

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,  
И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,  
Л. М. Лобанов,  
В. Д. Позняков, И. А. Рябцев,  
К. А. Ющенко

Ученые университетов Украины  
В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,  
В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ», Киев,  
В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев,  
М. М. Студент, ФМИ, Львов  
Зарубежные ученые

Н. П. Алешин  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ  
Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко  
ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ  
М. Зиниград

Ун-т Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль  
В. И. Лысак  
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ  
У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

Я. Пилярчик  
Ин-т сварки, Гливице, Польша  
О. И. Стеклов  
РНТСО, Москва, РФ

Г. А. Туричин  
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы  
Т. В. Юштина (отв. секр.), Н. А. Притула  
Электронная верстка  
И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Адрес редакции  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ  
03680, Украина, Киев-150,  
ул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

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

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001  
ISSN 0005-111X

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

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

К 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара ..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Эгерланд Ш., Циммер Й., Брунмайер Р., Нуссбаумер Р., Пош Г., Рутцингер Б.* Современное состояние и применение дуговой сварки (наплавки) вольфрамовым электродом в защитных газах ..... 7

*Кныш В.В., Соловей С.А., Ныrkova Л.И., Шитова Л.Г., Рыбаков А.А.* Повышение циклической долговечности тавровых сварных соединений в условиях повышенной влажности и температуры высокочастотной механической проковки ..... 19

*Лебедев В.А., Лендел И.В., Яровицын А.В., Лось Е.И., Драган С.В.* Особенности формирования структуры сварных соединений при дуговой наплавке с импульсной подачей электродной проволоки ..... 25

*Лукашевич А.А.* Расчетно-экспериментальный метод определения составляющих спектра нестационарного нагружения сварного соединения углеродистой стали ..... 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Царюк А.К., Скульский В.Ю., Нимко М.А., Губский А.Н., Вавилов А.В., Кантор А.Г.* Усовершенствование технологии сварки высокотемпературных диафрагм проточной части паровых турбин ..... 35

*Кулик В.М., Осадчук С.А., Ныrkova Л.И., Елагин В.П., Мельничук С.Л.* Продление ресурса эксплуатации сварных резервуаров из нержавеющей стали путем повышения питтингостойкости ..... 44

*Олейник О.И., Максимов С.Ю., Пальцевич А.П., Гончаренко Е.И.* Разработка технологии механизированной дуговой сварки при ремонте магистрального газопровода под давлением ..... 49

*Васильев Ю.С., Олейник Н.И., Паршутин Л.С.* Разработка клеевой и клеесварной технологии ремонта посадочных мест подшипников для продления ресурса эксплуатации корпусных деталей энергетического оборудования ..... 57

*Корниенко А.Н.* Роль автоматической сварки под флюсом в послевоенном возрождении промышленности ..... 62

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Диссертации на соискание ученой степени ..... 66

ХРОНИКА

И.И. Зарубе — 95 ..... 68

Информация

Интервью с Почетным директором ФМИ им. Г.В. Карпенко НАН Украины академиком В.В. Панасюком ..... 69

## EDITORIAL BOARD

## Editor-in-Chief

B. E. Paton

## Scientists of PWI, Kyiv

S. I. Kuchuk-Yatsenko (i e -b ief ed.),  
V. N. Lipodaev (i e -b ief ed.),  
Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,  
A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,  
I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,  
L. M. Lobanov,  
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,  
K. A. Yushchenko

## Scientists of Ukrainian Universities

V. V. Dmitrik, NTU «KhPI», Khar'k v,  
V. V. Kvasnitskii, NTUU «KPI», Ky v,  
V. D. Kuznetsov, NTUU «KPI», Ky v,  
M. M. Student, Karpenko PhMI, Lv v

## Foreign Scientists

## N. P. Alyoshin

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

## Guan Qiao

Beijing Aeronautics Institute, China

## A. S. Zubchenko

OKB «Gidropress», Podolsk, Russia

## M. Zinigrad

College of Uda &amp; Samaria, Ariel, Israel

## V. I. Lysak

Volgograd State Technical University, Russia

## Ya. Pilarczyk

Welding Institute, Gliwice, Poland

## U. Reisgen

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

## O. I. Steklov

Welding Society, Moscow, Russia

## G. A. Turichin

St. Petersburg State Polytechnic Univ., Russia

## Editors

T. V. Yushchenko (chief), N. A. Pritula  
Electronic galley

I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

## Address of Editorial Board:

11, Kazimir Malevich str., 03680, Kyiv,  
Ukraine

Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77

Fax (38044) 200 54 84, 200 82 77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

## Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,  
Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
IA «Welding» (Publisher)

## State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Published monthly

Journal «Automaticheskaya Svarka»

is published in English under the title

«The Paton Welding Journal»

Concerning publication of articles,  
subscription and advertising, please,  
contact the editorial board.

## CONTENTS

Towards the 100<sup>th</sup> birthday anniversary of B.I. Medovar ..... 3

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Egerlang S., Zimmer J., Brunmeier R., Mussbaumer R., Posel G.,  
Rutzing B. Advanced gas tungsten arc weld surfacing  
current status and application ..... 7

Knysh V.V., Solovey S.A., Nyrkova L.I., Shitov L.G., Rybakov  
A.A. Improvement in cyclic life of welded T-joints under conditions  
of increased humidity and temperature by using high-frequency  
mechanical peening ..... 19

Lebedev V.A., Lendel I.V., Yarovitsyn A.V., Los E.I., Dragan S.V.  
Peculiarities of formation of structure of welded joints in  
arc surfacing with a pulsed electrode wire feed ..... 25

Lukashevich A.A. Calculation-experimental method of deter-  
mination of components of spectrum of a non-stationary loading  
of low-carbon steel welded joint ..... 31

## INDUSTRIAL

Tsaryuk A.K., Skulsky V.Yu., Nimko M.A., Gubsky A.N., Vavilov  
A.V., Kantor A.G. Improvement of technology of welding of  
high-temperature diaphragms of steam turbine  
continuous-flow part ..... 35

Kulik V.M., Osadchuk S.A., Nyrkova L.I., Elagin V.P., Melni-  
chuk S.L. Extension of service life of stainless steel welded  
tanks by increase in pitting resistance ..... 44

Oleinik O.I., Maksimov S.Yu., Paltsevich A.P., Goncharenko E.I.  
Development of technology of mechanized arc welding in repair  
of main high-pressure gas pipeline ..... 49

Vasiljev Yu.S., Oleinik N.I., Parshutina L.S. Development of  
adhesion and adhesion-welded technology of repair of bearing  
seats for extension of service life of power equipment  
casing parts ..... 57

Kornienko A.N. Role of automatic submerged arc welding  
in post-war revival of industry ..... 62

## BRIEF INFORMATION

Theses for scientific degree ..... 66

## NEWS

I.I. Zaruba is 96 ..... 68

## Information

Interview with V.V. Panasyuk, academician, Honorary Director  
of PhMI ..... 69

---

## К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.И. МЕДОВАРА



**29 марта 2016 г.** исполняется сто лет со дня рождения украинского ученого-металлурга, пионера современного электрошлакового переплава академика НАН Украины Бориса Израилевича Медовара.

Б.И. Медовар — один из ярких представителей Патоновской науч-

ной школы, достойный ученик и соратник Евгения Оскаровича и Бориса Евгеньевича Патонов практически всю жизнь, за исключением двух военных лет Второй мировой войны, проработал в Институте электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины. Человек своего времени, он рос и развивался вместе с СССР, пережил его расцвет, затем распад, продолжал работать в независимом Украинском государстве, показывая новые научные результаты даже в последние годы своей жизни. В Интернете, энциклопедиях советского времени и независимой Украины подробно освещены основные достижения, награды и звания ученого, приведенные в конце статьи.

Попытаемся вспомнить незаурядную личность и, следуя собственным оценкам Б.И. Медовара, которые он неоднократно высказывал в кругу учеников и коллег, расскажем о его жизненном пути и достижениях, становлении ученого-сварщика, металловеда и металлурга.

Начинал Б.И. Медовар в Институте электросварки как исследователь сварочных процессов. Фронтовик—танкист, он гордился тем, что сварка наклонным электродом и соответствующие термины из уставов бронетанковых войск о построении машин «углом вперед» и «углом назад» введены в сварочную и технику и терминологию с его подачи. После войны ученый трудился над созданием оборудования и технологии сварки газопроводных труб большого диаметра на Харцызском трубном заводе. Эта работа в 1950 г. отмечена Сталинской премией. Специалистам-«трубникам» хорошо известно, что и сегодня сварка труб большого диаметра осуществляется на принципах, разработанных Б.И. Медоваром в середине прошлого века. Отдельной яркой страницей его творческой

жизни были изыскания в области сварки аустенитных сталей и сплавов. Его монография «Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов» переиздавалась три раза и по признанию многих сварщиков, особенно связанных с атомной энергетикой, служила им повседневным настольным пособием. Весьма поучительной и широко известной в кругах сварщиков и металлургов стала история о защите Б.И. Медоваром докторской диссертации. В 1960 г. в качестве диссертации он защищал второе издание упомянутой книги. Неожиданно в Ученый Совет потоком пошли резко отрицательные отзывы, в которых утверждалось, что соискатель должен быть лишен кандидатской степени, а уж о докторской и подавно говорить нельзя. Нынешним соискателям ученых степеней, обычно защищающим диссертации без «черных» шаров, трудно представить себе, когда почти треть Совета голосует против, а положительный результат решает всего один голос. Во всяком случае, после этого случая ни сварщики, ни металлурги не защищали докторские диссертации на основании книг.

Железный характер Бориса Израилевича в полной мере проявился в это время. Вспоминая его академик неоднократно подчеркивал, что выстоять ему помогли коллеги и, прежде всего, директор Института — друг и учитель Борис Евгеньевич Патон.

Непрост был переход от сварки к металлургии. Долгие годы Б.И. Медовар продолжал вести параллельно исследования как сварщик, так и металлург, создавая неизвестный к тому времени металлургический процесс — электрошлаковый переплав (ЭШП). И все-таки стремление к новому, возможность создавать абсолютно прогрессивные технологии и оборудование победили. Шаг за шагом ученый сокращал работы над сварочными проблемами и все больше сосредотачивал свои поиски и усилия учеников на создании и развитии ЭШП. Сегодня трудно себе представить, но современный ЭШП был рожден именно в г. Киеве в Институте электросварки и начал свое победное шествие по миру. В 1958 г. на Запорожском электрометаллургическом заводе «Днепроспецсталь» и Краматорском заводе тяжелого машиностроения «НКМЗ» заработали первые в мире печи ЭШП, а в 1963 г. продана во Францию ли-





На Кавказском фронте, 1942 г.

цензия на использование отечественной технологии. Долгие годы Институт электросварки и коллектив, руководимый Б.И. Медоваром, были в мире лидерами в этой области металлургии. Печи ЭШП, созданные на основании их последующих разработок, проданы в США, Швецию, Германию, Японию и страны восточной Европы. По оценкам Бориса Израилевича вершиной успеха для него и его учеников была уникальная печь для получения 40-тонных листовых слитков ЭШП, построенная в Японии по лицензии ИЭС.

Следует отметить, что ЭШП стал металлургической базой для создания мощного подводного флота в СССР. Ничего подобного не имели США и другие страны. Немало иных применений военного назначения нашел ЭШП и дома и за границей, в частности, для производства танковых пушек. Интересно, что в 1991 г. в Киев приехал американский журналист, чтобы сфотографировать Б.И. Медовара на фоне танка Т-34 во дворе первого корпуса Института. Этот танк — памятник Патоновцам, создавшим с Е.О. Патonom их производство в годы Отечественной войны. Но американец в короткой заметке подчеркнул то, что благодаря купленной в Институте электросварки лицензии на технологию ЭШП полых слитков американские танки не уступали советским.

Шли годы и, как это неоднократно происходило, лидерство удержать не удалось. Гонка вооружений и все большее сосредоточение усилий коллектива ИЭС на решении прикладных проблем военно-промышленного комплекса замедлили поисковые работы. В результате в независимой Украине в начале нового периода жизни и работы ученый и его соратники столкнулись с тем, что конкуренты продвинулись далеко вперед в создании новых шлаков, новых конструкций печей и источников питания, моделировании ЭШП. Тем не менее Б.И. Медовару удалось и в этот непростой период создать спектр новейших технологий ЭШП с прямой переработкой жидкого металла, разработать принципиально новое оборудование и реализовать его в промышленности.

Особенности характера Бориса Израилевича проявлялись при общении как со знакомыми, так и незнакомыми, с подчиненными и вовсе независимыми от него людьми. Он был человеком увле-

кающимся, иной раз не очень выбирал выражения, но всегда старался поддерживать людей. Именно поэтому он воспитал десятки кандидатов и докторов наук. Желание и готовность помогать людям, как неоднократно подчеркивал сам Б.И. Медовар, он перенял у Патонов. Особенно эта черта характера проявилась в те годы, когда он как депутат Верховного Совета Украины, вел прием избирателей и старался помочь людям в их борьбе с бюрократической машиной советского государства.

О многом говорит и такой факт. Готовясь к первому своему выступлению в США на симпозиуме по ЭШП (1967 г.), он часами репетировал свой доклад и с помощью магнитофона корректировал произношение английского языка, выученного по самоучителю. Интересно, что он мог читать и общаться без переводчиков с коллегами не только в англоязычных странах, но и в Германии и во Франции, читал в подлинниках зарубежные научные статьи. Постоянное и целеустремленное самообучение было еще одной характерной чертой Медовара. Уже будучи признанным ученым он не стеснялся учиться у молодых, никогда не скрывал, если не знал чего-либо.

Борис Израилевич неоднократно подчеркивал, что его самым близким другом и помощником всю жизнь была жена — Фрида Львовна, с которой они прожили вместе с 1938 г.



Печь У-436М для производства листовых слитков массой до 9 т на шведской фирме «Авеста», Швеция, 1970 г.



Б.И. Медовар (третий слева) со своими учениками и японскими металлургами компании «Ниппон Стил» стоят на первом в мире листовом 40-тонном слитке ЭШП (Япония, г. Явата, 1974 г.)

Учеников и соратников академика не раз поражала его интуиция и способность, что называется «на кончике пера», находить решения сложнейших проблем. Например, уже в последнюю четверть своей жизни он создал за своим рабочим столом низкоуглеродистую броневую сталь, смело понизив почти вдвое содержание углерода по сравнению с общепринятым уровнем 0,35...0,4 %, предложил состав нового шлака для наплавки валков и решился на считавшуюся невозможной закалку с отпуском низкоуглеродистой стали типа 09Г2С. Во всех этих случаях практика блестяще подтвердила смелые догадки ученого.

Нельзя не отметить вклад Б.И. Медовара в издательскую деятельность. Он оставил потомкам десятки книг, сотни статей, более тысячи патентов. Был инициатором создания в 1975 г. сборника «Проблемы специальной электрометаллургии», впоследствии (1985 г.) преобразованного в журнал, который сейчас издается под названием «Современная электрометаллургия». Многие годы

Б.И. Медовар был заместителем главного редактора этого журнала.

В заключение отметим, что и сегодня ряд разработок Б.И. Медовара и его учеников еще не превзойдены никем в мире. Это, прежде всего, технология ЭШП полых слитков, обеспечивающая получение литого металла с физико-механическими свойствами на уровне ковального металла. Не имеет и сегодня равных технология ЭШП листовых слитков для прокатки особо толстого листа из высокопрочных сталей. Дело ученого живет и развивается во всем мире. Несмотря на хорошо понятные трудности нынешнего времени продолжают исследования электрошлаковых процессов и в Институте электро-сварки. В частности, созданная еще при жизни Б.И. Медовара технология двухконтурного ЭШП нашла применение при производстве биметаллов и получении слитков жаропрочных сплавов без пятнистой ликвации, а его давняя идея ЭШП рельсовой стали спустя десятилетия пробивает себе дорогу в промышленное производство Украины.

## *Основные даты жизни и деятельности академика НАН Украины Б.И. Медовара*

Борис Израилевич Медовар родился 29 марта 1916 г. в г. Киеве.

1935–1940 гг. Студент механического факультета Киевского индустриального института (НТУУ «КПИ»).

1940–1941 гг. Инженер-технолог сварочного цеха на станкостроительном заводе «Коммунар» в г. Лубны Полтавской области.

1941 г. Сотрудник Института электросварки АН УССР.

1941–1943 гг. Участник Великой Отечественной войны.

1943 г. Вступил в ряды КПСС. Отозван для работы в тылу по сварке в бронекорпусном производстве.

1944 г. Награжден медалью «За оборону Кавказа».

1944–1947 гг. Секретарь партийного бюро Института электросварки им. Е.О. Патона АН УССР.

1944–1951 гг. Ученый секретарь Института электросварки АН УССР.

1945 г. Награжден медалями «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

1946 г. Присуждена ученая степень кандидата технических наук.

1950 г. Присуждена Государственная премия СССР.

1950 г. Член редколлегии журнала «Автоматическая сварка».

1958 г. Член Координационного совета по сварке Института электросварки им. Е.О. Патона АН УССР.

1959 г. Руководитель отдела физико-металлургических процессов сварки и рафинирования аустенитных сталей и сплавов Института электросварки им. Е.О. Патона АН УССР.

1959 г. Присуждена премия им. Д.К. Чернова.

1959 г. Награжден Почетной грамотой НТО «Машпром» за работу «Механизация и автоматизация сварочного производства», отмеченную первой премией на Всесоюзном конкурсе сварки.

1960 г. Защитил докторскую диссертацию по монографии «Сварка аустенитных сталей и сплавов».

1963 г. Член Научного совета Государственного комитета СССР по науке и технике по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции».

1963 г. Присуждена Ленинская премия.

1965 г. Председатель секции «Металлургические методы улучшения металлов и сплавов» Научного совета АН УССР по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов».

1965 г. Награжден Дипломом почета ВДНХ СССР за достижения в области электрошлаковой технологии.

1965 г. Награжден медалью «XX лет Победы над Германией».

1969 г. Избран членом-корреспондентом Академии наук УССР.

1970 г. Награжден медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина».

1973 г. Избран действительным членом АН УССР. Член комиссии «Черная металлургия» Научного совета Государственного комитета СССР по науке и технике и Президиума АН СССР по проблеме научно-технического и социально-экономического прогнозирования.

1974–1980 гг. Сопредседатель советско-американской группы по ЭШП в рамках советско-американского сотрудничества по специальной электрометаллургии.

1974 г. Награжден почетной грамотой японской металлургической компании «Ниппон стил» («Синнихон сейтецу»).

1975 г. Награжден медалью «XXX лет Победы в Великой Отечественной войне».

1976 г. Награжден орденом Трудового Красного Знамени.

1978 г. Присуждена государственная премия УССР.

1978 г. Награжден почетным знаком корпорации «Вестингхауз электрик» (отделение атомной энергетики).

1978 г. Присвоено звание почетного члена Исследовательского института Университета Карнеги-Меллона в г. Питтсбурге, США.

1980 г. Избран депутатом Верховного Совета Украинской ССР 10-го созыва. Член постоянной комиссии Верховного Совета Украинской ССР по тяжелой промышленности.

1980 г. Награжден Почетной Ленинской грамотой.

1980 г. Награжден орденом Трудового Красного Знамени.

1982 г. Член Научного совета Государственного комитета СССР по науке и технике по проблеме «Малоотходные технологические процессы производства точных заготовок и деталей машиностроения».

1982 г. Награжден медалью «В память 1500-летия Киева».

1982 г. Награжден Почетным знаком «Заслуженный работник» I степени, Почетным дипломом завода Польди СОНП в г. Кладно (ЧССР), Почетным знаком I степени Общества чехословацко-советской дружбы.

1984 г. Присуждена премия Совета Министров СССР.

1985 г. Избран депутатом Верховного Совета Украинской ССР 11-го созыва.

1985 г. Награжден орденом Отечественной войны II степени и медалью «XL лет Победы над Германией».

1985 г. Указом Государственного Совета НРБ награжден медалью «40 лет победы над гитлеровским фашизмом».

1989 г. Премия им. Е.О. Патона НАН України.

2004 г. Державна премія України (посмертно).



# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ (НАПЛАВКИ) ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Ш. ЭГЕРЛАНД, Й. ЦИММЕР, Р. БРУНМАЙЕР, Р. НУССБАУМЕР, Г. ПОШ, Б. РУТЦИНГЕР

Fronius International GmbH, Wels, Austria. E-mail: egerland.stephan@fronius.com

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) — процесс, который известен тем, что он обеспечивает наивысшее качество сварки, хотя и имеет более низкие характеристики производительности. К дуговой сварке в защитных газах (GMAW) часто прибегают с целью повышения производительности с обеспечением качества, соответствующего общепринятым стандартам. В секторах промышленности, где требуется выполнение высококачественной, например, коррозионностойкой наплавки с применением присадочных материалов на никелевой основе, жестко соблюдается необходимость удовлетворения критерия «нулевого дефекта». В этой связи ограниченная производительность преодолевается использованием передовых систем GTAW с «горячей» проволокой. В настоящей статье, с позиций автоматизации сварки, описывается состояние технологий в этой области включая устройства и их применения, а именно процесс сварки (наплавки) GTAW со сдвоенным катодом и «горячей» проволокой, что значительно расширяет достигаемые пределы производительности. Библиогр. 27, табл. 2, рис. 14.

*Ключевые слова:* сварка (наплавка) GTAW, одиночный катод, сдвоенный катод, «горячая проволока», производительность сварки, нулевая дефектность, разбавление металла

**Введение.** Термин дуговая сварка в его самом широком смысле предполагается использовать для обозначения сварки плавлением. Употребляют его также совместно с термином наплавка. В этом случае она подразделяется на наплавку твердосплавную и коррозионностойкую [1, 2]. По экономическим соображениям производители наиболее часто прибегают к таким высокоэффективным процессам наплавки, как дуговая под флюсом (SAW) или электрошлаковая наплавка. Несмотря на достижение при этом высокого качества, соответствующего общепринятым стандартам, эти процессы в ряде случаев ограничено применимы, например, из-за невозможности применения флюса при наплавке в неудобном положении, либо высокого разбавления наплавляемого металла основным, или разбавления в нежелательных пропорциях.

Процессы дуговой сварки в защитных газах GMAW с контролем дуги (например, процесс CMT), были внедрены в промышленность, чтобы решить проблемы, связанные, например, с коррозией [3] и, таким образом, частично заменить SAW и электрошлаковую наплавку. В наплавке существует, кроме того, определение критерия «нулевого дефекта», который является первоочередным, позволяя избегать сложной повторной обработки, гарантирует стабильную эффективность наплавки и обеспечение длительного срока эксплуатации изделий. Поэтому, несмотря на ограниченные характеристики эффективности дуги и скорости наплавки, дуговая сварка (наплав-

ка) вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) часто применяется в подобных случаях. Чтобы преодолеть недостаточную производительность этого процесса, были разработаны системы, модифицирующие процесс подачи проволоки и позволяющие применять способ GTAW либо с «холодной», либо с «горячей» проволокой. В то время, как первый из них вначале демонстрировал неустойчивость и довольно сложную адаптацию [4, 5], второй оказался способным преодолевать недостатки, в основном, за счет предварительного подогрева проволоки.

Ранее А. Манс [6] описал такие преимущества процесса, как к примеру, значительное увеличение скорости наплавки благодаря нагреву проволоки проходящим таким ( $I^2R$ ) и, по сравнению с GTAW (с «холодной» проволокой), возможность повышения скорости подачи проволоки в сварочную ванну в 3...10 раз [4]. Системы сварки GTAW с «горячей» проволокой постоянно совершенствуются и в настоящее время имеют хорошую репутацию благодаря ряду преимуществ у потребителей [2, 7, 8]. Информация о соотношении рабочих характеристик GTAW с «горячей» и «холодной» проволоками отмечена в работе [6], и, в соответствии с этими данными, определенная настройка параметров может даже позволить расплавлять проволоку без всякой дополнительной дуги. Это объясняется электрическим нагревом проволоки определенного состава проходящим током с уче-

том ее электрического сопротивления и диаметра в соответствии с уравнением [6]:

$$I^2R = I^2L\rho/d^2(\pi/4), \tag{1}$$

где  $\rho$  — сопротивление материала проволоки;  $L$  — эффективная длина вылета проволоки;  $d$  — диаметр проволоки. Энергия, необходимая для расплава проволоки, может быть выражена уравнением:

$$E_{\text{плав.}} = HF\delta d^2(\pi/4), \tag{2}$$

где  $H$  — теплосодержание объема расплавленной проволоки;  $F$  — скорость подачи проволоки;  $\delta$  — плотность проволоки.

На рис. 1, составленном согласно работе [6], схематически изображен принцип GTAW с «горячей» проволокой.

Скорость подачи проволоки  $F$  может быть выражена уравнением:

$$F = I^2L(ES)/(\pi d^2/4). \tag{3}$$

$ES$  в данном случае обозначает «константу чувствительности вылета» [6], которая зависит только от химического состава материала проволоки. Соответственно, рассчитать длину вылета проволоки  $L$  можно по уравнению:

$$L = F(\pi d^2/4)^2/I^2(ES) \tag{4}$$

$ES$  может быть получено из уравнения:

$$ES = \rho/H\delta. \tag{5}$$

Реальное сопротивление  $\rho$  представляет разницу между сопротивлением материала при температуре плавления и окружающей температуре и может быть аппроксимировано в виде уравнения:

$$\rho = \rho_{\text{плав.}} - \rho_{\text{окр.}}/\ln(\rho_{\text{плав.}}/\rho_{\text{окр.}}). \tag{6}$$

По аналогии плотность материала проволоки  $\delta$  может быть получена из уравнения:

$$\delta = \delta_{\text{плав.}} - \delta_{\text{окр.}}/\ln(\delta_{\text{плав.}}/\delta_{\text{окр.}}). \tag{7}$$

Согласно работе [6] величина  $ES$  пропорциональна значению  $I^2R$ . Таким образом, проволоки с более высоким сопротивлением обеспечивают более высокую скорость наплавки по сравнению с электродной проволокой с более низким сопротивлением.

За счет механизированной подачи «холодной» проволоки GTAW обеспечивает относительно высокую скорость наплавки. Часто это сопровождается неустойчивостью подачи электродной проволоки в сварочную ванну, что, в свою очередь,

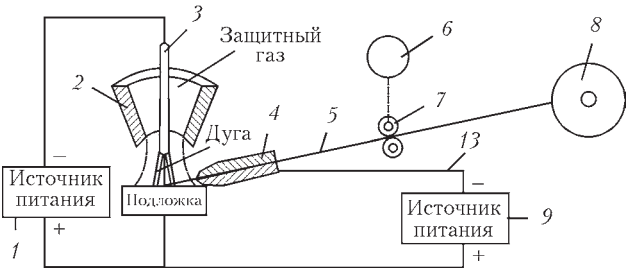


Рис. 1. Схематическое изображение системы GTAW с горячей проволокой [6]: 1 — источник питания GTAW (режим постоянного тока CC); 2 — сопло подачи защитного газа; 3 — вольфрамовый электрод; 4 — контактная трубка; 5 — присадочная проволока; 6 — двигатель подачи проволоки; 7 — подающие валки; 8 — катушка с проволокой; 9 — источник подачи горячей проволоки (режим постоянного напряжения CV)

может привести к неравномерному плавлению ее. Наблюдается «захолаживание» ванны, ухудшающее стабильность процесса и качество шва, независимо от того, подается ли проволока в ванну расплава со стороны передней или задней кромки. Дуга необходима для расплава как основного, так и присадочного материала, поэтому при «захолаживании» увеличивается риск получения неравномерно наплавленных валиков.

Предварительным нагревом электрода при GTAW с «горячей» проволокой устраняется необходимость потребления значительной части мощности тока дуги. Сохраняя соответствующий угол для вхождения в сварочную ванну ( $0^\circ \leq 30^\circ \leq 60^\circ$ ) [4] проволока может быть удобно расположена со стороны задней кромки, близко, но не напрямую, взаимодействуя с дугой [5].

Более современные разработки исключают второй источник питания за счет введения двух электронных схем управления током. Первая из них обеспечивает постоянные характеристики напряжения для нагрева присадочной проволоки, а вторая схема обеспечивает постоянные характеристики выходного тока для управления током дуги [8]. Несмотря на заявление о значительном сокращении количества оборудования, обычно необходимого для выполнения GTAW с «горячей» проволокой, авторы по-прежнему не знают примеров, значительного применения таких систем в промышленности. Особенно это касается наплавки, которая могла бы представлять процесс GTAW с «холодной» проволокой, обеспечивающий пони-

Т а б л и ц а 1. Предварительные данные экспериментов

Вид процесса	$I_{\text{имп}}, \text{ A}$	$I_{\text{св}}, \text{ A}$	$I_{\text{фон}}, \text{ A}$	$U_{\text{ср}}, \text{ В}$	$v_{\text{п.пр}}, \text{ см/мин}$	$v_{\text{п.гор}}, \text{ см/мин}$	$t_{\text{имп}}, \text{ мс}$	$t_{\text{ср}}, \text{ мс}$	$f, \text{ Гц}$	$I_{\text{гор.пр}}, \text{ A}$
С одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой	320	—	280	13,5	1,6*	32	200	200	2,5	70
То же	350	—	300	14,2	2,6*	50	150	150	3,3	70
Со сдвоенным катодом с одиночной «горячей» проволокой	—	450*	—	12,1	7,6	80	—	—	—	190

\* Данные являются суммарными, т.е. следует уменьшать вдвое.



женные глубину проплавления и степень разбавления с поддержанием стабильности процесса.

С. Голдсберри в работе [9] предполагает, что технология сварки с «горячей» проволокой в целом нашла лишь ограниченное применение в промышленности со времени изобретения ее в 1960-х годах. Поэтому, конкретные исследования проводились главным образом, чтобы понять явления, связанные с повышением производительности, например, за счет внедрения в процесс двух проволок с индукционным нагревом и успешным электромагнитным управлением увеличенным объемом сварочной ванны при сварке плавлением в неудобном положении [10]. Для К. Хори и др. [11], изучавших явления магнитно дутья дуги, хорошо известна главная проблема в использовании технологии GTAW с «горячей» проволокой. Авторы, которые разработали систему для применения высокочастотного (50...150 Гц) импульсного тока для предварительного нагрева проволоки, смогли преодолеть нестабильность («искрение дуги»), вызванную электромагнитными полями, индуцированными вольфрамовой дугой в защитных газах и действующими на проволоку, как только она отделяется от изделия. С. Уегури и др. [12] попытались оценить оптимальное соотношение между величиной сварочного тока и скоростью плавления, используя часть мощности дуги для предварительного нагрева проволоки. Было обнаружено, что увеличение скорости перемещения горелки в основном допустимо при увеличении ширины сварочной ванны и, что величина сварочного тока

ограничивает скорость подачи проволоки, и что наблюдается почти линейная зависимость между скоростью перемещения и током нагрева проволоки. Также для сварки плавлением М. Ямамото и др. [13] разработали «сверхвысокую скорость» процесса GTAW с «горячей» проволокой. Для достижения высокой скорости перемещения и приемлемого качества было установлено, что температура предварительного нагрева проволоки является наиболее важным параметром. Непосредственно основываясь на работе [13], К. Шинозаки и др. [14] тщательно изучили явления, вызванные как температурой проволоки, так и тепловложением дуги. Авторы пришли к выводу, что плавление присадочной проволоки зависит, в основном, от температуры предварительного нагрева проволоки, а плавление основного материала, в основном, определяется сварочной дугой.

**Автоматизация наплавки GTAW с «горячей» проволокой.** Автоматизация сварки способствует повышению ее характеристик и производительности даже при использовании процесса наплавки GTAW с одиночной «горячей» проволокой. Новейшее оборудование (рис. 2), может быть использовано, например, для наплавки внутренних или внешних поверхностей изделий.

Две электрически изолированные проволоки, подаваемые отдельно в ванну, получаемую одним вольфрамовым электродом, успешно повышают производительность процесса наплавки. Для применения в промышленности были разработаны соответствующие сварочные горелки при-



Рис. 2. Системы наплавки GTAW с непрерывным вращением горелки ETR® внутренних или внешних поверхностей изделий

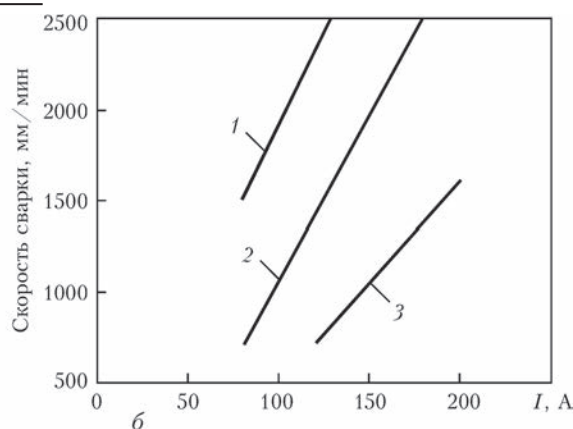
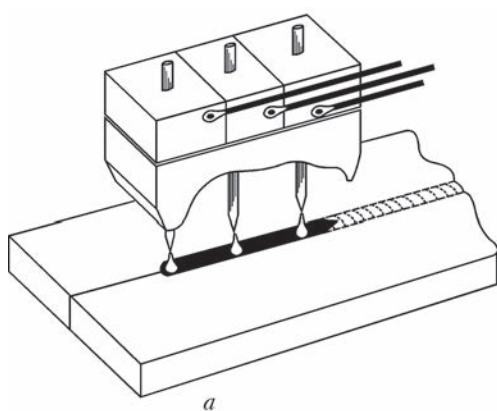


Рис. 3. Схематическое изображение GTAW с несколькими катодами (а) и сравнение скорости наплавки (б); 1 — три катода; 2 — два катода; 3 — один электрод (катод). Наплавка проводилась с полным проплавлением проволокой из нержавеющей стали AISI 304 диаметром 1,2 мм (по Дж. Нориш [21])

менительно к автоматизированной аргодуговой наплавке с «горячей» проволокой внутренних или внешних поверхностей. При этом преодолеваются недостатки использования одной «горячей» проволоки [2]. Такое оборудование позволяет производить экономичную наплавку толстостенных изделий, одновременно отвечая самым высоким требованиям к качеству, т.е. критерию «нулевого дефекта», а также обеспечивая низкие коэффициенты разбавления.

**GTAW с несколькими катодами.** Повышение производительности GTAW или скорости наплавки обычно связано с увеличением сварочного тока, увеличением силы дуги или давления дуги [15, 16]. Последнее склонно вызывать дефекты сварки, такие как подрезы или усиление валика [17]. Чтобы предотвратить эти дефекты М. Ямада в конце 1990-х годов [18] разработал и запатентовал [19] новаторский высокоэффективный метод GTAW. Оба электрода, независимо приводимые в действие двумя источниками питания и электрически изолированные друг от друга, были сведены в одну сварочную горелку. Подача «горячей» проволоки в ванну позволила увеличить производительность наплавки, например, ее скорость при изготовлении больших резервуаров из 9 %-й никелевой стали [20]. Геометрия электродов и их настройка описаны среди других особенностей этого способа. GTAW с несколькими катодами (рис. 3, а) вначале прошла испытание с целью повышения как производительности процесса, так и качества шва.

Дж. Нориш [21] отмечает, что при GTAW с несколькими катодами можно значительно увеличить скорость перемещения дуги, удлиняя ванну шва и предотвращая такие дефекты сварки, как подрезы. Графики зависимости скорости перемещения от тока приведены на рис. 3, б при применении GTAW с одиночным и несколькими катодами. Значительные различия становятся заметными при увеличении числа катодов. Нежелательное, но возможное отклонение дуги между электродами

можно преодолевать, например, за счет использования высокочастотных импульсов или магнитной стабилизации дуги [21].

**GTAW со спаренным катодом.** Г. Чжан и др. в работе [22] изучали физические явления сварки TIG со спаренным вольфрамовым электродом, т.е. GTAW с применением двух электродов в одной сварочной горелке. Авторы предположили, что сила Лоренца, притягивающая обе дуги, образует таким образом единую дугу, градиент давления которой значительно ниже по сравнению с процессом GTAW с одним электродом.

Сила притяжения  $F$  может быть рассчитана следующим образом [22]:

$$F = k \frac{I_1 I_2}{L}, \quad (8)$$

где  $k$  — константа;  $I_1, I_2$  — сварочный ток для катода 1 и катода 2;  $L$  — расстояние между двумя электродами. Авторы считают, что  $F$  возрастает при увеличении тока  $I$  и снижается при увеличении расстояния  $L$ . Была предпринята попытка оценить эти соотношения и, особенно, влияние этого явления на давление дуги. Было обнаружено, что последнее уменьшается при GTAW со спаренным катодом из-за более широкой области, которую охватывает сдвоенная дуга, приближающаяся к эллиптическому поперечному сечению.

На рис. 4, а на основе работы [23] показано давление дуги для сварки с одиночным катодом, которое круто растет в центре дуги при увеличении токов. На рис. 4, б опять же изображено давление дуги для GTAW со спаренным катодом, которое меняется по пологой кривой и более широко распределяется вокруг притягивающихся дуг.

В целом, наплавка требует низких уровней разбавления наплавленного металла с основным для поддержания свойств наплавленного металла, например, коррозионной стойкости. Усадку металла шва также считают функцией увеличения сварочного тока [16]. С. Лен и его коллеги в работах

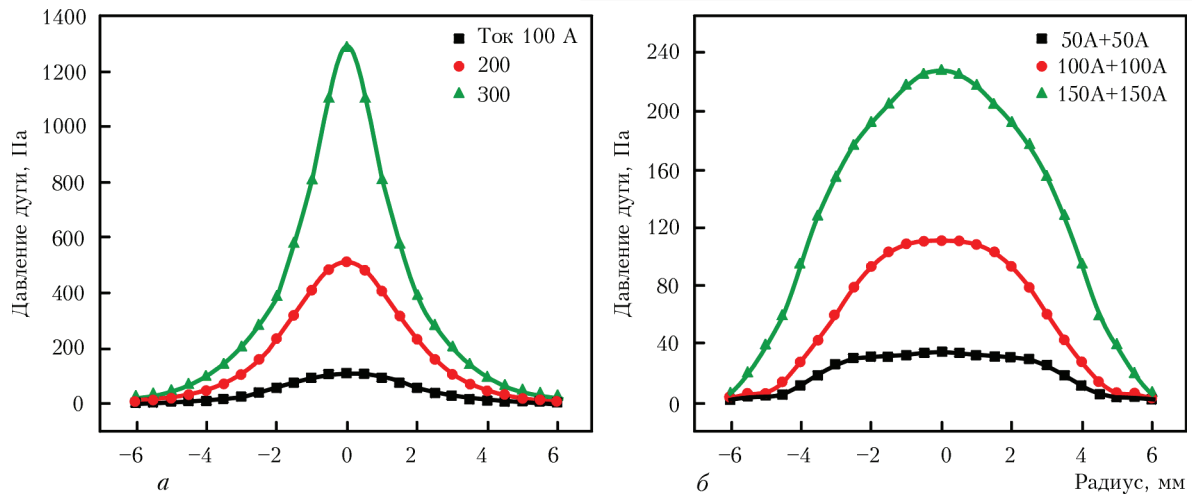


Рис. 4. Давление дуги, измеренное для GTAW с одиночным (а), сдвоенным (б) катодами [23]

[22, 23], тщательно изучили соотношения между увеличением тока и его влиянием на распределение давления дуги при GTAW со сдвоенным катодом. Они обнаружили, что давление снижается по сравнению с аналогичными значениям тока при сварке с одиночным катодом.

Принимая значение основной силы дуги, возникающей из плазменной струи и направленной на поверхность анода, согласно работе [23], давление дуги может быть рассчитано по закону сохранения импульса:

$$P = \frac{I}{2} \xi v^2, \quad (9)$$

где  $P$  — давление дуги;  $\xi$  — плотность плазмы;  $v$  — ее скорость.

Используя подход Х. Мекер [24] к соотношению максимальной скорости  $v_c$  и максимальной плотности тока, находящейся в центре дуги, и принимая поток плазмы как несжимаемый и невязкий:

$$v_c = \sqrt{\frac{u_0 I j}{2\pi \xi}}, \quad (10)$$

где  $u_0$  — магнитная проницаемость свободного пространства, а  $j$  обозначает плотность тока, можно окончательно достичь соотношения между давлением дуги  $P_c$  и  $j$  в центральной линии дуги [24]:

$$P_c = \frac{u_0 I j}{4\pi}, \quad (11)$$

представляя давление дуги как значение, прямо пропорциональное току  $I$  или плотности тока  $j$  соответственно.

Применяя выражение (8), определяющее силу, которая притягивает дуги в сторону центра, можно увидеть увеличение давления дуги в центре с увеличением токов дуги или уменьшением расстояния между двумя рабочими катодами. Однако из-за разделенных катодов обе дуги смещаются от центра, аналогичным образом смещая и максимумы давления. Согласно работе [23] сила притяжения производит перекрытие дуги, однако, получаемые пиковые значения давления находятся вне центра и, следовательно, достигнутое давление «сдвоенной дуги» падает по сравнению с давлением каждой отдельной дуги или «перекрытой дуги».

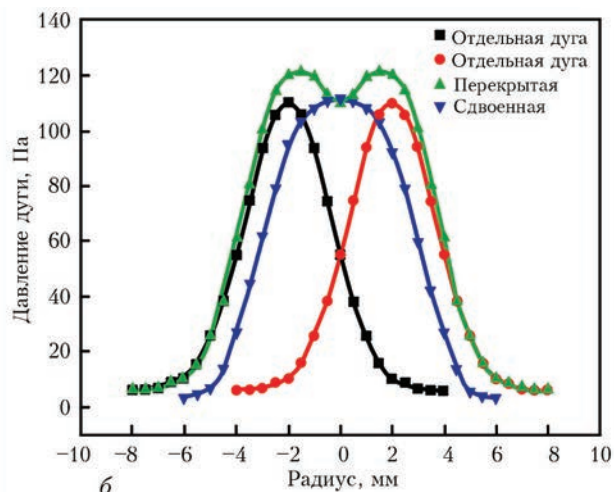
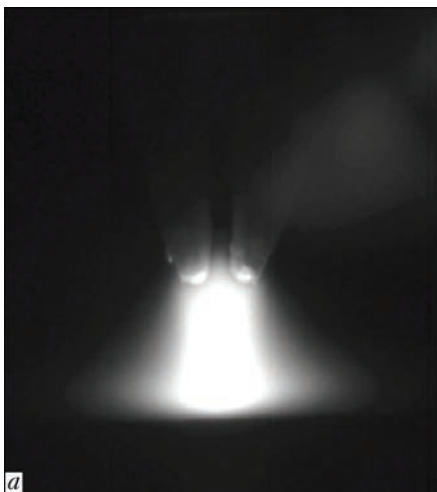


Рис. 5. Видимое перекрытие дуг  $2 \times 100$  А (а) и сравнение давлений отдельной, перекрытой, и сдвоенной дуги (б) для  $2 \times 100$  А тока дуги [23]



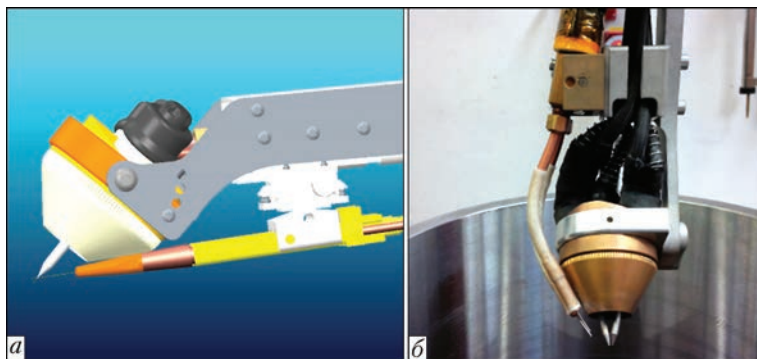


Рис. 6. Схематическое изображение сварочной горелки с одиночной (а) и спаренной «горячей» проволокой со двоянным катодом (FRONIUS SpeedClad®) (б)

На рис. 5, а показан видимый внешний вид настройки дуги двоянного катода при суммарном токе 200 А, а на рис. 5, б графически изображено сравнение давлений дуг.

В более поздней работе Г. Чжан и др. [25] применили метод Фаулера–Милна для определения профилей распределения температуры GTAW со двоянным катодом, включая влияние тока, длину дуги и пространственное расстояние электрода. Температурные максимумы были обнаружены в центре между двумя катодами, а ток оценивался при повышении температуры. Длина дуги почти не влияла на пиковую температуру, но, учитывая экспериментальные параметры настройки, распределение температуры на анодах было расширено. Более широкий зазор катода был оценен при снижении температуры в центре дуги. Е. Мартинс [26] разработал сварочную горелку со двоянным катодом для изучения полезного эффекта с целью предотвращения таких дефектов, как бугристость и подрезы валика, с обеспечением одновременно высокой производительности процесса.

**Обоснование.** Как было указано выше, сварочный ток играет важную роль при повышении производительности процесса. Основываясь на положительном эффекте GTAW со двоянным катодом в предотвращении дефектов сварки при более высоких значениях тока, исследователи сосредоточились на разработке автоматизации системы

наплавки GTAW по технологии со двоянным вольфрамовым катодом.

*Разработка сварочной горелки со двоянным катодом.* Между двумя электродами может происходить сильная интерференция дуги, которая в конечном счете способна привести к прерыванию процесса из-за повреждения катода [26]. Одним из наиболее существенных технических требований для GTAW со двоянным катодом является очень точная и осуществимая в промышленных условиях регулировка двух вольфрамовых катодов в одной горелке. Устойчивое подавление взаимодействия дуг

между двумя катодами должно быть обеспечено и для такого продолжительного автоматизированного процесса, как наплавка GTAW. Наконец, в качестве еще одной важной цели рассматривалась разработка комплектующих, легко приспосабливаемых для доступного на данный момент автоматизированного оборудования, как система наплавки GTAW ETR®.

На рис. 6 схематически изображен разработанный новаторский тип головки сварочной горелки со двоянным катодом, традиционно используемый для полностью механизированной GTAW с одиночной «горячей» проволокой (а) или, возможно, со спаренной «горячей» проволокой (б). Последний вариант применяется для дальнейшего увеличения скорости наплавки при увеличении скорости перемещения.

*Конфигурация системы.* Правильно собранная система должна обеспечить выполнение наплавки с одиночной и спаренной «горячей» проволокой. На рис. 7, а схематически изображена конфигурация для выполнения первого процесса, а на рис. 7, б — последнего.

Соответствующие параметры режима процесса и его стабильности взаимодействуют через интерфейс локальной высокоскоростной шины (LHSB), позволяя применять как чистые значения постоянного тока, так и накладывать и синхронизировать

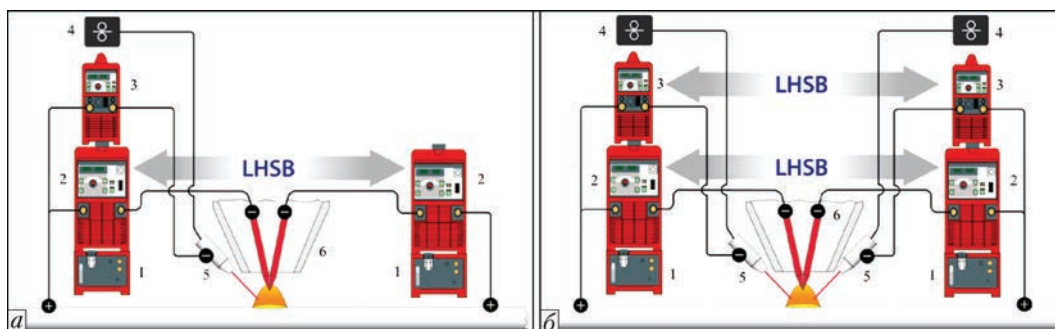


Рис. 7. Схематическое изображение конфигурации системы наплавки (SpeedClad®) со двоянным катодом с одиночной «горячей» проволокой (а) и конфигурация системы наплавки GTAW со спаренной «горячей» проволокой (б) (SpeedClad®); 1 — «охладитель»; 2 — инверторный источник питания GTAW; 3 — инверторный источник питания для подачи «горячей» проволоки; 4 — механизм подачи проволоки; 5 — контактная трубка с «горячей» проволокой; 6 — горелка со двоянным катодом

ток и движение подачи проволоки. И то и другое имеет решающее значение при плавных циклах запуска/остановки системы. Рабочая конфигурация оборудования, оснащенная системой ETR® с колонной и стрелой, имеет внешний вид, схематически показанный на рис. 8. Рисунок также показывает наложенный системный контроллер, позволяющий производить сложные определения траекторий сварки, которых следует придерживаться в зависимости от конкретной части детали.

**Экспериментальная часть.** Учитывая инновационный процесс наплавки GTAW со сдвоенным катодом и имеющееся оборудование, была предпринята попытка количественного определения различий и, по возможности, оценки технологических преимуществ других вариантов процесса наплавки. Следует отметить, что определенный экспериментальный подход был первоначально предпринят для получения предварительных результатов. То есть, наплавка с одиночным и со сдвоенным катодом как с одиночной, так и спаренной проволоками, проводилась в самом простом нижнем положении — «РА» (AWS '1F'). Затем экспериментальные условия (например, положение сварки) были ощутимо усложнены для тестирования новаторского процесса GTAW со сдвоенным катодом. В последствии экспериментальные условия для процесса наплавки GTAW

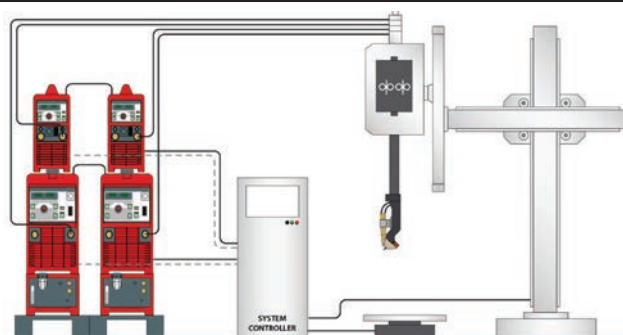


Рис. 8. Схематическое изображение системы наплавки GTAW со сдвоенным катодом (SpeedClad®)

со сдвоенным катодом были ужесточены, чтобы таким образом доказать его применимость в привычной производственной среде. Результаты прошли сравнение друг с другом, а количественные различия были обобщены.

*Наплавка GTAW с одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой.* Сварные образцы подложки были изготовлены из низкоуглеродистого основного металла марки S235 JR (в соответствии с Европейским стандартом EN 10025) толщиной 50 мм. Перед сваркой поверхность была механически обработана и очищена этиловым спиртом без предварительного нагрева. Применялись традиционные промышленные системы и компоненты фирмы FRONIUS, т.е. в качестве источников питания были использованы инвертор

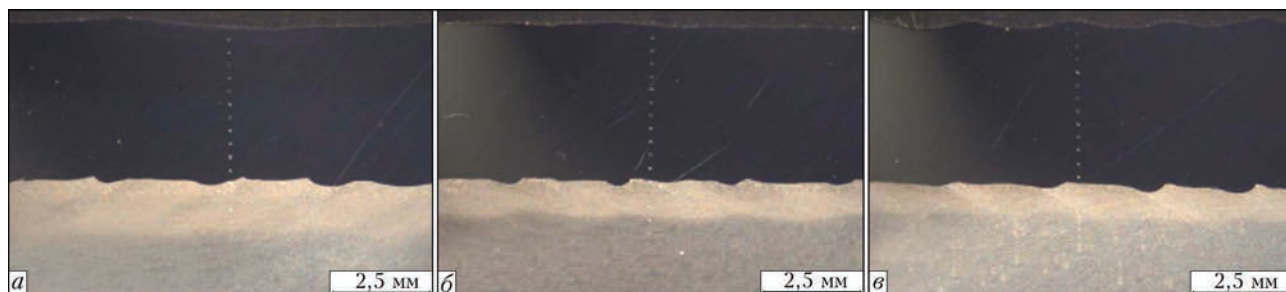


Рис. 9. Макрошлифы наплавки с одиночным катодом и спаренной «горячей» проволокой при скорости перемещения 32 (а), 50 (б) и со сдвоенным катодом и одиночной «горячей» проволокой 80 см·мин<sup>-1</sup> (в)

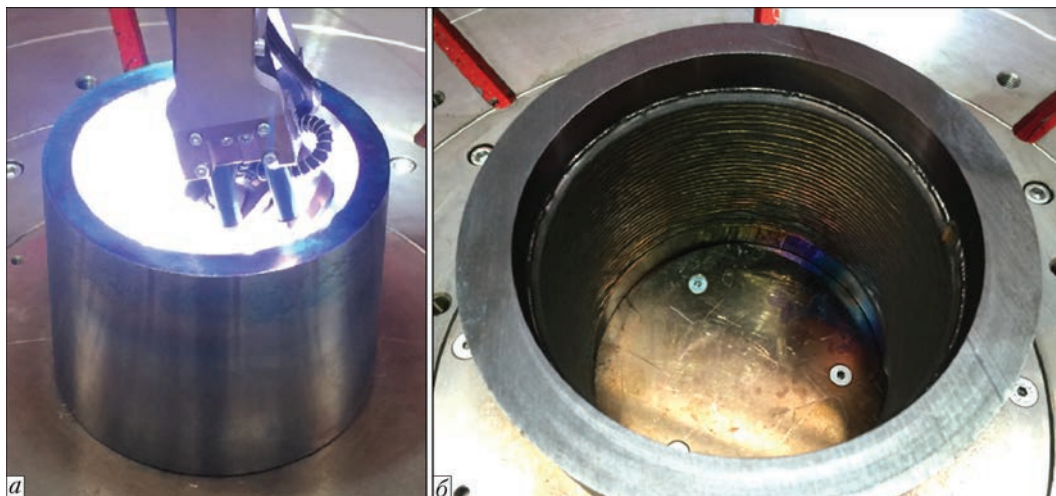


Рис. 10. Головка со сдвоенным катодом (SpeedClad®) во время процесса наплавки (а) и слои наплавленные импульсным процессом (б)



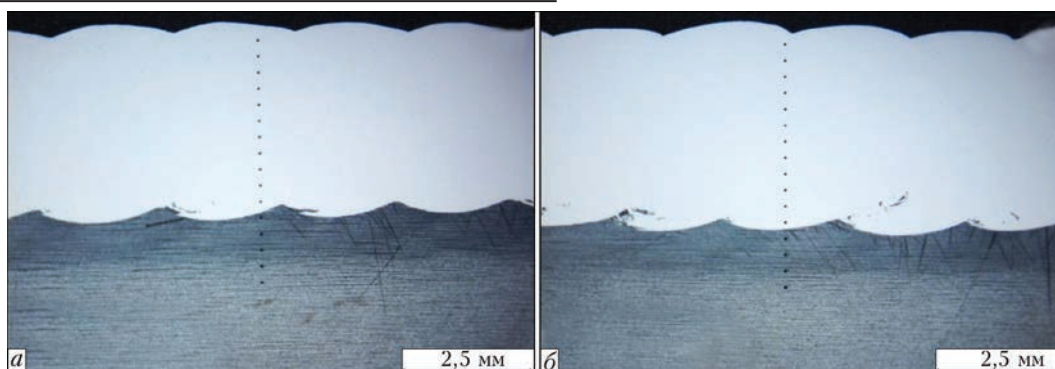


Рис. 11. Макрошлиф образца, наплавленного двоекатодом и спаренной «горячей» проволокой на постоянном токе (а) и пульсирующем токе (б) при скорости перемещения 120 см/мин и положении сварки «РС»

переменного/постоянного тока GTAW «Magic Wave 5000» (на ток до 500 А при рабочем цикле 40 %), а для наплавки «горячей» проволокой — инвертор GTAW «TransTig 2200 JOB» (на ток до 220 А при рабочем цикле 40 %). Шестиосевой шарнирный робот KUKA был оснащен шланговым пакетом длиной 4,5 м + сварочной горелкой с водяным охлаждением «TTW 4500» и наложенным системным блоком управления «HMI-T10CC» соответственно для обеспечения движения и контроля дуги. В качестве защитного газа применялся аргон (чистота 99,996 %) с расходом 12 л/мин, вольфрамовый электрод (W + 2 % оксида церия) диаметром 3,2 мм, заточенного под углом 60°. В двух сериях экспериментов применялась присадочная проволока диаметром 1,2 мм на основе никелевого сплава UNS N06625 (AWS ER NiCrMo-3) «Boehler Nibas 625-IG». Удельная плотность присадочного металла составляла 8,44 г/см<sup>3</sup> [27].

Все процессы, т.е. наплавка с одиночным катодом с «холодной» и «горячей» проволоками, а также со двоекатодом со спаренной «горя-

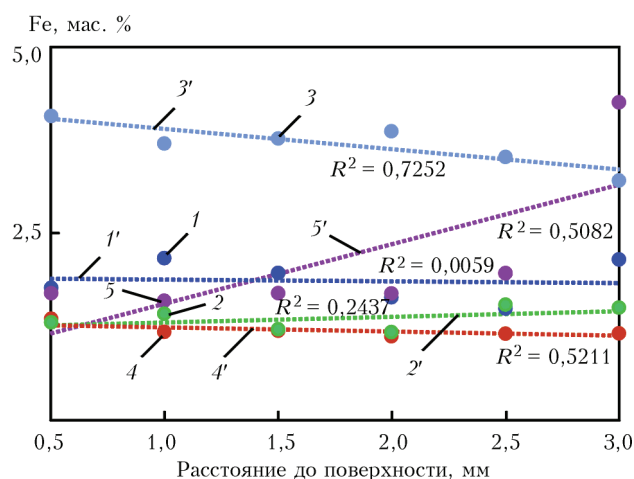


Рис. 12. Зависимость содержания железа (для применяемого процесса) от расстояния ниже наплавленного поверхностного слоя: 1, 1' — один катод, двоекатодная «горячая» проволока, 32 см/мин; 2, 2' — два катода, одна «горячая» проволока, 80 см/мин; 3, 3' — два катода, двоекатодная «горячая» проволока, импульсный постоянный ток, 120 см/мин; 4, 4' — один катод, двоекатодная «горячая» проволока, 50 см/мин; 5, 5' — два катода, двоекатодная «горячая» проволока, постоянный ток, 120 см/мин

чей» проволокой, проводились в два слоя и были ориентированы на среднюю толщину слоя примерно 2,5 мм. В соответствии с промышленными требованиями качество металла второго наплавленного слоя оценивалось по содержанию железа в нем на определенном расстоянии от поверхности. То есть, для соответствия требованиям следовало постоянно придерживаться условия, при котором концентрация железа на глубине ≤ 3,0 мм от уровня поверхности составляла ≤ 55 %.

Наплавка GTAW с одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой и со двоекатодом с одиночной «горячей» проволокой. В табл. 1 указаны данные предварительно проведенных сварочных экспериментов с использованием импульсного, а также постоянного сварочного тока прямой полярности.

Наплавка GTAW со двоекатодом со спаренной «горячей» проволокой. Применялась промышленная технология наплавки GTAW фирмы FRONIUS ETR® (рис. 8), включающая систему, оснащенную колонной и стрелой «FCB 3000-3000/ML 700», спаренную с системой поперечного скольжения «FCS 200-1000/ML 375» с новаторской «TTHW 6000 M SpeedClad®» системой GTAW с горелкой со спаренной «горячей» проволокой. Система была завершена сборкой двух источников питания постоянного тока «Transtig 5000 JOB» (на токи до 500 А при рабочем цикле 40 %) и двух источников питания для подачи двух «горячих» проволок «Transtig 2200 JOB», а также интегрированным системным блоком управления Fronius «FPA 9000».

Сварные трубчатые образцы диаметром 155 мм и толщиной стенки 20 мм для имитации наплавки внутренней поверхности трубы были изготовлены из низкоуглеродистого основного металла марки S 235 JR. Всего было наплавлено 30 валиков в горизонтальном положении сварки «РС» (AWS '2F'). Перед сваркой поверхность образца была подвергнута механической обработке и очистке этиловым спиртом. Сварочные материалы использовались аналогичные тем, что и при наплавке



Таблица 2. Данные экспериментов с применением наплавки со сдвоенным катодом (FRONIUS SpeedClad®) со спаренной «горячей» проволокой

Вид тока	$I_{св}$ , А	$I_{фон}$ , А	$U$ , В	$v_{п.пр}$ , см/мин	$v_{п.гор}$ , см/мин	$t_p$ , мс	$t_{фон}$ , мс	$f$ , Гц	$I_{гор.пр}$ , А
Непрерывный постоянный ток	370	–	10,4	4,8	120	–	–	–	240
Пульсирующий постоянный ток	430	370	11,0	5,0	120	70	70	7,1	250

GTAW с одиночным катодом с «горячей» проволокой, т.е. присадочная проволока диаметром 1,2 мм UNS N06625 и аргон в качестве защитного газа (чистота 99,996 %). Применялось цифровое управление расходом газа 24 л/мин и вольфрамовый электрод диаметром 4,0 мм, заточенный под углом 56°. Была выполнена кольцевая наплавка с получением 3,4 мм вертикального торцевого прироста, а вылет электрода поддерживался постоянным путем регулярного контроля напряжения дуги (AVC), который входил в состав системы ETR®. Осуществлялся ручной предварительный нагрев деталей до 200 °С при помощи кислородной горелки ( $C_3H_8 + O_2$ ). Температура металла была выбрана 200 °С. В табл. 2 приведены основные параметры процесса наплавки со сдвоенным катодом и спаренной «горячей» проволокой.

Из табл. 2 видно, что оба соотношения скорости подачи «горячей» проволоки и тока «горячей» проволоки и скорости перемещения поддерживались постоянными на протяжении двух серий экспериментов. При импульсной сварке соотношение между импульсным и фоновым циклом определяет значение выходного тока. При уравнивании между временем фонового и импульсного тока и учете выбранных параметров, импульсный процесс показывает значения сварочного тока немного выше среднего.

**Результаты.** Наплавка с одиночным катодом (спаренная проволока) и со сдвоенным катодом (одиночная проволока). На рис. 9, а изображены макрошлифы из циклов наплавки с одиночным катодом со спаренной проволокой и со сдвоенным катодом и одиночной проволокой.

В профиле проплавления между циклами наплавки с одиночным катодом и спаренной проволокой на импульсном токе и наплавки со сдвоенным катодом с одиночной проволокой на постоянном токе прямой полярности никаких существенных визуальных изменений не обнаруживается. Отмечено, что содержание железа во всех трех наплавках находится на допустимом уровне (ниже 5 %). Скорость наплавки была достигнута соответственно 1,83 кг/ч (32 см/мин) и 2,98 кг/ч (50 см/мин) для наплавки с одиночным катодом со спаренной проволокой, и 4,23 кг/ч (80 см/мин) для наплавки GTAW со сдвоенным катодом с одиночной проволокой.

Наплавка со сдвоенным катодом (спаренная проволока) на импульсном постоянном токе прямой полярности. На рис. 10, а обзорно показана компактная обработка головкой со сдвоенным катодом внутри образца трубы диаметром 155 мм и продемонстрировано высокое качество поверхностного слоя (б), очевидно достигнутое применением данного новаторского способа.

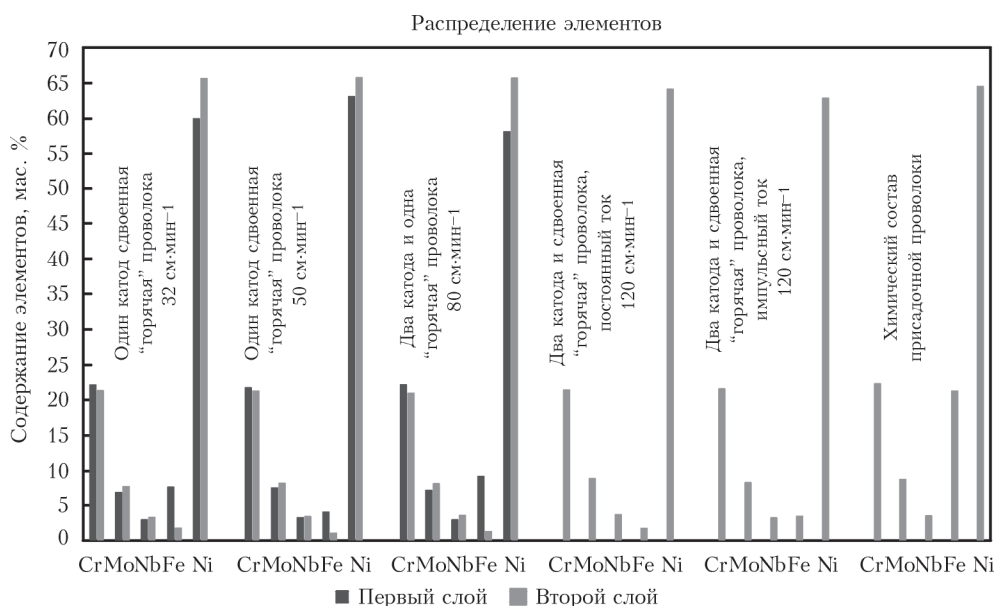


Рис. 13. Распределение элементов в наплавленном поверхностном слое в сравнении с химическим составом присадочной проволоки. Примечание: анализ наплавки со сдвоенным катодом со спаренной проволокой проведен только для второго слоя

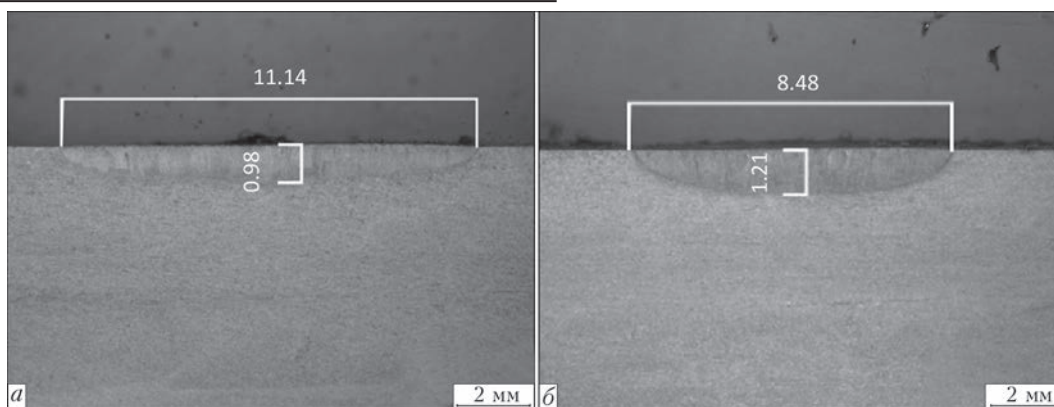


Рис. 14. Наплавка GTAW со сдвоенным катодом автономно, использующая электроды, расположенные продольно (а) и по нормали к направлению сварки (б). Примечание: диаметр катода 4,0 мм; суммарный ток сварки 300 А (2×150 А); зазор катода ~ 2,0 мм; рабочее расстояние электрода 4,0 мм и скорость перемещения 40 см/мин

В соответствии с данными параметров, приведенных в табл. 2, на рис. 11, а, б представлен макрошлиф, полученный EDX-анализом (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) (система: Oxford INCA Energy/PM55), выполненный во время экспериментов по наплавке со сдвоенным катодом.

Для всех циклов сварки на рис. 12 показано качество наплавки по содержанию железа на расстоянии 3,0 мм ниже поверхностного слоя, измеренного при помощи EDX-анализа. Как было обнаружено, скорость наплавки со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой значительно увеличилась и, соответственно, достигла значения примерно 5,6 кг/ч при постоянном токе прямой полярности и примерно 5,7 кг/ч при импульсном токе прямой полярности. Во время экспериментов была обнаружена более высокая однородность для более высоких значений тока — более высоких скоростей перемещения. Тем не менее, самая низкая скорость перемещения (32 см/мин) склонна создавать большие колебания в распределении химических элементов вдоль поверхности.

На рис. 13 представлен состав химических элементов поверхностного слоя, полученный при EDX-анализе с акцентом на основные легирующие элементы, в частности те, которые отвечают за коррозионную стойкость наплавленного слоя. Также, для сравнения сюда включен и анализ используемой присадочной проволоки. Аналогичное распределение элементов можно видеть и во втором слое, особенно при использовании новаторского метода наплавки GTAW со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой, где различия относительно химического состава сварочных материалов минимальны, за исключением, конечно, того, что содержание железа в проволоке было намеренно снижено.

На основании теоретических предположений относительно разного влияния, которое возможно зависит от изменения углов ориентации двух

катодов, т.е. от продольного до нормального, что связано с направлением сварки, дополнительные исследования применения системы со сдвоенным катодом проводились для обоих случаев. В соответствии с исследованиями и численным моделированием, проведенным С. Лен и др. [23], можно отметить заметные различия.

На рис. 14, а показан макрошлиф для варианта, когда вольфрамовые электроды расположены продольно в направлении сварки, в то время как на рис. 14, б — электроды, откорректированы на 90°, чтобы добиться их расположения по нормали к направлению сварки.

Ощутимые различия между двумя настройками можно легко заметить. В дальнейшем, как необходимое условие, предлагается, например, добиться установления достоверных количественных данных относительно влияния электродов, имеющих различную ориентацию, на степень разбавления металла шва и распределение элементов.

**Обсуждение.** Ценность результатов, проведенных экспериментов состоит в том, что они позволяют количественно сравнивать данные высокоэффективных традиционных процессов наплавки GTAW, т.е. GTAW со спаренной «горячей» проволокой с новаторским методом, именуемым GTAW со сдвоенным катодом.

Последний может быть использован как с применением одиночной, так и спаренной присадочной проволокой, что ведет к достижению значительно более высоких скоростей наплавки. Были выбраны данные сварочных экспериментов, которые отличаются на предварительном этапе, когда используется прототип оборудования со сдвоенным катодом, а на заключительном этапе особое внимание сосредоточено на промышленном применении и направлено на достижение обоснованной оценки характеристик процесса и удовлетворяющих характеристик качества, которые подтверждаются другими исследованиями.

Несмотря на то, что за основу взяли сварку плавлением и GTAW с множеством катодов (была исследована такими учеными, как Дж. Нориш [21], М. Ямада [18, 19] и К. Кобаяши и др. [20]), мы смогли дополнить новыми данными разработанный новаторский способ, который, прежде всего, способен увеличить скорость перемещения дуги с предупреждением дефектов сварки и повышением производительности наплавки. Тем не менее, по количественному подтверждению и, следовательно, только по качественному предположению на данном этапе, мы полагаем, что основополагающий механизм, влияющий как на низкое разбавление, так и на устранение дефектов сварки (подрез), возникает при более низком давлении дуги с одинаковым суммарным током по сравнению со сваркой с одиночным катодом, что связано с определенным расположением катода в разработанной сварочной головке. Необходимо отметить, однако, что результаты, полученные в работе, по сравнению с результатами других исследователей значительно отличаются друг от друга. Так, К. Кобаяши и др. [20] обнаружили, что давление дуги равно примерно 1500 Па для одиночного катода (сварочный ток 200 А + «длина дуги» 2 мм) и примерно 250 Па при расположении со сдвоенным катодом. При том же суммарном токе и аналогичными экспериментальными настройками Г. Чжан и др. [22] и С. Лен и др. [23] определили максимальное давление дуги примерно 500 Па (с одиночным катодом) и примерно 95 Па (со сдвоенным катодом).

Помимо этих различий, тем не менее, мы считаем, что соотношение между значением сварочного тока и давлением дуги, как, например, согласно постулату Й. Адоний др. [15] и С. Рохмена и А. Гуи [16], применимо также и к наплавке GTAW с «горячей» проволокой, по крайней мере, для условий экспериментов, описанных в данной статье. Это связано с более высокими коэффициентами разбавления, наблюдаемыми при наплавке со сдвоенным катодом на импульсном токе (что таким образом увеличивает средний ток) по сравнению с наплавкой на постоянном токе прямой полярности.

Несмотря на то, что был достигнут более высокий средний ток сварки, было обнаружено, что при импульсном цикле происходило сравнительно небольшое повышение скорости наплавки. Это предположительно можно объяснить лишь незначительным увеличением скорости подачи проволоки по сравнению с циклом на постоянном токе (5,0 м/мин по сравнению с 4,8 м/мин). Учитывая дальнейшие соотношения разбавления, было обнаружено увеличение импульсного тока GTAW и, соответственно, можно предположить о постоянном соотношении между скоростью подачи проволоки и током «горячей» проволоки, несмотря на утверждающие результаты К. Шинозаки и др. [14].

Можно предположить, что на плавление присадочной проволоки больше всего влияет ток «горячей» проволоки. Это мнение отлично от того, при котором считают, что плавление присадочной проволоки является функцией тока дуги. Тем не менее, на наш взгляд, целесообразно проведение дальнейшей работы по оценке двух этих предположений, а также соотношения между скоростью подачи проволоки, током «горячей» проволоки и током дуги.

Учитывая наши эксперименты (см. рис. 14) по изменению угла ориентации двух катодов, которое связано с направлением сварки, мы принимаем предположения С. Лена и др. [23] об изменении плотности тока и температурных полей вокруг катодов, что подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований. Это особенно касается наплавки GTAW со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой. Следовательно, несмотря на отсутствие практических доказательств в исследованиях, рассматриваемых в данной статье, предполагается, что и разбавление металла шва и высота наплавленного валика могут иметь непосредственную зависимость от угла ориентации двух катодов, тем самым влияя в дальнейшем на распределение элементов в металле шва и такие свойства, как, например, сопротивление коррозии наплавленного слоя.

## Выводы

Из экспериментов, описанных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

- Наплавка (GTAW) с одиночным катодом и с «горячей» проволокой (с использованием двух проволок диаметром 1,2 мм и характерным химическим составом UNS N06625) подтвердила свою надежность, показав результаты сварки, всецело соответствующие промышленным требованиям.
- Новаторская система дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) со сдвоенным катодом прошла сравнение с системой наплавки с одиночным катодом.
- Новаторская система доказала свою способность к значительному увеличению показателей сварки, т.е. производительности наплавки и скорости перемещения, и, самое главное, надежному соответствию всем промышленным требованиям.
- Была проведена количественная оценка содержания железа, как показателя, определяющего качество наплавленного слоя, которое надежно оставалось ниже порогового значения при использовании систем наплавки GTAW со сдвоенным катодом как с одиночной проволокой (сварка в положении «РА»), так и спаренной проволокой (сварка в положении «РС»).



• Соотношение между значением сварочного тока и давлением дуги подтвердилось и показало свою применимость также и к экспериментальным настройкам, которые использовались в данном исследовании.

• Несмотря на отсутствие количественного подтверждения, сниженное давление дуги считается в данном исследовании основным фактором уменьшения глубины проплавления во время наплавки GTAW со сдвоенным катодом, что таким образом значительно снижает коэффициент разбавления наплавленного металла с основным по сравнению с наплавкой GTAW с одиночным катодом при аналогичном значении сварочного тока.

• Считается, что на скорость наплавки в основном влияет ток «горячей» проволоки в отличие от тока дуги, и в этом отношении наши результаты подтверждаются данными других исследователей.

• Считается, что результаты эксперимента с изменением угла ориентации сдвоенного катода, что связано с направлением сварки (продольным или по нормали), подтверждают теоретические предположения других исследователей о целесообразности проведения дальнейшей работы.

• Считается, что наплавка GTAW со сдвоенным катодом будет в будущем постоянно и надежно расширять диапазон применений, где требуется высокая производительность и соблюдение критерия «нулевого дефекта».

1. Egerland S. Control led GMA welding processes prove applicability for high-quality weld overlay. In: Proceedings of the welding and repair technology for power plants: 9th international EPRI Conference; 2010 June 23-25; Fort Myers. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2010.
2. Egerland S. Status and perspectives in overlaying under particular consideration of sophisticated welding processes. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 2009, –27(2), P. 50–54.
3. Egerland S., Helmholtz R. Overlaying (cladding) of high temperature affected components by using the cold metal-transfer process. In: Mayr P., Editor. Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry. Austria: Verlag der Technischen Universität Graz, 2008. P. 327–332.
4. Freeman N.D., Manz A.F., Saenger J.F.Jr., Stanchus F.T., inventors; Union Carbide Corp, assign. Method for depositing metal with a TIG arc. United States patent US 3483354.1969 Dec 9.
5. Manz A.F., Norman R., Wroth R.S., inventors; Union Carbide Corp, assign. Electric arc working with hot wire addition. United States patent US 3163743.1964 Dec 29.
6. Manz A.F., inventors; Union Carbide Corp, assign. Consumable electrode arcless electric working. United States patent US 3122629A. 1964 Feb 25.
7. Hori K., Myoga T., Shinomiya M., Eiji W., Kazuki K., Toshiaki T. et al., inventors; Kaisha BHK, assign. Semi-automatic hot wire TIG welding equipment. United States patent US 4801781. 1989 Jan 31.
8. Mizuno T., Shimizu T., inventors; Kaisha MDK, assign. Hot wire welding system. United States patent US 4464558A. 1984 Aug 7.
9. Goldsberry C. Hot-wire TIG: not new but gaining appeal [web page], [access in 3 oct. 2015]. Cleveland: Welding Design & Fabrication; 2007. Available from: <http://weldingdesign.com/archive/hot-wiretig-not-new-gaining-appeal>.
10. Manabe Y., Wada H., Zenitani S., Hiromoto Y., Hashimoto Y. Investigation on TIG welding using 2 filler wires with electromagnetically controlled molten pool process in horizontal position. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 2000. –18(1). – P. 40–50. <http://dx.doi.org/10.2207/qjws.18.40>.
11. Hori K., Watanabe H., Myoga T., Kusano K. Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire: research on pulse heated hot wire TIG welding processes. Welding International. – 2004, 18(6). – P. 456–468. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2004.3281>.
12. Ueguri S., Tabata Y., Shimizu T., Mizuno T. A study on control of deposition rate in hot-wire TIG welding. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 1986. – 4(4). – P. 678–684. <http://dx.doi.org/10.2207/qjws.4.678>.
13. Yamamoto M., Shinozaki K., Myoga T., Kanazawa T., Arashin H. Development of ultra-high-speed GTA welding process using pulse-heated hot-wire. In: Pre-Prints of the 82nd National Meeting of JWS, Tokyo: Japan Welding Society, 2008. – P. 228–229.
14. Shinozaki K., Yamamoto M., Nagamitsu Y., Uchida T., Mitsu-hata K., Nagashima T. et al. Melting phenomenon during ultra-high-speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 2009. – 27(2). – P. 22–26. <http://dx.doi.org/10.2207/qjws.27.22s>.
15. Adonyi Y., Richardson R., Baeslack W. Investigation of arc force effects in subsurface GTA welding. Welding Journal. – 1992. – 71(9). – P. 321–330.
16. Rokhlin S., Guu A. A study of arc force, pool depression, and weld penetration during gas tungsten arc welding. Welding Journal. – 1993. – 72(8). – P. 381–390.
17. Mendez P., Eagar T. Penetration and defect formation in high-current arc welding. Welding Journal. – 2003. – 82(10). – P. 296–306.
18. Yamada M. Development of high efficiency TIG welding method. 1st Report of the Japan Welding Society. – 1998. – 63. – P. 24–25.
19. Yamada M., Tejima A., inventors; Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., assign. TIG welding apparatus and method. United States patent US 6982397. 2006 Jan 3.
20. Kobayashi K., Nishimura Y., Iijima T., Ushio M., Tanaka M., Shimamura J., et al. Practical application of high efficiency twin-arc TIG welding method (SEDAR-TIG) for PCLNG storage tank. Welding in the World. 2013. – 48(7-8). P. 35–39.
21. Norrish J. Advanced welding processes. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
22. Zhang G., Leng X., Lin W. Physics characteristic of coupling arc of twin-tungsten TIG welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2006. – 16(4). – P. 813–817.
23. Leng X., Zhang G., Wu L. The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure. Journal of Physics D, Applied Physics. – 2006. – 39(6). – P. 1120–1126. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/39/6/017>.
24. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift für Physik. – 1955. – 141(1). – P. 198–216.
25. Zhang G., Xiong J., Gao H., Wu L. Effect of process parameters on temperature distribution in twin-electrode TIG coupling arc. – Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2012. – 113(15). – P. 1938–1945. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.05.018>.
26. Martins A. Avaliação da soldagem tig autogena duplo catodo twin Tig [trabalho de graduação]. Fionanopolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2010.
27. Special Metal Corporation. Inconel alloy 625. Special metals. 2006. – Material Manufacturer Data Sheet.

Поступила в редакцию 15.01.2016

# ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

**В.В. КНЫШ, С.А. СОЛОВЕЙ, Л.И. НЫРКОВА, Л.Г. ШИТОВА, А.А. РЫБАКОВ**

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

В работе экспериментально установлена эффективность применения высокочастотной механической проковки (ВМП) для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, которые эксплуатируются в условиях умеренного климата. Коррозионные повреждения, характерные для таких конструкций после длительной эксплуатации, получали выдержкой сварных соединений в камере влаги Г4 при повышенной влажности и температуре на протяжении 1200 ч. Проведены металлографические исследования зоны сварного шва и зоны термического влияния сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях до и после воздействия коррозионной среды. Установлено, что в результате упрочнения ВМП стойкость соединений к воздействию повышенной влажности и температуры возрастает. Проведены испытания на усталость сварных соединений в исходном и упрочненном состояниях до и после выдержки в камере влаги. Установлено, что упрочнение технологией ВМП до коррозионного воздействия позволяет повысить предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов тавровых сварных соединений на 48 % и увеличить циклическую долговечность в 6...8 раз. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 7.

*К л ю ч е в ы е с л о в а* : тавровое сварное соединение, коррозионная среда, усталость, высокочастотная механическая проковка, ультразвуковая ударная обработка, повышение сопротивления коррозионной усталости

Инженерные металлоконструкции в процессе длительной эксплуатации могут подвергаться одновременному воздействию внешнего переменного нагружения и коррозионно-агрессивных сред. Срок службы таких конструкций определяется сопротивлением коррозионной усталости их наиболее нагруженных соединений и узлов. Для повышения характеристик сопротивления усталости узлов и элементов конструкций на практике широко применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД) металла. Обзор основных методов ППД представлен в работе [1]. В последние годы активно проводятся исследования по установлению эффективности применения методов ППД для повышения коррозионной усталости и коррозионной стойкости металлов и их сварных соединений [2–12]. Некоторые работы по данной тематике посвящены эффективности применения такого метода ППД, как высокочастотная механическая проковка (ВМП), известная в зарубежной литературе под названием «ультразвуковая ударная обработка» [3, 7, 9, 11, 12]. Так, в работе [9] установлено, что в зависимости от технологических параметров выполнения ВМП коррозионная стойкость упрочненного поверхностного слоя материала, определенная по потенциалу коррозии, может как повышаться, так и понижаться относительно основного материала. Экспериментальными исследованиями коррози-

онной усталости сварных соединений низколегированных сталей в растворе NaCl установлено, что упрочнение технологией ВМП позволяет существенно увеличить их циклическую долговечность [3, 7, 11]. В работе [12] показана перспективность применения комбинированного упрочнения сварных соединений электроискровым легированием и ВМП для повышения сопротивления коррозионной усталости в сравнении с упрочнением лишь ВМП. Следует отметить, что в данных работах при проведении испытаний на коррозионную усталость время пребывания образцов в коррозионной среде составляло от 10 до 200 ч. При таком времени пребывания образцов в коррозионной среде, как правило, не происходит существенных коррозионных повреждений упрочненного ВМП слоя металла, что может приводить к получению завышенных характеристик сопротивления коррозионной усталости сварных соединений, необходимых при расчете конструкций длительной эксплуатации. Коррозионные повреждения, характерные эксплуатируемым металлоконструкциям, можно получить предварительной выдержкой сварных соединений в коррозионно-агрессивных средах.

Цель настоящей работы — оценить эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений на стадии изготов-

ления металлоконструкций, длительная эксплуатация которых будет происходить в условиях повышенной влажности и температуры.

**Материал и методика исследований.** Экспериментальные исследования на коррозионную усталость проводили на образцах тавровых сварных соединений низколегированной стали 15ХСНД ( $\sigma_T = 400$  МПа,  $\sigma_B = 565$  МПа), которая широко применяется для изготовления элементов металлоконструкций длительной эксплуатации (например, в пролетных строениях железнодорожных и автомобильных мостов), имеет повышенную прочность, хорошо сваривается, устойчива в атмосферных условиях и работоспособна в диапазоне температур от  $-70$  °С до  $45$  °С. Химический состав стали 15ХСНД следующий, мас. %: 0,142 С; 0,466 Si; 0,63 Mn; 0,020 S; 0,013 P; 0,31 Ni; 0,66 Cr; 0,34 Cu.

Заготовки под образцы сварных соединений вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 мм 12 категории. Размер заготовок под тавровые соединения составлял  $350 \times 70$  мм. Тавровые сварные соединения получали путем приварки ручной дуговой сваркой электродами марки УОНИ 13/55 поперечных ребер жесткости (также из стали 15ХСНД) с двух сторон пластины угловыми швами. Корень (первый слой) проваривали электродами диаметром 3 мм, шов (второй слой) формировали электродами диаметром 4 мм. Форма и геометрические размеры образцов тавровых сварных соединений приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в инженерных сварных металлоконструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части 50 мм выбирали исходя из мощности испытательного оборудования.

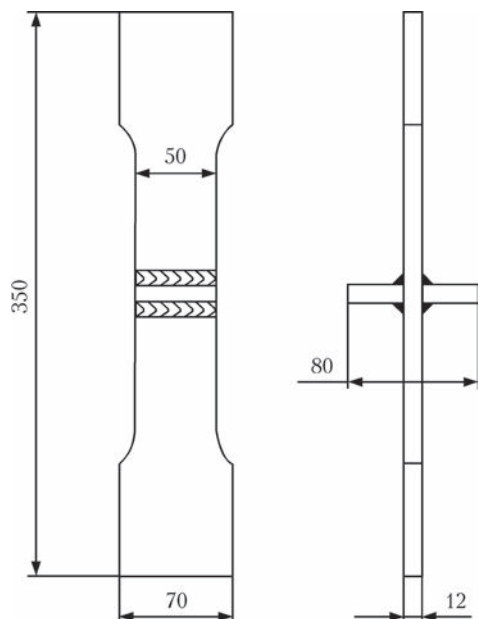


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образца таврового сварного соединения

Экспериментальные исследования проводили на сервогидравлической машине УРС-20 при переменном растяжении с асимметрией цикла  $R_\sigma = 0$  и частотой 5 Гц при регулярном нагружении. Критерием завершения испытаний служило полное разрушение образцов или превышение базы испытаний  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений.

Испытывали 4 серии образцов тавровых сварных соединений:

- образцы в исходном (неупрочненном) после сварки состоянии (первая серия),
- образцы, упрочненные технологией ВМП (вторая серия),
- образцы в неупрочненном состоянии после выдержки в коррозионной среде (третья серия);
- образцы, упрочненные ВМП, после выдержки в коррозионной среде (четвертая серия).

Упрочнение сварных соединений технологией ВМП проводили оборудованием USTREAT-1.0, в котором ручной компактный ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем соединен с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. При упрочнении сварных соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва на ЗТВ (по линии сплавления). В качестве упрочнителя использовали однорядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП при обработке тавровых сварных соединений составляла 1 мм/с. Амплитуду колебаний торца волновода ручного ударного инструмента задавали 25 мкм.

Для получения предварительных коррозионных повреждений сварные образцы третьей и четвертой серий помещали в камеру Г4, в которой при повышенной влажности (95 %) и температуре ( $40$  °С) выдерживали на протяжении 1200 ч.

Металлографические исследования поверхностного слоя металла шва и ЗТВ тавровых сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях проводили до и после выдержки в камере при повышенной влажности и температуре.

**Результаты исследований.** Металлографическими исследованиями основного металла и сварного соединения установлено следующее. Микроструктура основного металла проката стали 15ХСНД ферритно-перлитная с объемной частью перлитной составляющей около 30...35 %, полосчатость 3-4 балл ряда Б по ГОСТ 5640. Величина зерна соответствует № 7-9 шкалы 1 по ГОСТ 5639.

Перед исследованиями микроструктуры сварных соединений определяли размеры швов и ЗТВ. Ширина угловых швов составляла 12,8...14,3 мм, высота 9,5...12,0 мм. При этом высота первого слоя шва 4,5...6,5 мм, второго 6,8...8,3 мм. ЗТВ,



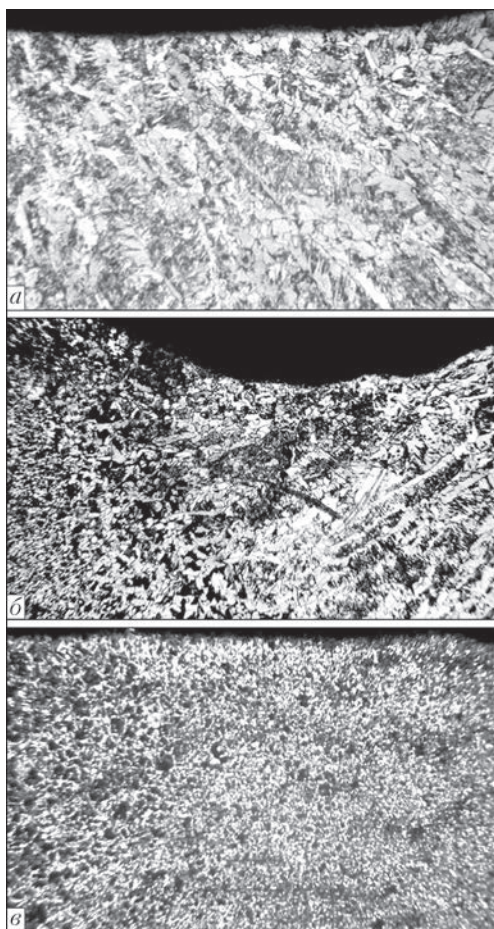


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) поверхностного слоя металла шва (а), металла ЗКЗ (б) и металла ЗТВ таврового сварного соединения в исходном состоянии

обусловленная видимыми изменениями структуры металла в поверхностных слоях проката, составляла 1,04...2,00 мм, а в удаленных от поверхности слоях металла 3,0...3,8 мм.

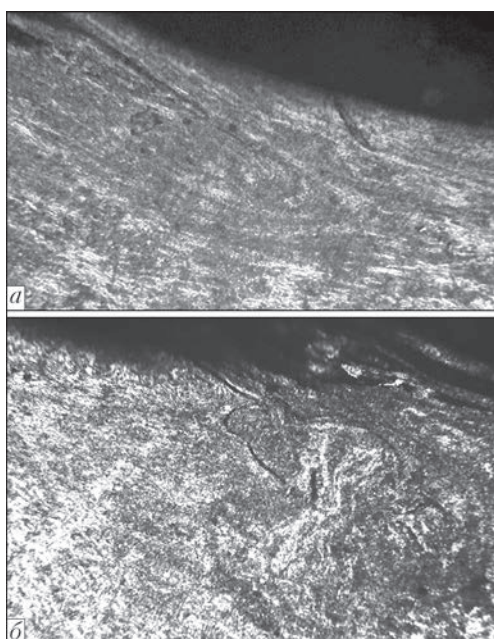


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 250$ ) металла шва (а) и металла ЗТВ (б) после упрочнения технологией ВМП

Микроструктура первого слоя металла шва представляет собой ячеистую ферритно-перлитную структуру с величиной зерна № 6–8 по ГОСТ 5639 шкала 1. Также выявлены зерна феррита с мелкодисперстными выделениями МАК-фазы зернистого типа и зерен, свободных от выделений. Перлитные образования имеют вид узких областей по границам зерен феррита. Микроструктура второго слоя металла шва имеет достаточно однородную дендритную ферритно-перлитную структуру. Ферритная составляющая содержит зерна с пластинчатыми выделениями МАК-фазы по типу верхнего бейнита, мелкодисперсные частицы зернового типа (по типу нижнего бейнита), а также зерна достаточно крупноогольчатого феррита.

Микроструктура металла ЗТВ следующая. Непосредственно около поверхности размер зерен зоны крупного зерна (ЗКЗ) отвечает № 3–4 по ГОСТ 5639, а ее протяженность 0,52 мм (2...3 зерна). На расстоянии около 3 мм от поверхности размер ЗКЗ увеличивается до 1,04...1,2 мм, но размер зерен остается на уровне № 3–4. Величина перлитно-ферритных зерен зоны мелкого зерна (ЗМЗ), размер которой составляет около 1 мм, составляет № 7–10. В металле ЗКЗ первого шва сформировалась в основном смесь ферритно-перлитных зерен № 5–8 протяженностью до 0,91 мм. Структура ЗКЗ второго сварного шва состоит из феррита с плотно распределенными в его матрице выделениями МАК-фазы с хаотичными дисперсными частицами зернистого типа, реже — с упорядоченными частицами пластинчатого типа (по нижнему и верхнему бейниту). В зернах наблюдается фрагментация — деление зерен на отдельные фрагменты с МАК-фазой разной морфологии и ориентации. Границы зерен оконтурены ферритом в виде прослоек шириной 1...3 мкм и цепей удлинённых зерен № 8–9. Твердость первого слоя металла шва находится в диапазоне  $HV_{0,98}$  — 232...241, второго  $HV_{0,98}$  — 292...325. Микроструктура поверхностного слоя металла шва, металла ЗКЗ и металла ЗТВ таврового сварного соединения в исходном состоянии приведены на рис. 2.

После ВМП на границе сплавления шва с основным металлом в поверхностных слоях металла швов и ЗТВ образовались практически одинаковые по размерам характерные канавки. Ширина канавок находится в диапазоне 3,0...3,5 мм, глубина 280...340 мкм. Под канавкой сформировались пластически деформированные слои металла шва шириной 1,7...1,82 мм и металла ЗТВ шириной 1,3...1,7 мм. Глубина пластически деформированного слоя металла шва и ЗТВ, обусловленная видимыми изменениями структуры металла под канавкой, составила 390...650 мкм. ВМП существенно изменило литую структуру метал-



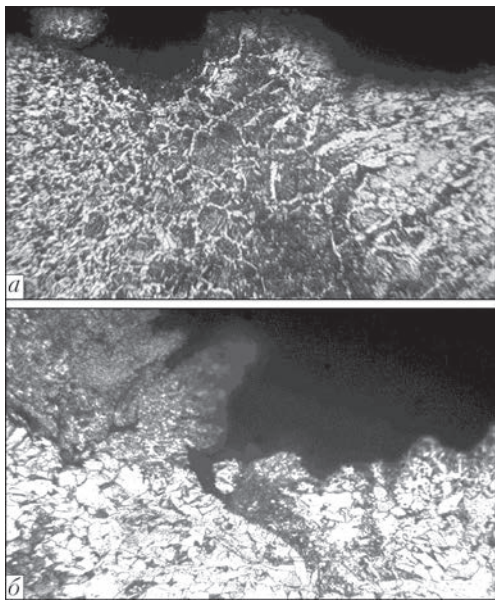


Рис. 4. Коррозионные повреждения в металле ЗТВ таврового сварного соединения в неупрочненном состоянии после испытаний в условиях повышенной влажности и температуры: *a* —  $\times 100$ ; *б* —  $\times 250$

ла шва (рис. 3, *a*). В поверхностном слое металла глубиной до 130 мкм образовались вытянутые зерна бейнита с коэффициентом формы зерна  $K_\phi = 5 \dots 17$  ( $K_\phi = a/b$ , где  $a$  и  $b$ , соответственно, длина и ширина вытянутого зерна), которые практически параллельны дну канавки, и ниткоподобные прожилки феррита. На расстоянии 260 мкм от дна канавки наблюдаются зерна феррита с  $K_\phi = 4 \dots 7$  и отдельные зерна бейнита. Выявлены также изменения зеренной структуры металла ЗТВ (рис. 3, *б*). В поверхностных слоях ЗКЗ глубиной до 280 мкм формируются вытянутые под углом ко дну канавки зерна бейнита и феррита с коэффициентом формы зерна  $K_\phi = 7 \dots 15$ . С дальнейшим удалением от дна канавки и в ЗМЗ наблюдаются мелкие ферритно-перлитные зерна 9–11 номеров. В упрочненном слое металла выявлено несколько отслоений длиной от 40 до 300 мкм. Проведены измерения микротвердости ( $HV_{0,20}$ ) пластически деформированного слоя металла. За счет существенного повышения уровня плотности дислокаций вследствие ВМП микротвердость упрочненного слоя металла ( $HV_{0,20} = 344 \dots 445$ ) на 27 % выше твердости металла ЗКЗ и на 35 % выше твердости металла шва.

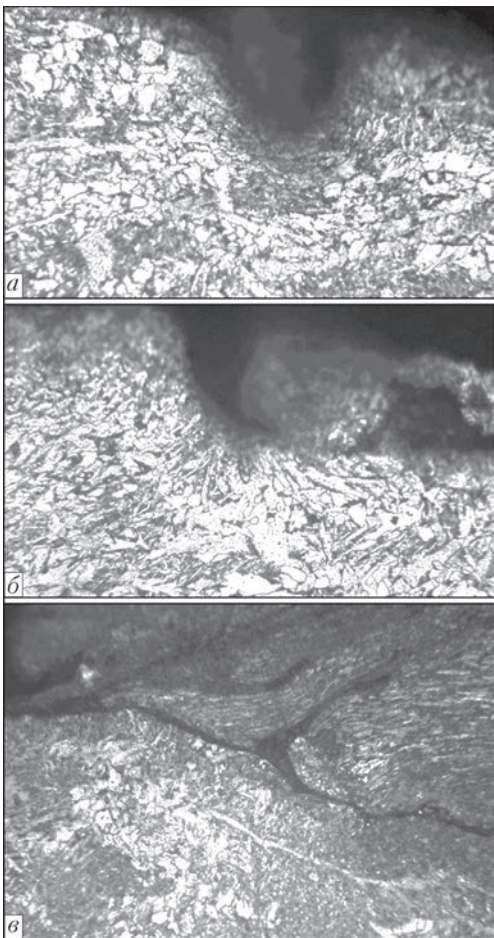


Рис. 5. Коррозионные повреждения в виде пятен (*a*, *б*) и трещин (*в*) в поверхностном слое металла таврового сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, после испытаний в условиях повышенной влажности и температуры: *a* —  $\times 100$ ; *б*, *в* —  $\times 250$

В поверхностных слоях металла шва и ЗТВ таврового сварного соединения в исходном (неупрочненном) состоянии после выдержки в камере Г4 при повышенной влажности и температуре наблюдаются достаточно глубокие и протяженные коррозионные повреждения в виде пятен размером до  $2,8 \times 0,26$  мм, а иногда в виде каверн размером до  $1,56 \times 1,17$  мм (рис. 4). В пластически деформированных ВМП поверхностных слоях металла угловых швов и металла ЗТВ после выдержки в камере Г4 выявлены аналогичные виды коррозии (рис. 5, *a*, *б*), максимальный размер которых не превышает  $1,95 \times 0,16$  мм. Кроме того, в упрочненном слое металла шва наблюдается коррозия в виде игольчатых межкристаллитных тре-

Размеры коррозионных повреждений в поверхностных слоях металла швов и ЗТВ тавровых сварных соединений стали 15ХСНД после выдержки 1200 ч при повышенной влажности и температуре

Состояние образцов	Коррозия пятнами поверхностных слоев металла шва			Коррозия пятнами поверхностных слоев металла ЗТВ		
	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Суммарный размер проекции площади поражения, мм <sup>2</sup>	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Суммарный размер проекции площади поражения, мм <sup>2</sup>
Без упрочнения	31,2	0,091...1,17	17,615	38,5	0,13...0,39	5,85
Упрочненные ВМП	23	0,13...1,17	12,44	29	0,13...0,26	4,42

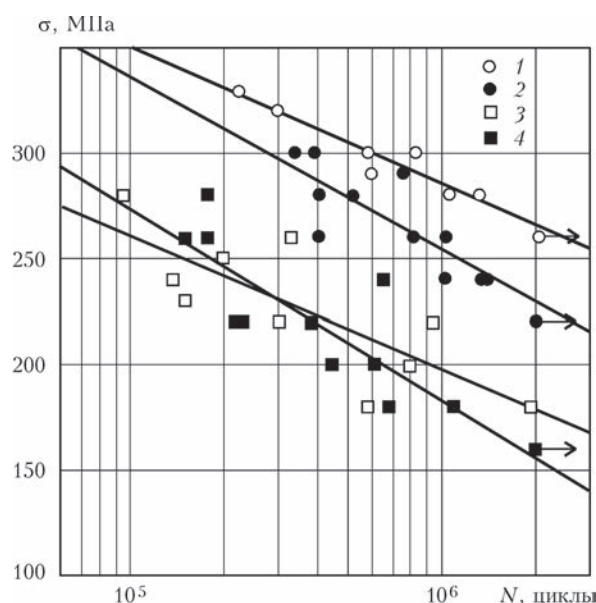


Рис. 6. Кривые усталости тавровых сварных соединений стали 15XCHD: 1, 2 — в упрочненном технологией ВМП состоянии до и после выдержки в камере влаги Г4 на протяжении 1200 ч, соответственно; 3, 4 — в исходном (неупрочненном) состоянии до и после выдержки в камере влаги Г4 на протяжении 1200 ч, соответственно

щин с продуктами коррозии длиной 0,65...1,00 мм и глубиной до 0,65 мм (рис. 5, в). Результаты металлографических исследований с вычисленными значениями степени поражения и суммарными размерами проекций площади поражения, глубины проникновения коррозионных пятен и каверн в поверхностные слои металла угловых швов и ЗТВ тавровых сварных соединений приведены в таблице. Глубина проникновения каверн в поверхностном слое металла ЗТВ не превышает 0,39 мм и 0,26 мм, соответственно для сварных соединений в исходном и упрочненном ВМП состояниях. Коррозионные каверны в поверхностных слоях металла шва сварных соединений как в исход-

ном состоянии, так и в упрочненном ВМП, более глубокие и достигают 1,17 мм. По-видимому, это связано со спецификой формирования второго слоя сварного шва при ручной дуговой сварке. В целом, образцы тавровых сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, являются более стойкими к влиянию повышенной влажности и температуры (см. таблицу).

Результаты усталостных испытаний всех четырех серий образцов таврового сварного соединения стали 15XCHD представлены на рис. 6, а внешний вид зоны шва сварного соединения в исходном и упрочненном ВМП состояниях после выдержки в камере влаги на протяжении 1200 ч на рис. 7.

Из приведенных кривых усталости (кривые 1 и 3, рис. 6) следует, что применение технологии ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений существенно увеличивает характеристики сопротивления усталости тавровых сварных соединений без коррозионных повреждений. Циклическая долговечность соединений увеличивается более чем в 20 раз, а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов повышается примерно на 47 % (от 180 до 265 МПа). Выдержка образцов тавровых сварных соединений в камере повышенной влажности и температуры на протяжении 1200 ч приводит к снижению пределов ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов неупрочненных сварных соединений примерно на 14 % (от 180 до 155 МПа), а упрочненных технологией ВМП — примерно на 13 % (от 265 до 230 МПа). Результаты, полученные на сварных соединениях после коррозионного воздействия (кривые 2 и 4, рис. 6), показывают, что предвари-



Рис. 7. Внешний вид зоны шва таврового сварного соединения в исходном (а) и упрочненном технологией ВМП (б) состояниях после выдержки на протяжении 1200 ч в условиях повышенной влажности и температуры



тельное упрочнение технологией ВМП повышает предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов таких соединений примерно на 48 % (от 155 до 230 МПа), а циклическую долговечность увеличивает в 6...8 раз. Разрушение упрочненных ВМП сварных соединений, испытанных как до, так и после выдержки в камере влаги Г4, происходило в основном вдали от сварного шва и ЗТВ.

Таким образом, экспериментально полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях умеренного климата при воздействии переменного нагружения (кривые 2 и 4, рис. 6). При этом следует отметить, что защита упрочненного ВМП поверхностного слоя металла от прямого воздействия атмосферных условий, т.е. от коррозионных повреждений (например, за счет использования лакокрасочных покрытий), позволит достичь максимальных характеристик сопротивления усталости таких соединений (кривая 1, рис. 6).

### Выводы

1. Проведены металлографические исследования поверхностных слоев металла шва и ЗТВ сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях до и после воздействия коррозионной среды. На основе вычислений степени и глубины, а также суммарного размера проекции площади поражений коррозионными пятнами и кавернами поверхностных слоев металла угловых швов и ЗТВ тавровых сварных соединений установлено, что упрочнение технологией ВМП повышает стойкость соединений к воздействию повышенной влажности и температуры.

2. Подтверждено, что упрочнение технологией ВМП существенно повышает характеристики сопротивления усталости сварных соединений низколегированных сталей на воздухе. Циклическая долговечность тавровых сварных соединений стали 15ХСНД после упрочнения технологией ВМП увеличивается более чем в 20 раз, а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов повышается на 47 %.

3. Установлена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций, работающих в условиях умеренного климата. Упрочнение технологией ВМП тавровых сварных соединений стали 15ХСНД перед выдержкой в камере повышенной влажности и температуры на протяжении 1200 ч приводит к увеличению циклической долговечности в 6...8 раз в зависимости от уровней прикладываемых напряжений и повышению предела ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов на 48 %.

1. Kulekci M.K., Esme U. Critical analysis of processes and apparatus for industrial surface peening technologies // The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – 74, № 9. – P. 1551–1565.
2. Похмурский В.И., Хома М.С. Коррозия в металлах и сплавах. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
3. Коломийцев Е.В., Серенко А.Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионной средах // Автомат. сварка. – 1990. – № 11. – С. 13–15.
4. Nasilowska B., Bogdanowicz Z., Wojucki M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance // J. of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 115. – P. 276–282.
5. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI 316L / A.A. Ahmed, M. Mhaede, M. Wollmann, L. Wagner // Surface & Coating Technology. – 2014. – Vol. 259. – P. 448–455.
6. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel / Hang-sang Lee, Doo-soo Kim, June-sung Jung et al. // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51. – P. 2826–2830.
7. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В.В. Кныш, А.З. Кузьменко, И.И. Вальтерис, С.А. Соловей // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
8. Коломийцев Е.В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12Х18Н10Т и методы ее повышения // Там же. – 2012. – № 12. – С. 41–43.
9. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, M.A. Vasylyev, M.O. Lefimov // Materials Sci. and Eng. A. – 2007. – Vol. 458. – P. 253–261.
10. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel // Materials and Design. – 2011. – № 32. – С. 3287–3292.
11. Daavary M., Sadough Vanini S.A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment // Materials Letter. – 2015. – Vol. 139. – P. 462–466.
12. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием / Г.И. Проккопенко, Б.Н. Мордюк, В.В. Кныш и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 34–40.

Поступила в редакцию 02.02.2016

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

В.А. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, И.В. ЛЕНДЕЛ<sup>1</sup>, А.В. ЯРОВИЦЫН<sup>1</sup>, Е.И. ЛОСЬ<sup>1</sup>, С.В. ДРАГАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Нац. ун-т кораблестроения. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 19

Показано, что процесс дуговой наплавки в углекислом газе с импульсной подачей электродной проволоки по сравнению с постоянной ее подачей характеризуется повышенной стабильностью, меньшими потерями электродного металла на разбрызгивание и улучшенными характеристиками износостойкости наплавленного металла 30ХГСА. Установлен оптимальный диапазон параметров импульсной подачи электродной проволоки для наплавки — частота 10...30 Гц, скважность 3...5 ед. Показано, что уменьшение глубины проплавления основного металла достигается за счет снижения тока на стадии роста капли в элементарном цикле переноса электродного металла. С привлечением растровой электронной микроскопии выполнены сравнительные исследования микроструктуры наплавленного металла и зоны термического влияния при постоянной и импульсной подаче электродной проволоки при увеличениях  $\times 500...2000$ . Библиогр. 18, табл. 2, рис. 10.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, наплавка, импульсные алгоритмы, система подачи, электродная проволока, сварное соединение, микроструктура

Механизированные и автоматические способы дуговой сварки и наплавки, в том числе в защитных газах, получили широкое распространение и постоянно совершенствуются. Во многих опубликованных работах представлены достаточно значимые результаты по указанным процессам, но они зачастую не имеют характер законченных исследований.

Некоторое отставание в исследованиях технологической эффективности сварки и наплавки плавящимся электродом с импульсными режимами работы систем подачи проволоки и перемещений дуги относительно линии ведения процесса ранее было связано с их техническим несовершенством. В настоящее время выполнен ряд разработок в данной области с использованием современных компьютеризованных электроприводов на основе вентильных электродвигателей специальной разработки. В частности, это позволило реализовать практически любой алгоритм движения электродной проволоки, включая реверсивное движение с регулированием всех составляющих, а именно: частота, шаг, амплитуда импульсов, а также скважность. При этом достигнут частотный диапазон, превышающий 50 Гц. Расширенные технические характеристики новых систем подачи электродной проволоки дали возможность существенно продвинуть исследования в части управления геометрическими характеристиками сварного соединения, оптимизации энергетических затрат и потерь электродного металла.

Полученные в работах [1–3] результаты позволяют утверждать, что импульсные алгоритмы функционирования систем подачи электродной проволоки могут быть одним из самых эффективных способов совершенствования механизированных и автоматических способов дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом.

Следует отметить, что исследовательская работа с использованием современных управляемых систем импульсной подачи продолжается в части решения весьма важной проблемы — управление (в той или иной степени) структурой металла шва. Важность и пути решения упомянутой проблемы отмечены в ряде работ, например [4, 5], однако, насколько нам известно, системных исследований в рассматриваемом направлении с использованием современных методов металлографических исследований в настоящее время не отмечено.

Целью настоящей работы является изложение результатов сравнительных исследований стабильности процесса, перехода легирующих элементов в наплавленный металл, износостойкости наплавленных валиков, микроструктуры сварного соединения при использовании невозмущенной и импульсной подачи электродной проволоки для процесса автоматической наплавки в углекислом газе с описанием и интерпретацией полученных результатов применительно к показателям служебных характеристик наплавленных валиков.

На рис. 1 представлена установка для наплавки стандартных пластин. Сравнительную оценку стабильности процесса дуговой наплавки в  $\text{CO}_2$



Рис. 1. Установка ИЗРМ-5 с механизмом ИПЭП

при постоянной (ППЭП) и импульсной подаче электродной проволоки (ИПЭП) выполняли путем статистического анализа записанных осциллограмм сварочного тока и напряжения по известным методикам [6, 7]. Режимы наплавки валика при ППЭП и ИПЭП:  $I \approx 230...250$  А,  $U = 27$  В и средняя скорость подачи электродной проволоки  $V_{avr} = 0,1$  м/с. Частота ИПЭП составляла 25 Гц, скважность 3 ед.

Анализ значений таких статистических параметров, как дисперсия, среднеквадратическое отклонение и коэффициенты вариации тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$  на участке роста капли, длительность этого участка  $t_d$  и продолжительность короткого замыкания  $t_{к.з}$  (табл. 1) показывает, что при ИПЭП уменьшаются коэффициенты вариации напряжения на участке роста капли и продолжительности этого участка в 3,5 и 5,0 раз соответственно. Поскольку известно, что с показателями стабильности горения дуги обратной полярности с плавящимся электродом тесно связаны разбрызгивание электродного металла и качество формирования наплавленного валика [6–8], именно зна-

Таблица 1. Значения параметров стабильности процесса наплавки при ППЭП и ИПЭП

Параметр стабильности	Режимы наплавки			
	$I_d$	$U_d$	$t_d$	$t_{к.з}$
ППЭП				
Среднее значение $\bar{\chi}$	230,53	29,43	0,031	0,006
$\sigma^2(x)$	148,49	0,77	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$
$\sigma(x)$	12,19	0,88	0,0087	0,001
$k_v(x)$	5,29	2,99	28,06	16,67
ИПЭП				
Среднее значение $\bar{\chi}$	175,54	30,05	0,036	0,004
$\sigma^2(x)$	71,17	0,0625	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$
$\sigma(x)$	8,44	0,25	0,002	$0,41 \cdot 10^{-3}$
$k_v(x)$	4,81	0,83	5,56	10,25
$\bar{\chi}$ — технологический параметр процесса наплавки.				

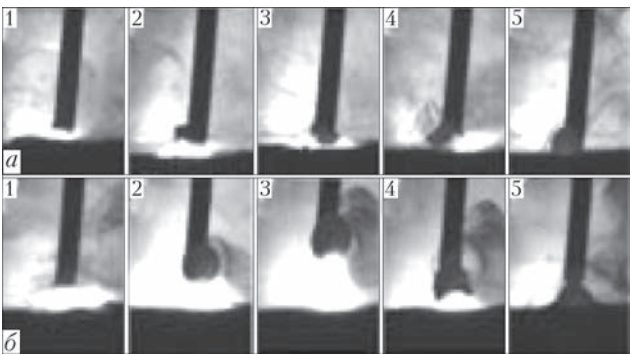


Рис. 2. Кадры скоростной видеосъемки цикла переноса электродного металла при наплавке в  $CO_2$ : а — ППЭП; б — ИПЭП

чительным повышением стабильности процесса наплавки под воздействием силы инерции, прикладываемой к торцу электродной проволоки, объясняется существенное снижение величины потерь электродного металла при ИПЭП [1–4]. В результате комплексных исследований по оценке влияния параметров ИПЭП на геометрию валика наплавленного металла и потери электродного металла был определен диапазон изменения частоты импульсов подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм, больше всего подходящий для задач наплавки (по критерию минимальной доли основного металла): частота  $f = 10...30$  Гц и скважность  $S = 3...5$  ед.

Несмотря на то, что при ИПЭП объем капли электродного металла и длительность ее роста несколько увеличены по сравнению с ППЭП (рис. 2, табл. 1), однако при этом условия для заметного уменьшения перехода легирующих элементов в наплавленный металл не создаются (табл. 2). Расчетная оценка температуры капли через ее теплосодержание, исходя из данных скоростной видеосъемки и осциллограмм сварочного тока и напряжения, показала, что при ИПЭП в диапазоне  $f = 10...25$  Гц и  $S = 3...5$  ед. наблюдается ее уменьшение примерно на 25 %.

Исследования влияния параметров ИПЭП на служебные характеристики наплавленного слоя показали (рис. 3), что при частоте импульсов 15...20 Гц и скважности 3...5 ед. данный способ дает возможность уже в первом слое наплавлен-

Таблица 2. Сравнительные результаты эмиссионно-спектрального анализа наплавленного металла типа 30ХГСА при ППЭП и ИПЭП диаметром 1,2 мм (наплавка в углекислом газе)

Образец	Содержание элементов, мас. %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
1 слой (ППЭП)	0,17	0,87	1,10	0,63	<0,10
1 слой (ИПЭП)	0,17	0,80	1,06	0,55	<0,10
5 слоев (ППЭП)	0,20	0,70	0,84	0,90	<0,10
5 слоев (ИПЭП)	0,21	0,78	0,81	0,98	<0,10
Примечание. Наплавку проводили на пластину из стали 09Г2С (ГОСТ 19281–89) проволокой Нп-30ХГСА (ГОСТ 10543–98); данные получены на зашлифованной площадке продольной поверхности валика, установка ДФС-36.					



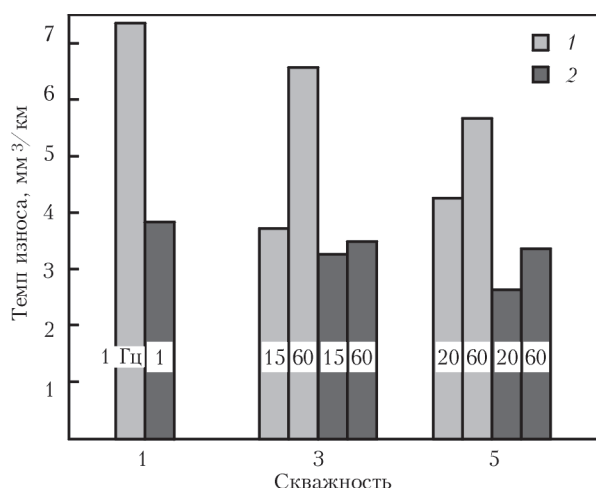


Рис. 3. Гистограмма оценки темпа износа образцов наплавленного металла 30ХГСА при вытирании лунок по схеме «вал-плоскость» без дополнительной подачи смазки в зону трения в зависимости от частоты, скважности и количества наплавленных слоев  $n$  (средний ток  $I = 220$  А, напряжение  $U = 26$  В); 1 —  $n = 1$ ; 2 — 5

ного металла получить характеристики износостойкости, аналогичные пятислойной наплавке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Сравнение износостойкости пятислойного наплавленного металла показало, что при ИПЭП также наблюдается улучшение износостойкости в 1,2...1,4 раза (см. рис. 3).

Повышение износостойких характеристик наплавленного металла 30ХГСА обусловлено в первую очередь существенным снижением глубины проплавления основного металла и, соответственно, уменьшением его доли в наплавленном валике. Данный эффект в основном достигается за счет ограничения на 20...30 % количества теплоты, выделяющейся при ИПЭП (рис. 4). Это, в свою очередь, исходя из сравнительного анализа осциллограмм при ППЭП и ИПЭП, обусловлено снижением в последнем случае значения сварочного тока на стадии роста капли за счет периодического удлинения дуги и уменьшения силы ее давления на расплавленный металл сварочной ванны.

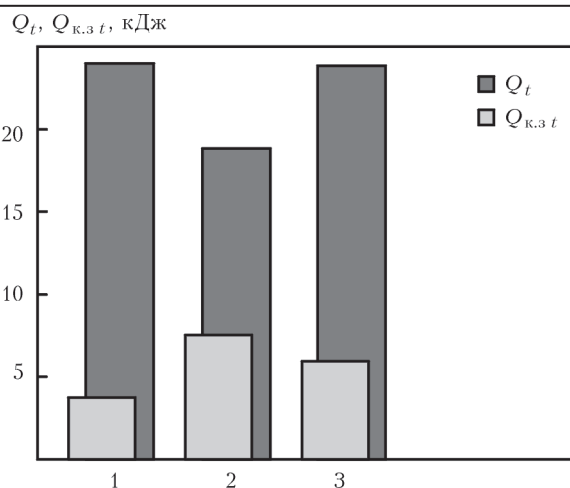


Рис. 4. Гистограмма оценок общей тепловой мощности  $Q_t$  и мощности на участке короткого замыкания  $Q_{к.з. t}$  при ППЭП и ИПЭП за время 5 с ( $Q_{к.з. t}$  — доля от  $Q_t$ ): 1 — ППЭП; 2 — ИПЭП (25 Гц); 3 — ИПЭП (60 Гц)

С целью объяснения причин повышения износостойкости наплавленного металла 30ХГСА при многослойной наплавке, когда влияние перемешивания основного и наплавленного металла практически исключено, проводились сравнительные металлографические исследования сварного соединения основной — наплавленный металл. Микроструктура наплавленного металла и зоны термического влияния в основном металле изучались методами оптической ( $\times 50...500$ ) и растровой электронной микроскопии в обратно рассеянных электронах ( $\times 500...2000$ ) на микрошлифах однослойных наплавов, прошедших травление в 4%-м растворе  $HNO_3$ . Вид наблюдаемых в поле зрения фаз, образовавшихся в результате распада первичного аустенитного зерна (феррит, бейнит, перлит), уточнялся путем измерения твердости по Виккерсу на микротвердомере М400 фирмы «LECO» при нагрузке 100 г.

Установлено, что структура наплавленного металла 30ХГСА состоит из кристаллитов игольчатого феррита [9, 10] ( $HV_{0,1} = 2360...2540$  МПа), разделенных между собой ферритными прослойками толщиной до 2,5 мкм (рис. 4). Сравни-

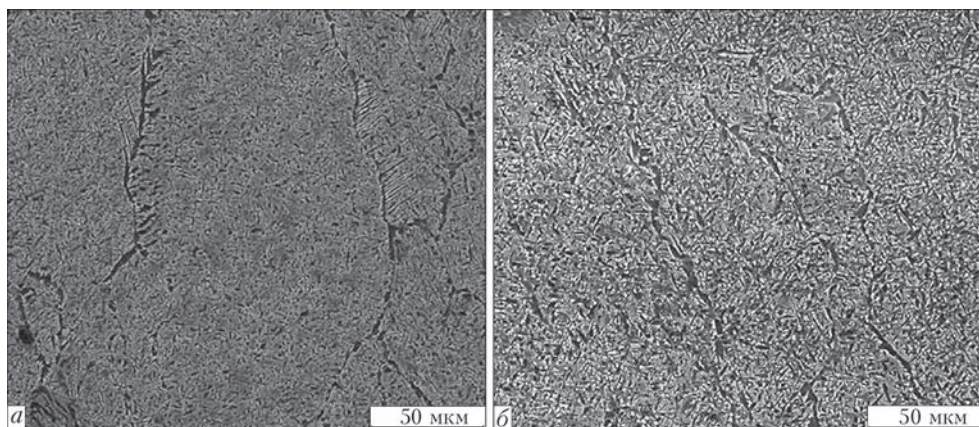


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла типа 30ХГСА: а — ППЭП; б — ИПЭП

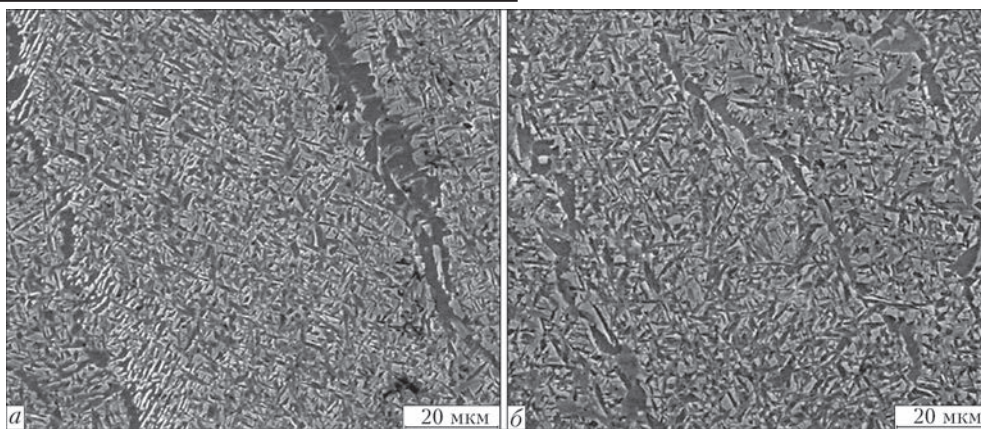


Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла 30ХГСА: а — ППЭП; б — ИПЭП

тельный анализ формы и размеров кристаллитов в центральной части наплавленного металла показал, что при ИПЭП они имеют несколько меньшую ширину и коэффициент формы. Так, при наплавке в  $\text{CO}_2$  ширина кристаллитов при ППЭП равна 97,5 мкм, при ИПЭП — 70; коэффициент формы кристаллитов при ППЭП — 6,8, при ИПЭП — 4,56. При ИПЭП также проявляется тенденция к ограничению длины кристаллитов, значительная часть из которых не превышает 210 мкм по сравнению с 640...700 мкм при ППЭП.

Металлографический анализ наплавленного металла при большем увеличении ( $\times 1000...2000$ )

показал, что при ИПЭП наблюдается более благоприятная форма границ кристаллитов (рис. 5, 6): преимущественно в 1,5...2,0 раза снижается толщина прослоек полигонального феррита [9, 10], считающегося наиболее опасной структурой с точки зрения хрупкого разрушения [11, 12]; отсутствует пластинчатый (видманштеттов) феррит [9, 10] на периферии кристаллитов; выделения микрочастиц игольчатого феррита преимущественно изменяют свою форму на полиэдрическую.

Известно, что структура игольчатого феррита в сварном шве обеспечивает оптимальные сочетания характеристик его прочности и вязкости [11–13], а также, наряду с игольчатым трооститом [14], отличается повышенной износостойкостью по сравнению с ферритно-перлитной (см. рис. 7), обусловленной измельчением структуры микровыделений игольчатого феррита до размера примерно 0,5 мкм под воздействием приповерхностного наклепа [15]. Эффект повышенной износостойкости игольчатого феррита также может связываться и с наличием в нем мартенситно-аустенитно-карбидных микрокомплексов (так называемой МАК-фазы [9, 16, 17], рис. 8), распределенной внутри кристаллитов и вдоль прослоек полигонального феррита.

Таким образом, улучшение на 20...40 % износостойкости при пятислойной наплавке с ИПЭП по сравнению с ППЭП (см. рис. 3) в условиях, когда фактор перемешивания основного и напла-

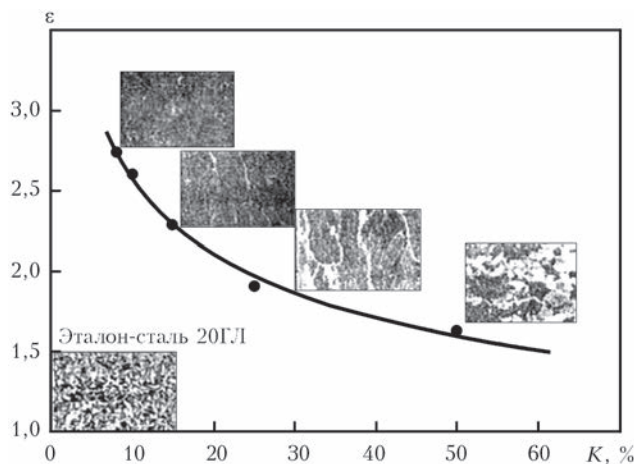


Рис. 7. Зависимость относительной износостойкости наплавленного металла  $\varepsilon$  от объемной доли полигонального феррита  $K$  [15]

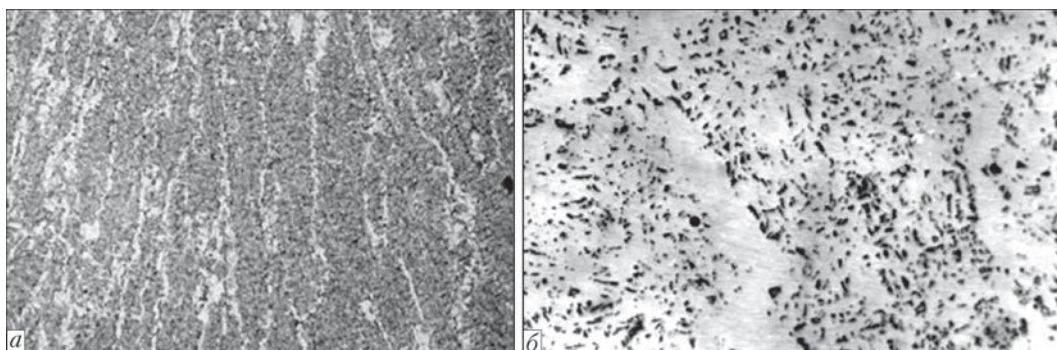


Рис. 8. Микроструктура металла шва стали 10Г2ФБ (проволока Mn–Ni–Mo, флюс АН60): а — травление в нитале ( $\times 100$ ); б — в пикрате натрия ( $\times 800$ ) [13]



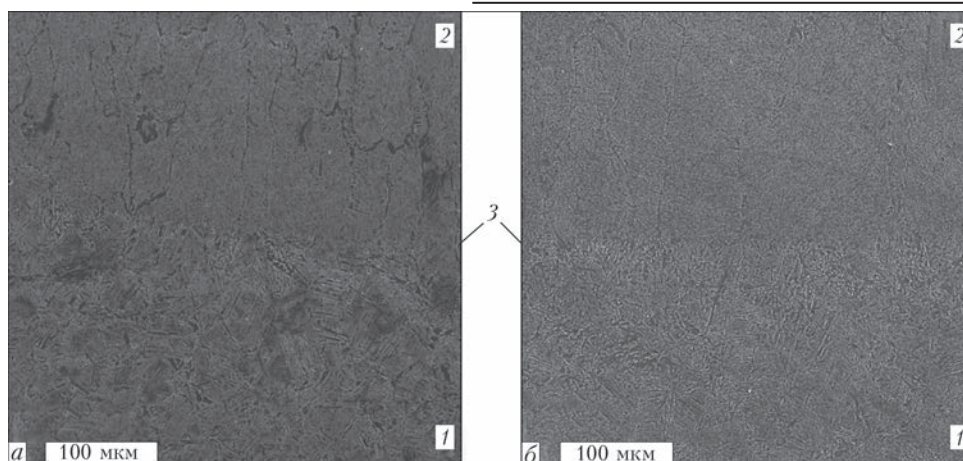


Рис. 9. Микроструктура в районе линии сплавления: а — ППЭП; б — ИПЭП (1 — основной металл 09Г2С; 2 — наплавленный металл 30ХГСА; 3 — линия сплавления)

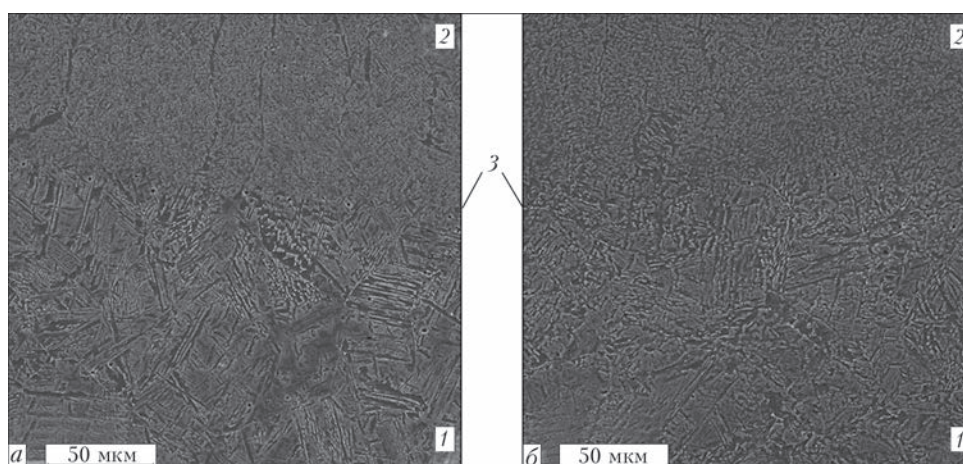


Рис. 10. Микроструктура в районе линии сплавления: а — ППЭП; б — ИПЭП (1 — основной металл 09Г2С; 2 — наплавленный металл 30ХГСА; 3 — линия сплавления)

ленного металла практически исключен, можно объяснить улучшением структуры игольчатого феррита: более благоприятной формой кристаллитов; снижением объемной доли полигонального и пластинчатого феррита на их периферии и, предположительно, оптимизацией морфологии и распределения МАК-фазы в составе игольчатого феррита.

При ППЭП в наплавленном металле в районе линии сплавления присутствуют кристаллиты шириной 20...40 мкм с ферритными оторочками шириной 2,0...2,5 мкм (рис. 9, а), т.е. существенно увеличивается объемная доля оторочек полигонального и пластинчатого феррита ( $HV_{0,1}$  — 2210...2280 МПа) на периферии кристаллитов. Такая структура, по данным работы [13], способствует повышению склонности сварных швов к хрупкому разрушению. Следует отметить, что в наплавленном металле в районе линии сплавления при ИПЭП наблюдалась разориентированная структура практически без наличия оторочек полигонального феррита (рис. 9, б).

В ЗТВ в основном металле 09Г2С наблюдаются следующие структурные составляющие (рис. 10):

нижний бейнит ( $HV_{0,1}$  — 3000...3500 МПа), верхний бейнит ( $HV_{0,1}$  — 2600...2660 МПа) и пластинчатый феррит ( $HV_{0,1}$  — 2210...2280 МПа). При ИПЭП в металле ЗТВ на участке крупного зерна наблюдается более однородная микроструктура, состоящая из верхнего и нижнего бейнита с несколько сниженным содержанием пластинчатого феррита (см. рис. 10, б). Также при ИПЭП в металле ЗТВ сварного соединения отмечена тенденция к переходу микроструктуры верхнего и нижнего бейнита от игольчатой к зернистой морфологии (см. рис. 10, б). По данным работы [18] такая структура является более предпочтительной с точки зрения свариваемости основного металла и надежности эксплуатации его ЗТВ, особенно в условиях низких климатических температур.

На участке мелкого зерна в ЗТВ основного металла 09Г2С микротвердость заметно снижалась: при ППЭП составляла  $HV_{0,1}$  — 2160...2280 МПа; при ИПЭП —  $HV_{0,1}$  — 2060...2130 МПа. На участке неполной перекристаллизации присутствовали участки феррита и, соответственно, микротвердость приближалась к значениям, характерным для основного металла: при ППЭП —



$HV_{0,1}$  — 1700...1810 МПа; при ИПЭП —  $HV_{0,1}$  — 1870...2060 МПа. В глубине основного металла 09Г2С присутствовала ферритно-перлитная стро-  
очечная структура; ее микротвердость составляла  $HV_{0,1}$  — 1470...1600 МПа.

### Выводы

1. Показано, что процесс дуговой наплавки в угле-  
кислом газе с ИПЭП характеризуется по срав-  
нению с ППЭП повышенной стабильностью и  
меньшими потерями электродного металла на раз-  
брызгивание.

2. Установлен оптимальный диапазон параме-  
тров ИПЭП:  $f = 10...30$  Гц и  $S = 3...5$  ед. Пока-  
зано, что ограничение глубины проплавления до-  
стигается за счет снижения тока на стадии роста  
капли в элементарном цикле переноса электрод-  
ного металла и, соответственно, тепловложений,  
общих и для этого цикла.

3. Установлено, что в оптимальном диапазоне  
параметров ИПЭП наплавленный металл 30ХГСА  
имеет повышенную износостойкость по сравне-  
нию с ППЭП. Этот эффект достигается за счет  
снижения доли основного металла в наплавлен-  
ном и улучшениями структуры в теле и на грани-  
це кристаллита игольчатого феррита на микроу-  
ровне (увеличение более  $\times 500$ ).

4. Показано, что при ИПЭП микроструктура  
наплавленного металла в районе линии сплавле-  
ния и ЗТВ основного металла является более бла-  
гоприятной с точки зрения свариваемости и на-  
дежности эксплуатации сварного соединения.

1. Новые возможности механизированной дуговой точеч-  
ной сварки с применением импульсных воздействий /  
Л.М. Лобанов, В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов и др. // Ав-  
томат. сварка. — 2012. — № 5. — С. 17–22.
2. Лебедев В.А., Лендел И.В. Управление импульсным дви-  
жением электродной проволоки при механизированной  
сварке за счет изменения шага подачи // Заготовитель-  
ные производства в машиностроении. — 2013. — № 3.  
— С. 10–14.
3. Использование механических импульсов для управления  
процессами автоматической и механизированной сварки  
плавящимся электродом / Б.Е. Патон., В.А. Лебедев, С.И.

Полосков, И.В. Лендел // Сварка и диагностика. — 2013.  
— № 6. — С. 16–20.

4. Лебедев В.А., Лендел И.В. Исследование технологиче-  
ских возможностей дуговой сварки и наплавки с импуль-  
сной подачей электродной проволоки // Научные тех-  
нологии в машиностроении. — 2015. — № 9. — С. 20–27.
5. Лебедев В.А. Особенности сварки сталей с импульсной  
подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. —  
2007. — № 8. — С. 30–35.
6. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавле-  
ние электродов / Под ред. И.К. Походни. — Киев: Наук.  
думка, 1990. — 224 с.
7. Ланкин Ю.Н. Показатели стабильности процесса дуго-  
вой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. —  
2011. — № 1. — С. 7–15.
8. Потаповский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка  
сталей в защитных газах плавящимся электродом. Тех-  
ника и технология будущего. — Томск: Изд-во Томского  
политехн. ун-та, 2012. — 208 с.
9. Abson D.I., Dolby R.E., Hart P.M. Trends in steel and consumables for welding: Weld. Inst. Conf. — London. — 1978. — London: Weld. Institute. — 98p
10. Hee Jin Kim, Bong Yong Kang. Microstructural Characteristics of Steel Weld Metal // Journal of KWS — 2000. — 8, № 5. — P. 565–572.
11. Curry D.C., Knott J.F. Effects of microstructure on cleavage fracture stress in steel // Metal Sci. — 1978. — V. 12. — 511 p
12. Костин В.А. Комплексная оценка влияния содержания марганца и титана на структуру и свойства сварных швов низколегированных сталей // Вісник Приазовського ДТУ. — 2008. — № 18. — С. 198–202.
13. Рыбаков А.А., Костин В.А., Филичук Т.Н., Прибытько И.А. Особенности формирования микроструктуры метал-  
ла швов газонефтепроводных труб при сварке микро-  
легированных сталей // Вісник Чернігівського ДТУ. —  
1(63). — С. 125–131.
14. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
15. Абраменко Д.Н. Повышение износостойкости деталей грузовых вагонов дуговой наплавкой слоя стали со струк-  
турой игольчатого феррита: Автореф. дис. ... канд. техн.  
наук. — М: ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», 2008 г. — 21 с.
16. Yurioka N. TMPC steel and their welding // Welding in the world. — 1995. — 35, № 6. — P. 375–390.
17. Гривняк И., Матцуда Ф. Металлографические исследова-  
ния мартенситно-аустенитной составляющей (МАС)  
металла ЗТВ высокопрочных низколегированных сталей  
// Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 22–30.
18. Иванайский А.А. Исследование структуры, фазового со-  
става, свойств зернистого бейнита и технологии его фор-  
мирования в сварных соединениях и в металлопрокате  
для сварных конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн.  
наук. Барнаул: Алтайский ГТУ им. И.И. Ползунова, 2006.  
— 20 с.

Поступила в редакцию 03.12.2015



## Сварка и резка 2017

С 25 по 29 сентября 2017 г. будет проходить 19-я Междуна-  
родная выставка «Сварка и резка 2017», г. Эссен (Германия).  
Эта выставка проводится один раз в четыре года на протяже-  
нии 50 лет и является крупнейшим в мире выставочным меро-  
приятием в области сварки и родственных технологий.

Условия участия в выставке размещены на сайте организатора:  
[www.schweissen-schneidencm.ru](http://www.schweissen-schneidencm.ru) [www.esse-essendc.ru](http://www.esse-essendc.ru)

УДК:621.791.052

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

А.А. ЛУКАШЕВИЧ

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

Определены временные параметры составляющих спектра нестационарного нагружения сварных соединений углеродистой стали, имеющие доминирующее влияние на интенсивность усталостного повреждения конструктивных элементов железнодорожных локомотивов. Предложен новый метод анализа результатов тензометрического измерения эволюции неоднородности деформаций в зоне термического влияния сварного соединения в процессе развития усталостной трещины. Установлено, что в каждом блоке нагрузок, на определенных частотах существуют деформации, которые являются доминирующими при усталостном разрушении. Библиогр. 12, рис. 5.

*Ключевые слова:* нестационарные нагрузки, угловое сварное соединение углеродистой стали, рост усталостной трещины, тензометрический нуль-индикаторный метод, частотно-временной анализ.

Детали и элементы конструкции транспортных машин при эксплуатации подвергаются воздействию нестационарной нагрузки, что обусловлено многими эксплуатационными факторами [1] (рис. 1).

Частота колебаний элементов механических конструкций экипажных частей железнодорожного подвижного состава находится в диапазоне от 1,5 до 110 Гц [2]. Сложный характер силового воздействия дорожного полотна на экипажные части обусловлен тем, что рамы тележек, рамы кузовов, несущие кузова являются колебательными системами со многими степенями свободы, а их возбуждающие факторы носят случайный характер. Длительная эксплуатация сопровождается возникновением усталостных повреждений в виде трещин, в частности, в сварном соединении, что делает металл этой зоны наиболее уязвимым к разрушению [3].

Целью работы является создание дискретного метода определения спектра частот колебаний, которые коррелируют с максимальными амплитудами деформаций подконтрольных участков поверхностей исследуемого элемента конструкций или образца при их нестационарном нагружении.

**Объект и методика испытаний.** В работе приведены результаты испытаний на консольный изгиб в режиме нестационарного нагружения лабораторных образцов углеродистой стали СтЗсп [4], с угловыми сварными соединениями. Образцы корсетного типа размером 3×60×165 мм изготовлены согласно требованиям нормативного документа [5], с угловым сварным соединением [6] и концентратором (рис. 2).

Размеры механического концентратора, которые определены экспериментально (вид А на рис. 2), составляют:  $a' = 570,4^{+141,6}_{-190,4}$  мкм;  $b' = 309,4^{+251,6}_{-104,4}$  мкм;  $P_1$  — направление действия силы на образец, — направление перемещения стола вибростенда; П — переключатель; ПК — персональный компьютер. Образец 1 с грузом 3 устанавливался на кронштейн 2 (рис. 2).

На модернизированном вибростенде ВЕДС-400А [7] в образцах около концентратора выращивали усталостную трещину до размера 3...7 мм при номинальных напряжениях консольного изгиба  $\sigma_a = 88...98$  МПа.

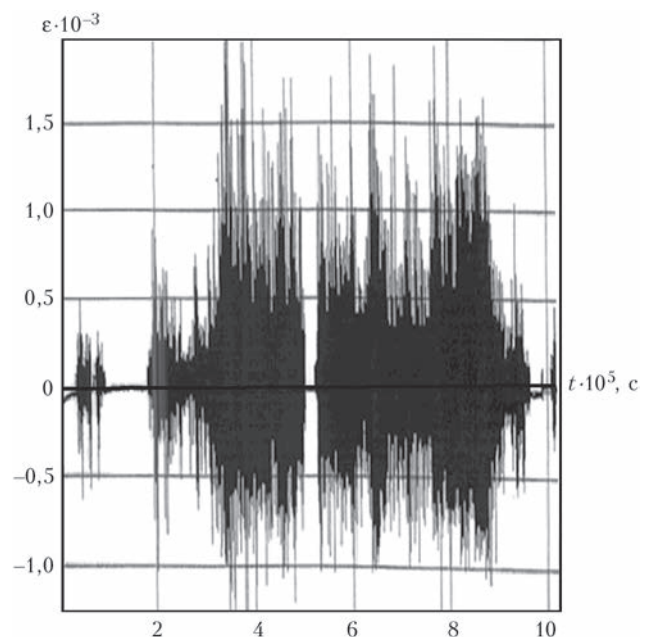


Рис. 1. Спектр относительных амплитуд деформаций элемента конструкции локомотива ДСЗ во время его эксплуатации

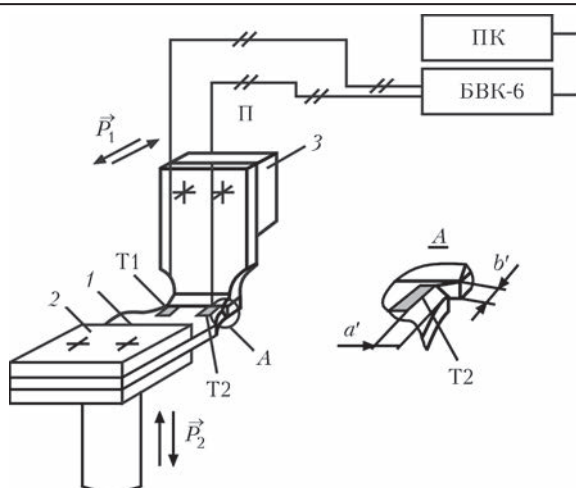


Рис. 2. Схема нагружения образца на вибростенде (обозначения см. в тексте)

Спектр нагружения образца, который соответствует характерному спектру частот циклов в диапазоне 20... 50 Гц (рис. 1), разделен программно на три блока разной продолжительности каждый. Нагружение создается путем периодического перемещения вибростола с амплитудой  $\pm 8$  мм в определенном диапазоне частот.

Амплитуда деформаций поверхности образца регистрировалась тензорезисторами Т1 и Т2. С целью расширения динамического диапазона чувствительности измерительной системы один из резисторов Т2 расположен решеткой к вершине концентратора напряжений (вид А на рис. 2). Рост усталостной трещины в сварном соединении регистрировали тензометрическим нуль-индикаторным методом путем измерения тензорезисторами Т1 и Т2 разницы амплитуд деформаций [8]. Для повышения чувствительности в системе установлен усилитель сигнала к  $U_{\max} = 1500$  мВ. Обработку результатов измерений осуществляли

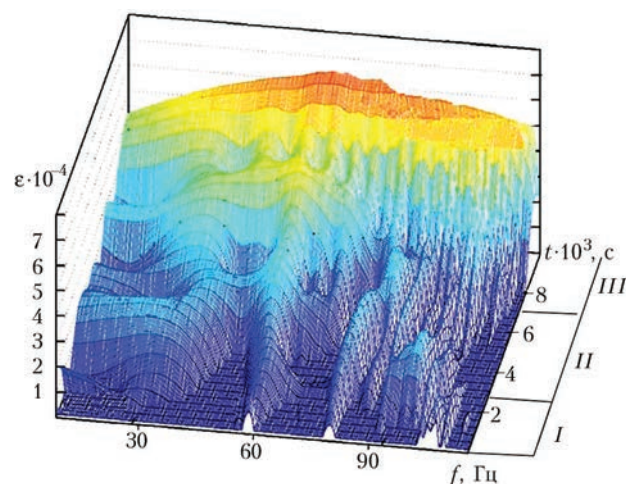


Рис. 3. Объемный вейвлет-спектр в диапазоне частот 20...150 Гц вынужденных колебаний углового образца стали СтЗсп (I, II, III — промежутки времени, которые соответствуют определенным блокам деформаций)

с помощью персонального компьютера (ПК), присоединенного к прибору БВК-6 [9].

Результаты измерений деформаций хранились на флэш-карте формата SD. Полученная информация в виде отдельных файлов записана с помощью специальной программы, созданной на базе LABVIEW [10]. Количество блоков полученной информации обусловлено объемом оперативной памяти компьютера. После ввода в компьютер полученных экспериментальных данных программа отображает на экране осциллограммы зависимостей амплитуд деформаций от времени. Программа работает с частотой распознавания информации 4096 точек/с. На монитор компьютера выводились осциллограммы колебаний и значения амплитуд деформаций образца с частотой дискретизации 2048 точек/с. Количество блоков, в которых размещена информация относительно значений деформаций, измеренных в дискретных точках поверхности образца, высчитывается по формуле:

$$N_6 = N_{\text{инф}} / (N_{\text{точ}} / 2), \quad (1)$$

где  $N_6$  — количество блоков в данном объеме информации;  $N_{\text{инф}}$  — количество записанной информации полной выборки;  $N_{\text{точ}}$  — количество амплитуд максимальной деформации (определяется по количеству точек в одном блоке информации).

**Анализ полученных результатов.** Разница амплитуд  $\Delta U$  сигналов, полученных с помощью тензорезисторов Т1 и Т2, вычислена по формуле:

$$\Delta U = U_{T2} - U_{T1}, \quad (2)$$

где  $U_{T2}$ ,  $U_{T1}$  — падение электрического напряжения на тензорезисторах Т2, Т1.

При этом разница относительных деформаций  $\Delta \epsilon$  составляла:

$$\Delta \epsilon = \Delta U M_{\epsilon}, \quad (3)$$

где  $M_{\epsilon}$  — масштабный коэффициент, равный  $10^{-6} \text{ мВ}^{-1}$ .

Спектральный анализ блоков разниц относительных деформаций осуществлен методом вейвлет-преобразования [11].

Вейвлет-преобразование сигнала  $\Delta \epsilon(t)$  имеет вид [11]:

$$[W_{\psi} \Delta \epsilon](\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \epsilon(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt, \quad (4)$$

где  $\tau$  — сдвиг по времени;  $s$  — масштаб;  $\psi_{\tau, s}^*(t)$  — материнский вейвлет Гаусса [12]. Принято:  $\tau = 250$  мс,  $s = (0...150) \text{ Гц}^{-1}$ .

Материнский вейвлет — это функция, которая является прототипом сигнала всех масштабов  $s$ , генерируемых при вейвлет-преобразовании  $[W_{\psi} \Delta \epsilon](\tau, s)$ , и подбирается оператором отдельно для каждой фазы временного сдвига периода колебания, согласовывая с масштабным и времен-



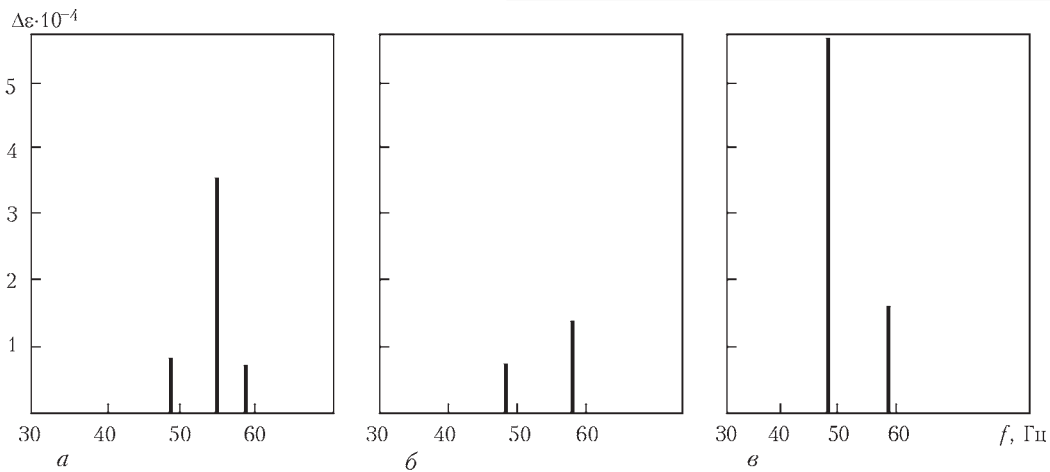


Рис. 4. Зависимость разницы амплитуды деформации от частоты нагружения образца в блоках I (а); II (б); III (в)

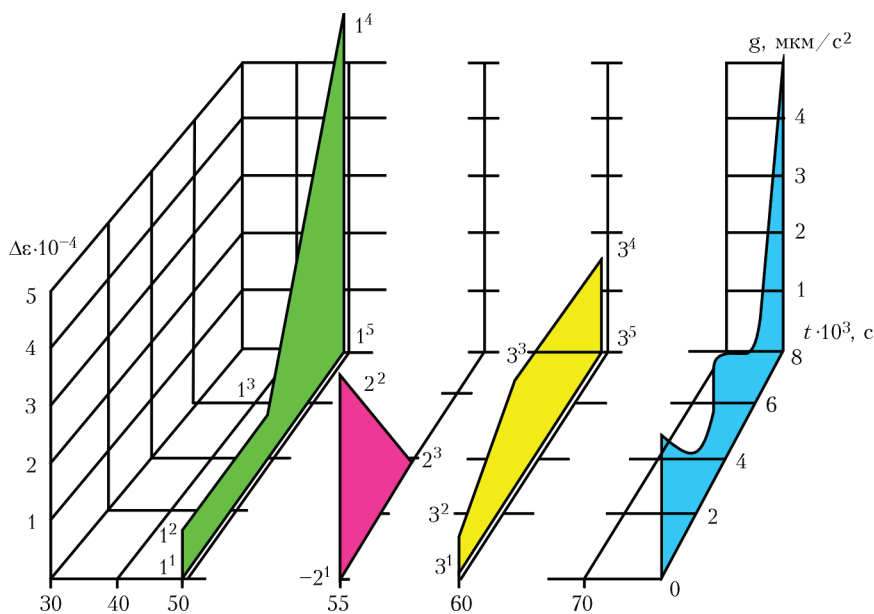


Рис. 5. Распределение во времени в разных блоках частотно-временного анализа доминирующих амплитуд колебаний образца

ным коэффициентами наибольшее сходство сигнала выбранной материнской функции. Наиболее распространенные материнские вейвлеты конструируются на основе производных функции Гаусса [12]:

$$\psi_{\tau,s}^*(t) = \exp(-t/2). \quad (5)$$

Построение диаграммы распределения во времени частот амплитудного спектра деформаций осуществляли с помощью соответствующего программного обеспечения [10] (рис. 3).

На рис. 4 приведена зависимость разниц амплитуд деформации  $\Delta \varepsilon$  поверхности образца от частоты нагрузки  $f$ , которые влияют на усталостное разрушение.

Распределение частот сигналов, при которых регистрировались разницы амплитуд деформаций поверхности образца, составила 48, 55 и 58 Гц. Рост трещины происходит при частотах 48, 55 и 58 Гц на I блоке деформаций и при 48 и 58 Гц на II и III блоках соответственно. Выявлено, что для

каждого блока существуют частоты, для которых амплитуда деформаций образца в виде всплеска (wavelet) являются доминирующими в процессе усталостного разрушения.

На рис. 5 в трехкоординатных измерениях приведены распределения во времени циклов деформирования с определенными частотами. В частности, для I блока — 55 Гц (плоскость  $2^1 - 2^2 - 2^3$ ), для II блока — 58 Гц (плоскость  $3^1 - 3^2 - 3^3 - 3^4 - 3^5$ ), для III блока — 48 Гц (плоскость  $1^3 - 1^4 - 1^5$ ). Трехмерное распределение частот колебаний образца во времени для блоков частотно-фазового анализа различий деформаций  $\Delta \varepsilon$  коррелируются с распределением ускорений  $g$ .

Представление сигнала в трехкоординатном виде характеризует продолжительность во времени процесса нестационарного нагружения по действию амплитуд деформаций резонансных всплесков с определенными частотами и ускорениями.

## Выводы

1. Определена на модели элемента сварной конструкции корреляция между максимальными амплитудами спектра частот и повреждающими всплесками разниц амплитуды деформаций поверхности углового образца.

2. Предложен экспериментально-расчетный подход к определению доминирующих деформаций на основе анализа спектра частот нестационарной нагрузки, что создает новые возможности для совершенствования методов расчета ресурса сварных элементов конструкций транспортных машин.

1. *Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. I изд. / Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Лангрэн и др. – М.: Ин-текст, 2002. – 408 с.*
2. *Басов Г.Г., Фалалеев Н.И., Яцько С.И. Современные методы проектирования экипажных частей подвижного состава // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 4. – С. 39–45.*
3. *Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.*

4. *ДСТУ 2651–94. Сталь вуглецева звичайної якості. [Чинний з 01.01.96]. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 18 с.*
5. *ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. [Действ. с 01.01.81]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 25 с. (Межгосударственный стандарт).*
6. *ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. [Действ. с 01.07.81]. – М.: Стандартиформ, 2009. – 145 с. (Межгосударственный стандарт).*
7. *Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. Т.2. / В.Т. Трощенко, Г.В. Цибанев, Б.А. Грязнов и др. – Киев: Ин-т пробл. прочноти им. Г.С. Писаренко НАН України, 2009. – 664 с.*
8. *Assessment of the null-indicator method for the detection of fatigue cracks in structural elements / V.A. Leonets, A.O. Lukashevych, V.O. Degtyarev et al. // Strength of Materials. – 2012. – 44, №3. – Р. 325–332.*
9. *Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения / О.Д. Токарев, В.А. Леонет, А.А. Леонет и др. // Ж.-д транспорт мира. – 2002. – № 9. – С. 73–76.*
10. *Трєвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.*
11. *Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – № 11. – С. 1145–1170.*
12. *Дьяков В.П. Вейвлет. От теории к практике. – М.: Солон. – Р., 2002. – 448 с.*

Поступила в редакцию 20.01.2016



**Международная конференция**  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»**  
 13–15 июня 2016 г.  
 Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

**Тематика конференции:**

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

**Контрольные даты**

- ◆ Подача заявок для участия и отправка доклада до 15.03.2016
- ◆ Рассылка программы конференции до 15.04.2016
- ◆ Оплата организационного взноса до 14.06.2016

**Организационный комитет:**  
 Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
 03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77  
 E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua), [patonpublishinghouse@gmail.com](mailto:patonpublishinghouse@gmail.com)  
[www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016](http://www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИАФРАГМ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН\*

А.К. ЦАРЮК<sup>1</sup>, В.Ю. СКУЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, М.А. НИМКО<sup>1</sup>, А.Н. ГУБСКИЙ<sup>2</sup>, А.В. ВАВИЛОВ<sup>2</sup>, А.Г. КАНТОР<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ПАО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, Московский просп. 199.

E-mail: office@turboatom.com.ua

Рассмотрены особенности и причины эксплуатационных повреждений в сварных узлах высокотемпературных диафрагм. Проведены сравнительные испытания сварочно-технологических свойств некоторых доступных на рынке марок покрытых электродов для сварки теплоустойчивых сталей композиций Cr–Mo и Cr–Mo–V. С помощью методики Implant и сварки технологических проб Tekken оценена склонность сварных соединений сталей 15X12ВНМФ+15X1М1ФЛ к замедленному разрушению при использовании выбранных электродов. Установлено, что для обеспечения высокой стойкости сварных соединений данных сталей против образования холодных трещин необходимо использовать предварительный подогрев 200...250 °С. Ориентируясь на показания измерений твердости металла швов и ЗТВ сварных соединений и ударной вязкости металла швов, определен оптимальный режим термообработки сварных соединений сталей 15X12ВНМФ+15X1М1ФЛ. Показано, что в структуре металла ЗТВ стали 15X12ВНМФ образуется зона разупрочнения с более низкой твердостью, по которой происходит разрушение образцов при испытаниях на статическое растяжение при рабочей температуре 570 °С. Библиогр. 8, табл. 4, рис. 10.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, теплоустойчивые стали, сварные соединения разнородных сталей, холодные трещины, термическая обработка

Характерными особенностями узлов, составляющих проточную часть турбины, являются воздействие на них динамических и вибрационных усилий в процессе их работы и высокие требования к точности изготовления. В этих конструкциях широкое применение находит сочетание в одном узле различных марок сталей. В настоящее время конструкции проточной части в сварном варианте получили достаточное применение в практике турбостроения.

При изготовлении высокотемпературных сварных диафрагм для цилиндров высокого (ЦВД) и среднего давления (ЦСД) в качестве материала для тела и обода диафрагмы обычно применяются теплоустойчивые стали перлитного класса типа 15X1М1Ф.

Направляющие лопатки изготавливаются из жаропрочных хромистых сталей типа 15X11МФ, 15X12ВНМФ (ЭИ-802) либо 18X11МФБ. Для бандажей (бандажной ленты) наибольшее применение имеет нержавеющая хромистая сталь 12X13. При изготовлении высокотемпературных диафрагм эти стали необходимо сваривать в различных сочетаниях между собой. Учитывая, что указанные стали относятся к разным структурным классам, их сварка связана с известными труд-

ностями в части обеспечения требуемых физико-механических и служебных свойств сварных соединений, а также их надежной эксплуатации в условиях ползучести при рабочих температурах от 480 до 600 °С. Поэтому целью настоящей работы являлась оптимизация технологического процесса сварки деталей из разнородных сталей при изготовлении высокотемпературных диафрагм для повышения надежности и ресурса проточной части паровых турбин.

Диафрагмы относятся к наиболее массовым сварным узлам турбоагрегатов. Стационарные паровые турбины могут содержать значительное ко-



Рис. 1. Контрольная сборка диафрагм в корпусе ЦСД

\* По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 гг.).



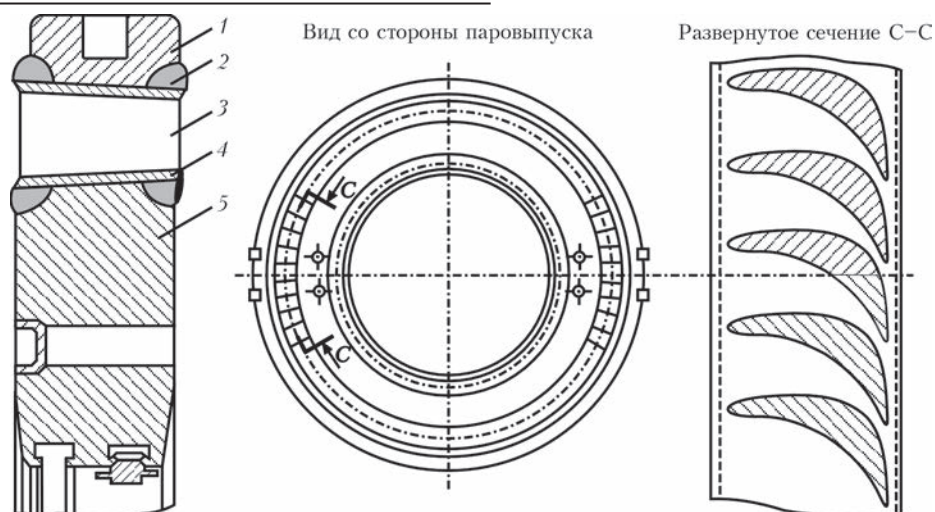


Рис. 2. Типовая конструкция сварной диафрагмы паровой турбины: 1 — обод; 2 — верхняя бандажная лента; 3 — направляющие лопатки; 4 — нижняя бандажная лента; 5 — тело

личество ступеней (до 20) и соответственно такое же количество диафрагм разных типоразмеров. С помощью диафрагм цилиндр турбины разбивается на отдельные отсеки. В направляющем аппарате диафрагм потенциальная энергия парового потока превращается в кинетическую. Кроме того, создается направление потока. Направляющий аппарат состоит из решетки направляющих лопаток, которые образуют сопловые каналы.

Диафрагма является одной из наиболее ответственных деталей турбины. Она имеет горизонтальный разъем и состоит из двух половин. Одна половина закрепляется в нижней, вторая в верхней половине корпуса цилиндра (рис. 1). Диафрагмы вставляются непосредственно в расточки корпуса или в специальные обоймы, закрепляемые в корпусе [1, 2].

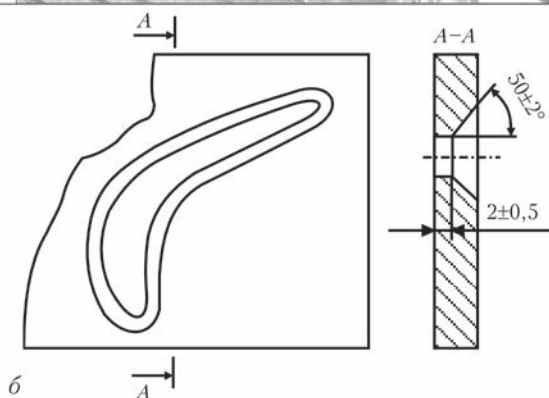


Рис. 3. Приварка торцов направляющих лопаток к бандажным лентам технологическим сварным швом: а — общий вид решетки после приварки; б — форма и разделки под приварку лопаток по контуру профильных отверстий в бандажной ленте

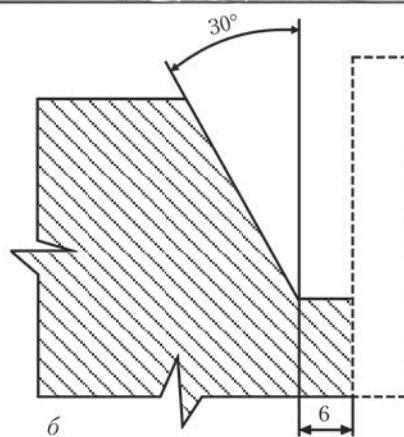


Рис. 4. Сборка половины диафрагмы под сварку силовых швов: а — общий вид собранной диафрагмы; б — типовая форма разделки кромок в теле (обода) под ручную электродную сварку силовых швов

Типовая конструкция сварной диафрагмы паровой турбины (рис. 2) состоит из тела, обода и решетки направляющих лопаток, включающей внутреннюю и наружную бандажные ленты с пробитыми отверстиями, в которые вставлены направляющие лопатки. Бандажные ленты, выгнутые по цилиндрической поверхности, обычно изготавливаются из полосы толщиной 4...10 мм. При сборке решетки лопатки устанавливаются в пазах бандажных лент с заглублением на 2...3 мм. Для обеспечения надежной связи лопаток с телом и ободом их торцы привариваются по контуру отверстия технологическим сварным швом заподлицо с бандажной лентой (рис. 3). Затем решетка лопаток вместе с бандажом приваривается основными силовыми швами к телу и ободу диафрагмы (рис. 4). Типовая форма разделки кромок под сварку основных швов диафрагмы показана на рис. 4, б. Эти швы являются наиболее напряженными участками сварных диафрагм, поскольку связывают бандажные ленты и лопатки с телом и ободом и через них на обод диафрагмы передаются усилия, воспринимаемые лопатками от давления рабочей среды. Обычно высота швов, соединяющих решетку с телом и ободом, составляет 0,2...0,3 ширины профиля. Дальнейшее увеличение высоты шва нецелесообразно, так как приводит к чрезмерной деформации конструкции при сварке.

Как показывают расчеты [3] и результаты экспериментов [4], напряжения в диафрагмах распределены неравномерно и являются наибольшими в лопатках и швах, примыкающих к разъему. Причем эти напряжения резко уменьшаются по мере удаления от разъема. Испытания диафрагм до разрушения [5] подтверждают, что разрушение начинается, как правило, со сварных швов около-разъемных лопаток у тела, т.е. в месте, которое согласно расчету является наиболее напряженным. Требования, предъявляемые к точности изготовления диафрагм, предусматривают необходимость выдерживания основных размеров проточной части в пределах очень жестких допусков. Для удовлетворения предъявляемых требований на всех стадиях технологического процесса изготовления диафрагм должны специально предусматриваться мероприятия, обеспечивающие необходимую точность геометрии конструкции. Эти мероприятия включают сборку и сварку узлов диафрагм в специальных приспособлениях, обеспечивающих необходимую точность установки входящих деталей, учет сварочных деформаций при просечке пазов в бандажных лентах и применение при сварке дополнительных жесткостей, уменьшающих коробление конструкции.

Основной причиной, вызывающей отклонение размеров диафрагмы от заданных, являются сварочные деформации. Пробивка пазов в бандажных лентах и механическая обработка изделия производятся достаточно точно и допуски на выполнение этих операций полностью укладываются в пределы общих допусков для диафрагм. В то же время сварочные деформации, как правило, превышают допустимые по условиям работы конструкции.

При длительной работе паровых турбин на ТЭС имеют место аварийные ситуации проточной части ЦВД и ЦСД, связанные с разрушением высокотемпературных диафрагм. На рис. 5 представлены повреждения таких диафрагм и рабочих лопаток.

Основные повреждения в процессе длительной эксплуатации наблюдаются в сварных соединениях направляющих лопаток с телом и ободом диафрагмы. Разрушение происходит по зоне сплавления торца направляющей лопатки с металлом сварного шва. Эта зона является наиболее высоконагруженным и уязвимым участком диафрагмы и определяет работоспособность диафрагмы в целом. Причиной образования повреждений и выхода из строя направляющих аппаратов, по-видимому, является влияние технологических факторов при изготовлении диафрагм, а также формирование напряженно-деформированного состояния в конструктивных узлах диафрагм при рабочих условиях эксплуатации турбины.

Для выяснения возможного влияния технологических факторов при изготовлении сварных высокотемпературных диафрагм представляет интерес проведение анализа процесса сборки, сварки и термообработки диафрагм на ОАО «Турбоатом» (г. Харьков) [6].

Технологическая инструкция по изготовлению сварных диафрагм предусматривает выполнение всех регламентируемых работ в строгом соответствии с требованиями ОСТ 108.021.04–78 [2], РТМ 108.020.35–81 [7], а также конструкторской документации СКБ «Турбоатом».

Для элементов сварных высокотемпературных диафрагм применяются следующие сварочные материалы:

- покрытые электроды ЭА-395/9 — для приварки направляющих лопаток из стали 15X12ВНМФ (ЭИ-802) или 15X11МФА к бандажной ленте из стали 12X13;
- покрытые электроды ТМЛ-3У — для сварки решетки с телом и ободом диафрагмы.

Фиксация направляющих лопаток в пазах бандажной ленты в процессе сборки производится с помощью прихваток длиной 10...15 мм. Обварка лопаток по контуру производится за один проход.

Таблица 1. Химический состав металла, наплавленного покрытыми электродами для сварки высокотемпературных диафрагм

Марка электрода	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Mo	Cr	V	S	P
ТМЛ-3У	0,06...0,12	0,50...0,90	0,15...0,40	0,40...0,70	0,80...1,25	0,15...0,30	≤0,025	≤0,030
ЦЛ-20	0,06...0,12	0,60...0,90	0,18...0,40	0,40...0,70	0,80...1,25	0,12...0,30	≤0,025	≤0,030

Сварка производится одновременно по наружному и внутреннему бандажам, начиная с середины сегмента по 2...3 лопатки, затем со стороны развеса и т.д. Сварка решетки производится только при ее горизонтальном положении.

Применение электродов ЭА-395/9 для сборки и сварки хромистых сталей при изготовлении решетки дает возможность исключить предварительный подогрев и проведение послесварочной термической обработки (высокий отпуск 690 °С). Сборка и сварка производится без подогрева на постоянном токе обратной полярности. Режим сварки для электрода диаметром 3,0 мм: сварочный ток  $I_{св} = 60...80$  А.

Сварка выполняется «снизу-вверх» короткой дугой узкими валиками. Участки шва приварки лопатки, расположенные вертикально или наклоненные на угол не более 15° к вертикали, допускаются сваривать в направлении «сверху-вниз».

Сборка диафрагмы (соединение решетки с телом диафрагмы и ободом) производится в специальном приспособлении электродами ТМЛ-3У или ЦЛ-20 с помощью прихваток длиной 80...120 мм с мест-

ным подогревом места прихватки до температуры 250...300 °С.

Химический состав металла, наплавленного этими электродами, приведен в табл. 1.

Собранная диафрагма передается на сварку. Сварка диафрагмы производится теми же электродами (табл. 1) с предварительным и сопутствующим подогревом не ниже 300 °С.

Заполнение разделок приварки решетки к телу и ободу диафрагмы необходимо начинать со стороны паровпуска. В процессе сварки должна производиться периодическая кантовка диафрагмы на 180 °С. Количество кантовок определяется технологическим процессом сварки данной диафрагмы.

В процессе сварки круговых швов необходимо производить проковку швов. Проковка первого и последнего слоя не производится. Порядок заполнения разделок представлен на рис. 6. Заполнение разделки выполняется участками длиной 250...350 мм в направлении от середины к краям. В первую очередь с учетом кантовки диафрагмы сваривается слой со стороны тела, далее со стороны обода и т.д., постоянно чередуя наложение слоев в швах приварки решетки к телу и ободу.

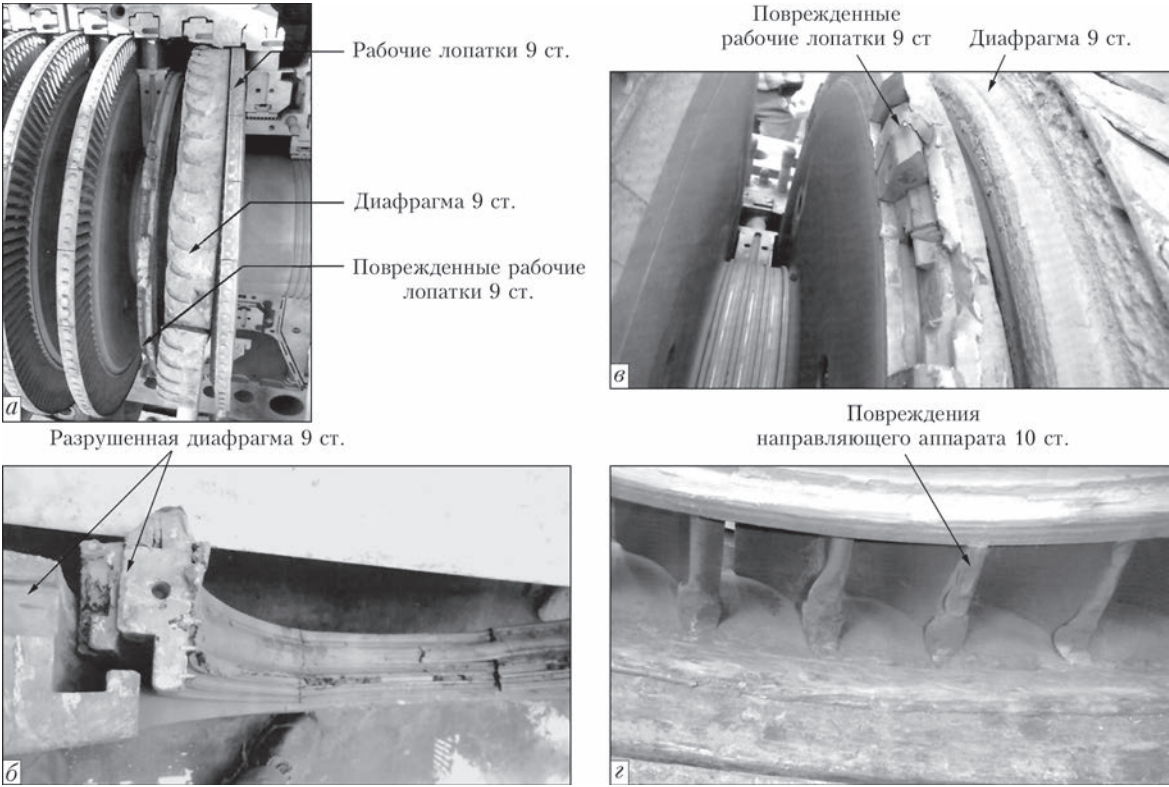




Таблица 2. Химический состав металла, наплавленного электродами MTS-4 и Kupfer 3KC

Марка электрода	Химический состав, мас. %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	V	Mo	Nb	Cu	P	S	[N <sub>2</sub> ]	[O <sub>2</sub> ]
MTS-4	0,16	0,20	0,53	10,5	0,51	0,47	0,21	0,87	0,046	<0,1	0,017	0,007	0,03	0,052
Kupfer 3KC	0,12	0,35	0,91	1,38	0,07	—	0,25	1,0	—	<0,1	0,021	0,012	0,03	0,048

После сварки диафрагмы, не допуская охлаждения ниже 300 °С, производят ее посадку в печь и выполняют отпуск при температуре 710...720 °С. Нагрев до температуры отпуска должен быть со скоростью 50...60 °С/ч. Допускается перерыв между сваркой и термообработкой до 72 ч при условии выдержки сварного узла после сварки при температуре подогрева в течение пяти часов и замедленного охлаждения. Выдержка при температуре 6...12 ч. Охлаждение со скоростью не более 50 °С/ч до температуры 150 °С.

Проведенный анализ причин повреждений высокотемпературных диафрагм (рис. 5), а также изучение действующего технологического процесса сварки направляющего аппарата и силовых швов диафрагмы показывает, что одним из определяющих факторов разрушения является низкий уровень служебных характеристик металла силовых швов (предел прочности и предел ползучести). Применяемые для ручной сварки силовых швов покрытые электроды типа ТМЛ-3У или ЦЛ-20 не могут обеспечить требуемые служебные свойства сварных соединений направляющих лопаток из стали 15X11МФА с телом и ободом диафрагмы из стали 15X1М1ФЛ. По показателям длительной прочности металл сварного шва, выполненного указанными электродами, значительно уступает даже литой стали 15X1М1ФЛ тела и обода. Это свидетельствует о необходимости усовершенствования существующей технологии сварки соединений диафрагмы. В связи с изложенным выше выбор прогрессивных сварочных материалов и усовершенствование технологии сварки высокотемпературных диафрагм является весьма важной зада-

чей. Актуальность ее решения возрастает в связи с необходимостью создания турбогенераторов нового поколения с высокими параметрами пара (температура до 600 °С и давление 300 бар).

Предварительно был проведен маркетинговый поиск покрытых электродов для сварки теплоустойчивых сталей хромомолибденовой и хромомолибденованадиевой композиции, обеспечивающих гарантированный предел длительной прочности ( $\sigma_{д.п}$ ) металла шва при 570 °С за 100 тыс. ч на уровне 140...150 МПа ( $\sigma_{д.п}$  стали 15X1М1ФЛ при 570 °С за 100 тыс. ч составляет 100 МПа). Были рассмотрены электроды отечественного производства, а также фирмы «Бёлер» (Германия), фирмы «Эсаб» (Швеция) и других зарубежных производителей. По результатам маркетингового поиска предпочтение было дано электродам производства фирмы «Бёлер» (Германия):

- Thermanit MTS-4 (основные покрытые хромистые электроды (хром до 11 %), для сварки сталей, эксплуатирующихся при температурах до 580 °С);
- Phoenix SH Kupfer 3KC (основные покрытые электроды Cr–Mo–V композиции для сварки компонентов, работающих при температурах до 600 °С).

Сравнительные исследования указанных электродов показали несколько лучшие сварочно-технологические свойства при применении электродов Phoenix SH Kupfer 3KC.

Содержание основных элементов и содержание газов в металле, наплавленном указанными электродами, приведено в табл. 2.

Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле исследовали с помощью спиртовой пробы [8]. Результаты исследования показали, что содержание диффузионного водорода в наплавленном металле при сварке электродами MTS-4 находится на уровне  $[H]_{диф.} = 2,1...2,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , а при сварке электродами Kupfer 3KC  $[H]_{диф.} = 1,8...2,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . В соответствии с данными работы [8] уровень диффузионного водорода  $[H]_{диф.}$  в наплавленном металле должен быть ниже  $5,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , что отвечает предъявляемым требованиям для обеих марок покрытых электродов.

Таким образом, проведенные сравнительные испытания сварочно-технологических свойств покрытых электродов для сварки комбинированных соединений теплоустойчивых сталей композиции Cr–Mo–V и хромистой стали с 11...12 % Cr показали, что для выполнения силовых швов высокотемпературных диафрагм принципиально подходят

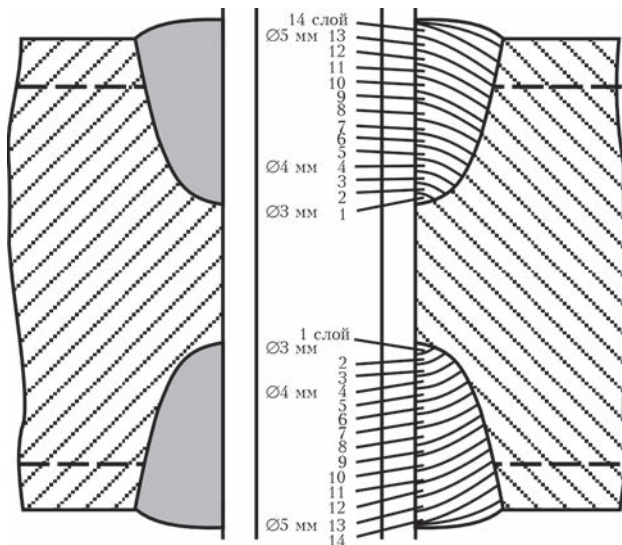


Рис. 6. Порядок заполнения разделок силовых швов

испытанные марки электродов MTS-4 и Kupfer 3КС.

Склонность к замедленному разрушению сварных соединений из стали 15Х12ВНМФА оценивали с помощью испытаний по методу Implant и сварки технологических проб типа Tekken (ГОСТ 26388–84) при использовании выбранных электродов. Критерием стойкости против замедленного разрушения по методу Implant является критическое напряжение, выше которого развивается разрушение опытных соединений. Напряжение в соединении рассчитывается как отношение нагружающего усилия к сечению образца.

Результаты испытаний по методу Implant представлены на рис. 7. Видно, что по сравнению со сваркой без подогрева существенный рост критических напряжений имеет место при подогреве более 150 °С. Максимальный уровень напряжений соединения стали 15Х12ВНМФА выдерживают при  $T_{\text{п}} \approx 250$  °С. Этому условию соответствует самое высокое сопротивление трещинообразованию. Подогрев до более высокой температуры в данных условиях эксперимента не давал преимуществ. Сопротивление образованию трещин оставалось приблизительно на том же уровне, как и у соединений, сваренных с подогревом 250 °С.

Результаты испытаний по методу Implant сварных соединений стали 15Х12ВНМФА, выполненных электродами Kupfer 3КС, представлены на рис. 7, б. Кривая, разграничивающая области нали-

чия и отсутствия трещин, представляет собой ориентировочные значения критических напряжений.

Подогрев до 100 °С практически не сказывается на трещиностойкости — критические напряжения остаются на том же уровне, что и при сварке без подогрева. При  $T_{\text{п}}$  выше 100 °С трещиностойкость заметно возрастает, что указывает на целесообразность применения подогрева выше 100 °С. При применении температур подогрева 200...250 °С стойкость против замедленного разрушения возрастает более интенсивно, чем при подогреве в интервале 150...200 °С. Это подтверждается более крутым подъемом кривой на участке 200...250, чем на участке 150...200 °С (или большим углом  $\alpha_2$  наклона касательной к кривой на участке 200...250 °С, чем  $\alpha_1$  на участке 150...200 °С).

Полученные результаты испытаний подтверждают, что для обеспечения высокой стойкости сварных соединений стали 15Х12ВНМФА против замедленного разрушения при использовании электродов Kupfer 3КС следует применять предварительный подогрев в интервале 200...250 °С. При исследовании макрошлифов установлено, что основным видом структуры наплавленного металла является высокоотпущенный бейнит, образующийся без предварительной деформации (из литого металла) с коагулированными карбидами.

Таким образом, исследования показали высокую сопротивляемость наплавленного металла образованию холодных трещин при условии сварки соединения стали 15Х12ВНМФА с предварительным и сопутствующим подогревом до температуры 250 °С.

Для уточнения теплового режима сварки были выполнены дополнительные испытания трещиностойкости с применением сварки жестких соединений типа Tekken. Сварку технологических проб Tekken выполняли электродами Thermanit MTS-4 и Kupfer 3КС без подогрева и с предварительным подогревом при 150, 200 и 250 °С. После сварки стыки подвергали термическому отдыху — выдержке в печи с температурой 200 °С. После отдыха соединения охлаждали на спокойном воздухе до комнатной температуры и давали выдержаться в течение 48 ч.

Такая выдержка необходима для обеспечения возможности развития замедленного разрушения в соединениях, склонных к трещинообразованию, и проверки гарантированной стойкости соединений против этого вида разрушения. После этого проводили осмотр металла шва и ЗТВ с помощью лупы с четырехкратным увеличением и микроскопа МБС.

Было установлено, что при сварке технологических проб без предварительного подогрева во всех случаях образуются холодные трещины.

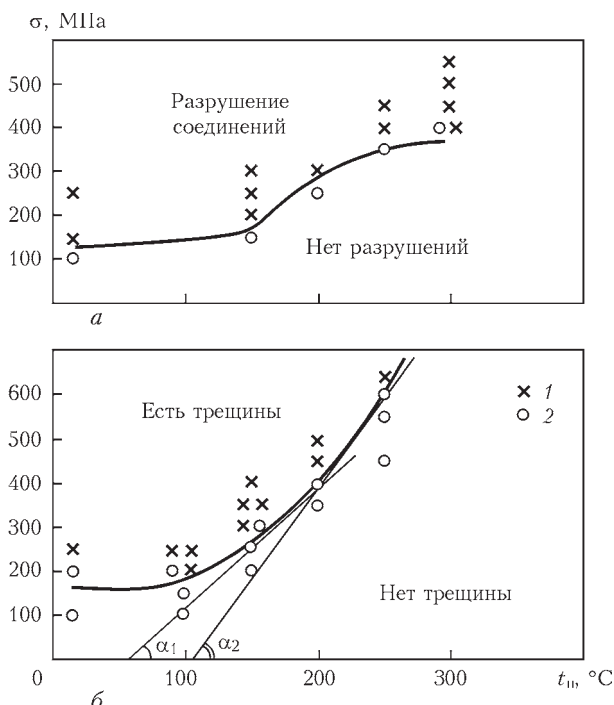


Рис. 7. Влияние температуры предварительного подогрева стали 15Х12ВНМФА на склонность к замедленному разрушению по методу Implant: а — критические напряжения разрушения при сварке электродами MTS-4; б — Kupfer 3КС (1 — условия испытаний, при которых отсутствовало замедленное разрушение; 2 — условия, вызывающие разрушения)

**Таблица 3.** Влияние температуры предварительного подогрева  $T_{\text{п}}$  на скорость охлаждения металла ЗТВ и склонность к замедленному разрушению стыковых проб Tekken на стали 15X12ВНМФА

$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	150	200	250
$w_{5/3}, ^\circ\text{C}/\text{с}$	9,7	6,3	4,2
Наличие трещин	Есть	Нет	Нет

Результаты оценки технологической прочности при сварке проб с подогревом 150, 200 и 250  $^\circ\text{C}$  представлены в табл. 3.

Полученные результаты подтверждают необходимость использования предварительного подогрева до 200...250  $^\circ\text{C}$  для обеспечения высокой стойкости сварных соединений стали 15X12ВНМФА против образования холодных трещин. При этом необходимым условием обеспечения требуемого теплового режима сварки является получение скорости охлаждения  $w_{5/3}$  металла ЗТВ на уровне, не превышающем 9  $^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Исследования показали, что при температуре подогрева 150  $^\circ\text{C}$  в металле шва могут образовываться трещины. В металле ЗТВ трещины отсутствуют. При повышении температуры до 200  $^\circ\text{C}$  трещины в любых зонах сварного соединения отсутствуют. Учитывая необходимость обеспечения запаса технологической прочности при разработке технологии РЭДС стали, была установлена температура предварительного и сопутствующего подогрева на уровне 250  $^\circ\text{C}$ .

Таким образом, на основании полученных результатов можно рекомендовать следующий подход к сварке соединений стали 15X12ВНМФ и 15X1М1ФЛ:

- сварка с предварительным подогревом 200...250  $^\circ\text{C}$  при обязательном контроле температуры, с целью предотвращения ее снижения ниже 200  $^\circ\text{C}$ ;

- отдых после сварки при температуре 200  $^\circ\text{C}$  в течение времени, определяемом из соотношения 10 мин/1 мм толщины шва (определено экспериментально из условия обеспечения стойкости против образования холодных трещин в технологической пробе со швом толщиной около 5 мм при выдержке при указанной температуре в течение 20 мин);

- охлаждение соединения до температуры примерно 150  $^\circ\text{C}$  (для завершения распада остаточного аустенита);

- проведение высокого отпуска.

Выбор оптимального режима термической обработки проведен на основании результатов измерений твердости сварных соединений (в металле шва и ЗТВ) и испытаний на ударный изгиб металла швов после различных режимов отпуска.

Результаты измерения твердости в состояниях после сварки и отпуска приведены на рис. 8. Видно, что после резкого спада твердости в процессе

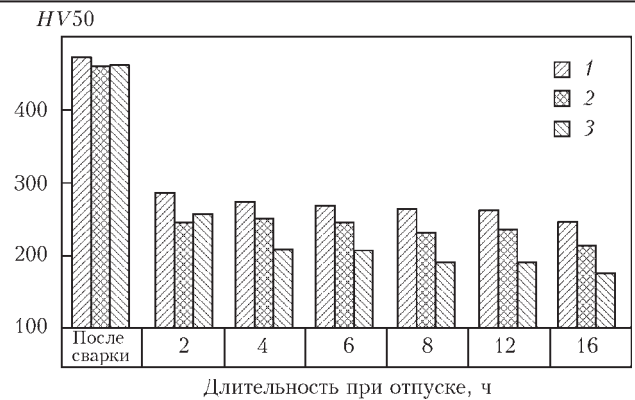


Рис. 8. Влияние длительности отпуска комбинированных сварных соединений на твердость металла шва и участков ЗТВ на удалении 0,2...0,5 мм от линии сплавления (1 — сталь 15X12ВНМФ; 2 — шов МТS4; 3 — сталь 15X1М1Ф)

отпуска в течение 2 ч дальнейшая выдержка приводит к постепенному снижению значений твердости для всех зон соединения. Более резко твердость начинает снижаться после выдержки более 12 ч. При этом после отпуска в течение 16 ч твердость металла ЗТВ в стали 15X1М1Ф достигает  $HV\ 173$  (что соответствует твердости по Бринеллю около  $HB\ 163$ ), в стали с 12 % Cr —  $HV\ 246$  (или около  $HB\ 235$ ). При всех режимах отпуска твердость швов занимает промежуточное положение. После 16 ч отпуска шов имеет  $HV\ 215$  ( $HB\ 204$ ).

При проведении термической обработки важно не допустить ухудшение механических свойств основного металла и металла в зоне сварного соединения. В данном случае такой характеристикой может быть прочность, пропорциональная величине твердости. Как видно из рис. 9, а, твердость металла ЗТВ в стали 15X12ВНМФ снижается ниже твердости стали в исходном состоянии (пун-

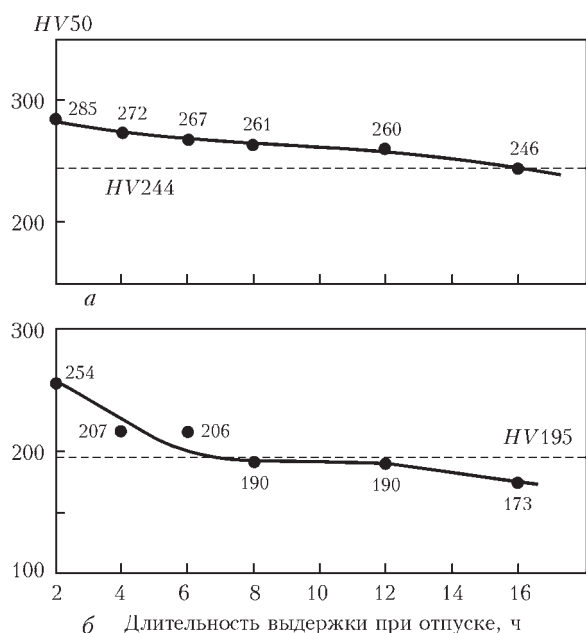


Рис. 9. Изменение твердости металла ЗТВ при отпуске сварных соединений при 720  $^\circ\text{C}$  в сравнении с исходной твердостью стали: а — ЗТВ стали 15X12ВНМФ; б — 15X1М1Ф



Таблица 4. Механические свойства сварных соединений типа 15X1M1Ф + 15X12ВНМФ, сваренных электродами Thermanit MTS 4 (отпуск 720 °С, 8 ч), место разрушения — ЗТВ

T <sub>исп</sub> , °С	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	σ <sub>в</sub> , МПа	ψ, %
	Металл шва					Сварное соединение	
20	553,8...557,7	690,7...717,7	— *...22,75	55,0...57,9	93	554,2...569,1	48,6...57,6
570	317,6...321,7	381,6...395,0	29,2...30,3	80,7...84,3	184,3...195,5	371,6...379,7	67,0...68,8

\* Разрушение за базой.

ктирная линия на уровне HV 244) после отпуска при 720 °С с продолжительностью более 16 ч. Металл ЗТВ со стороны стали 15X1M1Ф (рис. 9, б) приобретает твердость ниже твердости исходной стали после выдержки в течение 8...12 ч.

Следовательно, отпуск более 8 ч ведет к разупрочнению сварных соединений (как ЗТВ, так и, вероятно, основного металла) в области стали 15X1M1Ф. В стали 15X12ВНМФ такое разупрочнение происходит при отпуске более 16 ч.

Исходя из результатов измерений твердости можно заключить, что продолжительность отпуска должна быть не более 8 ч.

Результаты проверки влияния режима отпуска на ударную вязкость (KCV) металла шва представлены на рис. 10. Из приведенных данных следует, что после всех выдержек при 720 °С швы имели достаточно высокие значения KCV. Таким образом, для отпуска исследуемых комбинированных соединений можно рекомендовать режим: температура 720 °С, длительность 8 ч.

Для испытания на статическое растяжение использовали поперечные образцы из сварного соединения и продольные образцы из металла шва. Для испытания на ударный изгиб — поперечные образцы с острым надрезом по шву (тип IX, ГОСТ 6996–66). Испытания проводили при комнатной (20 °С) и при рабочей температурах (570 °С). Для испытаний на статическое растяжение при 20 °С использовали образцы типа II, при 570 °С — типа IV по ГОСТ 6996–66.

Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Во всех случаях при испытаниях на статическое растяжение поперечных образцов разрушение проходило по металлу ЗТВ одной из свариваемых сталей в зависимости от температуры испытаний. При

T<sub>исп</sub> = 20 °С разрушение шло по стали 15X1M1Ф, при 570 °С — по стали 15X12ВНМФ.

Изучены особенности микроструктуры в состоянии после сварки и после ранее определенного оптимального отпуска при 720 °С в течение 8 ч. Выявление микроструктуры на полированных шлифах проводили двухступенчатым травлением:

- химическим в 3 %-м спиртовом растворе азотной кислоты;
- электрохимическим в хромовой кислоте при напряжении 8 В в течение 20 с.

Первое травление использовано для выявления структуры в низколегированной стали, второе — в шве и высоколегированной стали.

Выявлены следующие особенности строения основного металла и сварных соединений.

Прежде всего следует отметить, что для микроструктуры сварного соединения, особенно металла ЗТВ, характерно неоднородное строение. В большей мере микронеоднородность проявляется в металле ЗТВ в стали 15X1M1Ф. Здесь, в силу возможности образования ряда продуктов превращения аустенита и частичного их видоизменения под воздействием термодетформационных циклов при многопроходной сварке, формируются микроучастки с различной интенсивностью травления и с различным окрашиванием.

Особенностью структуры металла ЗТВ в стали 15X1M1Ф после высокого отпуска является появление участков α-феррита, расположенных вдоль границы со швом. Имеются области в виде прослоек, состоящие только из феррита, и области со смешанной структурой в виде зерен феррита и продуктов отпуска исходной игольчатой структуры закалки. Ферритная прослойка на разных уровнях поперечного сечения соединения имеет различную ширину, которая изменяется примерно от 0,7 до 1,4 мм. В шве вдоль границы раздела шов/ЗТВ образовалась карбидная прослойка (гряд), которая после травления приобрела темную окраску.

Развитие структурной неоднородности вдоль границы ЗТВ/шов является следствием диффузионного перераспределения углерода, вызванного различием в содержании карбидообразующих элементов в основном металле и шве. В данном соединении определяющее влияние на развитие неоднородного распределения углерода оказало различие в легировании хромом низколегированной стали и высоколегированного шва. Углерод имеет свойство скапливаться в области с боль-

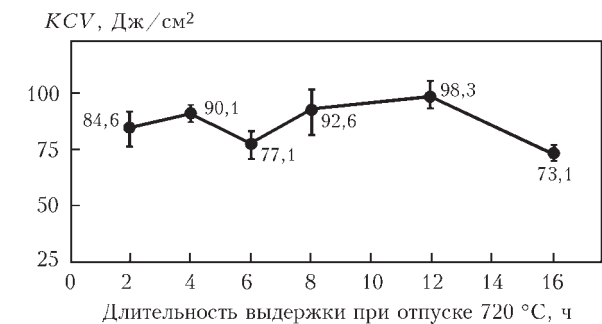


Рис. 10. Влияние длительности отпуска при 720 °С на KCV металла швов соединений стали 15X1M1Ф и стали 15X12ВНМФ, сваренных электродами Thermanit MTS4

шим содержанием хрома. В данном случае, обеднение углеродом прилежащих ко шву участков привело к появлению  $\alpha$ -феррита, а его скопление в шве — к повышенной концентрации карбидов. Такая структурная неоднородность характерна для комбинированных соединений и может формироваться как при сварке, так и при отпуске. Исключить ее появление, не меняя легирования шва или технологии сварки, в целом не представляется возможным.

Структура металла ЗТВ хромистой высоколегированной стали после отпуска исходного мартенсита представляет собой ферритно-карбидную смесь, сформировавшуюся в результате выделения карбидов по границам первичных аустенитных зерен и по субграницам внутри зерен. Кроме продуктов отпуска мартенсита в структуре металла ЗТВ встречаются отдельные зерна  $\delta$ -феррита, изначально находящиеся в основном металле.

Установлено, что в ЗТВ исследуемой стали имеется участок с более низкой твердостью. Можно считать, что именно по этой зоне разупрочнения (ЗР) произошло разрушение разрывных образцов при испытании при 570 °С.

Дополнительно проведено металлографическое исследование микроструктуры металла в зоне разрушения. Металл разрушался при развитии пластического течения, что было видно по выстраиванию рядов дисперсных внутризеренных выделений вдоль направлений деформации. В местах, где в структуре отпущенного мартенсита присутствовал  $\delta$ -феррит, разрушение проходило по межфазным границам  $\delta$ -феррит/мартенсит; разрушений по ферритной фазе не обнаружено.

Таким образом, можно полагать, что снижение прочности в металле ЗТВ в стали 15X12ВНМФ может быть связано с тонкими структурными изменениями и с дополнительным доотпуском, обусловленными воздействием сварочного нагрева.

Структура шва типа Thermanit MTS4 с высоким содержанием хрома, также, как и стали 15X12ВНМФ, после отпуска исходного мартенсита представляет собой однородную мелкодисперсную ферритно-карбидную смесь. Твердость в шве изменяется примерно от HV 250 вблизи кромки низколегированной стали до HV 290 у высокохромистой стали.

На основании проведенных исследований разработаны основные положения принципиальной технологии сварки и термической обработки комбинированных соединений стали 15X1М1ФЛ со сталью 15X12ВНМФА.

Для окончательного выбора марки электродов для сварки силовых швов были изготовлены образцы сварных соединений стали 15X1М1ФЛ со сталью 15X12ВНМФА, выполненные электрода-

ми Thermanit MTS4 и Phoenix SH Kupfer ЗКС для испытания на длительную прочность и ползучесть при 570 °С. По результатам этих испытаний будет принято техническое решение по выбору и применению электродов для сварки штатных изделий.

### Выводы

1. Диафрагма является одним из наиболее ответственных узлов проточной части паровой турбины, отвечающей за обеспечение надежности и работоспособности турбоагрегата и в целом энергоблока ТЭС.

2. Существующая технология сварки высокотемпературных диафрагм ЦВД и ЦСД не обеспечивает надежности работы проточной части мощных паровых турбин, способствует снижению ресурса эксплуатации и приводит к аварийным ситуациям на ТЭС.

3. Изучены особенности эксплуатационных повреждений в сварных узлах высокотемпературных диафрагм. Показано, что основные повреждения в процессе длительной эксплуатации образуются в сварных соединениях направляющих лопаток с телом и ободом диафрагм. Разрушение происходит по зоне сплавления торца направляющей лопатки с металлом сварного шва.

4. Для повышения эксплуатационной работоспособности и надежности высокотемпературных диафрагм выбраны новые материалы для сварки силовых швов, а также разработаны основные положения принципиальной технологии сварки и термообработки, обеспечивающие высокое качество и требуемые служебные свойства комбинированных соединений.

1. Шляхин П.Н. Паровые и газовые турбины. — М.: Энергия, 1974. — 224 с.
2. ОСТ 108.021.04–78. Турбины паровые стационарные. Диафрагмы сварные, аппараты направляющие. Общие технические условия. Введ. 01.01.79.
3. Исследование напряженного состояния корпусов и диафрагм паровых турбин / Г.М. Меллерович, Е.Н. Пелипенко, М.И. Покрасса и др. // Пробл. прочности. — 1969. — № 4. — С. 19–22.
4. Напряжения и деформации в деталях паровых турбин / Под общ. ред. А.Н. Подгорного. — Киев: Наук. думка, 1978. — 275 с.
5. Кулагина Г.Ф. Экспериментальное исследование напряжений и прогибов диафрагм // Исследование элементов паровых и газовых турбин и осевых компрессоров. — М.: Машгиз, 1960. — С. 333–346.
6. Технологическая инструкция ТИ-656. Диафрагмы сварные, подготовка под сварку, сварка, термообработка и контроль качества / ОАО «Турбоатом», 2007.
7. Руководящие технические материалы РТМ 108.020.35–81. Турбины паровые стационарные. Сварка и термическая обработка диафрагм и направляющих аппаратов. Основные положения.
8. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.

Поступила в редакцию 22.12.2015

## ПРОДЛЕНИЕ РУСурсА ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ПИТТИНГОСТОЙКОСТИ

В.М. КУЛИК, С.А. ОСАДЧУК, Л.И. НЫРКОВА, В.П. ЕЛАГИН, С.Л. МЕЛЬНИЧУК

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

При длительной эксплуатации резервуаров, изготовленных из нержавеющей стали, на контактирующей с периодически подогреваемой агрессивной жидкостью поверхности образуются питтинги, преимущественно на сварных соединениях, и возникает опасность сквозного повреждения стенки. Целью работы являлось увеличение надежности и долговечности резервуаров для хранения агрессивной жидкости путем повышения стойкости против питтингообразования, в первую очередь сварных соединений. Необработанные и механически обработанные различными способами образцы с проваром необработанной поверхности и шлифованной листовой стали 12X18H10T подвергались ускоренным испытаниям на стойкость против питтинговой коррозии при комнатной температуре и подогревах, подобных технологическим, раствора FeCl<sub>3</sub>. Стойкость против питтинговой коррозии сварных соединений существенно повышается после выполнения абразивных обработок, в меньшей степени поверхностных проковок и не зависит от шероховатости поверхности. Питтингостойкость также повышается при замене опосредованного подогрева раствора через образец на его прямой подогрев погруженным нагревателем. Результаты работы целесообразно использовать при изготовлении, ремонте и эксплуатации химического, нефтехимического, пищевого и пр. оборудования. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 5.

*Ключевые слова:* резервуар, нержавеющая сталь, сварное соединение, питтинговая коррозия, абразивная обработка, проковка, подогрев, шероховатость поверхности

В производстве абразивов используется формалин, поступающий из вертикального сварного резервуара диаметром 3,2 и высотой 7,2 м, изготовленного из коррозионностойкой двухслойной стали Ст3+12X18H10T. В процессе длительной эксплуатации резервуара формалин, подогреваемый для технологических целей, преимущественно в холодную пору, вызывает образование и развитие коррозионных питтингов на плакирующем слое, в большей степени на сварных соединениях и днище. При достижении питтингами основного слоя, коррозионный процесс интенсифицируется, что приводит к сквозному коррозионному поражению стенки в течение короткого времени и загрязнению окружающей среды горючими токсичными веществами. В ИЭС им. Е.О. Патона разработана методика мониторинга [1], которая позволяет установить момент нарушения питтингом герметичности плакировки. Для заварки местных коррозионных поражений требуется длительный перерыв в эксплуатации резервуара, что влечет материальные и трудовые затраты.

Целью работы являлось увеличение эксплуатационной надежности и долговечности резервуаров для хранения агрессивных жидкостей путем повышения их стойкости против питтингообразования, в первую очередь сварных соединений нержавеющей стали.

Анализ распределения питтингов в резервуаре свидетельствует о заметном влиянии на их обра-

зование температуры и способа подогрева формалина, пространственного положения и продолжительности контактирования стенки с формалином, термических воздействий на металл при сварке и возможном влиянии состояния металла поверхности. Частичным подтверждением этого является установленная нами большая склонность к питтинговой коррозии нержавеющей стали при горизонтальном ее размещении, чем при вертикальном, что учитывалось при проведении коррозионных испытаний.

Известно, что коррозионностойкие стали склонны к питтинговой коррозии [2] вследствие образования гальванической пары между пассивированной поверхностью и ее отдельными непассивированными по разным причинам участками. Развитие питтингов вглубь происходит со скоростью, превышающей скорость равномерной коррозии в десятки тысяч раз. Склонность к питтинговой коррозии нержавеющей стали увеличивается, как правило, с повышением температуры агрессивного раствора и зависит от вида и температуры термической обработки, а также последующих нагревов [3, 4]. Стойкость к питтинговой коррозии аустенитной стали 12X18H10T повышается деформацией растяжением с образованием мартенситной  $\alpha'$ -фазы [5]. На повышение стойкости против коррозии под напряжением и коррозионно-усталостного разрушения положительно влияет обкатка роликами, дробеструйная обра-





Рис. 1. Провар вольфрамовым электродом в среде аргона высоколегированной стали толщиной 8 мм

ботка, крацевание металлической щеткой, уменьшение шероховатости поверхности нержавеющей стали и ее сварных соединений, а также высокочастотная механическая обработка сварных соединений низколегированных сталей [6–8].

Для уточнения влияния состояния металла и поверхности сварного соединения нержавеющей стали, а также способа подогрева контактирующего с ним агрессивного раствора на питтингообразование изготавливались плоские образцы размером 50×70 мм из листовой стали 12Х18Н10Т толщиной 8 мм в состоянии поставки и толщиной 7 мм после чистовой шлифовки с эмульсионным охлаждением для удаления возможных поверхностных дефектов. Образцы подвергались несквозному провару аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом без присадочного металла (ТИГ) с применением сварочного аппарата АРК-1 с источником питания ВДУЧ-315. При соблюдении  $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 11$  В и  $v_{св} = 5,5$  м/ч глубина, ширина и усиление (превышение поверхности основного металла) провара составляли 3, 11...13 и примерно 0,5 мм соответственно (рис. 1), что приемлемо для заварки локальных повреждений внутренней поверхности резервуара. При этом металл шва (провара) получается практически того же химического состава, что и основной металл, а столбчатые кристаллиты верхней части шва ориентируются в целом нормально к поверхности.

Часть образцов сварных соединений подвергалась поверхностным механическим обработкам: абразивным кругом на заточном станке, также с последующей ручной абразивной обработкой шкуркой с образованием хорошо видимых рисок; вулканитовым кругом на заточном станке до зеркального блеска (полировкой), торцевым трением без и с упругими ударами упрочненным стальным стержнем с помощью ручной дрели с образованием плохо видимых рисок, ручной и высокочастотной механической проковками с формированием вмятин.

Необработанный шов характеризуется чешуйчатостью поверхности в виде изотерм кристаллизации сварочной ванны. Они устраняются обработками абразивами, трением с образованием множества рисок разной глубины и частоты распределения и проковками с поверхностной пластической деформацией металла без образования рисок. После этих обработок шов выявляется на

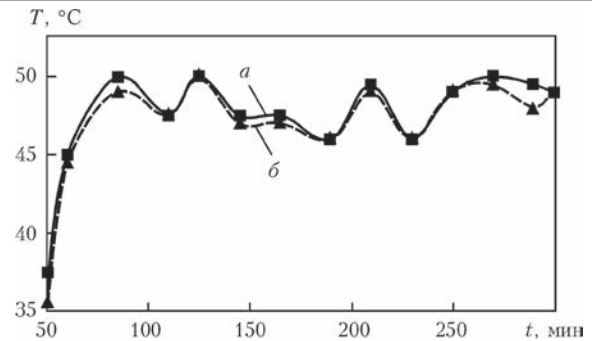


Рис. 2. Изменение температуры водного раствора  $FeCl_3$ , подогреваемого на электроплитке на расстоянии 5 (а) и 45 (б) мм от поверхности образца

поверхности только по его усилению над основным металлом.

Коррозионные испытания на предмет выявления склонности к питтинговой коррозии горизонтально размещенных сварных образцов проводились в 10 %-ном водном растворе  $FeCl_3$  при комнатной температуре 25...27 °С в течение 5, 24, 48, 72 ч и в процессе подогрева в течение 5 ч по ГОСТ 9.912–89. Подогревы столба раствора высотой 90 мм в цилиндрической ячейке диаметром 40 мм, установленной вертикально на поверхности образца, осуществлялись на электроплитке через образец и электронагревателем, погруженным в раствор на глубину 45 мм, при охлаждении образца с обратной стороны проточной 18...20 °С водопроводной водой. Температура раствора на разных уровнях контролировалась погружаемым ртутным термометром и регулировалась оперативными изменениями подводимого напряжения ЛАТРОМ, а также принудительными охлаждениями погружаемой сверху пробиркой с холодной водой.

В процессе подогрева на электроплитке температура водного раствора повышается до 45 °С в течение 1 ч и стабилизируется при 46...50 °С по истечении 75...80 мин (рис. 2). При этом за счет конвекции устанавливается небольшая разность температур раствора 0...1,5 °С на участке в пределах 5...45 мм от образца. В условиях конвективного теплообмена температура поверхности образца незначительно превышает температуру подогреваемого раствора.

При подогреве погруженным электронагревателем температура раствора у поверхности об-

Т а б л и ц а 1. Изменение по высоте температуры водного раствора  $FeCl_3$ , подогреваемого погруженным нагревателем и охлаждаемого снизу

Длительность подогрева, мин	Температура раствора (°С) на высоте (мм)				
	5	15	25	33	45
0	22	22	24	24	24
50...58	25	29	31	41	52
75...80	27	31	-	44	52
110...120	28	34	40	48	51
163...171	28,5	-	41	-	56
197...240	28,5	34	-	48	53

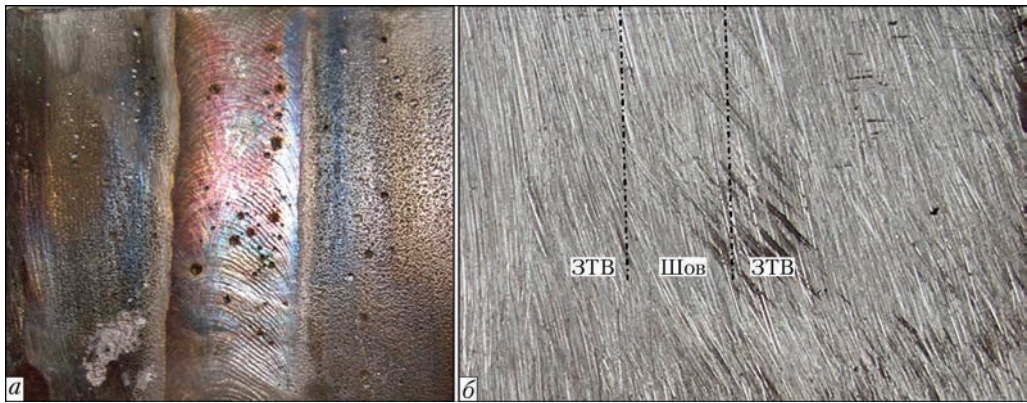


Рис. 3. Поверхность сварного соединения листовой стали 12Х18Н10Т, испытанного на питтинговую коррозию в течение 5 ч в состояниях после сварки (а) и абразивной обработки (б)

разца повышается дольше и до меньших значений, чем возле нагревателя, и стабилизируется на 28,0...28,5 и 51...56 °С на расстоянии 5 и 45 мм от поверхности образца после 110 минут подогрева (табл. 1). С учетом градиента температур по высоте 0,55...0,60 °С/мм температура раствора у самой поверхности образца должна быть 25...26 °С. От-

сутствие конвекции обуславливает пониженную интенсивность теплообмена и подогрева образца, что в сочетании с принудительным охлаждением его с обратной стороны (как стенки резервуара в холодную пору) обуславливает установление температуры на его поверхности ниже, чем при по-

Т а б л и ц а 2. Образование питтингов на сварном соединении стали 12Х18Н10Т в зависимости от обработки

Способ обработки. Шероховатость поверхности <i>Ra</i> , мкм			Длительность. испытаний, ч	Количество питтингов, шт.*	
Стали	Соединения			Провар	ЗТВ
	Шов	ЗТВ			
Без обработки. 0,2...1,6	Без обработки		5	26	60
	После сварки	0,2...1,6			
То же	Абразивная кругом		5	2	5
	40...60	40...60			
То же	Абразивная кругом и шкуркой		5	1	2
	20...40	20...40			
Шлифовка. 0,2...0,8	Без обработки		5	20	1
			24	20	1
	После сварки	0,2...0,8	48	20	1
			72	20	1
То же	Ручная проковка		5	14	1
			24	14	1
	После проковки	После проковки	48	14	1
			72	14	1
То же	Высокочастотная механическая проковка		5	14	1
			24	14	1
	После проковки	После проковки	48	14	1
			72	14	1
То же	Полировка		5	Не обнар.	Не обнар.
			24	Не обнар.	Не обнар.
	0,2...1,6	0,2...1,6	48	Не обнар.	Не обнар.
			72	Не обнар.	Не обнар.
То же	Торцевое трение		5	11	4
			24	21	15
	5...10	5...10	48	21	15
			72	21	15
То же	Торцевое трение с ударами		5	20	4
			24	27	20
	5...10	5...10	48	27	20
			72	27	20

\* На 40 мм длины сварного соединения.

\* На 40 мм длины сварного соединения.



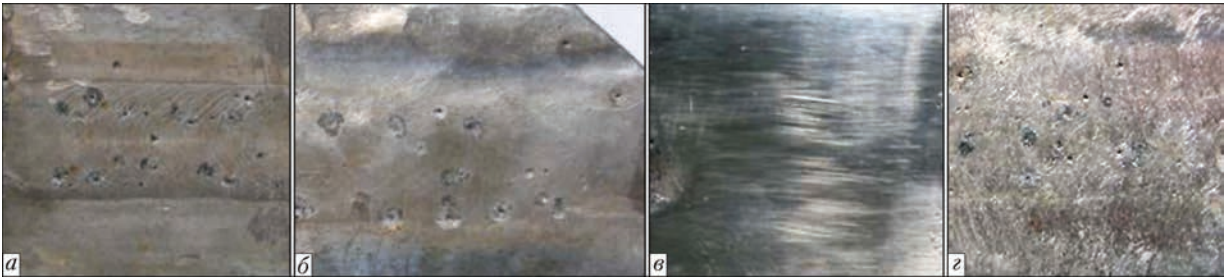


Рис. 4. Поверхность сварных соединений шлифованной нержавеющей стали, испытанных на питтинговую коррозию после сварки (а), проковки (б), полировки (в), торцевого трения (з)

догреве на электроплитке, по крайней мере, на 20...25 °С и ниже комнатной температуры.

При воздействии раствора  $\text{FeCl}_3$  при комнатной температуре необработанное сварное соединение нержавеющей стали в состоянии поставки склонно к образованию питтингов: относительно крупных на шве и меньших разных размеров на расстоянии от шва 3...8 мм и более (рис. 3, а, табл. 2). Высокую склонность к питтингообразованию соединения можно объяснить возникновением в приповерхностном слое растягивающих напряжений [7], обогащением серой и другими примесями пограничных зон ячеек столбчатых кристаллитов металла шва у поверхности и наличием поверхностных дефектов в листовом прокате в сочетании с неблагоприятными температурами нагрева при сварке. Абразивные обработки кругом на заточном станке и шкуркой, удаляющие приповерхностные слои с дефектами и чешуйчатость шва, существенно уменьшают (до единичных проявлений) склонность к образованию питтингов на сварных соединениях, несмотря на увеличение шероховатости поверхности (образование рисок), которая практически не изменяется в процессе коррозионных испытаний (рис. 3, б, табл. 2).

Существенное уменьшение количества образующихся в металле ЗТВ питтингов достигается шлифовкой (без видимых рисок) образца перед сваркой по сравнению с сохранением большо-

го их количества на необработанном шве (рис. 4, а, табл. 2). Склонность к питтинговой коррозии шва снижается в результате проведения поверхностных ручной и высокочастотной механической проковок (рис. 4, б, табл. 2), после которых уменьшаются растягивающие и появляются сжимающие напряжения в металле приповерхностного слоя [9]. Практическое устранение склонности сварного соединения к питтингообразованию осуществляется полировкой до зеркального блеска вулканитовым кругом, сочетающей удаление дефектов приповерхностного слоя с уменьшением шероховатости поверхности (рис. 4, в, табл. 2). Соединения, обработанные торцевым трением, особенно с упругими ударами, становятся более склонными к образованию питтингов (рис. 4, з, табл. 2), причиной чему может быть возникновение растягивающих напряжений в приповерхностном слое. Питтинги образуются преимущественно в течение первых 5 ч испытаний, после чего их количество существенно не увеличивается.

Подогрев сварного образца необработанной стали и водного раствора на электроплитке в процессе коррозионного испытания в течение 5 часов вызывает увеличение количества и размеров образующихся на поверхности сварного соединения питтингов, особенно на участке ЗТВ на расстоянии 3...5 мм от шва (рис. 3, а, 5, а). При его испытании с подогревом раствора погруженным элект-

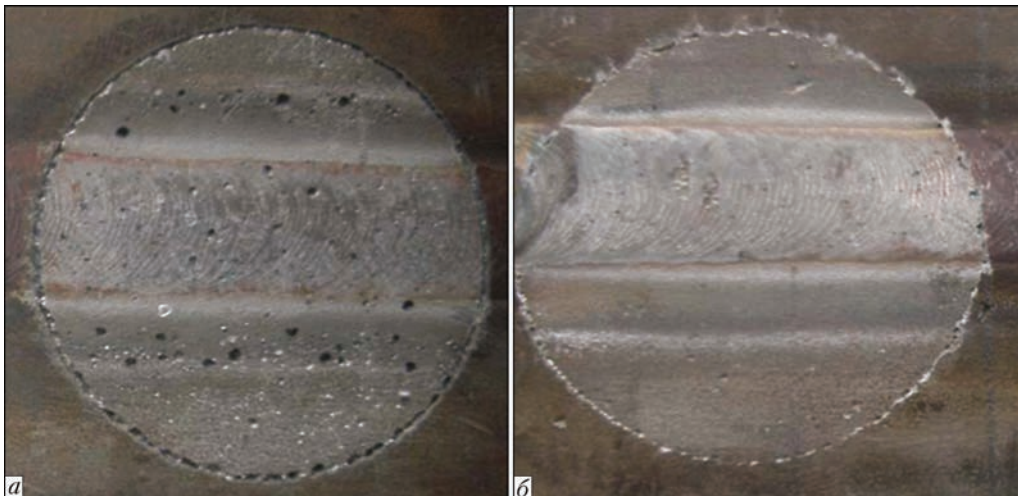


Рис. 5. Поверхность сварных соединений механически необработанной стали после коррозионных испытаний на питтинговую коррозию с подогревом на электроплитке (а) и погруженным электронагревателем (б)



тронагревателем и принудительным охлаждением образца с обратной стороны образуются мелкие, обнаруживаемые с помощью лупы, питтинги, преимущественно на поверхности шва (рис. 3, а, 5, б), уступающие по количеству и размерам питтингам, образующимся при комнатной температуре. Уменьшение склонности к питтингообразованию сварного соединения происходит благодаря совместному снижению температуры его поверхности и раствора в зоне их контакта, что возможно также путем рассредоточения подводимой через металл теплоты.

Выполнение абразивных обработок, особенно полировки, сварных соединений и заварок коррозионностойкой стали и замена опосредованного подогрева агрессивной жидкости через стенку резервуара на прямой подогрев изнутри погруженным нагревателем способствуют увеличению надежности и ресурса эксплуатации резервуара. При подогреве снаружи это возможно также за счет рассредоточения подводимой теплоты, когда уменьшаются плотность теплового потока и температура внутренней поверхности стенки и пограничного слоя жидкости. Установлено, что небольшое повышение питтингостойкости сварного соединения достигается поверхностной проковкой.

### Выводы

1. Сварной шов и зона термического влияния соединений стали 12X18H10T с одинаковым химическим составом металла, например, после аргонодуговой сварки W-электродом без использования специальной обработки, склонны к питтинговой коррозии в формалине.

2. Существенное повышение стойкости против образования питтингов, в первую очередь на сварных соединениях нержавеющей стали, обеспечивается абразивными обработками, особенно полировкой, удаляющими поверхностные слои с повышенным количеством различного рода де-

фектов. При этом шероховатость (чистота обработки) поверхности не определяет склонность к питтинговой коррозии. Повышение стойкости против питтингообразования возможно также поверхностными проковками, однако менее эффективно. Эти обработки целесообразно применять при изготовлении и ремонте резервуаров из коррозионностойкой стали.

3. Надежность и ресурс эксплуатации резервуара можно повысить, заменив технологический подогрев снаружи через стенку резервуара на подогрев агрессивной жидкости изнутри погруженным нагревателем или рассредоточив подводимую теплоту при опосредованном подогреве снаружи.

1. Моніторинг корозійного стану біметалевого резервуару для продуктів нафтопереробки та його ремонт / Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук, А.О. Рибаків та ін. / Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: 36. наук. статей. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – С. 531–537.
2. Идельчик Б.М., Лященко А.Е. Защита от коррозии компрессорных машин. – Л.: Машиностроение, 1984. – 119 с.
3. Томашев Н.Д. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 358 с.
4. Влияние нагревов на коррозионную стойкость нержавеющей стали 12X18H10T / Л.И. Шабудеева, О.К. Ревякина, Т.Б. Макачук, Л.Я. Гурвич // Физика поверхности и защита материалов. – 1996. – 32, № 2.
5. Яровчук А.В., Воронина Т.А., Тиванова О.В. Влияние мартенсита деформации на стойкость к питтинговой коррозии нержавеющей стали 12X18H10T // Ползуновский альманах. – 2007. – № 1-2. – С. 190–196.
6. Пачурин Г.В. Оптимизация режимов поверхностной пластической обработки с целью повышения эксплуатационной долговечности металлоизделий // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 2. – С. 91–95.
7. Соппротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В.В. Кныш, И.И. Вальтерис, А.З. Кузьменко, С.А. Соловей // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
8. Клименко А.В., Соловей С.А., Коваленко С.Ю. Повышение стойкости сварных соединений трубных сталей к коррозионному разрушению под напряжением // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 13 (202). – С. 178–183.
9. Кирьян В.И., Кныш В.В. Высокочастотная механическая проковка сварных соединений металлоконструкций // Автомат. сварка. – 2008. – № 11. – С. 36–41.

Поступила в редакцию 02.02.2016

### Компания Ярдевей Групп, КНР приглашает на работу трех инженеров-сварщиков

#### Требования к кандидатам:

- степень бакалавра или выше по специальностям: сварка, машиностроение, электротехника и родственные специальности;
- мужчины, возраст 25–49 лет;
- базовое знание разговорного английского языка;
- интерес к китайской культуре, желание работать в КНР и других странах мира.

#### Сферы деятельности:

- послепродажное обслуживание сварочного оборудования на предприятиях клиентов;
- модернизация существующего и разработка нового сварочного оборудования.

E-mail: masha@kiwayzh.com. Contact Person: Ms. Masha

Tel: +8613809235810 (Kyiv time from 9:00-17:00) <http://www.yardwaygroup.com/>

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПРИ РЕМОНТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ\*

О.И. ОЛЕЙНИК, С.Ю. МАКСИМОВ, А.П. ПАЛЬЦЕВИЧ, Е.И. ГОНЧАРЕНКО

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

Выполнен комплекс исследований по разработке технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах применительно к ремонту магистральных газопроводов усиливающими конструкциями. Определены условия предотвращения образования пор в сварных соединениях вследствие нарушения газовой защиты под влиянием порывов ветра. Проведены испытания металла шва стыковых и нахлесточно-стыковых соединений, сваренных с применением современных порошковых проволок и проволок сплошного сечения Св-08Г2С. Показано влияние техники выполнения сварки стыковых соединений на механические свойства и ударную вязкость металла шва. Изучено влияние факторов, которые определяют риск образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированной стали класса прочности Х70. Установлено, что сварочные проволоки Св-08Г2С, Е71Т-1, DW-A55 соответствуют требованиям по обеспечению необходимого уровня механических характеристик, ударной вязкости металла шва, содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и могут быть рекомендованы при дальнейшей апробации технологии в полевых условиях ремонта на действующих трубопроводах. Изложены основные рекомендации по технике сварки стыковых и нахлесточно-стыковых соединений и ориентировочные режимы сварки в различных пространственных положениях. Библиогр. 19, табл. 6, рис. 7.

*Ключевые слова:* магистральный газопровод, дуговая сварка, сварные соединения, порошковая проволока, холодные трещины, предварительный подогрев, диффузионный водород

Известно, что механизированная дуговая сварка в защитных газах приводит к росту производительности сварочных работ по сравнению с ручной дуговой. Системы механизированной дуговой сварки на трубопроводах, разработанные ведущими мировыми компаниями (ESAB, Lincoln Electric, CRC) используются уже не менее 40 лет. Однако все эти разработки касаются условий сварки при строительстве магистральных газопроводов (МГ). Опыт механизации ремонтных сварочных работ в полевых условиях на магистралях, находящихся под внутренним давлением, крайне ограничен.

В Украине в настоящее время при ремонте МГ под давлением применяются технологии, которые предусматривают использование ручной дуговой сварки. С одной стороны, это связано с простотой сварочного процесса, его доступностью для полевых условий ремонта, широким спектром имеющихся сварочных материалов и оборудования. В то же время ручной метод сварки регламентирован различными нормативно-техническими документами, которыми руководствуются при выполнении работ на МГ, в том числе и под давлением. Главным недостатком является сравнительно низкая скорость сварки, что отражается на продолжительности процесса ремонта. Для примера можно сказать, что сварка только одного кольцевого сты-

ка на трубопроводе диаметром 1420 мм бригадой из двух сварщиков длится более 5 ч. Учитывая, что подобные ремонты требуют снижения давления в магистрали, такая возможность по разным причинам в условиях транзита газа по Украине появляется только в ночные часы, когда снижается объем потребления газа. В связи с этим увеличивается риск получить дефекты в сварных швах при недостаточной видимости.

Таким образом, существует необходимость в интенсификации ремонтно-сварочных работ с одновременным повышением их качества и безопасности. Одним из вариантов выхода из такого положения является применение технологий механизированной дуговой сварки в защитных газах новейшими сварочными материалами.

**Выбор сварочных материалов для механизированной дуговой сварки.** В настоящее время при строительстве и ремонте МГ для механизированной дуговой сварки в защитных газах регламентированы к применению проволоки сплошного сечения и порошковые проволоки, которые должны соответствовать требованиям [1–5].

Для отработки технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах во всех пространственных положениях (потолочное, вертикальное, горизонтальное на вертикальной поверх-

\*По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).

© О.И. Олейник, С.Ю. Максимов, А.П. Пальцевич, Е.И. Гончаренко, 2016

ности, ниже), выбраны следующие сварочные материалы: проволока сплошного сечения Св-08Г2С (Украина); порошковые проволоки DW-50, DW-A55 (Kobelco, Япония), E71T-1 (Baoding lanyu welding material, КНР) и ППс-ТМВ7 («ТМ. ВЕЛТЕК», Украина). Такой выбор обосновывается необходимостью сравнить сварочно-технологические характеристики новых, современных высококачественных порошковых проволок с хорошо известной по опыту широкого применения в промышленности более дешевой проволокой Св-08Г2С с целью определения возможности их дальнейшего применения в условиях ремонта МГ под давлением. Все проволоки имели одинаковый диаметр 1,2 мм.

**Влияние скорости ветра на качество формирования стыковых сварных швов.** При выполнении сварки одним из факторов, влияющим на качество сварного соединения, считают надежность защиты расплавленного дугой металла шва от воздуха. Для механизированной дуговой сварки в полевых условиях этот фактор становится критическим, поскольку следует ожидать вредного воздействия порывов ветра на газовую защиту дуги. Поэтому существует потребность в экспериментальном определении влияния скорости ветра  $v_{\text{в}}$  на эффективность защиты зоны сварки и, соответственно, на качество формирования стыковых сварных соединений в зависимости от расхода защитного газа  $Q_{\text{г}}$ . Для исследований использовали сварочные проволоки Св-08Г2С и E71T-1, защитный газ  $\text{CO}_2$ .

На первом этапе экспериментально получены предельные значения расхода защитного газа  $Q_{\text{г}}$ , которые позволяют избежать возникновения пор для заданных скоростей движения воздуха  $v_{\text{в}}$ . Установлено, что в полевых условиях сварки проволокой сплошного сечения Св-08Г2С в  $\text{CO}_2$  исключается возникновение пор при скорости ветра до 2 м/с, а также показано, что применение порошковой проволоки повышает допустимую скорость ветра до 2,6 м/с из-за наличия газшлаковой защиты из компонентов сердечника. Такой результат достигается при увеличении расхода газа  $Q_{\text{г}}$  с 10...15 л/мин. ( $v_{\text{в}} = 0...0,25$  м/с) до 30 л/мин.

Поскольку известно, что в низколегированных сталях азот и кислород являются вредными примесями [6, 7], на втором этапе работ были про-

ведены эксперименты по определению влияния скорости ветра  $v_{\text{в}}$  на содержание этих элементов в металле шва. Для проведения газового анализа были изготовлены образцы Ми99 из металла, который был наплавлен при разных величинах  $v_{\text{в}}$ . Исследования выполняли с использованием газового анализатора LECO TC 436. Результаты приведены в табл. 1.

Видно, что при расходах защитного газа в количестве, необходимом для максимально допустимых скоростей  $v_{\text{в}}$ , содержание азота и кислорода в металле шва увеличивается незначительно. По абсолютной величине полученные значения содержания азота в 3,0...3,5 раза меньше максимально рекомендованного (0,02 %) для механизированной сварки в  $\text{CO}_2$ . Общее содержание кислорода в шве, выполненном проволокой сплошного сечения, меньше такого, которое было получено для Св-08Г2С ранее (0,0573 %) в работе [8]. Относительно порошковой проволоки следует отметить, что некоторое увеличение [O] в металле шва связано с его наличием в сердечнике, но в абсолютном измерении содержание кислорода находится на уровне нормативных значений для проволок с рутиловым типом сердечника (0,06...0,085 %) [9].

**Механические свойства металла стыковых и нахлесточно-стыковых швов.** При ремонте поврежденных участков МГ используют бандаж и муфты различных конструкций. Они обеспечивают усиление стенки трубы, а также сохранение работоспособности магистрали при нарушении целостности стенки в месте дефекта под муфтой. Для соединения отдельных цилиндрических элементов между собой, а также с трубопроводом, применяют продольные стыковые и кольцевые нахлесточно-стыковые сварные швы.

Нормативно-техническая документация [10] требует, чтобы сварочные материалы, которые применяются для МГ с наружным диаметром до 1420 мм, построенных из сталей с классом прочности до К60 включительно, и которые работают с рабочим давлением до 8,3 МПа, отвечали следующим условиям:

временное сопротивление разрушению при испытаниях на статическое растяжение должно быть не ниже нормативного значения временно-го сопротивления разрушения (разрыв) основного металла трубы;

твердость металла шва должна быть не более  $HV_{10} - 280$ , зоны термического влияния — не более  $HV_{10} - 300$  для труб с классом прочности до К55 включительно и не более  $HV_{10} - 325$  для труб с классом прочности выше К55 до К60 включительно;

ударная вязкость металла шва должна быть не менее 34 Дж/см<sup>2</sup> (по Шарпи) при температуре

Таблица 1. Содержание азота [N] и кислорода [O] в наплавленном металле, %

Сварочный материал	Расход защитного газа $Q_{\text{г}}$ , л/мин	[N], %	[O], %	Скорость ветра $v_{\text{в}}$ , м/с
Св-08Г2С	10	0,0065	0,045	0,0
	27	0,0068	0,045	2,0
E71T-1	10	0,0054	0,056	0,0
	30	0,0058	0,062	2,5



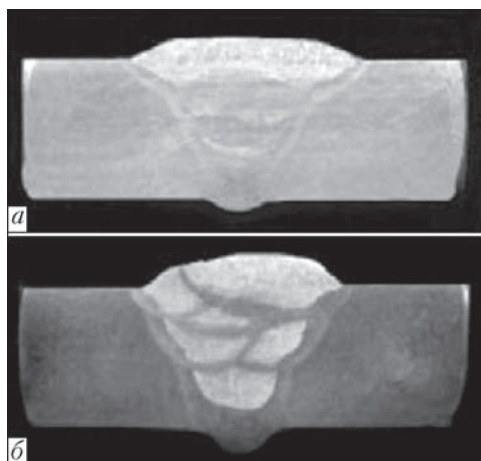


Рис. 1. Макрошлиф стыкового сварного соединения: а — сварка методом «один слой за один проход»; б — сварка точными валиками

на 20 °С ниже минимальной температуры стенки трубы газопровода при эксплуатации (при подземной прокладке газопровода в Украине такой температурой следует считать 0 °С).

Для определения механических свойств сварных соединений были сварены стыки толщиной 16,0 мм с разделкой кромок под общим углом 60°. Каждый слой выполнялся за один проход (рис. 1, а). Материалом служила трубная сталь X70 с механическими характеристиками  $\sigma_T > 480$  МПа,  $\sigma_B > 560$  МПа,  $\delta_5 > 18$  %, которая использовалась в Украине в 1980-х годах при строительстве газопровода «Уренгой–Помары–Ужгород».

Сварку выполняли по комбинированной технологии [10] — корневой шов стыкового соединения выполняли вручную штучным электродом диаметром 3 мм (УОНИ 13/45), разделку заполняли проволоками. Защитными газами служили углекислый газ CO<sub>2</sub> и смесь Ar (82 %) + CO<sub>2</sub> (18 %). Режимы сварки следующие: Св-08Г2С —  $I_{св} = 140...150$  А,  $U = 20...21$  В; порошковые проволоки —  $I_{св} = 200...220$  А,  $U = 25...27$  В. Скорость сварки  $v_{св} = 0,2...0,25$  м/мин,  $Q_r = 15$  л/мин. Образцы для определения механических характе-

ристик металла шва Ми12 тип II и ударной вязкости Ми50 тип 11 вырезали согласно требованиям [3, 5]. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов и их сравнение между собой показали, что с точки зрения выполнения первого условия проволоки E71T-1, DW-50, ППС-ТМВ7 и Св-08Г2С могут применяться при сварке сталей с классом прочности K55, а порошковая проволока DW-A55 — для труб с классом прочности K60 (X70). Измерение твердости металла в центре шва и ЗТВ показало, что все марки проволок соответствуют второму требованию (табл. 3).

Относительно показателей ударной вязкости (KCV) было установлено, что порошковая проволока DW-50 не соответствует третьему требованию при температурах испытания –20 и –40 °С (см. табл. 2). Было выдвинуто предположение, что одна из причин низких показателей ударной вязкости связана с техникой сварки, а именно — процесс заполнения разделки выполнялся с поперечными колебаниями на всю ее ширину с высокими значениями удельного тепловложения [11].

Поэтому было принято решение изменить схему заполнения разделки на такую, в которой сварка стыка выполнялась ниточными валиками без поперечных колебаний (рис. 1, б) с умеренным тепловложением. Результаты испытаний образцов металла шва, сваренного по новой схеме, показали существенное повышение механических характеристик и ударной вязкости ( $\sigma_T = 540$  МПа;  $\sigma_B = 612$  МПа;  $\delta_5 = 27$  %;  $\psi = 71,5$  %;  $KCV_0 = (217...172)/197$ ,  $KCV_{-20} = (160...101)/125$ ,  $KCV_{-40} = (87...51)/70$  Дж/см<sup>2</sup>). В качестве защитного газа использовали CO<sub>2</sub>.

Сравнение этих результатов с предварительно полученными показывает, что для повышения механических характеристик и ударной вязкости металла сварных соединений необходимо изменить предварительно выбранную технику сварки стыка на такую, которая предусматривает запол-

Таблица 2. Механические характеристики металла швов

Сварочный материал, защитный газ	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	Ударная вязкость (KCV, Дж/см <sup>2</sup> ) при температуре, °С		
					0	–20	–40
Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	423	552	27,4	72,1	(168...138)/153	(91...88)/89	(71...62)/67
Св-08Г2С, Ar+CO <sub>2</sub>	430	561	30,9	75,1	(177...154)/165	(98...93)/95	(75...71)/72
E71T-1, Ar+CO <sub>2</sub>	444	557	29,0	71,6	(151...107)/128	(55...53)/53	(63...32)/46
DW-A55, Ar+CO <sub>2</sub>	484	589	27,3	71,0	(176...152)/164	(147...128)/136	(49...45)/46
DW-50, CO <sub>2</sub>	468	567	29,1	72,8	(44...40)/41	(23...22)/22	(14...13)/13
ППС-ТМВ7, CO <sub>2</sub>	476	570	29,0	71,6	(172...170)/170	(125...110)/117	(86...80)/83

Таблица 3. Средняя твердость металла шва и ЗТВ (HV10)

Исследуемый участок	Сварочный материал, защитный газ					
	Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	Св-08Г2С, Ar+CO <sub>2</sub>	E71T-1, Ar+CO <sub>2</sub>	DW-A55, Ar+CO <sub>2</sub>	DW-50, CO <sub>2</sub>	ППС-ТМВ7, CO <sub>2</sub>
Металл шва	149	148	148	153	149	148
ЗТВ	162	160	154	158	165	155

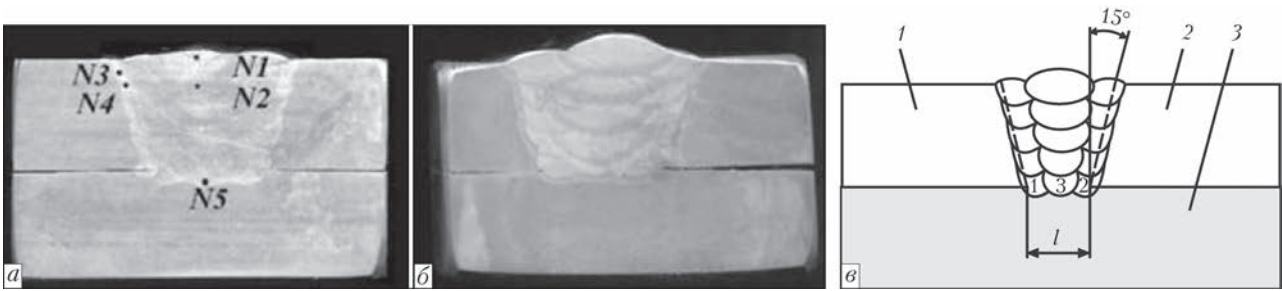


Рис. 2. Налесточно-стыковое сварное соединение: а, б — макрошлиф соединения с использованием соответственно проволоки Св-08Г2С и ППс-ТМВ7; в — схема разделки кромок и сварки (1, 2 — стенка усиливающего элемента: муфты (1) и технологического кольца (2); 3 — стенка газопровода; l — зазор между элементами муфты)

Таблица 4. Ударная вязкость (KCV) металла налесточно-стыковых швов

Сварочный материал, защитный газ	Ударная вязкость (KCV, Дж/см <sup>2</sup> ), при температуре, °С		
	0	–20	–40
Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	(164...148)/155	(171...125)/142	(100...65)/81
ППс-ТМВ7, CO <sub>2</sub>	(160...153)/165	(160...127)/140	(127...105)/118

нение разделки ниточными валиками без колебаний. Данный вывод был подтвержден при оценке ударной вязкости налесточно-стыковых соединений, в которых каждый слой выполнялся отдельными валиками 1, 2 в угол на каждую кромку, после чего внутри накладывался валик 3 (рис. 2). При проведении сварки использовались проволоки ППс-ТМВ7 и Св-08Г2С.

Результаты испытаний образцов Ми50 приведены в табл. 4. Анализ данных показывает, что во всем диапазоне температур испытаний сохраняется высокий уровень ударной вязкости, который значительно превышает минимально необходимый уровень этого показателя — не менее 34 Дж/см<sup>2</sup>.

Для металлографических исследований были выбраны участки: N1 — металл шва последнего слоя; N2 — ЗТВ в металле шва; N3 — зона крупного зерна последнего слоя; N4 — зона крупного зерна со структурными изменениями после выполнения следующего слоя; N5 — зона крупного зерна в корне шва.

Изучение образцов соединений показало, что на участках N1 и N2 структура ферритно-перлитная с преобладанием ферритной фазы. Твердость составляет HV1 — 1650...1750 МПа. На участке N2 структура металла в результате теплового воздействия мелкодисперсная ферритно-перлитная с баллом зерна 10. В металле ЗТВ (участки N3 и N4) структура ферритно-перлитная с твердостью 1970...2130 МПа. На участке N5 вследствие ускоренного охлаждения наблюдается увеличение твердости до 2360...2640 МПа. Установлено, что сварка отдельными валиками позволяет получить мелкозернистую, практически однородную по высоте соединения ферритно-перлитную структуру и это способствует решению задачи получения повышенных значений ударной вязкости в свар-

ных швах по сравнению с минимально необходимыми.

**Оценка стойкости сварных соединений против образования холодных трещин.** Одним из факторов риска возникновения холодных трещин является напряженно-деформированное состояние сварного соединения [12, 13]. При ремон-

те труб с локальными коррозионными дефектами применяются конструкции «заплата-муфта» или «заплата-муфта с герметиком» [14]. Особенностью этих конструкций является наличие кольцевого налесточно-стыкового шва, которым заплата диаметром 100...120 мм по контуру сваривается с муфтой и трубой. При таком техническом решении в многослойном шве наблюдается высокий уровень напряжений в результате усадки металла шва и жесткого закрепления. В сочетании с другими факторами (диффузионный водород, микроструктура) существует риск возникновения холодных трещин.

С целью определения условий, влияющих на устойчивость против образования холодных трещин в налесточно-стыковом соедине-

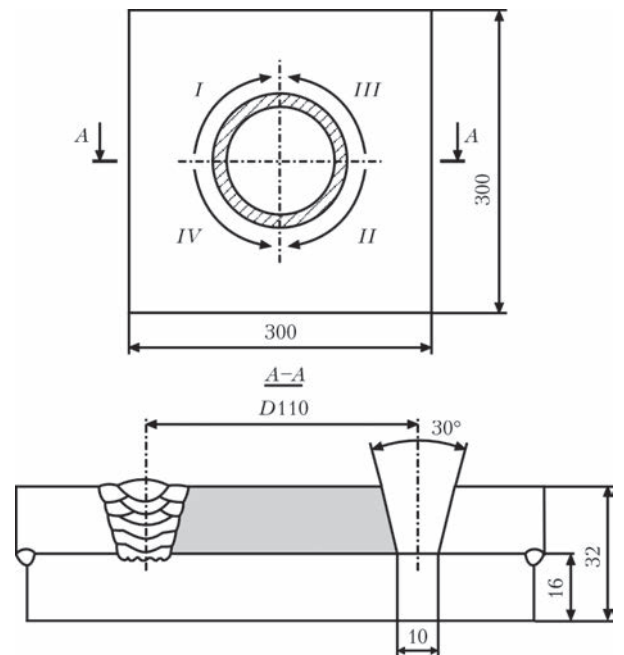


Рис. 3. Схема технологической пробы «Marine» с порядком сварки налесточно-стыкового шва

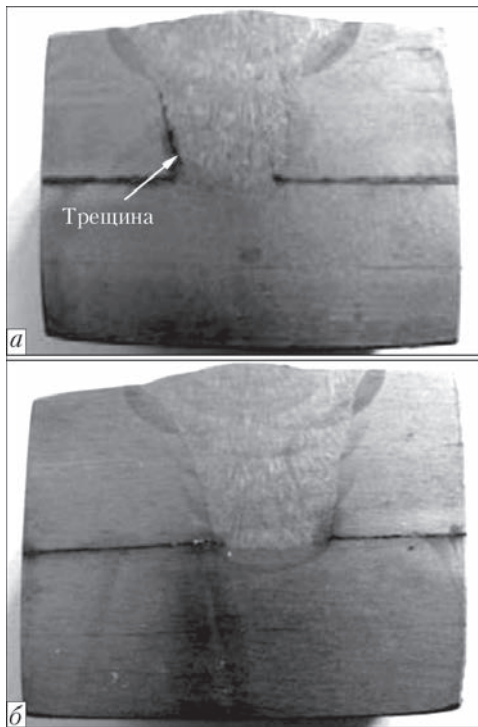


Рис. 4. Шлифы пробы «Marine» при механизированной сварке: а — без предварительного подогрева; б — с предварительным и сопутствующим подогревом до 160...180 °С

нии «заплата-муфта», проведены испытания с использованием пробы «Marine» [15, 16]. Такая технологическая проба (рис. 3) в полной мере имитирует реальный сварной шов, а при соответствующем соотношении диаметра диска к ширине пластины в сварном соединении можно создать уровень напряжений, близкий к пределу текучести стали.

Детали двух проб были изготовлены из сегментов трубы диаметром 1420 мм. Сварку порошковой проволокой ППС-ТМВ7 в углекислом газе выполняли согласно указанной схеме. Режим сварки:  $I_{св} = 190...200$  А,  $U_d = 26...27$  В,  $v_{пр.} = 9,1$  м/мин. Для визуального обнаружения трещины вырезали по два шлифа с каждого квадранта. Ожидалось, что наибольший уровень напряжений будет создан в квадранте IV, где, соответственно, и должна возникнуть трещина [17].

Исследование шлифов пробы, в которой не выполняли предварительный подогрев, показали, что наложение следующего валика после охлаждения предыдущего до 20 °С привело к образованию холодной трещины в квадранте IV (рис. 4, а). Проведение предварительного и сопутствующего подогрева до температуры 160...180 °С позволило предотвратить их появление (рис. 4, б).

Установлено, что в первом случае трещина возникла в корневой части на границе сплавления с внешней стороны кругового шва. Зарождение трещины начинается у концентратора напряжений — зоны перехода поверхностей накладных

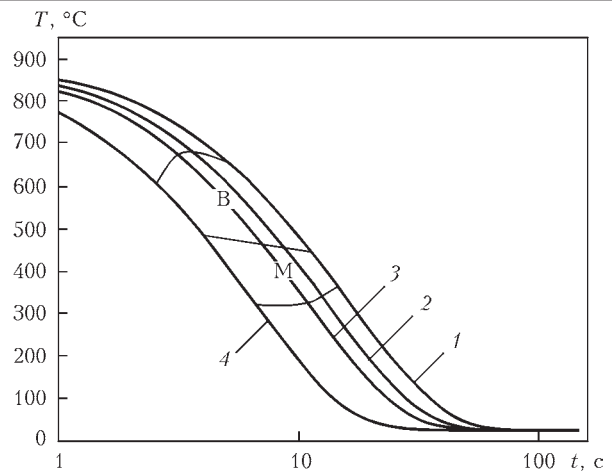


Рис. 5. Диаграмма превращения переохлажденного аустенита в металле ЗТВ стали X70 при различных скоростях охлаждения в диапазоне 800...500 °С: 1 — 40 (8,6 % М); 2 — 50 (20,4 % М); 3 — 60 (23 % М); 4 — 90 (67 % М) °С/с

элементов пробы в металл шва. Причиной возникновения этого дефекта следует считать радиальные напряжения от усадки металла, которые с внешней стороны шва выше напряжений, действующих с внутренней стороны [18]. В связи с этим, для предупреждения образования холодных трещин в многослойных швах целесообразно применить подогрев перед сваркой до 160...180 °С с соблюдением такой температуры перед началом выполнения каждого следующего прохода, а также использовать качественные сварочные материалы с уровнем пластичности  $\delta_5 > 20$  % при температуре -20 °С и обеспечивающих содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не более 10 см<sup>3</sup>/100 г. Для уменьшения уровня напряжений дополнительно следует увеличить диаметр заплат до 200 мм.

Другим фактором, существенно влияющим на риск возникновения холодных трещин при выполнении механизированной дуговой сварки на МГ в условиях эксплуатации, является микроструктура металла ЗТВ сварного соединения. Расчетно-экспериментальным путем получена информация относительно времени пребывания металла шва и ЗТВ в интервале температур 800...500 °С при интенсивном теплоотводе. Она показывает, что при сварке без предварительного подогрева скорость охлаждения составляет 45...60 и 30...40 °С/с при применении подогрева 150 °С. В связи с тем, что большинство трубных марок сталей имеют склонность к образованию закалочных структур в указанных условиях, были проведены исследования по изучению влияния скорости охлаждения металла на структуру металла ЗТВ стали X70.

Исследования выполнялись с помощью исследовательского комплекса Gleebe 3800. На специальных образцах имитировался термический цикл сварки на участке перегрева металла ЗТВ, в ко-



тором скорость охлаждения в интервале температур 800...500 °С составляла 40, 50, 60 и 90 °С/с. Полученная диаграмма превращения переохлажденного аустенита (рис. 5) и ее анализ показал следующее.

В интервале скоростей охлаждения 40...60 °С/с в стали X70 количество мартенситной фазы увеличивается с 8,6 до 23 % и это значительно меньше значения 50 %, при котором считается, что сталь подвержена образованию холодных трещин. Повышение скорости охлаждения до значения 90 °С/с, характерного для условий мокрой сварки под водой, увеличивает количество мартенсита в металле ЗТВ до 65...68 %, что опасно для работоспособности сварного соединения.

Металлографические исследования образцов показали, что для скоростей охлаждения 40...60 °С/с интегральная твердость в металле ЗТВ находится в диапазоне  $HV_{10} - 270...300$  и это не превышает порог в  $HV_{10} - 325$  для сталей с классом прочности X70, а применение предварительного подогрева до 150 °С положительно отражается на морфологии микроструктуры металла ЗТВ. В связи с высокой достоверностью получаемых с помощью комплекса Gleebel результатов, сделан вывод о целесообразности продолжения исследований длительно эксплуатирующихся трубных марок сталей классов прочности X52, X56, X60, X65 применительно к условиям ремонта МГ.

Как известно, на риск возникновения в сварных соединениях холодных трещин существенно влияет диффузионный водород, одним из источников которого является электродный металл. Нормативно-техническая документация регламентирует применение сварочных материалов, обеспечивающих содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не более  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . В связи с этим для всех сварочных проволок были проведены исследования по определению содержания диффузионного водорода в напла-

вленном металле  $[H]_{\text{диф.н.м.}}$  хроматографическим методом [19]. Перед выполнением экспериментальных работ, для удаления влаги порошковые проволоки просушивались в печи при температуре 200...250 °С в течение не менее 3 ч. Наплавки металла на специальные образцы (по три шт. на каждую марку проволоки) выполняли в смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  с применением сварочного трактора ТС-17 на режимах, обеспечивающих погонную энергию на уровне 5,8...6,2 кДж/см. Среднее содержание  $[H]_{\text{диф.н.м.}}$  в наплавленном металле для каждой марки проволоки следующее: для Св-08Г2С — 3,4...3,6; DW-50 — 12,0...13,2; DW-A55 — 7,6...8,5; E71T-1 — 9,7...10,0; ППС-ТМВ7 — 10,1...11,8  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ .

Видно, что наименьшее содержание диффузионного водорода в наплавленном металле наблюдается при применении обычной проволоки сплошного сечения Св-08Г2С и это соответствует сварочным материалам, которые обеспечивают его очень низкий уровень — до  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Порошковые проволоки DW-A55 и E71T-1 соответствуют сварочным материалам, которые обеспечивают низкий уровень диффузионного водорода — до  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Еще две проволоки (DW-50, ППС-ТМВ7) превышают допустимый порог в  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  и не могут быть в настоящее время рекомендованы к применению в условиях ремонта МГ.

**Разработка технологии сварки усиливающих конструктивных элементов.** При разработке технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах усиливающих конструктивных элементов основное внимание было уделено отработке техники сварки стыковых и нахлесточно-стыковых соединений в различных пространственных положениях. При этом пытались определить такие режимы сварки, которые, с одной стороны, обеспечивали качественное формирование многослойных сварных швов, а с другой — не требовали существенной корректировки при изменении пространственного положения.

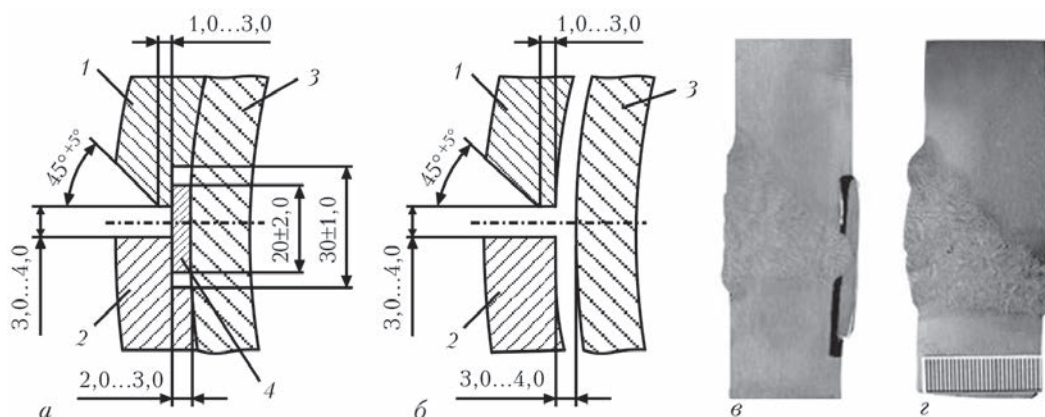


Рис. 6. Продольные стыковые соединения усиливающих конструктивных элементов: а — разделка кромок для сварки с подкладной пластиной; б — разделка кромок для сварки «на весу»; в — макрошлиф соединения с подкладной пластиной (проволока DW-A55); з — макрошлиф соединения, выполненного проволокой Св-08Г2С «на весу» (1, 2 — стенка соответственно верхнего и нижнего усиливающего элемента; 3 — стенка газопровода; 4 — подкладная пластина)

**Таблица 5. Рекомендуемые режимы сварки стыкового соединения, сваренного с применением проволок DW-A55 и Св-08Г2С\* (защитный газ 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>)**

Параметр	Проход при заполнении разделки		
	Корневой	Заполняющий	Облицовочный
Скорость подачи проволоки, м/мин.	(9,0...9,2)/(3,6...3,8)	(9,0...9,2)/(4,0...4,1)	(7,4...7,7)/(3,6...3,8)
Сварочный ток, А	(200...210)/(125...130)	(205...215)/(145...155)	(180...190)/(125...130)
Напряжение на дуге, В	(26,0...26,3)/(18,0...18,5)	(26,5...27,0)/(19,0...20,0)	(25,0...26,0)/(18,0...18,5)
Вылет проволоки, мм	(20...23)/(18...23)	(16...20)/(16...20)	(10...14)/(10...14)

\* Числитель — для проволоки DW-A55, знаменатель — Св-08Г2С.

**Таблица 6. Рекомендуемые режимы сварки нахлесточно-стыкового соединения, сваренного с применением проволок DW-A55 и Св-08Г2С\* (защитный газ 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>)**

Параметр	Проход при заполнении разделки	
	Заполняющий	Облицовочный
Скорость подачи проволоки, м/мин	(8,0...9,1)/(4,0...4,1)	(7,4...8,0)/(3,7...3,8)
Сварочный ток, А	(190...220)/(135...140)	(180...200)/(125...130)
Напряжение на дуге, В	(26,5...27,0)/(19,5...20,5)	(26,0...26,5)/(18,0...18,5)
Вылет проволоки, мм	(12...23)/(12...23)	(10...16)/(10...16)

\* Числитель — для проволоки DW-A55, знаменатель — Св-08Г2С.

Сварку протяженных стыковых соединений в горизонтальном положении на вертикальной плоскости (рис. 6, *а, б*) выполняли проволоками DW-A55 и Св-08Г2С в смеси Ar + CO<sub>2</sub>. Материал — сегменты трубы Х70 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16 мм.

Порошковую проволоку использовали для варианта сварки с подкладной пластиной (рис. 6, *в*), проволоку Св-08Г2С также и для сварки «на весу» (рис. 6, *г*). Техника сварки предусматривала наложение отдельных проходов ниточными вали-

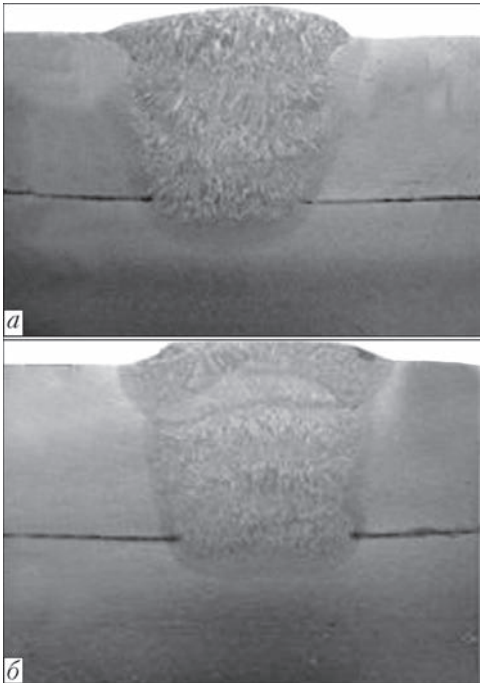
ками с небольшими поперечными колебаниями. Корневой проход выполняли с наклоном горелки углом назад. Второй и все последующие заполняющие проходы выполняли без поперечных колебаний узкими валиками с наклоном горелки углом вперед, корректируя количество проходов в каждом слое в зависимости от ширины разделки кромок. Облицовочный слой выполняли отдельными проходами с небольшими поперечными колебаниями для обеспечения плавного перехода к основному металлу.

Режимы сварки приведены в табл. 5.

Технология выполнения многослойных кольцевых нахлесточно-стыковых соединений предусматривает ведение процесса сварки в направлении снизу-вверх по секторам. При ширине разделки кромок  $l \geq 15$  мм (см. рис. 2, *в*) все слои надо выполнять методом «один слой за два прохода». Это позволяет измельчить структуру металла и дополнительно повысить значение ударной вязкости шва. При ширине разделки кромок  $l < 15$  мм первый слой выполняют методом «один слой за один проход», а начиная со второго слоя — методом «один слой за два прохода» (рис. 7 *а, б*). Облицовочный слой нахлесточно-стыкового соединения следует выполнять методом «слой за проход» или «слой за два прохода» в зависимости от величины  $l$ . Общее количество слоев в нахлесточно-стыковых соединениях определяется толщиной стенки усиливающих конструктивных элементов.

Для гарантированного сплавления кромок с трубопроводом сварку в потолочном положении следует выполнять в положении электрода «углом назад». Режимы сварки приведены в табл. 6.

Оборудование для механизированной дуговой сварки в защитных газах должно включать профессиональные источники питания, которые предназначены для работы в тяжелых условиях. Аппараты должны иметь степень защиты не менее IP23. В комплектацию должны входить четырехроlikовые выносные механизмы подачи проволоки с водяным охлаждением, которые позволяют подавать проволоку в шланги длиной до 6 м. Все требования к оборудованию, материалам,



**Рис. 7. Нахлесточно-стыковые соединения усиливающих конструктивных элементов: а — макрошлиф соединения, выполненного проволокой DW-A55; б — Св-08Г2С**

защитным газам изложены в разработанной технологической документации.

В заключение можно отметить, что использование механизированной дуговой сварки в защитных газах с применением традиционных (Св-08Г2С) и современных сварочных материалов (DW-A55, E71T-1) позволяет достичь требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам отремонтированных участков МГ. Итогом проведенной работы стала разработка нормативной документации по технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах при ремонте МГ, согласованной с ПАТ «Укртрансгаз».

По результатам лабораторно-исследовательских испытаний принято решение о промышленной апробации разработанной технологии на предприятиях ПАТ «Укртрансгаз» с целью ее применения в полевых условиях ремонта МГ.

1. *ГОСТ 2246–70*. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – Введ. 01.01.1973. – ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 19 с.
2. *AWS A5.18*: Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // American Welding Soc., Miami, 2005.
3. *AWS A5.28*: Specification for Low-Alloy Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // Ibid.
4. *ГОСТ 26271–84*. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1987. – М.: Госстандарт СССР, 1987. – 19 с.
5. *AWS A5.36*. Specification for carbon and low-alloy steel flux cored electrodes for flux cored arc welding and metal cored electrodes for gas metal arc welding // American Welding Soc., Miami, 2012.
6. *Підгаєцький В.В.* Пори, включення і тріщини в зварних швах. – Київ: Техніка, 1970. – 236 с.
7. *Металлургия дуговой сварки*. Взаимодействие металла с газами / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, А.П. Пальцевич и др. – Киев: Наук. думка, 2004. – 442 с.
8. *Новожилов Н.М.* Основы металлургии дуговой сварки в газах. – М.: Машиностроение, 1979. – 230 с.
9. *Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н.* Сварка порошковой проволокой. – Киев: Наукова думка, 1972. – 223 с.
10. *СТО Газпром 2-2.2-136–2007*. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Ч. 1. Технология сварки при ремонте промышленных и магистральных газопроводов, находящихся в эксплуатации. – Введ. 22.09.2007 – ОАО «Газпром», 2007.
11. *Справочник по сварке*. Всепозиционные порошковые проволоки для нелегированных и низколегированных сталей – ESAB. – 32 с.
12. *Макаров Э.Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
13. *Махненко В.И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
14. *ГБН В.3.1-00013741-12:2011*. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації. – Чинний з 06.09.2011. – Київ: Мін-во енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 152 с.
15. *Испытание металлов / Сб. ст.* под ред. К. Нитцше. – М.: Металлургия, 1967. – 452 с.
16. *Бут В.С., Максимов С.Ю., Олейник О.И.* Склонность к трещинообразованию сварных соединений ремонтных конструкций на магистральных газопроводах // Автомат. сварка. – 2014. – № 11. – С. 17–26.
17. *Ремонт магістральних трубопроводів під тиском / М.В. Беккер, В.С. Бут, Р.М. Говдяк та ін.* – Київ: Київ, 2008. – 239 с.
18. *Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А.* Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
19. *ГОСТ 23338–91*. Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва. – Введ. 01.07.1992. – М.: Госстандарт СССР, 1991. – 20 с.

Поступила в редакцию 02.02.2016

# MMC100

**7–10 June 2016,  
Kyiv, Ukraine**

**[www.medovar100.org](http://www.medovar100.org)**



## Международный симпозиум

### к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

<b>Дата проведения</b>	7–10 июня 2016 г.
<b>Тематика симпозиума</b>	ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование; электрошлаковое литье; сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов; теория кристаллизации сталей и сплавов; управление затвердеванием в металлургии и сварке; крупные кузнечные и листовые слитки; моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки; современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков; родственные области металлургии, сварки и металловедения.
<b>Место проведения</b>	Киев, Украина, Президент Отель
<b>Организационный комитет</b>	Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82 E-mail: <a href="mailto:org@medovar100.org">org@medovar100.org</a> , <a href="mailto:info@medovar100.org">info@medovar100.org</a> Дополнительная информация на сайте симпозиума <a href="http://www.medovar100.org">www.medovar100.org</a>



# РАЗРАБОТКА КЛЕЕВОЙ И КЛЕЕСВАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ\*

Ю.С. ВАСИЛЬЕВ, Н.И. ОЛЕЙНИК, Л.С. ПАРШУТИНА

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

Проведен анализ физико-механических факторов, определяющих ресурс эксплуатации подшипниковых узлов. Разработаны клеевая и клеесварная технологии восстановления посадочных мест подшипников в опорах тяжело нагруженных зубчатых передач. Подобраны составы ремонтного композиционного материала на базе клея «Коутекс» и оптимальные режимы постадийного нанесения аппретирующего, шпатлевочного и финишного слоев покрытия. Установлены граничные значения реологических характеристик клеевых композиций для формирования клеесварного ремонтного соединения. Библиогр. 4, рис. 7.

*Ключевые слова:* технология ремонта, подшипниковый узел, клеесварная технология, ремонтные клеевые композиции, редуктор

В Украине эксплуатируется большое количество промышленного оборудования, которое уже отработало определенный производителем срок службы. Высокая степень износа геометрических параметров, наличие усталостных и коррозионных повреждений требуют проведения большого объема ремонтно-восстановительных работ. Самым распространенным дефектом корпусных деталей является износ посадочных поверхностей под подшипники. Восстановление массовых корпусных деталей экономически целесообразно, т.к. позволяет существенно снизить расход запасных частей при ремонте и обеспечить необходимую долговечность сборочных единиц машин.

В настоящее время накоплен достаточный опыт по ремонту подшипниковых узлов в конструкциях различного назначения, который учитывает режимы работы и условия эксплуатации оборудования, надежность и долговечность подшипников, удобство и простоту обслуживания в процессе эксплуатации. Способы восстановления изношенных поверхностей на основе сварки, напыления и наплавки металлическими материалами и порошками нашли широкое применение на крупных специализированных предприятиях, где используется высокоточное оборудование для механической обработки посадочных мест подшипников с обеспечением параллельности осей

и межцентровых расстояний. Применение сварки и последующей механической обработки значительно увеличивает объем сопутствующих работ, связанных с демонтажем и последующим монтажом элементов оборудования, включая непроизводительные затраты на транспортировку демонтированного оборудования на ремонтные участки и производства. Поэтому разработка эффективной технологии ремонта и восстановления изношенных и поврежденных агрегатов промышленного оборудования непосредственно в условиях эксплуатации объектов или на ремонтном участке является актуальной.

Использование полимерных материалов значительно упрощает технологию восстановления посадочных мест и повышает долговечность подшипников качения за счет перераспределения внешней нагрузки между телами качения [1]. Наибольшее распространение в ремонтных работах промышленного оборудования нашли высоконаполненные металлополимерные клеевые композиции (мультиметаллы), а технология получила название «холодная молекулярная сварка». Эти композиционные материалы (по сравнению с чистыми полимерами) обладают повышенной жесткостью, прочностью и вибростойкостью, теплостойкостью, стабильностью размеров, а также пониженной газо- и водопроницаемостью. Совмещение технологических процессов сварки и склеивания при использовании металлополимерных композиций позволяет повысить жесткостные и прочностные характеристики металлоконструкций без снижения эксплуатационных нагрузок.

\* По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).

Цель научно-исследовательской работы состояла в разработке клеевой и клеесварной технологий ремонта подшипниковых узлов энергетического оборудования по месту эксплуатации на базе отечественных металлополимерных клеевых композиций, полученных путем рецептурного модифицирования промышленно выпускаемых полимерных матриц.

На основании опыта конструирования и эксплуатации металлических подшипников качения определен характер сопряжения колец подшипника с валом и с корпусом, который зависит от вида их нагружения — циркуляционного или местного [2]. Циркуляционно нагруженные кольца должны соединяться с сопрягаемой деталью неподвижно. Наличие зазора между циркуляционно нагруженным кольцом и сопряженной с ним деталью приводит к проворачиванию кольца относительно посадочного места, в результате чего происходит развальцовывание и износ шейки вала или корпуса, изготавливаемых обычно из более мягкого металла по сравнению с материалом кольца подшипника. Наоборот, подвижное соединение местно нагруженных колец с сопрягаемыми деталями предусматривает наличие зазора или незначительного натяга между кольцом и посадочным местом, что позволяет кольцу под действием толчков и вибраций медленно поворачиваться относительно своего посадочного места, и в работе участвует не ограниченный участок, а вся дорожка качения кольца. Такой способ установки местно нагруженных колец в значительной степени повышает срок службы подшипника, так как в противном случае имеет место износ дорожки качения кольца только на одном ее участке.

В соответствии с характером сопряжения колец подшипников с корпусом и учетом величины износа посадочных отверстий исследованы следующие методы ремонта подшипниковых узлов с использованием клеевых композиционных материалов (ККМ):

1. Вклеивание колец подшипника в посадочное место с образованием неподвижного соединения.
2. Формирование посадочных отверстий номинального размера в корпусной детали с образованием минимального зазора или небольшого натяга.

Вклеивание подшипников при износах до 0,25 мм рекомендуется производить с использованием жидкотекучих анаэробных клеевых композиций типа Анатерм и Унигерм (Россия), Локтайт (США), Пермабонд (Великобритания) [1]. Сущность этого способа заключается в том, что процесс восстановления посадочного места совмещается со сборочной операцией узла подшипника, в результате чего образуется неподвижное соеди-

нение подшипника и вала (корпуса), во много раз превосходящее по своим прочностным характеристикам рекомендуемые в таких случаях посадки с натягом. Это надежно предохраняет кольца подшипника от проворота, исключает появление фреттинг-коррозии и обеспечивает более надежную работу узла. При этом вклейка, в отличие от посадки с натягом, не приводит к появлению напряжений и деформаций колец подшипника, что также способствует более надежной работе.

В порядке предложения по импортозамещению зарубежных анаэробных материалов нами проведено исследование по восстановлению подшипниковых узлов с использованием отечественных клеевых композиций на эпоксидной и полиуретановой полимерных матрицах. Наиболее технологичной и ремонтпригодной определена клеевая композиция «Коутекс» — совместная разработка ИХВС НАНУ и ПО «Дайвер». Композиция представляет собой жидкотекучую двухупаковочную клеевую систему (основа + отвердитель в соотношении 1:1), обладающую высокой адгезией к влажным и замасленным поверхностям. Процесс формирования ремонтных соединений состоит в предварительной механо-химической обработке посадочных мест, нанесении тонкого слоя клеевой композиции на внешнюю поверхность наружного кольца подшипника и сборке подшипникового узла.

Для ремонта подшипниковых узлов с износом до 1,0 мм используется тиксотропная клеевая композиция «Коутекс», а обеспечение требуемой точности сборки осуществляется с помощью приспособлений для фиксации деталей в определенном положении на время отверждения. В противном случае под действием силы тяжести происходит выдавливание клея и нарушается соосность посадочного отверстия и вала с подшипником.

Ремонт подшипниковых узлов в крупногабаритных редукторах энергетического оборудования состоит в восстановлении геометрии опорных поверхностей подшипников с помощью ККМ различной степени наполнения неорганическими частицами. Пастообразный ККМ наносится с избытком на место износа и обрабатывается под номинальный размер после отверждения (рис. 1) [3]. Прослойка ККМ между наружным кольцом подшипника и посадочным кольцом корпуса редуктора под действием внешней нагрузки деформируется, обеспечивая ее рациональное распределение между телами вращения. В работе [4] определены оптимальные физико-механические характеристики полимерного слоя в зависимости от действующей нагрузки и зазора между кольцом и посадочным местом.

Необходимым требованием к применяемым ККМ является обеспечение достаточного уровня

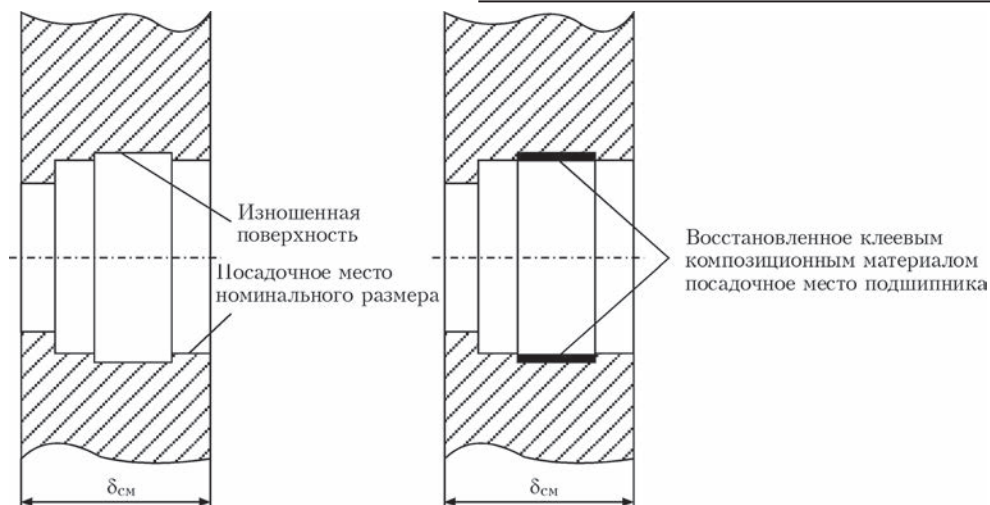


Рис. 1. Восстановление посадочного места подшипника с помощью ККМ [3]

технологической (начальной) прочности клеевых соединений через 30...60 мин после нанесения. Это позволяет существенно снизить трудоемкость технологического процесса склеивания благодаря возможности проведения последующих операций до полного завершения ремонта. Клеи с длительной жизнеспособностью за это время не набирают технологическую прочность, что увеличивает время ремонта и длительность простоя оборудования. Поэтому для разработки клеевой и клеесварной технологий ремонта подшипниковых узлов были проведены исследования по усовершенствованию составов клеевых композиций для создания ремонтных материалов с требуемым уровнем реологических характеристик и жизнеспособности.

С целью уточнения химического состава и количественного содержания компонентов ремонтных клеевых композиций (РКК) был проведен анализ исследований аналогичных по назначению материалов «Дурметалл» (Швейцария), «Честер Молекуляр» (США). Результаты показали, что полимерной основой выбранных материалов является ароматическая эпоксидная смола, что подтверждается наличием пиков поглощения в области  $2900\text{ см}^{-1}$  (ароматические кольца) и в области  $830\text{ см}^{-1}$  (эпоксидные группы). Этот вывод согласуется также с анализом масс-спектров, имеющих линии молекулярной массы 43 (эпоксидная группа) и 94 (бензольное кольцо). Отвердители могут быть классифицированы как ангидридные (полосы поглощения  $1513$  и  $1718\text{ см}^{-1}$ ) или оксидные с последующей перегруппировкой в присутствии катализатора PC15 в аминные группы. Это подтверждается наличием остатков HCN с молекулярной массой 27 по масс-спектру и полосы  $812\text{ см}^{-1}$  по ИК-спектру. Масс-спектроскопия активатора ускоренного типа показывает наличие линии с молекулярной массой 19, указывающей на то, что катализатором является комплекс трехфтористого бора с эфиром. Исследования, проведенные методом пиро-

лиза, показали высокое наполнение неорганическими частицами размером от 5 до  $150\text{ мкм}$ .

Выявленные материаловедческие закономерности создания дисперсно упрочненных полимерных композиционных материалов послужили основой для разработки РКК на базе отечественной клеевой полимерной матрицы «Коутекс» и отверждающих систем — УП-583, УП-0633М и Л-19, который также является активным пластификатором, обладающим свойствами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Исследования процессов наполнения РКК осуществлялись при введении частиц оксидов металлов Ti, Fe, Cr, Zn, порошков железа, кварца, а также частиц чешуйчатой формы на основе базальта.

Взаимодействие полимерной матрицы с аминными отвердителями в присутствии перечисленных оксидов изучали методом дифференциально-термического анализа (ДТА). Установлено, что все используемые оксиды металлов влияют на процесс отверждения эпоксидного олигомера. При этом фиксируется некоторое смещение температуры начала реакции и температур максимального пика кривой ДТА в область более низких значений по сравнению с ненаполненной композицией. Оксид хрома оказывает обратное действие. Экзотермический эффект при введении дисперсных частиц увеличивается в следующей последовательности:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{чистая композиция} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{ZnO} > \text{TiO}_2$ . При введении оксидов в эпоксиаминную композицию наблюдается снижение энергии активации процесса отверждения. Приведенные данные указывают на каталитическую активность оксидов Ti, Fe, Zn и ингибирующее действие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на процесс отверждения эпоксиаминных композиций. С целью снижения стоимости расходных материалов применялся кварцевый порошок в виде частиц размером до  $200\text{ мкм}$ .

Известно, что введение в полимерную матрицу высокодисперсных частиц размером менее



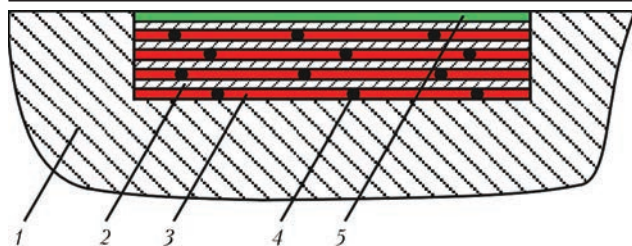


Рис. 2. Клееварной метод восстановления посадочного места подшипника в корпусной детали: 1 — опора; 2 — многослой из тонколистовой стали 05кп; 3 — наполнитель межслойного пространства — анаэробный герметик; 4 — сварная точка; 5 — финишный слой композита

1 мкм приводит к образованию цепочечных структур, кластеров и агрегатов. В процессе полифракционного наполнения высокодисперсные частицы заполняют «свободный» объем между более крупными фракциями, повышая степень упаковки и прочностные показатели. Усиление РКК осуществлялось введением ультрадисперсного порошка (УДП) карбида кремния (SiC) с размером частиц  $0,03 \dots 0,2$  мкм и удельной поверхностью около  $20 \text{ м}^2/\text{г}$ . При введении УДП с объемной долей  $v_n \sim 0,1 \dots 0,2$  усиливающее действие наполнителя проявляется в увеличении поверхностной энергии разрушения и прочности при растяжении. В композиции возникает бесконечный объемный кластер из цепочек частиц УДП, связанных с крупнодисперсными частицами через пленочные прослойки матрицы, и образующий каркас, представляющий пространственную сеть. Такой каркас при нагружении деформируется, а его ячейки искажаются, растягиваясь или сжимаясь в зависимости от направления приложенной нагрузки.

Нами разработана клеевая технология восстановления поверхностей посадочных мест подшипников в корпусе редуктора, основанная на формировании трехслойного ремонтного композиционного покрытия. Первый слой — аппрети-



Рис. 3. Корпус редуктора РЛКУ-250М

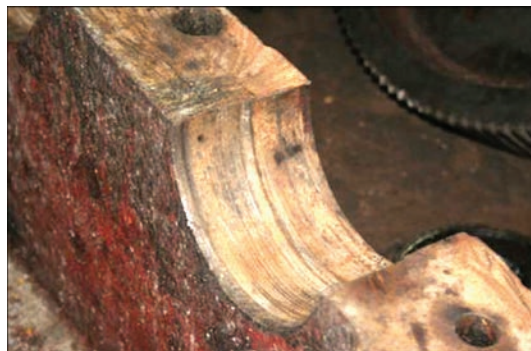


Рис. 4. Износ посадочных мест подшипников

рующий (грунтовочный) с высокой адгезионной способностью к восстанавливаемой поверхности опоры (РКК-1). Второй — шпатлевочный с высокими прочностными и демпфирующими характеристиками (РКК-2). Третий — финишный, обеспечивающий максимальную величину фактического контакта (РКК-3).

Для ремонта тяжело нагруженных подшипниковых узлов и компенсации значительных износов опорных поверхностей нами предложена клееварная конструкция ремонтного посадочного места подшипника качения в корпусе крупногабаритного редуктора с целью повышения несущей

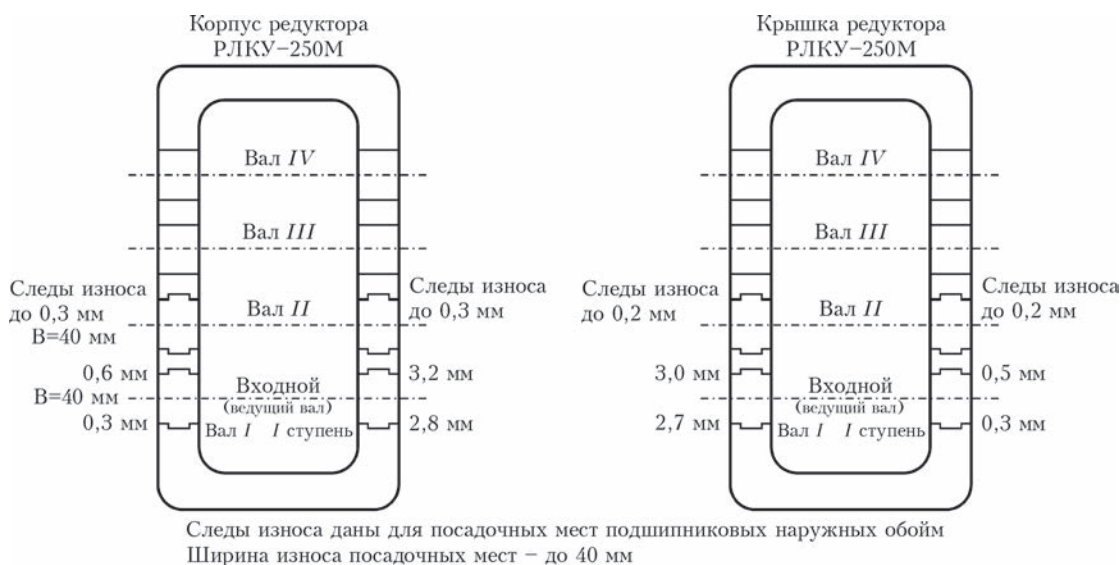


Рис. 5. Карта расположения и размеры дефектов, подлежащих ремонту с помощью РКК



Рис. 6. Установка фальшвалов на посадочные места подшипников

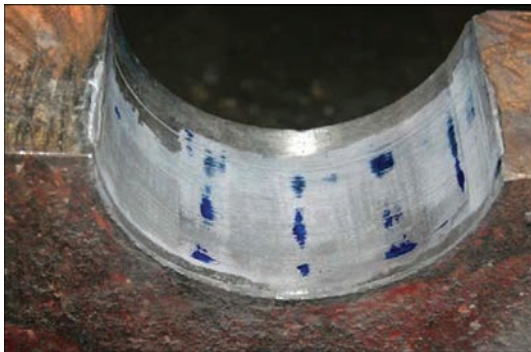


Рис. 7. Контроль точности восстановления посадочных мест подшипников

способности и изгибной жесткости так называемого «шпатлевочного слоя» (рис. 2).

Ремонтная конструкция представляет собой многослой, состоящий из набора пластин тонколистового металла толщиной 0,1...0,5 мм (2), соединенных сварными точками (4) и клеевыми прослойками (3) (рис. 2). Контактная поверхность с подшипником сформирована из эластичного клеевого композиционного материала (5).

Отработка технологических методов ремонта энергетического оборудования с использованием экспериментальных РКК осуществлялась на предприятиях Донецкой топливноэнергетической компании ДТЭК. В качестве объекта исследований выбрано проведение ремонта крупногабаритного цилиндрического редуктора РЛКУ-250М (рис. 3). В результате обследования редуктора установлены места износа и измерены размеры дефектов (рис. 4, 5). Проверка овальности и конусности посадочных мест, неподверженных износу, при помощи фальшвала (рис. 6) показала их соответствие размерам и допускам, заданным в рабочих чертежах. Восстановление посадочных мест подшипников (вал 1 и вал 2) выполнено согласно разработанного технологического регламента ремонта редуктора.

Окончательный контроль восстановленных посадочных мест подшипников выполнялся способом краски с помощью фальшвалов (рис. 7).

После производственных испытаний отремонтированный редуктор эксплуатируется на Першотравенском ремонтно-механическом заводе с марта 2014 г. по настоящее время.

1. *Применение и прочность полимерных материалов при изготовлении и ремонте машин и оборудования* / Б.А. Грязнов, В.К. Бухтияров, В.А. Какуевичкий и др. // Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – Киев, 2013. – 296 с.
2. *Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник.* – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.
3. *Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Одинцов Л.Г. Способ восстановления диаметрального размера сушильного цилиндра бумагоделательного оборудования* // А.с. № 2364487, Бюл. № 23 от 20.08.2009.
4. *Тулинов А.Б., Гончаров А.Б. Новые композиционные материалы в ремонтном производстве* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – № 11. – С. 46–49.

Поступила в редакцию 22.12.2015

### **III Международная научно-практическая конференция СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

19–21 апреля 2016 г.

Андижан, Узбекистан

Андижанский машиностроительный институт совместно с Туринским политехническим университетом в г. Ташкенте и ЗАО «Дженерал Моторс–Узбекистан» проводят Международную научно-практическую конференцию «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении».

#### **Тематика конференции:**

- ◆ современное инженерное образование: проблемы и перспективы развития;
- ◆ современное машиностроение;
- ◆ энергообеспечение и энергосбережение в промышленности;
- ◆ современные методы организации и управления производством.

**Оргкомитет:** E-mail: andmiedu@umail.uz  
Тел.: (+99874) 223-43-67, 223-43-78  
<http://conf.andmiedu.uz/>

## РОЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ В ПОСЛЕВОЕННОМ ВОЗРОЖДЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В годы Великой Отечественной войны в СССР было разрушено свыше 19 тыс. промышленных предприятий, шахт, мостов и около 200 тыс. производственных зданий. Восстановление экономики в значительной мере зависело от возможностей сварочного производства.

В мае 1944 г. ИЭС возвратился в Киев. Конверсия высокоэффективной «военной» технологии — автоматической сварки под флюсом — для «гражданского» применения стала основной задачей института. Еще в Нижнем Тагиле был выполнен анализ и обобщен опыт разработки оборудования для автоматической дуговой сварки. Написана и издана первая в мире монография, в которой изложены основы проектирования установок и применения автоматической сварки в промышленном строительстве при изготовлении строительных металлоконструкций.

Е.О. Патон сосредотачивает усилия коллектива на решении проблем восстановления и развития народного хозяйства страны. 4 апреля 1944 г. вышло подготовленное Е.О. Патоном постановление СССР «О внедрении автоматической сварки на восстанавливаемых промышленных предприятиях УССР». До конца 1944 г. автоматическая сварка под флюсом была внедрена на 12 крупных предприятиях Украины. Однако, несмотря на очевидные преимущества, руководители предприятий и некоторых министерств не поддерживали предложений Е.О. Патона перевести производство на более прогрессивные технологии. Причин было много: риск сорвать выполнение плановых заданий, отсутствие специалистов, необходимость изготавливать сварочное оборудование своими силами, изменять конструкции изделий и т.п. Кроме того, в НИИ или КБ многих министерств еще с 1930-х годов были образованы отделы или лаборатории сварки, в которых не всегда успешно решались вопросы освоения новых технологий.

Понимая, что для ускорения развития сварочного производства необходимо директивное вмешательство руководства страны, Е.О. Патон подготовил проект соответствующего его планам постановления. 9 июня 1947 г. ЦК ВКП(б) и Совет Министров СССР принял постановление «О расширении применения в промышленности автоматической электросварки под слоем флюса». Оно обязывало 18 министерств в ближайшие полтора

года внедрить 670 сварочных автоматов на 111 заводах стран. Были выделены необходимые фонды, запланировано открытие новых сварочных кафедр в вузах, курсов подготовки рабочих. ИЭС им. Е.О. Патона поручалось научное и организационное сопровождение всех сварочных работ в стране. Для специалистов ИЭС предусматривалось в течение полугода построить квартиры площадью тысячу квадратных метров.

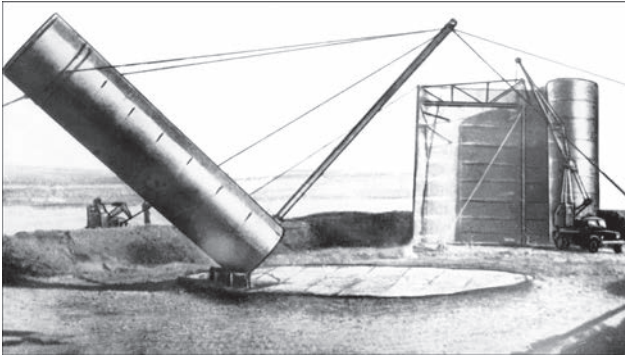
Военный опыт организации научных исследований подтвердил плодотворность концентрации усилий специалистов на приоритетных направлениях, могущих дать большой практический выход. Е.О. Патон продолжал развивать принцип разработки прорывных инновационных решений — от научной идеи и фронтальных научных исследований до внедрения и промышленной эксплуатации. Он умело регулировал интенсивность комплексно-совмещенных исследований на различных этапах, сочетая экономические и административно-директивные методы ускорения внедренческих работ.

Естественно, нужно было расширить объем научных исследований и конструировать не только оборудование, но и собственно сварные изделия. Е.О. Патон распределил работу на 25 поисковых тем.

Важной составной частью целенаправленного фундаментального исследования процессов сварки под флюсом было совершенствование основ проектирования новой сварочной техники. В этом направлении коллективу под руководством Е.О. Патона удалось совершить прорыв в создании принципиально нового оборудования — универсальной мобильной сварочной аппаратуры (тракторов и шланговых полуавтоматов) и специализированной аппаратуры для массового производства однотипных изделий, что позволило опередить мировое развитие такой техники. Научные основы проектирования высокоэффективных источников питания и систем управления сварочными процессами были разработаны под руководством Б.Е. Патона. К 1950 г. им впервые в мире была создана теория автоматического регулирования процессами дуговой сварки, предложены схемы простых и надежных сварочных головок.

Рационализация сварных конструкций была одним из важнейших направлений, которым Е.О. Патон уделил внимание еще до войны. Боль-





Индустриальный способ изготовления крупных резервуаров (монтаж резервуаров из рулонных заготовок)

шинство изделий ряда областей промышленности, в том числе и серийных, были сконструированы без учета условий, которые требуются для применения автоматической сварки. Одна из идей Е.О. Патона заключалась в «расчленении» конструкций на узлы и сварка их использованием специализированных автоматов на отдельных позициях конвейерных линий. Это было принципиально новым подходом к проектированию и изготовлению машин, резервуаров, труб, промышленных сооружений. Путем совершенствования форм конструкций в ИЭС решались задачи технологичности сварных изделий, снижения их массы, уменьшения количества соединяемых элементов.

В результате всесторонних исследований прочности узлов различной конструкции, воспроизведения разрушений на больших образцах-моделях сварных соединений в лабораторных условиях находились рациональные конструктивные решения (В.В. Шеверницкий и др.).

Впервые в мире в ИЭС им. Е.О. Патона были разработаны технологии совмещенной сборки и сварки, соответствующие станки-автоматы и поточные линии, рациональные сварные конструкции горно-шахтного и энергетического оборудования, металлургических печей, мостов. Торецкий машиностроительный завод выпускал 4 вагонетки за смену (8 часов), при этом приходилось приваривать вручную короткими швами 25 деталей.



Применение технологии механизированной сварки под флюсом при строительстве газопровода «Дашава–Киев»

Под руководством Е.О. Патона была разработана новая конструкция вагонеток и новый процесс их производства. Осталось 8 швов. В основу организации поточной линии был положен принцип соединения операций сборки и сварки узлов с применением вальцесварочных станков (Р.И. Лашкевич, В.Е. Патон, А.И. Коренной). Девять сварочных головок обеспечили выпуск за смену более 60 вагонеток для шахт и горно-обогатительных комбинатов Донбасса, Криворожья и других регионов. Были также усовершенствованы конструкции шахтерских ламп, стальных крепежных стояков, разработаны специальные установки и автоматические линии по их производству. До 1950 г. все 220 основных шахт Донбасса были восстановлены, введены в действие несколько новых шахт. Добыча угля превысила довоенный уровень.

В 1946–1948 гг. на Мариупольском заводе им. Ильича была введена в действие линия производства железнодорожных цистерн. Внутренние и внешние продольные и внешние кольцевые швы выполнялись автоматической сваркой под флюсом тракторами. Технология поточной сборки и сварки локомотивных котлов была внедрена в 1950 г. на заводе им. Г.И. Петровского в Херсоне. В соответствии с постановлением правительства от 1946 г. о переводе судостроения на сварку корпусных конструкций и после неудачной попытки отраслевых НИИ выполнить это задание, ИЭС подключился к созданию технологии сварки специальных сталей.

С 1944 г. началось конструирование сварочных аппаратов нового класса — была разработана серия усовершенствованных аппаратов (УСА-2) и специализированных тракторов (ТС-6...ТС-17) (П.И. Севбо, В.Е. Патон). Универсальный сварочный автомат-трактор ТС-17, разработанный в 1948 г. В.Е. Патоном, стал одним из основных средств механизации сварочных работ в народном хозяйстве страны. Его конструкция послужила основой при создании большой гаммы аппаратов для дуговой сварки и развивается до сих пор. Уже с 1949 г. ТС-17 был использован при строительстве газопровода Дашава–Киев–Брянск–Москва.

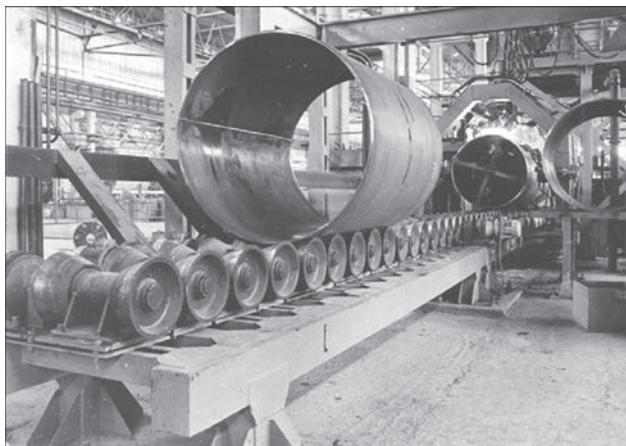
Ряд сварочных аппаратов, сварочных установок, механизмов и устройств, таких как, например: вальцесварочный станок для шахтных вагонеток, аппараты для электрошлаковой сварки, проходной стан для автоматической сварки труб большого диаметра и т.п. не имели аналогов за рубежом.

В 1949 г. был разработан метод принудительного формирования и кристаллизации сварного шва. Впервые в мире была решена задача автоматической дуговой сварки под флюсом швов на вертикальной плоскости с применением подвижного охлаждае-

мого ползуна (Г.З. Волошкевич) и нового вида сварочных аппаратов — магнитошагающих автоматов (В.Е. Патон, П.И. Севбо). Технология сварки вертикальных и горизонтальных швов вскоре была применена при строительстве доменной печи объемом 1050 м<sup>3</sup> на «Запорожстали». Новые технические решения позволили сократить продолжительность строительства доменных печей и повысить их качество. Объем механизированной сварки составил 70 %. До конца 1952 г. были восстановлены и сооружены 23 доменные печи мощностью 8,3 млн т чугуна в год, 51 мартеновская печь годовой мощностью 4,7 млн т стали, прокатные станы мощностью 4,4 млн т проката.

Е.О. Патон также акцентировал внимание на форсирование работы по внедрению полуавтоматической сварки под флюсом, начатой Б.Е. Патоном еще в 1943 г. К 1948 г. было разработано оборудование и технология сварки под флюсом тонкой электродной проволокой (диаметром 1...3 мм), так называемая шланговая полуавтоматическая дуговая сварка (Б.Е. Патон, Д.А. Дудко, П.Г. Гребельник, И.Н. Рублевский др.). Эта технология позволила механизировать производство сложных конструкций с множеством коротких швов, как, например, корпуса кораблей. Для монтажно-строительных работ широкое применение нашел пистолет для приварки шпилек (Н.Г. Остапенко).

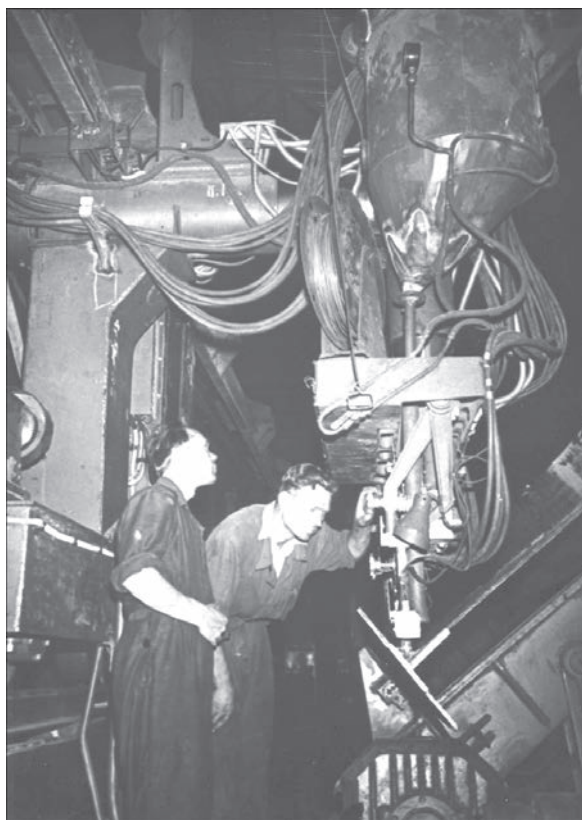
Г.В. Раевскому удалось решить сложнейшую задачу, поставленную Е.О. Патоном, — изготавливать крупногабаритные конструкции, такие как, например, многотонные нефтяные резервуары, в цехах с применением автоматической сварки. В 1944 г. теоретически и экспериментально была доказана возможность изменения формы сварных конструкций, работающих в условиях нагружения в пределах упругих деформаций. К 1948 г. впервые был создан метод промышленного строительства резервуаров из плоских полотнищ. Три основных элемента резервуара (днище, стенка и кровля) собирались и сваривались автоматами под флюсом в полотнища в цеху. Для транспортировки их сворачивали в габаритные рулоны, а потом на монтажной площадке разворачивали. На месте эксплуатации оставалось сварить один замыкающий вертикальный стык стенки и приварить днище и крышу к стенке. Применение новой технологии изготовления резервуаров дало возможность вчетверо уменьшить трудоемкость монтажных работ, в пять-десять раз ускорить сроки строительства. Для индустриального производства резервуаров в 1948 г. были построены цеха на Куйбышевском и Запорожском заводах металлоконструкций. Монтаж 144 рулонов (годовая продукция) в кратчайшие сроки обеспечил стра-



Внедрение технологии автоматической сварки под флюсом на трубосварочных заводах

ну необходимым количеством нефтехранилищ при годовой экономии в размере 7 млн рублей. Эта идея пригодилась для решения еще одной проблемы — изготовления водо-, газо-, продуктопроводов из двух полос-рулонов длиной до 1...2 км в одном отрезке, сваренных между собой по длинным торцам на заводах, затем свернутых и после разворачиваемых и раздуваемых на месте монтажа.

С целью повышения скорости сварки проводились исследования магнитогидродинамических явлений в зоне горения дуг и сварочной ванне, процессов многодуговой сварки с колебаниями электрода, трехэлектродной сварки и др. (Б.Е. Па-



Автоматическая сварка под флюсом при изготовлении строительных конструкций



тон, С.Л. Мандельберг и др.). Были разработаны технологии автоматической сварки под флюсом электродом, наклоненным вдоль оси шва «углом вперед», расщепленными электродами и др. (А.И. Коренной, Б.И. Медовар и др.). В 1946–1947 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона созданы технология сварки со скоростью 160...200 м/ч двумя раздельно горящими дугами и сварочная аппаратура для осуществления этого процесса. В 1949 г. в ИЭС им. Е.О. Патона был сконструирован первый отечественный непрерывный трубозлектросварочный стан, сварочная аппаратура и источники питания введенные в эксплуатацию на Харцызском трубном заводе. Впервые сборку и сварку выполняли в одном агрегате при стационарно установленной сварочной головке и подвижной заготовке.

Образцом универсального применения автоматической сварки под флюсом является сооружение цельносварного автодорожного моста им. Е.О. Патона через р. Днепр в Киеве протяженностью более полутора километров, завершившееся в 1953 г. и признанное Американским сварочным обществом выдающейся сварной конструкцией. Евгений Оскарович не дожидаясь трех месяцев до открытия моста, из-за которого он и занялся проблемами сварочного производства — он умер 12 августа 1953 г.

Именно работы, выполненные в ИЭС им. Е.О. Патона в послевоенные годы, сыграли значительную роль в восстановлении разрушенной промышленности страны. В частности, в Украине к 1952 г. была полностью восстановлена топливно-энергетическая и металлургическая промышленность. Внедрение сварки под флюсом освободило для других работ свыше 30 тыс. квалифицированных рабочих. В условиях экономической и информационной блокады периода холодной войны впервые в мире были выполнены оригинальные научные исследования, созданы но-

вые высокопроизводительные технологии и решены организационные задачи развития сварочного производства. По темпам развития, уровню работ и масштабам, применению дуговой автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом Советский Союз опередил другие страны.

1. *Автоматическая сварка под флюсом строительных металлоконструкций* / Е.О. Патон, П.И. Севбо, Г.В. Раевский, Б.Е. Патон. — М.: Стройиздат, 1944. — 70 с.
2. *Патон Б.Е. Процесс плавления электрода при автоматической сварке под флюсом* / Труды по автоматической сварке под флюсом. — Киев: Изд-во АН УССР, 1944. — 92 с.
3. *Патон Б.Е. Сварка длинным гибким электродом под флюсом* // Автогенное дело. — 1945. — № 1. — С. 1–2.
4. *Патон Б.Е. О нижнем пределе сил тока при автосварке под флюсом* // Там же. — 1946. — № 5-6. — С. 10–11.
5. *Патон Б.Е. Схемы питания сварочных дуг* // Сб. тр. по автоматической сварке под флюсом. — Киев: Изд-во АН УССР, 1948. — С. 230–247.
6. *Патон Б.Е. Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом* / Тр. Ин-та электросварки им. Е.О. Патона. — 1948. — № 3. — С. 17–23; 1949. — № 4. — С. 15–27.
7. *Патон Е.О., Шверницкий В.В. Сталь для сварных мостов* // Автогенное дело. — 1949. — № 6. — С. 3–7.
8. *Севбо П.И. Автосварочные установки и приспособления: Материалы для проектирования*. — Киев: Машгиз, 1949. — 146 с.
9. *Патон Б.Е. Исследование схем регулирования сварочной дуги* // Сб., посвященный 80-летию со дня рождения и 55-летию науч. деятельности Е.О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 426–450.
10. *Патон Б.Е. Принципы действия сварочных головок* // Там же. — С. 217–240.
11. *Медовар Б.И. Двухдуговая автоматическая сварка на больших скоростях*. /В кн. Юбилейный сборник, посвященный 80-ти летию Е.О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 357–370.
12. *Регулирование процесса сварки под флюсом* // Автоматическая электродуговая сварка / Под ред. Е.О. Патона. — М.; Киев: Машгиз, 1953. — С. 270–288.
13. *Патон Б.Е., Лебедев В.К. Элементы расчетов цепей и аппаратов переменного тока для дуговой сварки*. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 165 с.
14. *Патон Б.Е. Современная сварочная техника*. Киев—Москва: Машгиз, 1957. — 100 с.
15. *Чеканов А.А. История автоматической электросварки*. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 159 с.

А.Н. Корниенко

## Международная конференция Немецкого союза сварки и родственных процессов DVS «Современные тенденции в сварке и соединительных технологиях в 21-ом веке»

1–3 июня 2016

г. Таллин

Языки конференции: русский, английский, эстонский

Наш первый контакт для Вас, пожалуйста, свяжитесь с нами:

1. Frau Agne Plenaite agne.plenaite@gsi-baltikum.ee LT, ENG
2. Herr Vladimir Beloi vladimir.beloi@tlmk.ee EE, RUS
3. Herr Ilgonis Rungis irungis@3arodskola.lv LV, RUS
4. Frau Irina Pinneker pinneker@slv-rostock.de DE, RUS
5. Herr Sergei Boaga sergei.boaga@gsi-baltikum.ee EE, RUS
6. Herr Dr. Groß hans-g.gross@gsi-baltikum.ee DE, RUS, ENG





## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**М.Н. Бобров (Национальный университет кораблестроения им. Акад. Макарова МОН Украины)** защитил 18 января 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Повышение физико-механических свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на гетерофазную высокотемпературную струю».

Диссертация посвящена разработке технологических основ и практических рекомендаций по повышению физико-механических и эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий путем электроимпульсного воздействия на гетерофазную высокотемпературную струю за счет излучения и ускорения частиц дисперсной фазы.

Исследовано влияние амплитудно-частотных параметров такого воздействия на микроструктуру и твердость покрытий и на основе полученных данных установлены ее оптимальные параметры, которые обеспечивают максимальный уровень их физико-механических свойств. Показано, что одним из перспективных направлений дальнейшего повышения твердости покрытий является предкристаллизационная термическая обработка.

**Ал.В. Лабарткава (Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова МОН Украины)** защитил 19 января 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Оптимизация конструкции и технологии пайки металлокерамических гермовводов на основе анализа термомодеформационных процессов».

Диссертационная работа посвящена оптимизации конструкции и технологии пайки с управляемым напряженно-деформированным состоянием (НДС) металлокерамических гермовводов с толщиной токоподвода 0,5 мм электронно-лучевых пушек установок для сварки и напыления на основе установленных закономерностей формирования НДС при охлаждении после пайки с учетом деформаций мгновенной пластичности и ползучести кова, что обеспечивает допустимый уровень напряжений в керамике.

Разработана типовая технология изготовления металлокерамических узлов гермовводов. (УКФА 680210 001 ТП-2010), которая исключает трудоемкий процесс металлизации керамики, что на 50 % снижает стоимость узлов по сравнению с использованными ранее импортными. Пайка промышленных изделий с толщиной токоподводов 0,5 мм и их эксплуатация показала, что гермовводы имеют более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с зарубежными аналогами.

**И.В. Симутенков (Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова МОН Украины)** защитил 19 января 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Разработка технологии автоматической наплавки под флюсом конструкционных сталей с высокочастотными колебаниями электрода».

Диссертация посвящена разработке технологии автоматической наплавки под флюсом с управляемым характером переноса металла путем возбуждения в электродной проволоке высокочастотных колебаний (ВКЭ) с помощью специального механического генератора. В работе раскрыт механизм влияния ВКЭ на производительность плавления электрода, перенос электродного металла через дугу, свойства наплавленного слоя.

Установлено, что с увеличением частоты и амплитуды колебаний электродной проволоки изменяется характер переноса электродного металла, масса наплавленного металла возрастает, а глубина проплавления и доля участия основного металла в наплавленном снижаются. Определены области, соответствующие различному эффекту от воздействия параметров ВКЭ на устойчивость дуги, характер переноса металла и геометрию зоны проплавления.

**Задорожнюк О.М. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)** защитил 3 февраля 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Структура, фазовый состав и способность к сварке титановых сплавов с дисперсионным упрочнением».

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния структуры, фазового состава основного металла, сварных швов и зоны термического влияния, размеров и распределения дисперсных частиц сложных силицидов титана в этих областях опытных высокопрочных титановых сплавов с разной системой легирования и структурой, выплавленных методом электронно-лучевой плавки с электромагнитным перемешиванием, на механические свойства.

Впервые установлено, что дисперсные частицы, образующиеся во время выплавки и кристаллизации слитков, имеют наноразмеры. Установлено, что эти частицы имеют неоднородный химический состав и представляют собой сложное химическое соединение титана, циркония, алюминия и кремния. С помощью расчетов по стехиометрии определено, что дисперсные частицы представляют собой алюмосилицид титана, легированный цирконием типа  $(\text{Ti,Zr})_5(\text{Al,Si})_3$ , с

силицидной оболочкой типа  $Ti_3Si$  или алюмосилицид титана.

Наличие дисперсных упрочняющих частиц сложных силицидов, находящихся в теле зерна, способствует повышению прочностных характеристик. Включения, расположенные по границам зерен, приводят к хрупкому механизму разрушения сколом.

Показано, что дисперсионно-упрочнённые титановые сплавы после термомеханической обработки (прокатки) хорошо свариваются всеми наиболее распространёнными методами, а сварные соединения имеют удовлетворительную структуру и механические характеристики.

По результатам проведённых исследований определено, что оптимальным комплексом механических свойств обладает электронно-лучевое сварное соединение сплава № 5 ( $Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si$ ), с псевдо-а структурой, равномерным распределением дисперсных упрочняющих частиц алюмосилицидов титана правильной геометрической формы.

**Мирзов И.В. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)** защитил 3 февраля 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Напряженно-деформированное состояние внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-1000».

Работа посвящена моделированию радиационного распухания выгородки и внутрикорпусной

шахты реактора ВВЭР-1000, а также анализу изменения напряженно-деформированного состояния в этих конструкциях при сроках эксплуатации, превышающих проектные.

Рассмотрены существующие математические модели радиационного распухания и предложена усовершенствованная модель, в которой деформации распухания и ползучести представлены в тензорном виде и зависят от величины остаточных сварочных напряжений. В результате выполнения комплекса расчетных исследований с применением разработанной модели показано, что деформирование выгородки вследствие радиационного распухания может привести к ее контакту с внутрикорпусной шахтой. Исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние внутрикорпусных устройств таких факторов, как температурные деформации, радиационное распухание, радиационная ползучесть и уровень остаточных напряжений, возникающих при сварке и последующей термообработке. Показано, что наибольший вклад в напряженное состояние внутрикорпусной шахты в сверхпроектный период может вносить ее контактное взаимодействие с выгородкой. Показано, что вклад остаточных сварочных напряжений в общее напряженное состояние выгородки снижается в процессе эксплуатации. Получена количественная зависимость уровня остаточных сварочных напряжений в выгородке от времени эксплуатации.



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная  
компания «ХОБЭКС электрод»



при поддержке

Российского научно-технического сварочного общества и Общества сварщиков Украины

### ***IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»***

*Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции*

*по сварочным материалам (1966 г.)*

*и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).*

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

#### **Тематика конференции**

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

<http://association-electrode.com>; тел./факс: (+38044) 200 63 02.

E-mail: [office@association-electrode.com](mailto:office@association-electrode.com)

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка»

## И.И. ЗАРУБЕ — 95



В марте исполнилось 95 лет Игорю Ивановичу Зарубе, ведущему научному сотруднику Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии СССР, известному ученому в области электрофизических проблем

дуговой сварки и сварочных источников питания.

И.И. Заруба в 1945 г. окончил Киевский политехнический институт, где получил квалификацию инженера-электрика по специальности «Электрооборудование промышленных предприятий». С 1946 г. его трудовая и научная деятельность связана с ИЭС им. Е.О. Патона, где он прошел путь от аспиранта до заведующего научным отделом.

На протяжении 70 лет работы в институте И.И. Заруба выполнил ряд научных исследований по изучению условий устойчивости сварочных дуг и систем «источник питания — сварочная дуга» и особенностей массопереноса в плазме дугового разряда. Он разработал теоретические основы процесса и является одним из основных создателей способа механизированной сварки тонкой электродной проволокой в углекислом газе с короткими замыканиями дугового промежутка от источников питания постоянного тока с жесткими внешними характеристиками, которые широко используются в современной сварочной технике. Именно этому процессу была посвящена кандидатская диссертация И.И. Зарубы, которую он защитил в 1954 г. При непосредственном участии И.И. Зарубы были созданы новые типы источников питания сварочной дуги и разработаны методы испытаний и оценки их сварочных свойств. Эти работы внесли существенный вклад в развитие сварочной науки и техники.

С 1954 г. в течение более восьми лет И.И. Заруба работал ученым секретарем Института электросварки им. Е.О. Патона.

С его участием в 1959 г. был организован первый квалификационный ученый совет института, членом и ученым секретарем которого он был до 1962 г. С этого же года И.И. Заруба в течение 25 лет заведовал лабораторией, а затем отделом источников питания ИЭС. За это время выполнено много научных разработок и обеспечено создание и внедрение в производство новых типов источников питания для различных сварочных процессов, в том числе многопостовых систем сварки, импульсных источников питания для управления переносом металла, устройств стабилизации горения дуги переменного тока. В 1976 г. И.И. Заруба защитил докторскую диссертацию, в которой были отражены теоретические основы процесса механизированной сварки с короткими замыканиями дугового промежутка.

Технология и оборудование для сварки тонкой проволокой в углекислом газе широко применяется практически во всех отраслях машиностроения. В 1991 г. И.И. Заруба отмечен званием лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники.

И.И. Заруба — автор нескольких монографий и более 300 научных работ и изобретений по теоретическим основам, оборудованию и способам дуговой сварки. Имеет государственные награды, а также много грамот и медалей за участие в выставках сварочного оборудования, конкурсах по экономии энергии и других мероприятиях.

Изобретения И.И. Зарубы легли в основу новых решений высокоэффективных сварочных источников питания, которые нашли широкое промышленное применение.

Благодаря таким чертам характера И.И. Зарубы, как доброта, отзывчивость, скромность, умение установить деловые отношения и дружеские контакты, уделить внимание собеседнику, он по праву заслужил глубокое уважение и доброе отношение коллег.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Редколлегия журнала



## Интервью с Почетным директором Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины академиком Владимиром Васильевичем Панасюком

*Владимир Васильевич Панасюк — известный украинский ученый в области механики и физики прочности материалов и конструкций, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, один из организаторов Львовской научной школы механиков-материаловедов.*

*Он является автором свыше 600 научных публикаций, в том числе 17 монографий. Среди них первая в Восточной Европе монография «Предельное равновесие хрупких тел с трещинами» (1968 г.), которая сыграла важную роль в формировании нового научного направления в науке о прочности материалов и конструкций — физико-химической механики разрушения материалов и целостности конструкций (переведена в США в 1971 г.). Важным источником в материаловедении стал подготовленный под руководством В.В.Панасюка 15-томный справочник по механике разрушения и прочности материалов (1988–2015 гг.).*

*27 февраля Владимиру Васильевичу Панасюку исполнилось 90 лет. Редакция журнала взяла интервью у юбиляра.*



### Владимир Васильевич, что предопределило Ваш выбор профессии?

Я окончил в 1951 г. физико-математический факультет Львовского государственного университета им. Ивана Франко по специальности «механика» и поступил на работу в Институт машиноведения и автоматизации АН УРСР (с 1964 г. — Физико-механический институт) во Львове, где работаю и в настоящее время. В Университете я слушал лекции известных уже в то время ученых Г.Н. Савина, М.Я. Леонова и других, посещал Львовские городские научные семинары Г.Н. Савина по механике деформируемых твердых тел, на которых доминировала проблема определения концентрации напряжений около различных надрезов и отверстий в элементах конструкций. Упомянутые ученые были руководителями научных отделов и аспирантов в Институте. Я стал аспирантом профессора М.Я. Леонова. Таким образом, выбор моей научной профессии сформировался под влиянием деятельности этих ученых.

### С Вашим именем связывают появление широко известной в мире $\delta_c$ -модели, ставшей важной вехой в развитии механики разрушений. Какие предпосылки способствовали этому?

Проблемы прочности материалов и конструкций были и будут актуальными всегда. Над разработкой методов и технологий создания прочных материалов и конструкций, в том числе и сварных, работают многие коллективы и научные школы. Яркий пример этому в Украине — это Патоновская научная школа по проблемам сварки металлов и неметаллов.

В середине XX столетия стала особо актуальной проблема прочности деформируемых твердых тел в случае, когда в теле имеется концентратор напряжений (дефект) в виде трещины. Это было связано с авариями таких объектов, как корабли (в частности, американские корабли «Либерти»), новые английские самолеты, трубопроводы на Севере и т.п. Причиной этих аварий были дефекты типа трещин в элементах конструкций. Такие дефекты были изначально или возникали в процессе эксплуатации. В эти годы в мировой практике для оценки влияния таких дефектов на прочность конструкционного материала широко использовали энергетическую концепцию А. Гриффитса. В конце 1950-х годов в работах М.Я. Леонова и моих были решены задачи о влиянии малых (мельчайших, дислокационных) трещин на прочность деформированного тела. Для решения этой задачи была сформулирована деформационная модель.

ционная концепция, в частности, для оценки прочности тела с таким дефектом была введена величина критического раскрытия берегов трещин ( $\delta_c$  или  $\bar{\delta}_k$ ) в окрестности ее вершины, т.е. был предложен новый (деформационный) параметр структуры материала, отражающий сопротивление материала старту трещины. Эта модель была обобщена на случай макротрещины (гриффитсовских трещин). В результате показано, что в случае малых трещин гриффитсовская модель приводит к физически неоправданному результату. Предложенная деформационная модель ( $\delta_c$ -модель) устраняет этот недостаток. Так и утвердилась в мировом научном сообществе  $\delta_c$ -модель. Короткий ответ на вопрос можно сформулировать следующим образом. Анализ результатов, которые следуют из концепции А. Гриффитса для случая малых трещин (стремящихся к нулю), показывает, что они физически неоправданы. Таким образом, необходимо искать лучшее решение. Предложенная  $\delta_c$ -модель устраняет этот недостаток и согласуется с концепцией А. Гриффитса для больших трещин (макротрещин).

**Владимир Васильевич, Вы были удостоены Премии им. Е.О. Патона в 1972 г. Что связывает Вас с учеными-сварщиками и с проблемами сварки в целом?**

Сварка металлов — великое достижение ученых, а также инженеров-практиков. Это научное направление стало основой эффективных технологий создания современных конструкций машин и сооружений. Прочность и надежность таких конструкций во многом зависит от прочности сварного шва. Известно, что неэффективные технологии не обеспечивают надлежащего качества сварного шва. Во многих случаях даже эффективные технологии провоцируют появление так называемых холодных трещин (известные работы академика И.К. Походни). Поэтому важной задачей механиков, работающих в области прочности материалов, и сварщиков разработать методы оценки прочности и трещиностойкости материала зоны сварного шва в конструкции. В моей монографии, за которую я удостоен Премии им. Е.О. Патона, рассмотрен ряд теоретических и прикладных задач по этой тематике, что содействовало успешному сотрудничеству в этом научно-техническом направлении коллективов ФМИ и ИЭС.

**Могли бы Вы назвать какие сегодня актуальные направления в развитии мировой науки по механике разрушения, в том числе сварных конструкций?**

Актуальные научные направления формируются в основном такими обстоятельствами: или появлением фундаментальных научных результатов в области математики, физики, механики, материаловедения и других наук, которые открывают перспективы получения новых знаний о природе и обществе, которые нужны для развития общества, или возникновением научно-технических проблем, тормозящих развитие экономического, энергетического, технического, медицинского прогресса человеческого сообщества. В данное время в числе актуальных и перспективных проблем мировой науки о материалах и конструкциях можно выделить проблемы водородного материаловедения. Это направление объединяет усилия механиков и материаловедов, а также сварщиков по вопросам разработки теории, методов и технологий создания конструкционных материалов с высокой прочностью и трещиностойкостью для длительной эксплуатации при воздействии заданных напряжений и водородсодержащей среды; здесь сохраняет свою актуальность и разработка методов определения ресурса работоспособности элементов конструкций, в том числе и сварных соединений в заданных водородсодержащих средах.

Это направление выдвигается мировым сообществом как поиск альтернативных и экологически чистых, по сравнению с используемыми, источников энергии. Таким альтернативным энергетическим источником может быть водород. Необходимо разработать эффективные и дешевые технологии производства водорода в больших количествах, а также материалы и сварные конструкции (емкости, трубопроводы, двигатели и т.п. конструкции) для хранения водорода, его транспортировки и практического использования.

**Благодарим Вас, Владимир Васильевич, за обстоятельные ответы на вопросы редакции и желаем Вам крепкого здоровья, долгих лет успешной работы, счастья и благополучия.**

Редакция журнала



## ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Одесса, отель «Курортный» ([www.inkurort.com](http://www.inkurort.com))  
19 – 23 сентября 2016 г.



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

### Тематика конференции

#### Математическое моделирование:

- ♦ физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- ♦ процесса переноса металла при сварке;
- ♦ образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- ♦ кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- ♦ кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- ♦ зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;
- ♦ кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин и условий их предупреждения;

- ♦ термдеформационных процессов при сварке давлением с учетом больших деформаций;
- ♦ транспорта водорода в сварных соединениях;
- ♦ оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- ♦ остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- ♦ деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- ♦ процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний.

**Информационные технологии в сварке,  
наплавке и нанесении покрытий.**

- ♦ Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.
- ♦ Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 21 июня 2016 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.
- ♦ Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кегель 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

#### Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 21.06.2016 г. Рассылка второго информационного сообщения до 01.07.2016 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 15.07.2016 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

#### Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 200-82-77  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua), [romanova@paton.kiev.ua](mailto:romanova@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2016> | [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)



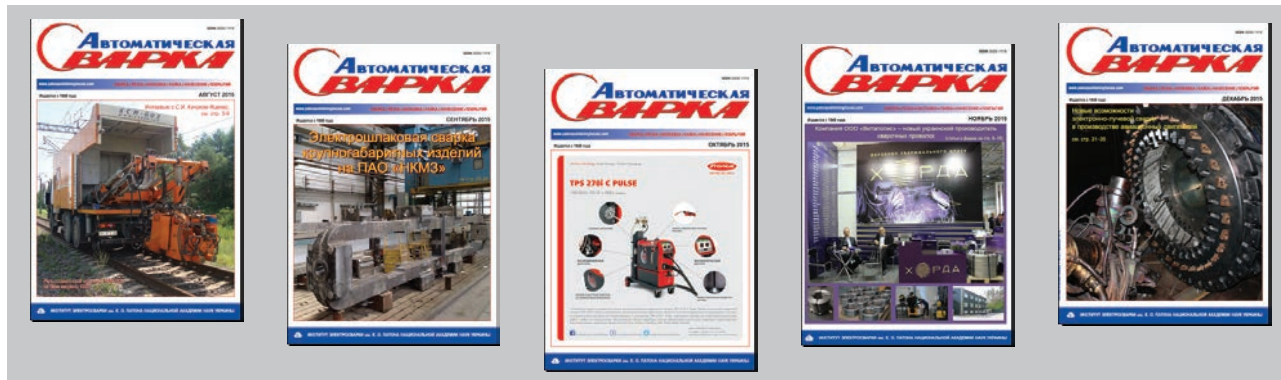


## ПОДПИСКА на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).



**Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка»  
на сайте: <http://www.patonpublishinghouse.com>  
В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2014 гг. в формате \*.pdf.**

## Реклама в журнале «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

**Реклама публикуется  
на обложках и  
внутренних вклейках  
следующих размеров**

- ▶ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ▶ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ▶ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ▶ Вклейка А4, 200×290 мм
- ▶ Разворот А3, 400×290 мм
- ▶ 0,5 А4, 185×130 мм

**Технические требования к  
рекламным материалам**

- ▶ Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- ▶ В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм 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, InDesign C56
- ▶ Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

**Стоимость рекламы  
и оплата**

- ▶ Цена договорная

- ▶ По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- ▶ Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- ▶ Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- ▶ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- ▶ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)

- ▶ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 02.03.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22.  
Печать ООО «Фирма «Эссе». Тираж 840 экз.  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.