях).

Обязательными функциями сварочных аппаратов «Fronius» серии «TransPocket» являются Soft-Start (специально для электродов с основным покрытием) и Hot-Start (облегчает зажигание электродов с целлюлозным покрытием).

В тот момент, когда стержневой электрод прикасается к свариваемому изделию, дуга зажигается при 30 А. При дальнейшей работе сила сварочного тока постепенно повышается до установленного значения. Достижимый эффект заключается в спокойном, точном цикле зажигания дуги с минимальным разбрызгиванием. Более того, Soft-Star компенсирует тенденцию электродов с основным покрытием к поглощению влаги из окружающей среды во время хранения. Обычным явлением при использовании электрода является выделение водорода, которое может вызывать появление пор в сварном шве, но только не с Soft-Star. Благодаря низкому току поджига возникающие пузырьки газа остаются на поверхности и легко могут всплыть в момент заварки зоны начала сварки.



Оптимизированный поджиг рутитовых и целлюлозных электродов поддерживается функцией Hot-Start. Прекрасные свойства дуги сохраняются даже при использовании очень тугоплавких электродов. Более высокий стартовый ток позволяет вытеснить шлаковые включения из сварочной ванны, быстро стабилизируется дуга.

Запрограммированные характеристики устройства легки в управлении и гарантируют получение максимальных результатов по обеспечению качества. Здесь очень важно цифровое последовательное управление процессом. Тот факт, что все параметры, связанные со сваркой, полностью оцифрованы, — идеальное дополнение ко многим преимуществам резонансного преобразователя. Дуга всегда автоматически реагирует на любую ситуацию.

В итоге Resonant Intelligence — это концепция интеллектуально совершенных решений. Для сварки ММА во всем диапазоне мощности, в настоящее время расширенном до 500 А, и для сварки ТИГ (дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа) сварочное оборудование, оснащенное резонансными преобразователями, самая перспективная технология на сегодня.

При работе в среде защитного газа будет полезна функция Lift TIG, облегчающая «поджиг дуги». Принцип ее действия следующий: сварщик прижимает электрод к металлу, но ток на него подается не сразу, а только в момент «отрыва» от поверхности. Таким образом исключается возможность возникновения дефектов, связанных с началом шва.



**ОТЛИЧНАЯ СВАРКА**

ООО «Фрониус Украина» 07455, Киевская обл.,  
Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24  
Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44  
E-mail: sales.ukraine@fronius.com  
www.fronius.ua



ГП «Опытный завод  
сварочных материалов  
ИЭС им. Е.О. Патона  
НАН Украины»

**Производство материалов для  
дуговой сварки, наплавки и резки:**

**Электроды** — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМА-1У, ТМА-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100, Т-590, АНР-2

**Порошковые проволоки** — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

**Флюсы плавные** — по ГОСТ 9087-81, а также АН-М13, АН-25, АН-72

**Флюсы керамические** — АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.:	(044)	456-64-95
г. Киев-112			456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс:	(044)	456-64-95
			456-63-08

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



предприятие  
**«Триада-Сварка»**  
г. Запорожье

- > Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- > Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- > Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- > Пуско-наладочные работы
- > Широкий выбор сварочного оборудования



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,  
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua  
Сервисный центр: (061) 270 2939. [www.triada-weld.com.ua](http://www.triada-weld.com.ua)

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**СпецСплав**

**ПРОИЗВОДСТВО:**

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной  
обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,  
напыления и металлзации

Электроды наплавочные, специального назначения,  
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1  
г. Днепропетровск  
49051, Украина

Тел. (380562) 35-50-25  
Тел./факс (38056) 37-41-912  
E-mail [sp@spetsplav.dp.ua](mailto:sp@spetsplav.dp.ua)

**НАВКО-ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы  
для дуговой сварки и наплавки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ  
КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, Киев  
Тел.: +38 044 456-40-20  
Факс: +38 044 456-83-53

<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: [info@navko-teh.kiev.ua](mailto:info@navko-teh.kiev.ua)

**SELMA** ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

### Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки.

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.



95000, г. Симферополь, Украина,  
ул. Генерала Васильева, 32А  
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55  
Факс: +38 (0652) 58-30-53  
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

**ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»**

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2  
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50  
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН-348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

*МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ*  
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



**ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**ДОНМЕТ®**

Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13  
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

**Все для газовой резки и сварки. Электросварка.**

**100% гарантия от производителя**

**GYS TB ДОНМЕТ®**

**ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ**

**КИЕВ • ДОНЕЦК**  
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

**ЗАПОРОЖЬЕ**  
Тел./факс (061) 224-11-56

**ПУГАНСК • ОДЕССА**  
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65



**Plasma Master** Научно-производственная фирма **ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.**

Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмотроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев  
ул. Кржижановского, 3  
тел./факс: +38 044 537-31-44  
office@plasma-master.com.ua  
www.plasma-master.com.ua



**ОАО "ЗОНТ"**

ПРОИЗВОДСТВО:

МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";  
 МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";  
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";  
 МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";  
 МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С  
 ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;  
 ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";  
 НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ  
 КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА  
 ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.  
 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И  
 МОДЕРНИЗАЦИЯ  
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.





**ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА «АВТОГЕНМАШ»)**  
 65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.

Т. +38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA  
 715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA  
 Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

**Днепрометиз**  
 Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО "Днепрометиз" - крупнейшее предприятие  
 Украины в своей отрасли, входит в международную  
 группу производителей "Северсталь-метиз"

e-mail: [sale@dm.severstalmetiz.com](mailto:sale@dm.severstalmetiz.com)

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97  
 Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда“, 20

ПРОВОЛОКА:  
 сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С  
 Вр-1 для армирования ЖБК  
 общего назначения без покрытия  
 термообработанная черная  
 оцинкованная  
 колючая

СЕТКИ:  
 плетеные  
 сварные  
 рифленые

ЭЛЕКТРОДЫ:  
 МР-3  
 АНО-4  
 АНО-6  
 АНО-21  
 УОНИ

ГВОЗДИ  
 БОЛТЫ  
 ГАЙКИ  
 ШАЙБЫ

[www.dneprometiz.com.ua](http://www.dneprometiz.com.ua)



Каховский завод  
 электросварочного оборудования

74800 Украина, г. Каховка, Тел./факс: +38 (05353) 2-99-82, 2-19-72  
[market@kzeso.com](mailto:market@kzeso.com) [www.kzeso.com](http://www.kzeso.com)



СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ,,,



**КЗЭСО**

Специальные Научные Разработки **СНР**  
 Научно-производственная фирма

**ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
 И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА**

**Магнитный  
 структуроскоп КРМ-Ц-К2М**

- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений



- ✓ без зачистки
- ✓ через защитное покрытие **до 6 мм**
- ✓ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06  
 | [www.krm-ndt.com](http://www.krm-ndt.com) | e-mail: [mail@krm-ndt.com](mailto:mail@krm-ndt.com)  
 в Москве – ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-91, [mail@mdiag.ru](mailto:mail@mdiag.ru)

Разработка, производство, внедрение

# СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки  
порошковые для  
сварки и наплавки,  
проволоки сплошные,  
электроды, флюс,  
наплавочные установки



ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине



ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»  
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина  
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17  
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua



MEGAFIL® — обеспечение точности благодаря совершенной форме: полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами для получения неразъемных соединений; благодаря своим стабильным размерам, отсутствию деформаций кручения она пригодна при решении широкого круга задач; гарантированная внутренняя защита от влаги позволяет использовать ее без повторной прокалики; важными преимуществами являются сверхвысокая электрическая проводимость и стабильное горение дуги. Поддержите свою форму с помощью MEGAFIL®.

MEGAFIL®: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE® и MECUFIL®.



Drahtzug Stein  
D-67317 Altleiningen  
Tel: +49(0) 6356 966-0  
Fax: +49(0) 6356 966-114  
E-mail: postmaster@drahtzug.de; www.drahtzug.de

Официальный представитель в Украине  
АРКСЭЛ  
83017, г. Донецк, пер. Витязий, 2а  
Тел.: (062) 332-2650(52)  
Тел./факс: 382-9449, 332-2651  
E-mail: info@arcsel.dn.ua; www.arcsel.dn.ua

