



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,
И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко
(в редакционную коллегию
входят ученые ИЭС им. Е. О. Патона)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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
Б. Е. Патон
ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина
Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
О. И. Стеклов
РНТСО, Москва, РФ
Г. А. Турчин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ
В. Г. Фартушный
Общество сварщиков Украины, Киев

Учредители

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

Издается ежемесячно

Адрес редакции

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

Редактор
Т. В. Юштина
Электронная верстка
И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

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.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Миходуй О. Л., Соломийчук Т. Г.*
Устранение местных деформаций типа «бухтина» путем
электродинамической обработки 3
- Махненко О. В., Великоиваненко Е. А., Мирзов И. В.*
Перераспределение остаточных сварочных напряжений
во внутрикорпусной шахте реактора ВВЭР-1000 в процессе
эксплуатации 10
- Бут В. С., Максимов С. Ю., Олейник О. И.* Склонность к
трещинообразованию сварных соединений ремонтных
конструкций на магистральных газопроводах 17
- Аношин В. А., Илюшенко В. М., Бондаренко А. Н., Лукьян-
ченко Е. П., Николаев А. К.* Комплексная оценка влияния
основных примесей на свариваемость меди 27
- Жудра А. П.* Исследование износостойкости композицион-
ных сплавов в условиях газообразивного износа при
повышенных температурах 31
- Ланкин Ю. Н., Суший Л. Ф., Байштрук Е. Н.* Система изме-
рения температуры биологических тканей при биполярной
высокочастотной сварке 35

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Мазур А. А., Пустовойт С. В., Маковецкая О. К., Бровченко
Н. С., Петрук В. С.* Состояние и перспективы мирового
и региональных рынков сварочных материалов (Обзор) 39
- Кныш В. В., Соловей С. А., Кузьменко А. З.* Эффективность
упрочнения высокочастотной механической проковкой
стыковых сварных соединений с длительной наработкой 46
- Саенко В. Я., Полишко А. А., Рябинин В. А., Степанюк С. Н.*
Электронно-лучевая сварка листового технического титана
BT1-0, упрочненного азотом в процессе дугошлакового
переплава 50
- Стефанив Б. В., Хорунов В. Ф., Сабадаш О. М., Максимо-
ва С. В., Воронов В. В.* Особенности восстановления
промывочного канала стального бурового долота 54

ИНФОРМАЦИЯ

- Комплект импульсно-дуговой сварки для сварочной системы
MIG/MAG TPS/i 59
- Комплексные решения по очистке воздуха производственных
помещений 61
- Универсальные сварочные горелки от компании «ШТОРМ» 64

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. Paton

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko (exec. director),
V. V. Knysh, I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
Yu. N. Lankin,
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
I. K. Pokhodnya,
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko
(*Editorial Board Includes PWI Scientists*)

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

N.P. Alyoshin
N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia
Guan Qiao
Beijing Aeronautical Institute, China
A.S. Zubchenko
OKB«Gidropress», Podolsk, Russia
M. Zinigrad
College of Judea & Samaria, Ariel, Israel
V.I. Lysak
Volgograd State Technical University, Russia
B.E. Paton
PWI, Kyiv, Ukraine
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 Polytechn. Univ., Russia
V.G. Fartushnyi
Welding Society of Ukraine, Kyiv

Founders

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

Published monthly

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko 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

Editor

T. V. Yushtina
Electron galley
I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Lobanov L. M., Pashchin N. A., Mikhoduy O. L., Solomijchuk T. G.*
Elimination of local deformations of the «buckling» type using
electrodynamic treatment 3
- Makhnenko O. V., Velikoivanenko E. A., Mirzov I. V.* Redistri-
bution of residual welding stresses inside the inner-body shaft
of the reactor WWER-1000 in the process of service 10
- But V. S., Maksimov S. Yu., Olejnik O. I.* Tendency to crack
formation in welded joints of repair structures on the gas main
pipelines 17
- Anoshin V. A., Ilyushenko V. M., Bondarenko A. N., Lukyanc-
henko E. P., Nikolaev A. K.* Integrated evaluation of influence
of main impurities on copper weldability 27
- Zhudra A. P.* Investigation of wear resistance of composite
alloys under the conditions of gas-abrasive wear at elevated
temperatures 31
- Lankin Yu. N., Sushiy L. F., Bajshtruck E. N.* System of measu-
rement of temperature of biological tissues at bipolar high-
frequency welding 35

INDUSTRIAL

- Mazur A. A., Pustovojt S. V., Makovetskaya O. K., Brovchenko
N. S., Petruk V. S.* State-of-the-art and prospects of world and
regional markets of welding consumables (Review) 39
- Knysh V. V., Solovej S. A., Kuzmenko A. Z.* Efficiency of
strengthening by high-frequency mechanical peening of butt
welded joints at long-time service 46
- Saenko V. Ya., Polishko A. A., Ryabinin V. A., Stepanyuk S. N.*
Electron beam welding of sheet commercial titanium VT1-0,
hardened by nitrogen during arc-slag remelting process 50
- Stefaniv B. V., Khorunov V. F., Sabadash O. M., Maksimova S. V.,
Voronov V. V.* Peculiarities of restoration of water course of steel
drilling bit 54

INFORMATION

- Set of pulse-arc welding for welding system MIG/MAG TPS/i 59
- Integrated solutions for purification of air in industrial rooms 61
- Versatile welding torches from company «STORM» 64

«Automaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».



УДК 621.791.011:53

УСТРАНЕНИЕ МЕСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТИПА «БУХТИНА» ПУТЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЦИН, О. Л. МИХОДУЙ, Т. Г. СОЛОМИЙЧУК

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

В результате неравномерного нагрева судокорпусных конструкций при сварке продольно-поперечного силового набора возникают остаточные местные деформации (бухтины) в виде чередующихся выпучин и вмятин на смежных участках полотнища. Они негативно влияют не только на эксплуатационные характеристики и внешний вид конструкции, но и на гидродинамические характеристики судов, понижая их скорость до 10 %. Традиционные методы устранения бухтин такие, как тепловая и холодная правки, имеют ряд недостатков (шум, вибрация, значительный расход энергоносителей). Актуальной представляется разработка новых методов правки бухтин, основанных на минимальном энергопотреблении одним из которых является электродинамическая обработка. Целью настоящей работы является изучение влияния электродинамической обработки на снижение местных деформаций типа бухтина в сварных соединениях из алюминиевых сплавов и низкоуглеродистых сталей. Используются квадратные образцы тавровых сварных соединений из сплава АМгб и низкоуглеродистой стали Ст3, на которых моделировали образование бухтины с различными знаком и величиной прогиба. Режим обработки соответствовал запасенной энергии накопителя, не превышающей 800 Дж. Исследовано влияние распределения электродинамических воздействий таких, как точечные, круговые и спиральные, по поверхности образцов на формоизменение бухтин. Наименее эффективна точечная схема, а круговая и спиральная по эффективности сопоставимы. Сравнительный анализ показал, что энергетические затраты при электродинамической обработке значительно ниже, чем при традиционных методах правки. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: местные деформации, бухтина, низкоуглеродистая сталь, алюминиевый сплав, электродинамическая обработка, схема обработки, энергия импульса, традиционные методы правки

При сварке продольно-поперечного силового набора в результате неравномерного нагрева судокорпусных конструкций возникают остаточные местные сварочные деформации коробления (бухтины) в виде чередующихся выпучин и вмятин на смежных участках полотнища. Они имеют знакопеременный характер и направлены как в сторону набора, так и в противоположную. Известно [1], что бухтиноватость конструкции возникает вследствие потери устойчивости полотнища между набором под действием напряжений сжатия и негативно влияет на работоспособность, эксплуатационные характеристики и внешний вид конструкции, а также гидродинамические характеристики судов, понижая их скорость до 10 % [1]. При этом многие тонколистовые сварные корпусные конструкции проектируются с таким сочетанием элементов, при которых неизбежно возникновение бухтин выше допустимого уровня. Основным способом снижения деформаций таких конструкций является правка [2].

В судостроении наибольшее распространение получила правка бухтин местным нагревом с динамическим воздействием, что связано с применением тяжелого физического труда, высоким уровнем шума (120...140 дБ) и вибрацией конструкций. Учитывая, что правка в основном осуществляется на завершающей стадии сварочных

работ на стапеле, когда на монтаже и достройке занято большое количество производственного персонала, это создает тяжелые условия труда, приводит к удлинению цикла достройки, а в отдельных случаях к недопустимым повреждениям обрабатываемой поверхности.

Применение тепловой правки исключает шум и вибрацию, но связано с негативным термическим воздействием на производственный персонал, значительным перерасходом теплообразующих газовых смесей при теплоотводе в окружающую среду, технологическую оснастку. Кроме того, использование тепла при правке конструкций из алюминиевых сплавов в ряде случаев недостаточно эффективно из-за их высокой теплопроводности. Приведенные недостатки присущи и для тепловой правки «холостыми» валиками с использованием нагрева сварочной дугой.

Применение перечисленных методов правки сопряжено с достаточно заметными повреждениями поверхности сварных конструкций, обусловленными динамическим воздействием механического инструмента, а также термомеханическими циклами вследствие сварочного нагрева.

Использование холодной правки с растяжными стендами для устранения бухтин ограничено как геометрическими особенностями данного вида

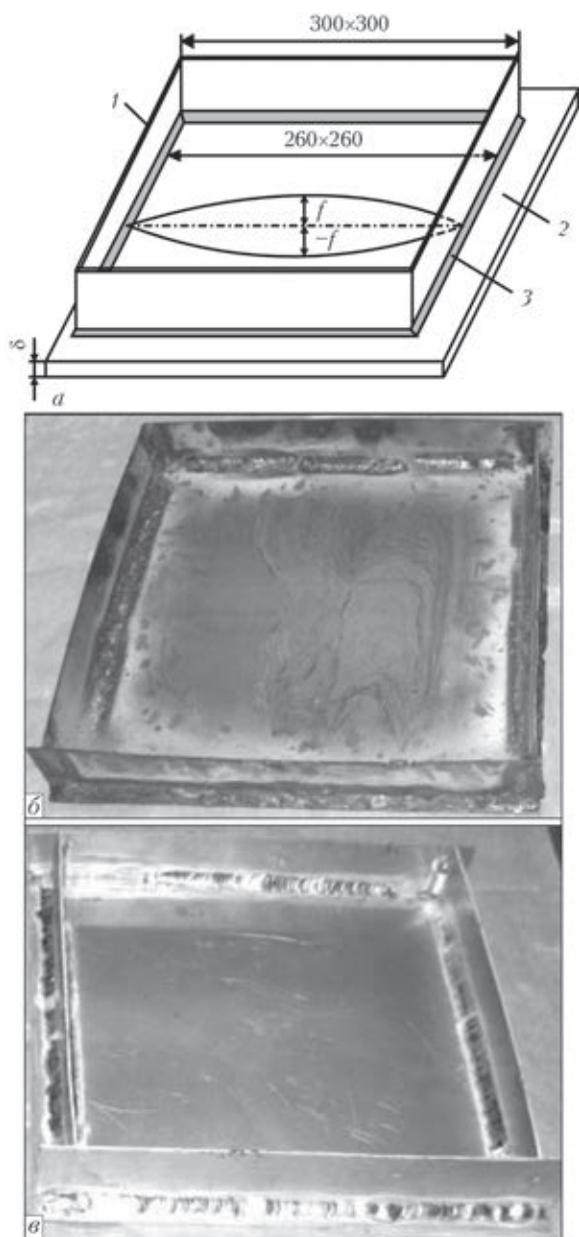


Рис. 1. Схема образцов сварных соединений с деформацией типа бухтина (а) (1 — ребро; 2 — пластина; 3 — угловой шов) и внешний вид образцов соответственно из стали Ст3 (б) и сплава АМг6 (в)

формоизменений, к которым относятся их локализация, значительные габариты конструкций, так и высокой стоимостью оборудования.

Поэтому разработка новых прогрессивных методов правки бухтин, основанных на минимальном энергопотреблении и обеспечивающих минимальную повреждаемость обрабатываемой поверхности, является достаточно актуальной. К ним относится обработка конструкций импульсными электрическими и магнитными полями [3–6], разновидностью которой является электродинамическая обработка (ЭДО).

Ранее нами проведены исследования влияния ЭДО на регулирование остаточного продольного и поперечного коробления стыковых сварных со-

единений из алюминиевых сплавов и конструкционных сталей [7]. Результаты работ подтвердили перспективность применения ЭДО для снижения таких видов коробления.

Целью настоящей работы является изучение влияния ЭДО на снижение местных деформаций типа бухтина в сварных соединениях из алюминиевых сплавов и низкоуглеродистых сталей, применяемых в судостроении.

Для исследования нами использованы образцы с тавровыми сварными соединениями из алюминиевого сплава АМг6 и низкоуглеродистой стали Ст3, на которых моделировали образование бухтины с прогибом f (рис. 1). Они представляли собой пластину, к которой угловыми швами приваривали четыре ребра. Размеры пластин и ребер представлены на рис. 1, а. Исследовали формоизменения образцов из сплава АМг6 с равной толщиной δ пластины и ребер двух типоразмеров, соответствующих $\delta = 2,0$ и $4,0$ мм, и одного типоразмера стали Ст3 ($\delta = 2,0$ мм). При этом прогиб пластины f в направлении к ребрам принимали со знаком «+», а в направлении от ребер — со знаком «-». В образцах из сплава АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) прогиб задавали как в направлении к ребрам, так и от ребер, а в образцах из сплава АМг6 и стали Ст3 ($\delta = 2,0$ мм) — лишь в направлении к ребрам.

На основании [8], где приведены параметрические характеристики импульсов давления при электродинамических воздействиях, а также данных [9], где показано, что металл на внешней поверхности контакта с электродом подвержен сжатию в радиальном направлении в плоскости листа, можно заключить, что применение ЭДО целесообразно в зонах максимальной кривизны бухтины, а направление приложения электродинамического воздействия следует выбирать в сторону уменьшения f .

Угловые швы образцов из сплава АМг6 выполняли способом ручной сварки ТИГ в среде аргона при токе 130 А и скорости 1,3 мм/с с использованием присадочного прутка марки СВАМг6 диаметром 3,0 мм. С помощью различных сочетаний наложения валиков обеспечивали геометрические характеристики формообразования бухтины, соответствующие различным знакам f . Соединения образцов из стали Ст3 выполняли ручной сваркой покрытым электродом марки «Монолит РЦ» диаметром 3,0 мм при токе 120 А и скорости 1,5 мм/с.

ЭДО (рис. 2) выполняли с помощью плоского индуктора, укомплектованного электродом из меди марки М1, с полусферическим рабочим торцом, а в качестве генератора импульсов использовали емкостной накопитель энергии [6]. Режим ЭДО соответствовал запасенной энергии емкостного накопителя $E_{к1}$, необходимой для реализации оди-

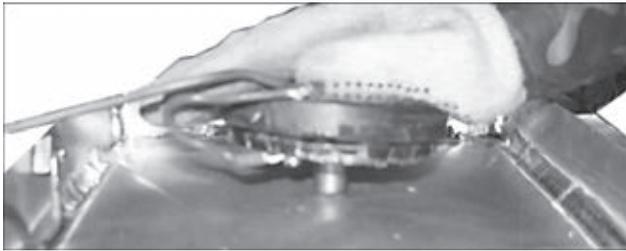


Рис. 2. ЭДО образцов с бухтиной из сплава АМг6 ($\delta = 2,0$ мм) ночного электродинамического воздействия ($n = 1$), не превышающей 800 Дж. Значение запасенной энергии $E_{\text{эдо}}$, необходимое для реализации серии из n электродинамических воздействий, рассчитывали из выражения

$$E_{\text{эдо}} = E_{\text{к1}} \cdot n. \quad (1)$$

Расстояние между зонами электродинамических воздействий изменяли от 10 (для стали Ст3) до 30 мм (для сплава АМг6), что обеспечивало стабильные результаты правки по длине обрабатываемого участка поверхности образца.

Исследовали влияние различных схем распределения электродинамических воздействий по поверхности образцов на формоизменение бухтин. Прогибы f в поперечном сечении образцов контролировали по стандартной методике с использованием строганой линейки и штангенциркуля. На образцах из сплава АМг6 толщиной 4,0 мм исследовали три схемы ЭДО поверхности образцов: точечную, круговую и спиральную в направлении от центра к краям.

Точечную ЭДО реализовывали посредством приложения серии из пяти электродинамических воздействий ($n = 5$) в центре пластины, где начальная бухтина имела характерную форму прогиба с максимальным начальным значением $f_{\text{max}} = -5$ мм (рис. 3, кривая 1) в направлении от ребер. Формоизменения бухтины в образце представлены на рис. 3, где зона ЭДО соответствует координате $x = 110$ мм на оси абсцисс. Как видим, максимальная эффективность ЭДО имеет место при $n = 1$, что соответствует $f = -4,0$ мм (рис. 3, кривая 2), и монотонно понижается до $f = -2,0$ мм при $n = 5$ (рис. 3, кривые 3–5). При $n = 3 \dots 5$ имеет место изменение характерной формы прогиба, что сопровождается снижением значений f в зоне обработки и их повышением за зоной, на участках, соответствующих координатам $x = 75$ и 125 мм. Это можно объяснить на основании теории нормального контакта неупругих тел [9] для случая взаимодействия полусферического индентора (в нашем случае — электрода) с упругопластической средой, где показано, что при контактных взаимодействиях деформируемый материал вытесняется индентором на свободную поверхность за зоной контакта. При этом имеет место пластическое течение вытесненного материала по краям

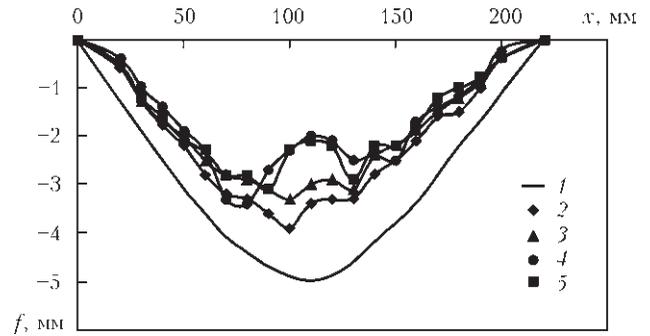


Рис. 3. Формоизменения бухтины f в образце из сплава АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) после ЭДО центра пластины: 1 — начальные значения f_{max} ; 2 — f после ЭДО при $n = 1$; 3 — f при $n = 2$; 4 — f при $n = 3$; 5 — f при $n = 4$ и 5

индентора. В цикле ЭДО, соответствующем $n > 3$, имеет место данный механизм, что характеризуется вытеснением металла за зону обработки и локальным искривлением поверхности бухтины на участках, соответствующих координатам $x = 75$ и 125 мм (рис. 3). Повторное пластическое течение в зоне контакта электрода, наблюдаемое при $n = 4 \dots 5$, происходит в условиях стесненной деформации и его влияние на профиль поверхности незначительное, что видно из подобия кривых 4, 5 на рис. 3. Кроме того, в [10] показано, что при ЭДО сплава АМг6 имеет место существенное увеличение значения $\sigma_{0,2}$, и взаимодействие бухтины с электродом при циклах обработки, соответствующих $n > 3$, переходит в упругую стадию без существенных остаточных формоизменений. Таким образом, схема локального многократного приложения электродинамических воздействий на фиксированном участке поверхности образца позволяет снижать исходные значения f не более чем на 60 %. Это не является эффективной схемой ЭДО, так как согласно нормам на местные деформации, например ОСТ 5.9079–72, допускаемые значения f должны соответствовать условию

$$f = a/80, \quad (2)$$

где a — размер шпации (расстояние между ребрами).

Для рассматриваемых в работе образцов допускаемое значение f не должно превышать 3,75 мм, что является близким к кривой 5 на рис. 3 и предельно возможным для точечной ЭДО. Преимуществом данной схемы является минимальное (по сравнению с другими схемами) количество запасенной энергии $E_{\text{эдо}}$ емкостного накопителя, необходимое для осуществления формоизменения, показанного на рис. 3, которое согласно (1) при $n = 5$ не превышает 4000 Дж.

Круговую схему ЭДО реализовывали посредством приложения трех серий электродинамических воздействий в форме концентрических окружностей с различным радиусом R на поверхности образца (рис. 4, а) с начальной бухтиной,

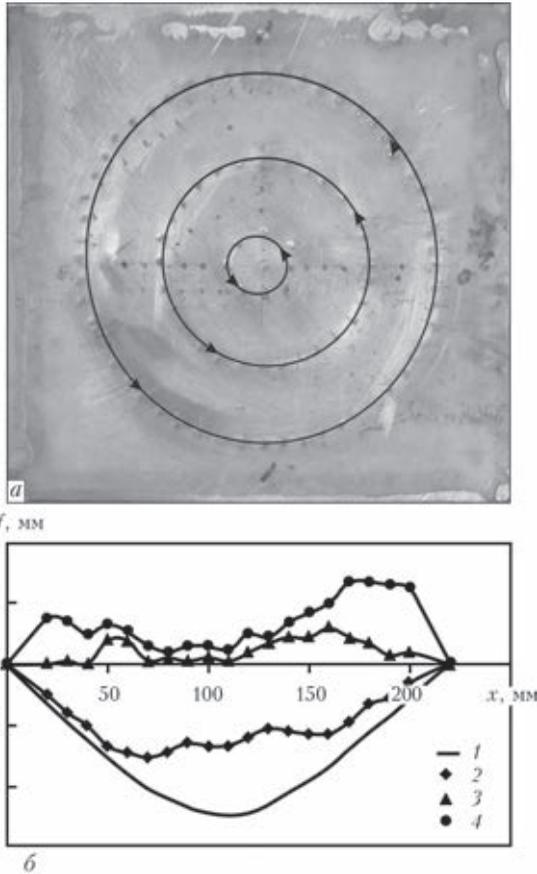


Рис. 4. Внешний вид (а) и формоизменения бухтины f (б) в образце из сплава АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) после круговой ЭДО при изменении радиуса R : 1 — начальные значения f_{\max} ; 2 — f после ЭДО при $R = 15$ мм; 3 — f при $R = 50$ мм; 4 — f при $R = 90$ мм

форма и значение f_{\max} (рис. 4, б, кривая 1) которой были аналогичны рассмотренной на рис. 3. Значения R были равны 15, 50 и 90 мм, а значения n и $E_{\text{эдо}}$ (согласно (1)) для ЭДО заданных окружностей составляли соответственно 8; 30; 55 и $6,4 \cdot 10^2$; $2,4 \cdot 10^4$; $4,4 \cdot 10^4$ Дж.

Как видно из рис. 4, б, значения f монотонно понижаются с увеличением R , что сопровождается изменением знака прогиба и постепенным изменением его формы от характерной до волнообразной. При $R = 15$ мм значения f (рис. 4, б, кривая 2) и формоизменения бухтины близки показанным на рис. 3 для точечной ЭДО при $n = 1 \dots 3$, что объясняется малым значением R . При увеличении R до 50 мм (рис. 4, б, кривая 3), что соответствует центральной области пластины, форма прогиба близка волнообразной при изменении знака, а значение f достигает 1 мм. ЭДО при $R = 90$ мм (рис. 4, б, кривая 4) проводили для изучения возможности устранения бухтин, значения f_{\max} которых превышают показанные на рис. 4, б. Использование схемы концентрических окружностей при дискретном возрастании значения R практически полностью позволяет устранить

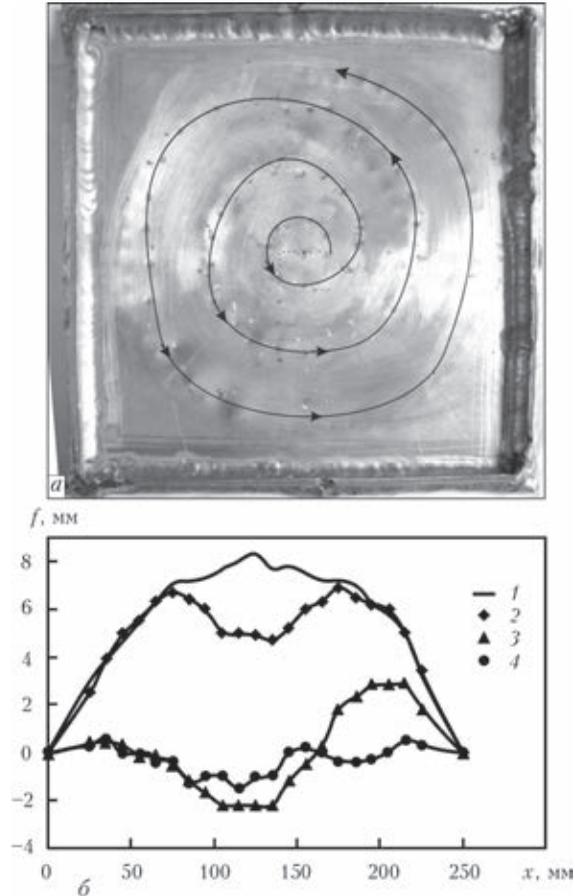


Рис. 5. Внешний вид (а) и формоизменения бухтины f (б) в образце из сплава АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) после спиральной ЭДО при изменении радиуса R : 1 — начальные значения f_{\max} ; 2 — f после ЭДО при $R = 15$ мм; 3 — f при $R = 50$ мм; 4 — f при $R = 90$ мм

местную деформацию, а также использовать данную схему при увеличенных f_{\max} .

Проанализировав данные рис. 4, б, можно заключить, что наиболее эффективной представляется ЭДО центральной части пластины при $R = 50$ мм по сравнению с $R = 15$ и 90 мм. В то же время, учитывая данные рис. 3, можно заключить, что использование ЭДО в широком диапазоне значений R может повысить эффективность электродинамических воздействий при увеличенных начальных значениях f и площади обрабатываемой поверхности.

Развитием двух предыдущих схем является спиральная ЭДО, реализуемая посредством приложения электродинамических воздействий к обрабатываемой поверхности в форме спирали с переменным радиусом R , которая расходится от центра к краям образца (рис. 5, а). При этом параболическую форму начальной бухтины задавали в направлении к ребрам, а значение f_{\max} (рис. 5, б, кривая 1) достигало 8 мм. Изменения f регистрировали при $R = 15, 50$ и 90 мм для сравнения с кольцевой ЭДО, показанной на рис. 4. Значения n и $E_{\text{эдо}}$ (1) для ЭДО при $R = 15, 50$ и 90 мм состав-



ляли соответственно 8; 30; 22 и $6,4 \cdot 10^2$; $2,4 \cdot 10^4$; $1,7 \cdot 10^4$ Дж.

Как видно из рис. 5, б, характер изменения формы и значений f близок к круговой схеме ЭДО без учета знака прогиба. При достижении $R = 15$ мм значения f (см. рис. 5, б, кривая 2) понижаются в центральной зоне бухтины с 8 до 5 мм при сохранении знака прогиба. При ЭДО средней части бухтины, соответствующей увеличению R до 50 мм (см. рис. 5, б, кривая 3), формоизменение изменяет характер от параболического к синусоидальному, что сопровождается монотонным нарастанием значений отрицательной полуволны амплитуды f от 0 до -2 , положительной — от 0,5 до 3,0 мм. Несимметричность формоизменения, представленная на рис. 5, б, кривая 3, устраняется при ЭДО в условиях нарастания R до 90 мм (кривая 4), при котором синусоида становится симметричной с размахом до 2,0 мм, а ее положительная полуволна не превышает 0,5 мм. Это согласно выражению (1) значительно ниже допускаемых значений f при используемой шпации $a = 300$ мм.

Наиболее эффективной с точки зрения понижения f , как и для варианта круговой схемы, является ЭДО центральной части пластины при нарастании R до 50 мм (см. рис. 5, б, кривая 3) по сравнению с $R = 15$ мм (см. рис. 5, б, кривая 2) и $R = 90$ мм (см. рис. 5, б, кривая 4). Следует отметить, что применение ЭДО в зоне напряжений сжатия у ребер ($R = 90$ мм) может вносить корректирующее воздействие, направленное на локальное выравнивание участков поверхности бухтины.

При сравнении схем ЭДО, приведенных на рис. 3–5, можно заключить, что наименее эффективной и энергоемкой является точечная схема, а круговая и спиральная сопоставимы по эффективности, но последняя для своей реализации требует меньшее значение E_k . Таким образом, наиболее целесообразной для правки местных деформаций бухтиноватости представляется спиральная схема ЭДО.

С использованием спиральной схемы, аналогичной показанной на рис. 5, проводили ЭДО образцов из сплава АМгб ($\delta = 2,0$ мм) и стали Ст3 ($\delta = 2,0$ мм). Для достижения показателей по снижению f_{\max} до значений, близких представленным



Рис. 6. Микроструктура стали Ст3 после ЭДО с прокладкой из меди М1 толщиной 0,5 мм: а — общий вид «лунки» ($\times 50$); б — центр «лунки» ($\times 200$); в — Ст3 в исходном состоянии ($\times 200$)

на рис. 5, потребовалось меньшее значение E_k для образца из сплава АМгб по сравнению с $\delta = 4,0$ мм в отличие от стали Ст3, где значение E_k существенно выше.

Сравниваемые данные по влиянию ЭДО на величину начального f_0 , остаточного $f_{\text{эдо}}$ прогибов при различных конфигурационных схемах ЭДО, а также соответствующие схемам значения ΣE_k после полного цикла обработки представлены в таблице. На основании данных f_0 и $f_{\text{эдо}}$ определены абсолютные значения изменения прогиба $\Delta f = f_0 - f_{\text{эдо}}$ и удельная энергоэффективность $\Sigma E_k / \Delta f$ при различных схемах ЭДО. Кроме того, в таблице также указаны значения ΣE_k при тепловой и ударной правке с подогревом площади поверхности конструкции из сплава АМг5 $\delta = 3,0 \dots 5,0$ мм, равной $0,9 \text{ м}^2$, что близко к геометрическим характеристикам исследуемых образцов.

Проанализировав данные таблицы, можно заключить, что значения ΣE_k при ЭДО значительно меньше ΣE_k , соответствующих традиционным видам правки (см. позиции № 6, 7) при равной площади обрабатываемой поверхности, что свидетельствует об удовлетворительной энергоэффективности процесса ЭДО. При этом даже наименее эффективная точечная схема ЭДО сплава

Значения прогибов $f_0, f_{\text{эдо}}$ и энергии ΣE_k при различных видах правки сплавов АМгб и стали Ст3

Номер позиции	Металл	Толщина δ , мм	Вид правки ЭДО	f_0 , мм	$f_{\text{эдо}}$, мм	ΣE_k , кДж	$\Sigma E_k / \Delta f$, кДж/мм
1	АМгб	4,0	Точечная	-5,0	-3,0	4,0	2
2	->-	4,0	Круговая	-5,0	1,0	74,4	12
3	->-	4,0	Спиральная	8,0	-1,0	47,4	5,2
4	->-	2,0	->-	8,0	-1,0	31,2	3
5	Ст3	2,0	->-	8,0	-2,0	115	11,5
6	АМг5	3,0...5,0	Ударная с подогревом	Нет свед.		41160	Нет свед.
7	->-	3,0...5,0	Тепловая	->-		15876	->-

Примечание. Значения ΣE_k (позиции № 6, 7) взяты из работы [1].

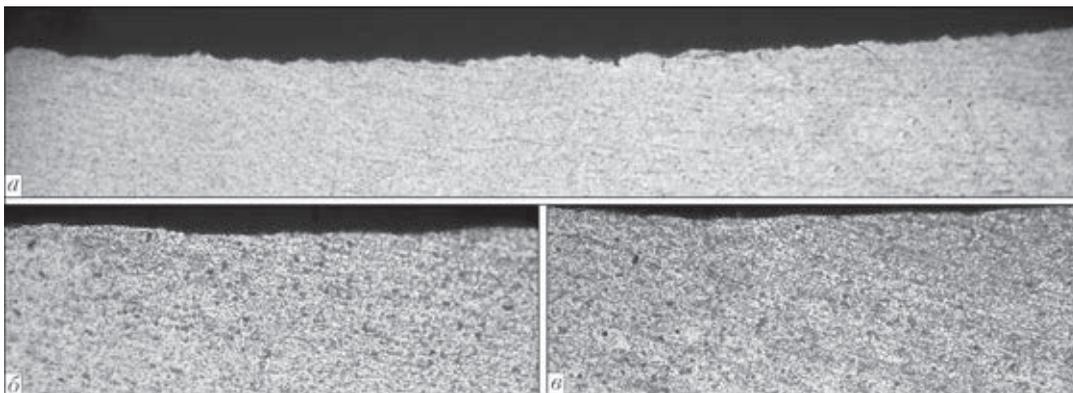


Рис. 7. Микроструктура сплава АМг6 после ЭДО с прокладкой из меди М1 толщиной 0,5 мм: *а* — общий вид «лунки» ($\times 25$); *б* — структура в зоне «лунки» ($\times 500$); *в* — сплав АМг6 ($\times 500$) в исходном состоянии

АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) при минимальных энергозатратах ΣE_k (позиция № 1) позволяет обеспечить понижение f_0 до соответствующих требованиям нормативных документов, например ОСТ 5.9079–72. В то же время для сплава АМг6 ($\delta = 2,0$ мм) значения затрат энергии на 1 мм прогиба $\Sigma E_k / \Delta f$ при спиральной схеме (позиция № 4) близки к $\Sigma E_k / \Delta f$ при точечной для $\delta = 4,0$ мм (позиция № 1). При сравнении $\Sigma E_k / \Delta f$ круговой (позиция № 2) и спиральной (позиция № 3) ЭДО сплава АМг6 ($\delta = 4,0$ мм) видно, что последняя требует в два раза меньше затрат при примерно равной производительности процесса.

Наиболее затратной по уровню запасенной энергии является ЭДО стали Ст3 при $\delta = 2,0$ мм (позиция № 5), где показатели ΣE_k и $\Sigma E_k / \Delta f$ в четыре раза превышают аналогичные для сплава АМг6 при равной толщине (позиция № 4), а значения $\Sigma E_k / \Delta f$ сопоставимы с круговой схемой для сплава АМг6 при $\delta = 4,0$ мм.

На основании данных [6] можно заключить, что электроимпульсные воздействия в целом положительно влияют на структуру конструкционных материалов. В то же время на локализованных участках зоны электродинамических воздействий образуются полусферические лунки глубиной до 0,3 мм, которые в ряде случаев могут влиять на эксплуатационные характеристики судовых корпусов. Исходя из этого оптимизация технологии ЭДО направлена на уменьшение глубины поверхности в зоне контактного взаимодействия.

Исследован метод минимизации глубины лунки, основанный на применении технологических прокладок из меди марки М1, устанавливаемых между электродом и обрабатываемым металлом.

Фрагменты структуры стали Ст3, обработанные при энергии импульса $E_k = 800$ Дж через медную прокладку толщиной 0,5 мм, представлены на рис. 6. В зоне ЭДО сформировалась лунка (см. рис. 6, *а*) глубиной 0,1 мм, на поверхности которой структурных изменений металла не выявлено.

Изучение структуры металла в зоне ЭДО в центре лунки (см. рис. 6, *б*) показало ее идентичность ферритно-перлитной структуре исходного металла (см. рис. 6, *в*).

После ЭДО алюминиевого сплава АМг6 с использованием прокладок толщиной 0,5 мм на поверхности металла сформировалась лунка (рис. 7, *а*) глубиной до 0,3 мм, на поверхности которой изменений структуры не обнаружено. Микроструктура металла после ЭДО (рис. 7, *б*) и в исходном состоянии (рис. 7, *в*) состоит из твердого α -раствора, в котором наблюдали включения β -фазы (Mg_5Al_8) и фазы Mg_2Si .

Таким образом, применение медных прокладок, практически полностью устраняющее влияние ЭДО на структуру поверхности обрабатываемых материалов и минимизирующее глубину лунки (рис. 6, 7), может быть рекомендовано для технологий ЭДО, при которых допускается минимальная повреждаемость обрабатываемой поверхности сварных судовых корпусов.

Выводы

1. Проведены исследования влияния различных схем ЭДО на снижение местных деформаций типа бухтина образцов из сплава АМг6 и стали Ст3, в частности, точечную, круговую и спиральную в направлении от центра к краям. Установлено, что наименее эффективной и энергоемкой является точечная схема, а круговая и спиральная сопоставимы по эффективности, но последняя требует для своей реализации меньших энергетических затрат. Наиболее целесообразной для правки местных деформаций бухтиноватости представляется спиральная ЭДО.

2. На основании данных сравнительного анализа установлено, что энергетические затраты при ЭДО значительно меньше, чем при традиционных методах правки таких, как тепловая и ударная с подогревом.



3. С помощью металлографического анализа микрошлифов сплава АМг6 и стали Ст3 установлено, что применение технологических прокладок из меди марки М1 при ЭДО практически полностью исключает влияние электродинамических воздействий на структуру обрабатываемого металла.

1. Михайлов В. С. Правка судовых сварных корпусных конструкций. – М.: Судостроение, 1972. – 152 с.
2. Махненко О. В., Мужиченко А. Ф., Зайфферт П. Применение математического моделирования при термической правке судостроительных панелей // Автомат. сварка. – 2009. – № 1. – С. 10–16.
3. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field / F.Tang, A. L. Lu, J. F. Mei et al. // J. Mat. Proc. Technol. – 1998. – 74. – P. 255–258.
4. Антонов Ю. А., Рогозин Ю. И. Импульсный метод снятия остаточных напряжений // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 3. – С. 91–95.

5. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. – 2004. – № 4. – С. 60–67.
6. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: Ин-т проблем прочности НАНУ, 2008. – 504 с.
7. Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Миходуй О. Л. Электродинамическая правка элементов тонколистовых сварных конструкций // Автомат. сварка. – 2013. – № 9. – С. 19–25.
8. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, О. Л. Миходуй и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 3–8.
9. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
10. Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Миходуй О. Л. Влияние условий нагружения на сопротивление деформированию сплава АМг6 при электродинамической обработке // Пробл. прочности. – 2012. – № 5. – С. 15–26.

Поступила в редакцию 20.06.2014



VIII Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

20-22 мая 2015

пгт Ворзель, Киевская обл.

*Конференция посвящается памяти
доктора технических наук Леонида Сергеевича Киреева,
инициатора проведения научно-технической конференции молодых ученых
и специалистов «Сварка и родственные технологии»*

Совет научной молодежи ИЭС при поддержке Института электросварки им. Е. О. Патона и Национальной академии наук Украины планируют провести с 20 по 22 мая 2015 года VIII Международную научно-техническую конференцию молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии». Для участия в работе конференции приглашаются молодые ученые до 35 лет (студенты, специалисты, аспиранты, докторанты, инженеры и научные сотрудники).

В рамках конференции запланировано проведение ряда научных школ по тематике конференции, в том числе следующие мероприятия: лекции и доклады ведущих украинских и зарубежных ученых; выступления молодых ученых; конкурс докладов молодых ученых; посещение отделов и лабораторий ИЭС; экскурсии по Киеву.

Участие в конференции бесплатное. Проживание и проезд оплачиваются участниками самостоятельно.

Место проведения: Киевская обл., пгт Ворзель, ул. Ленина, 1, кардиологический санаторий «Ворзель» НАН Украины.

Основные направления конференции:

- ♦ прогрессивные технологии сварки и соединения материалов;
- ♦ прочность, надежность и долговечность сварных конструкций;
- ♦ технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхностей;
- ♦ процессы специальной электрометаллургии;
- ♦ новые конструкционные и функциональные материалы;
- ♦ техническая диагностика и неразрушающий контроль;
- ♦ автоматизация процессов сварки и родственных технологий;
- ♦ исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, коррозия);
- ♦ математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах;
- ♦ технологии термической резки материалов;
- ♦ материаловедение (структура и свойства наноматериалов, композитных материалов, биоматериалов, полимеров, керамики, полупроводников);
- ♦ нанотехнологии в сварке и родственных процессах;
- ♦ оборудование и источники питания для сварки и родственных технологий.

Контакты: 03680, Украина, г. Киев, ул. Боженко, 11,
Совет научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.
E-mail: wrtys2015@gmail.com; www: <http://paton.kiev.ua/wrtys2015>
тел.: +38 (044) 200-47-83; факс: +38 (044) 528-04-86



ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВНУТРИКОРПУСНОЙ ШАХТЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

О. В. МАХНЕНКО, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, И. В. МИРЗОВ

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

Выгородка реактора подвержена высоким дозам радиационного облучения, что при эксплуатации приводит к ее распуханию и формоизменению. Давление выгородки на шахту изнутри создает дополнительные напряжения в зоне контакта. Остаточные сварочные напряжения также могут существенно влиять на уровень напряженного состояния стенки шахты, что необходимо учитывать при оценке работоспособности внутрикорпусного устройства при продлении срока эксплуатации реактора ВВЭР-1000. Таким образом, актуальной задачей является оценка напряженного состояния в области ее контакта с выгородкой, особенно если место контакта совпадает с зоной сварного соединения. Целью настоящей работы является изучение напряженного состояния в зоне сварных швов внутрикорпусной шахты реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации с учетом радиационного распухания и контактного взаимодействия выгородки и шахты. Задача решена методом конечных элементов в двухмерной постановке с применением современных математических моделей радиационного распухания и изменения механических свойств стали 08X18H10T. Расчеты показывают, что влияние одних лишь температурных деформаций не вызывает высоких напряжений в стенке шахты. Степень перераспределения напряжений в стенке шахты за счет радиационного распухания зависит от остаточных сварочных напряжений. Наибольший вклад в напряженное состояние стенки внутрикорпусной шахты за 60 лет эксплуатации дают окружные и осевые напряжения, обусловленные контактным взаимодействием шахты с выгородкой. Напряжения в сварных швах внутрикорпусной шахты в конце продленного срока эксплуатации (60 лет) близки к значениям предела текучести облученного материала. Остаточные сварочные напряжения могут существенно влиять на уровень напряженного состояния стенки шахты, что следует учитывать при оценке работоспособности внутрикорпусного устройства при продлении срока эксплуатации реактора ВВЭР-1000. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: внутрикорпусная шахта, реактор ВВЭР-1000, внутрикорпусное устройство, остаточные сварочные напряжения, радиационное облучение, 08X18H10T, продление ресурса

Внутрикорпусная шахта реактора ВВЭР-1000 является сварной конструкцией цилиндрической формы и изготавливается из аустенитной стали 08X18H10T. Расположение шахты в корпусе реактора и ее чертеж приведены на рис. 1. На уровне установки выгородки активной зоны внутрикорпусная шахта имеет внешний радиус 1805 мм и толщину стенки 60 мм.

Выгородка реактора подвержена высоким дозам радиационного облучения, что в процессе эксплуатации приводит к ее распуханию и формоизменению. В исходном состоянии зазор между кольцами выгородки и шахтой составляет 2,5 мм. По результатам расчетов [1] не исключается контакт выгородки и внутрикорпусной шахты в процессе эксплуатации. Давление выгородки на шахту изнутри приводит к возникновению дополнительных напряжений в зоне контакта. Остаточные сварочные напряжения также могут существенно влиять на уровень напряженного состояния стенки шахты, что следует учитывать при оценке работоспособности внутрикорпусного устройства (ВКУ) при продлении срока эксплуатации реактора ВВЭР-1000. Таким образом, актуальной задачей является

оценка напряженного состояния во внутрикорпусной шахте в области ее контакта с выгородкой, особенно если место контакта совпадает с зоной сварного соединения. Стоит заметить, что радиационному распуханию подвержена также стенка

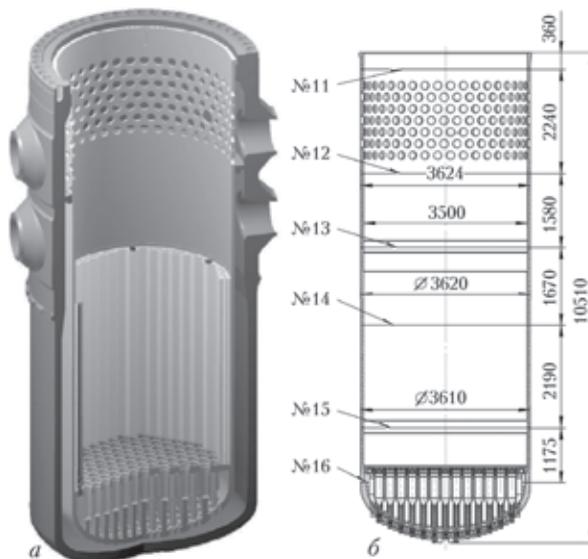


Рис. 1. Расположение внутрикорпусной шахты в устройстве реактора ВВЭР-1000 (а) и ее чертеж (б)



шахты, однако повреждающая доза в ней на порядок ниже, чем в выгородке.

Целью настоящей работы является изучение напряженного состояния в зоне сварных швов внутрикорпусной шахты реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации с учетом радиационного распухания и контактного взаимодействия выгородки и шахты.

Первоначально эта проблема была изучена в [2]. В настоящей работе усовершенствованы математические модели радиационного распухания и механических свойств материала ВКУ, уточнены значения объемных тепловыделений и повреждающей дозы в шахте, разработана численная модель расчета напряженно-деформированного состояния при контакте выгородки и шахты, а также смоделированы остаточные сварочные напряжения в сварных швах внутрикорпусной шахты.

Методика исследований. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач. Вначале рассмотрена свободная шахта без учета ее контакта с выгородкой, чтобы понять, каким образом на ее напряженное состояние влияют эксплуатационные температурные поля и радиационное распухание. Во второй задаче учитывается контакт с выгородкой. Следующие две задачи аналогичны первым, но в них рассмотрена шахта с остаточными сварочными напряжениями, которые имеют упрощенное распределение.

Решение этих задач дает понимание того, как перераспределяются остаточные сварочные напряжения в шахте и каким образом они суммируются с напряжениями от контактного взаимодействия выгородки и шахты. Последняя задача включает весь опыт предыдущих задач, но в шахте уже рассмотрены реальные поля остаточных сварочных напряжений, полученные в ходе отдельного численного расчета.

Все задачи решены методом конечных элементов в двухмерной постановке в условии обобщенной плоской деформации. Материал ВКУ — сталь 08X18H10T. Использована модель идеальной пластичности. Задача оценки напряженно-деформированного состояния в условиях радиационной ползучести с распуханием решена с пересчетом напряжений и деформаций на каждом шаге прослеживания. При контакте не учтен теплообмен между выгородкой и шахтой, их контактное взаимодействие оказывает влияние на напряженное состояние как шахты, так и выгородки, оба ВКУ моделируются одновременно с начальным зазором 2,5 мм. Внутреннее давление в корпусе реактора 16 МПа.

Торможение тяжелых частиц в металле ВКУ вызывает подогрев материала. Мощность объемных тепловыделений в шахте меняется линейно от 5,0 (на внутренней поверхности) до 0,5 Вт/см³ (на

Таблица 1. Теплофизические свойства стали 08X18H10T [1]

T, °C	E, ГПа	α' , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	c_p , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	ρ , кг/м ³
20	205	16,2	16,6	478	7900
100	200	16,6	17,2	495	7862
200	190	17,0	18,0	516	7821
300	180	17,4	18,7	537	7778
400	170	17,8	19,4	558	7732
500	165	18,2	20,1	579	7684
600	160	18,5	20,8	600	7634

Таблица 2. Температура теплоносителя и коэффициенты теплопередачи для различных поверхностей шахты [1]

Поверхность шахты	Температура на поверхности, °C	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)
Наружная	291,7	15900
Внутренняя	320	39017

внешней). Скорость набора повреждающей дозы в шахте также меняется линейно от 0,2 (на внутренней поверхности) до 0,02 сна/год (на внешней). Теплофизические свойства стали 08X18H10T, приведенные в табл. 1, применимы как для основного металла, так и для металла сварного шва. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Механические свойства основного металла стали 08X18H10T и сварных швов зависят от температуры и дозы облучения и описаны в [3]. Ниже приведена модель, описывающая изменение механических свойств стали 08X18H10T в зависимости от температуры и повреждающей дозы.

Предел текучести основного металла

$$\sigma_{0,2}(T, D) = \begin{cases} \sigma_{0,2}^0(T) + \Delta\sigma_{0,2}^T(T, D), & D < D^* \\ \sigma_{0,2}^*(T) + \Delta\sigma_{0,2}^*(D), & D \geq D^* \end{cases}$$

$$\sigma_{0,2}^0(T) = 155 + 239 \exp(-2,22 \cdot 10^{-3}(T + 273)) \text{ (МПа)},$$

$$\Delta\sigma_{0,2}^T(T, D) = (\sigma_{0,2}^*(T) - \sigma_{0,2}^0(T)) \times \frac{\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D)}}{\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D^*)}}$$

$$\sigma_{0,2}^*(T) = 650 + 1405 \exp(-5,9 \cdot 10^{-3}(T + 273)) \text{ (МПа)},$$

$$\Delta\sigma_{0,2}^*(D) = A_{\sigma_{0,2}} \times \left(\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D)} - \sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D^*)} \right),$$

$$D^* = 7 \text{ сна}, C_{\sigma_{0,2}} = 0,126 \text{ сна}^{-1},$$

$$A_{\sigma_{0,2}} = 621 \text{ МПа}.$$

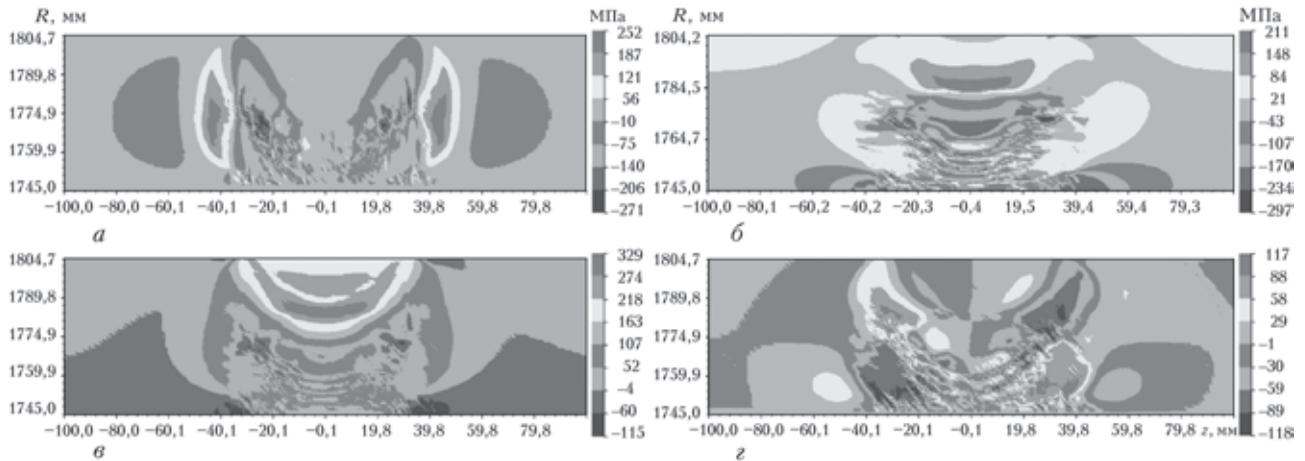


Рис. 2. Остаточные сварочные напряжения в шахте реактора ВВЭР-1000 в цилиндрической системе координат: а — σ_{rr} ; б — $\sigma_{\phi\phi}$; в — σ_{zz} ; г — $\sigma_{r\phi}$

Предел текучести металла сварного шва

$$\sigma_{0,2}(T, D) = \sigma_{0,2}^0(T) + \Delta\sigma_{YG}(D) \text{ (МПа)},$$

$$\sigma_{0,2}^0(T) = 255 + 420 \exp(-2,22 \cdot 10^{-3}(T + 273)) \text{ (МПа)},$$

$$\Delta\sigma_{YG}(D) = 498\sqrt{1 - \exp(-0,3D)} \text{ (МПа)}.$$

Предел прочности основного металла

$$\sigma_B(T, D) = \sigma_B^0(T) + \Delta\sigma_B(D) \text{ (МПа)},$$

$$\sigma_B^0(T) = 350 + 247 \exp(-6,6 \cdot 10^{-3}T) \text{ (МПа)},$$

$$\Delta\sigma_B(D) = 483\sqrt{1 - \exp(-0,11D)} \text{ (МПа)}.$$

Предел прочности металла сварного шва

$$\sigma_B(T, D) = \sigma_B^0(T) + \Delta\sigma_B(D) \text{ (МПа)},$$

$$\sigma_B^0(T) = 439 + 222 \exp(-9,74 \cdot 10^{-3}T) \text{ (МПа)},$$

$$\Delta\sigma_B(D) = 440\sqrt{1 - \exp(-0,25D)} \text{ (МПа)}.$$

Для нахождения стационарной температуры в стенке внутрикорпусной шахты решалась температурная задача с граничными условиями третьего рода. Температура теплоносителя и значения коэффициентов теплопередачи для различных поверхностей шахты приведены в табл. 2.

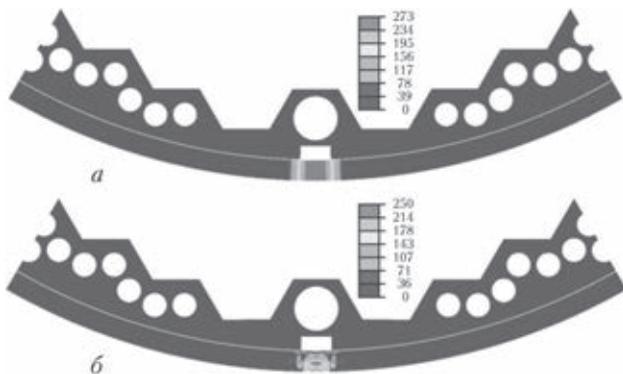


Рис. 3. Интенсивность напряжений (в МПа) в продольном сварном шве в шахте в исходном состоянии: а — упрощенная задача; б — смоделированные остаточные сварочные напряжения

Численный расчет объемных деформаций распухания проводили в соответствии с [4]. Эта математическая модель учитывает зависимость распухания от радиационной дозы, температуры, вида напряженного состояния, значений напряжений и радиационной ползучести. Ниже приведены основные соотношения и параметры этой модели:

$$\frac{d\varepsilon_{eq}^c}{dt} = \left(B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \frac{dS}{dt} \right) \sigma_{eq}, d\varepsilon_{eq}^c > 0, \varepsilon_{eq}^c \Big|_{t=0} = 0,$$

$$\frac{dS}{dt} = C_D n D_i^{n-1} f_0(T) f_1(\sigma_m) f_3(\alpha) dD, dS > 0, S \Big|_{t=0} = 0;$$

$$f_0(T) = \exp(-r(T - T_{max})^2),$$

$$f_1(\sigma) = 1 + 8 \cdot 10^{-3} (0,85\sigma_m + 0,15\sigma_{eq}),$$

$$f_3(\alpha) = \exp(-\eta\alpha);$$

$$B_0 = 10^{-6} \text{ сна}^{-1}, \omega = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1},$$

$$C_D = 1,035 \cdot 10^{-4} \text{ сна}^{-n}, n = 1,88,$$

$$r = 1,825 \cdot 10^{-4} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-2},$$

$$T_{max} = 470^\circ\text{C}, P = 4 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}, \eta = 8,75,$$

где S — распухание; D — повреждающая доза; σ_m — средние напряжения; α — параметр Одквиста.

Поля остаточных сварочных напряжений в шахте получены расчетным методом с применением пакета WeldPredictions, разработанного сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Проведено моделирование продольного многопроходного сварного соединения (шесть проходов) цилиндрической обечайки с внутренним диаметром $D_{вн} = 3490$ мм, толщиной $\delta = 60$ мм с разделкой $30^\circ_{вн}$ для следующего режима: $I = 200$ А, $U = 17$ В, $v_{св} = 3$ мм/с (погонная энергия $Q_{п} = 850$ Дж/мм, коэффициент эффективности 0,75). Краевую задачу определения кинетики напряженно-деформированного состояния решали в цилиндрической системе координат методом конечных элементов (размер элемента 1×1 мм) путем последовательного прослеживания



упругопластических деформаций от начала сварки первого прохода до остывания после шестого прохода с учетом условия текучести Мизеса. Результаты расчета полей остаточных напряжений приведены на рис. 2.

В данном исследовании рассмотрен вертикальный сварной шов, находящийся из-за консервативных предположений в области контакта выгородки и шахты (см. рис. 3).

Остаточные сварочные напряжения для упрощенных задач содержат лишь осевую компоненту. Напряжение в шахте падает от 270 до 0 МПа при удалении по окружной координате от центра большого канала выгородки (см. рис. 3, а).

Результаты и обсуждение. Поле объемных деформаций распухания выгородки после 60 лет эксплуатации реактора показано на рис. 4. Вследствие неравномерного распухания выгородка деформируется в радиальном направлении. Радиальные перемещения максимальны в районе большого канала. Эта же область воздействует на внутрикорпусную шахту при ее соприкосновении с выгородкой.

Распределение температуры по толщине стенки шахты в режиме нормальной эксплуатации (НЭ) реактора для задач 1–5 показано на рис. 5. Шахта разогревается за счет торможения тяжелых частиц в металле, внутренняя и наружная поверхности шахты охлаждаются водой, поэтому

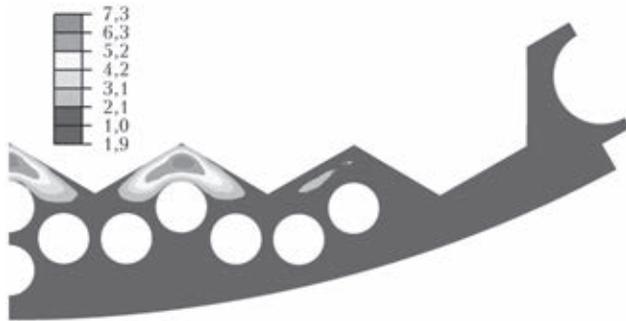


Рис. 4. Поле объемных деформаций распухания выгородки после 60 лет эксплуатации реактора. Расчет проведен с учетом радиационной ползучести [4]

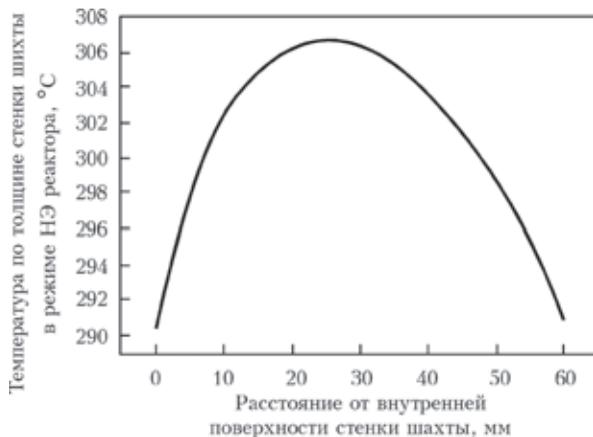


Рис. 5. Распределение температуры по толщине стенки шахты в режиме НЭ реактора

максимум температуры находится внутри стенки и составляет 306 °С. Температура на внутренней и внешней поверхностях примерно одинакова и равна 290 °С. Предел текучести материала сварного шва в шахте под действием радиационного облучения за 60 лет эксплуатации установился на уровне 850 (на внутренней поверхности) и 500 МПа (на внешней) и меняется линейно по толщине. Внутрикорпусная шахта имеет форму цилиндра, поэтому напряженно-деформированное состояние ВКУ рассмотрим в цилиндрической системе координат, ось которой сонаправлена с осью шахты.

1. *Свободная шахта: нагрев, облучение, охлаждение.* Неравномерный прогрев обуславливает возникновение напряжений в стенке шахты. Качественное перераспределение окружных и осевых напряжений похоже, поэтому приведем только осевые напряжения в течение эксплуатации (рис. 6). Радиальные напряжения примерно постоянны по толщине стенки и составляют 16 МПа, что обусловлено внутренним давлением в реакторе.

Так как температура на внутренней и внешней поверхностях стенки шахты ниже, чем во внутренней области, напряжения на поверхностях растягивающие (рис. 6, кривая 2), внутри стенки наблюдается сжатие. Радиационное облучение в процессе эксплуатации реактора вызывает распухание материала на внутренней поверхности стенки шахты (~0,01 %), что снижает растягивающие напряжения в этой области (рис. 6, кривые 3, 4). Из условия равновесия растягивающие напряжения на внешней поверхности незначительно увеличиваются. Остановка реактора в конце срока эксплуатации снимает температурные деформации, однако перераспределение напряжений, вызванных радиационным распуханием материала, остается (рис. 6, кривая 5).

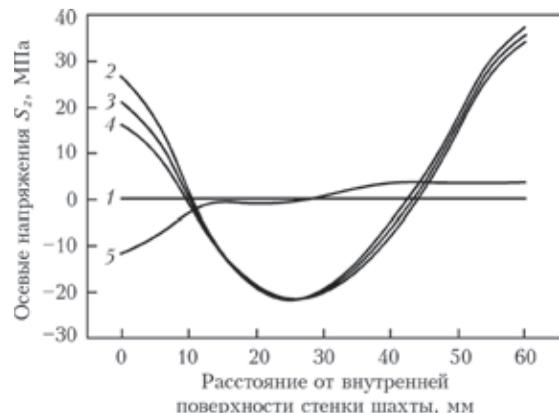


Рис. 6. Перераспределение осевых напряжений по толщине стенки шахты реактора в процессе эксплуатации: здесь и далее 1 — исходное состояние; 2 — выход на режим НЭ; 3, 4 — после 30 и 60 лет облучения соответственно; 5 — остановка реактора после 60 лет

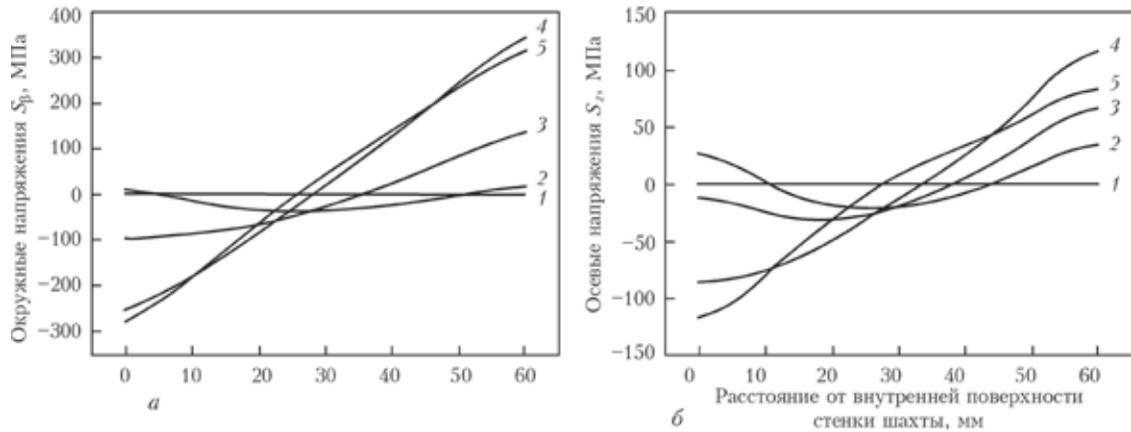


Рис. 7. Перераспределение окружных (а) и осевых (б) напряжений по толщине стенки шахты реактора в процессе эксплуатации с учетом контакта с выгородкой

Таким образом, радиационное распухание материала стенки шахты вызывает снижение напряжений на внутренней поверхности на 10 МПа, что из условия равновесия сопровождается их незначительным ростом на внешней поверхности стенки шахты. Температурные деформации в стенке шахты вызывают напряжения на уровне ± 30 МПа.

2. *Контакт шахты с выгородкой: нагрев, облучение, охлаждение.* Выгородка под действием радиационного облучения распухает, что приводит к ее формоизменению и контакту с шахтой на 25-м году эксплуатации (в «горячем» состоянии). На рис. 7 показано перераспределение окружных и осевых напряжений в шахте реактора в процессе эксплуатации с учетом контакта с выгородкой. Значения напряжений снимались по толщине стенки шахты в области соприкосновения с выгородкой. Кривые 3–5 на рис. 7 показывают, что давление выгородки на стенку шахты изнутри способствует возникновению сжимающих окружных и осевых напряжений на внутренней поверхности, а также росту растягивающих окружных и осевых напряжений на наружной поверхности шахты.

Давление выгородки на шахту не вызывает значительного роста радиальных напряжений. Сжимающие и растягивающие окружные напряжения

намного больше, чем соответствующие осевые, и после 60 лет эксплуатации реактора достигают -280 МПа (сжатие) на внутренней поверхности шахты и $+340$ МПа (растяжение) — на внешней. В то же время осевые напряжения на внутренней поверхности стенки шахты составляют -110 , на внешней — $+100$ МПа.

3. *Упрощенное сварное соединение. Свободная шахта: нагрев, облучение, охлаждение.* Чтобы понять, каким образом перераспределяются сжимающие и растягивающие остаточные сварочные напряжения в шахте в процессе эксплуатации реактора, были решены две задачи, в которых остаточные сварочные напряжения в упрощенных швах имели различные знаки. Перераспределение упрощенных остаточных сварочных напряжений в шахте реактора при эксплуатации показано на рис. 8. Снижение (релаксация) растягивающих осевых остаточных сварочных напряжений на рис. 8, а при эксплуатации реактора объясняется радиационным распуханием материала вблизи внутренней поверхности стенки шахты. По этой же причине сжимающие осевые остаточные сварочные напряжения растут по абсолютной величине (рис. 8, б). В этой задаче степень влияния деформаций распухания на напряжения значительно

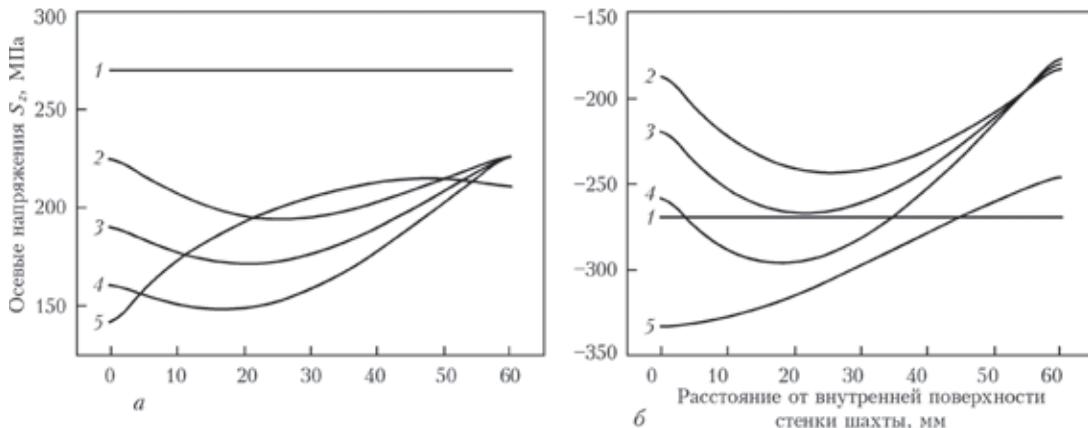


Рис. 8. Перераспределение упрощенных остаточных сварочных напряжений по толщине стенки шахты реактора в процессе эксплуатации: а — растягивающие; б — сжимающие осевые напряжения

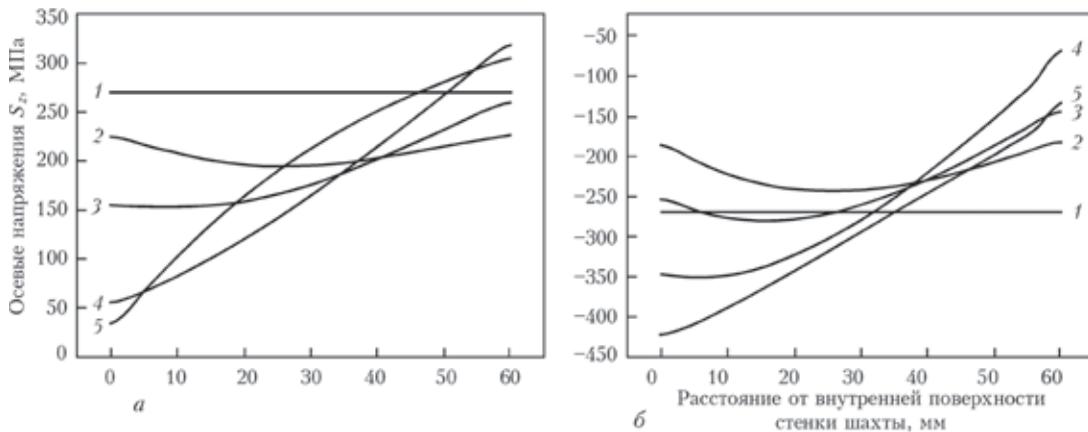


Рис. 9. Перераспределение упрощенных остаточных сварочных напряжений по толщине стенки шахты реактора в процессе эксплуатации с учетом давления выгорodka: *a* — растягивающие; *б* — сжимающие осевые напряжения

выше, чем в случае отсутствия сварного соединения в стенке шахты (задача № 1). Это объясняется зависимостью распухания от напряженного состояния. За 60 лет в стенке шахты растягивающие осевые напряжения снизились на 125 МПа на внутренней и на 60 МПа на внешней поверхности. В то же время сжимающие осевые напряжения выросли на 85 МПа на внутренней поверхности и уменьшились на 20 МПа на внешней поверхности шахты.

4. Упрощенное сварное соединение. Контакт шахты с выгорodka: нагрев, облучение, охлаждение. Как и в задаче № 3, рассмотрим перераспределение растягивающих (рис. 9, *a*) и сжимающих (рис. 9, *б*) упрощенных остаточных сварочных напряжений в шахте при эксплуатации реактора. В этой задаче учитываем контактное взаимодействие внутрикорпусной шахты с выгорodka. Фактически данная задача является суперпозицией задач № 2, 3 и изменение напряженного состояния можно оценить исходя из их решения. На внутренней поверхности растягивающие осевые напряжения (рис. 9, *a*) снижаются в результате радиационного распухания и давления выгорodka на $125 + 110 = 235$ МПа, на внешней поверхности шахты растут на $-60 + 100 = 40$ МПа. На

внутренней поверхности сжимающие осевые напряжения (рис. 9, *б*) увеличиваются из-за радиационного распухания и давления выгорodka на $85 + 110 = 195$ МПа, на внешней поверхности шахты снижаются на $20 + 100 = 120$ МПа.

5. Контакт с выгорodka: нагрев, облучение, охлаждение. Картина напряжений в сварном шве. Перераспределение смоделированных остаточных сварочных окружных и осевых напряжений в шахте реактора в процессе эксплуатации показано на рис. 10. Учтен контакт с выгорodka. После 60 лет эксплуатации реактора максимальные напряжения в сварном шве внутрикорпусной шахты — окружные и осевые, что обусловлено давлением выгорodka. Их распределения приведены на рис. 11.

Как и в задачах № 2 и 4, давление выгорodka на шахту способствует росту сжимающих окружных и осевых напряжений на внутренней поверхности шахты и растягивающих окружных и осевых напряжений — на внешней поверхности (рис. 10).

Окружные напряжения в зоне сварного шва достигают значений (440 МПа, рис. 11, *a*), близких к пределу текучести облученного материала стенки шахты.

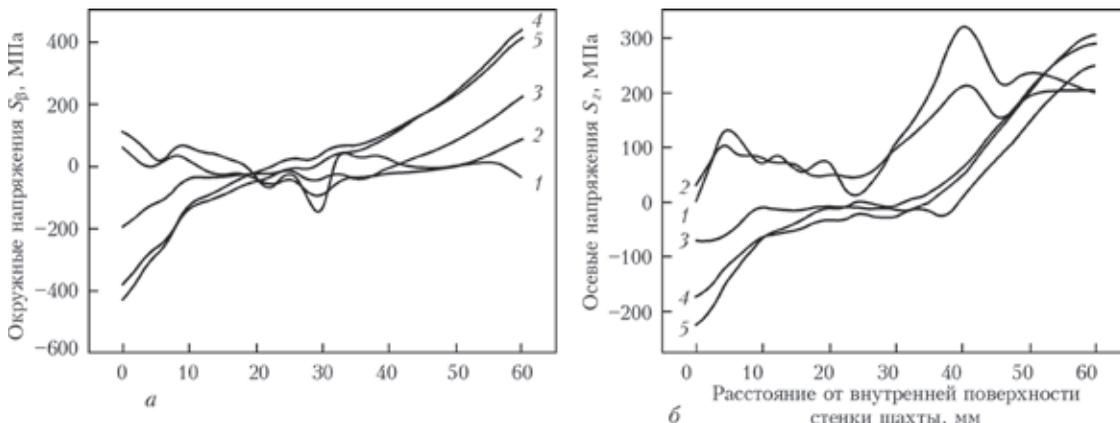


Рис. 10. Перераспределение окружных (*a*) и осевых (*б*) напряжений в зоне упрощенного сварного шва внутрикорпусной шахты реактора в процессе эксплуатации с учетом контакта с выгорodka

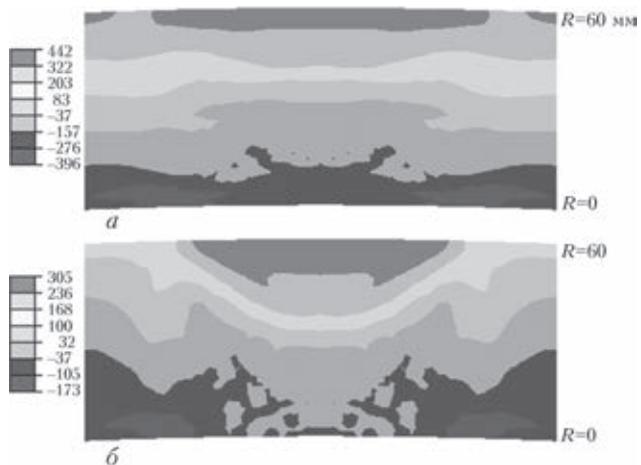


Рис. 11. Распределение окружных (а) и осевых (б) напряжений (в МПа) в зоне сварного шва внутрикорпусной шахты реактора в конце продленного срока эксплуатации (60 лет) с учетом контакта с выгородкой

Выводы

1. При выходе на режим НЭ реактора в результате температурных деформаций в стенке шахты возникают напряжения на уровне ± 30 МПа.
2. Радиационное распухание без учета остаточных сварочных напряжений за 60 лет эксплуатации вызывает изменение напряжений в пределах ± 10 МПа.
3. В зоне сварных соединений стенки шахты перераспределение напряжений за счет радиационного распухания зависит от уровня остаточных сварочных напряжений. Снижение остаточных

растягивающих напряжений может достигать 125 МПа.

4. Наибольший вклад в напряженное состояние стенки внутрикорпусной шахты за 60 лет эксплуатации может вносить контактное взаимодействие шахты с выгородкой (до 340 МПа).

5. Окружные напряжения в зоне сварных швов внутрикорпусной шахты в конце продленного срока эксплуатации (60 лет) с учетом остаточных сварочных напряжений и контакта с выгородкой могут достигать высоких значений (440 МПа), близких к пределу текучести облученного материала.

6. Остаточные сварочные напряжения могут существенно влиять на уровень напряженного состояния стенки шахты, что необходимо учитывать при оценке работоспособности ВКУ при продлении срока эксплуатации реактора ВВЭР-1000.

1. Махненко О. В., Мирзов И. В. Исследование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций из аустенитной стали в условиях радиационного облучения // Автомат. сварка. – 2013. – № 1. – С. 7–12.
2. Сварные конструкции из аустенитной стали типа 10X18H10T в условиях радиационного распухания / В. И. Махненко, О. В. Махненко, С. С. Козлитина и др. // Там же. – 2012. – № 2. – С. 7–12.
3. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР / А. А. Сорокин, Б. З. Марголин, И. П. Куревич и др. // Вопр. материаловедения. – 2011. – № 2. – С. 131–151.
4. Марголин Б. З., Мурашова А. И., Неустроев В. С. Анализ влияния вида напряженного состояния на радиационное распухание и радиационную ползучесть аустенитных сталей // Пробл. прочности. – 2012. – № 3. – С. 5–24.

Поступила в редакцию 13.02.2014

15-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ»

23–27 февраля 2015

г. Свалява, Карпаты, Украина

Организатор: Всеукраинская общественная организация
Ассоциация технологов-машиностроителей Украины

Тематика семинара

- Современные тенденции развития технологии машиностроения
- Подготовка производства как основа создания конкурентоспособной продукции
- Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки в машино- и приборостроении
- Упрочняющие технологии и покрытия
- Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве
- Ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления
- Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий

04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2. АТМ Украины
Тел./факс +38044 430 85 00, www.atmu.net.ua, www.atmu.org.ua
E-mail: atmu@ism.kiev.ua, kopeykina@voliacable.com



УДК 621.791:621.6.43

СКЛОННОСТЬ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕМОНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

В. С. БУТ, С. Ю. МАКСИМОВ, О. И. ОЛЕЙНИК

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

Ремонт магистральных трубопроводов, находящихся под давлением, предполагает применение различных усиливающих сварных конструкций. Сроки эксплуатации магистралей во многих случаях превышают 30 лет, а материал труб может иметь неблагоприятную структуру, поэтому существует необходимость расширить представления об обеспечении технологической прочности сварных соединений в условиях ремонта. В работе приведены результаты исследования склонности сварных соединений низколегированных сталей к образованию холодных и слоистых трещин. Для этого были проведены эксперименты на технологических пробах, имитирующих реальные сварные соединения ремонтных конструкций. Показано положительное воздействие предварительного подогрева, послесварочного нагрева и термоотжигающего эффекта на стойкость к образованию холодных трещин, а также существенное влияние серы на склонность сталей к слоистому растрескиванию. Доказана возможность прогнозирования вероятности слоистого растрескивания по показателям относительного сужения, ударной вязкости и критического раскрытия трещины, а также по критическим напряжениям замедленного разрушения и фрактограммам поверхности излома основного металла. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 12.

Ключевые слова: ремонтные сварные конструкции, магистральные трубопроводы, холодные трещины, слоистое растрескивание, термоотжигающий эффект, технологические пробы

Украина обладает мощным нефтегазовым комплексом, который позволяет стране играть важную роль в транспортировке энергоресурсов от поставщика к потребителю. Анализ структурного распределения магистральных газопроводов (МГП) Украины по протяженности показывает, что 23 % из них находится в эксплуатации более 40 лет, 32 % — от 30 до 40 и 45 % — до 30 лет [1]. Понятно, что для обеспечения надлежащего технического состояния и непрерывной работы трубопроводов в ближайшее время необходимо будет выполнить большой объем ремонтно-восстановительных работ.

Готовность к аварийным ситуациям и возможность действий в этих случаях является важнейшей проблемой с момента создания давления в трубопроводе и в течение всего срока его эксплуатации. В связи с этим для каждой аварийной ситуации или случая выявления недопустимых дефектов на линейной части трубопровода необходима стратегия ремонта, базирующаяся на следующих критериях: выбор метода ремонта, безопасность выполнения восстановительных работ, надежность ремонтных конструкций (отсутствие трещин), воздействие на окружающую среду, непрерывность транспортировки продукта, продолжительность ремонта, экономическая целесообразность. При этом преимущество следует отдавать методам ремонта без остановки эксплу-

атации трубопровода, чтобы исключить уменьшение объема перекачиваемого продукта или значительно сократить его в течение небольшого промежутка времени, а также не нанести существенного материально-финансового и экологического ущерба.

Для Украины такие методы имеют особое значение с учетом большой плотности населения в зоне расположения МГП, высоких цен на газ и необходимости безусловного выполнения контрактных обязательств по поставке газа как отечественным, так и зарубежным потребителям.

Проведенная диагностика технического состояния МГП ПАО «Укртрансгаз» выявила на линейной части обширные коррозионные повреждения, которые составляют около 50 % от общего количества обнаруженных дефектов, отдельные участки с расслоением металла, а также недопустимые по действующим нормативно-техническим документам дефекты в кольцевых сварных соединениях [2], которые, как правило, образуются в замыкающих стыках («захлестах») при строительстве трубопроводов.

На основании анализа характера и геометрических параметров выявленных дефектов ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ был предложен структурный подход к разработке технологий восстановления несущей способности линейной части МГП под давлением с применением дуговой сварки [3]. Методы ремонта были сгруппированы по видам де-

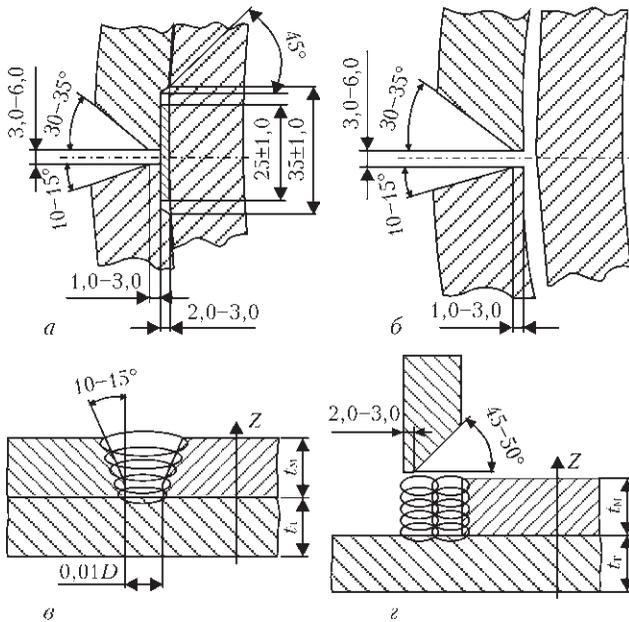


Рис. 1. Типовые сварные соединения в ремонтных конструкциях, устанавливаемых на МГП в условиях эксплуатации: а, б — продольный стык муфты; в — нахлесточно-стыковое соединение; з — соединение патрубков-муфта

фектов и целевому назначению [4]. Для каждой группы были определены безопасные условия выполнения дуговой сварки с учетом рабочих параметров транспортировки газа, геометрических характеристик магистрали, механических свойств металла труб и типа сварного соединения.

Большинство предложенных методов ремонта линейной части МГП в условиях эксплуатации [4] предусматривает применение усиливающих конструктивных элементов с типовыми сварными соединениями (рис. 1). Перед тем, как рекомендовать разработанные технические решения к практическому применению, необходимо было определить условия обеспечения технологической прочности сварных соединений, т. е. исключить трещинообразование. Частично результаты исследований в этом направлении представлены в работе [5], где акцентировалось внимание на оценке конструкционной прочности сварных соединений усиливающих элементов с трубопроводом. Данная работа посвящена технологическим аспектам свариваемости трубных сталей.

Стойкость сварных соединений к образованию холодных трещин. Способность сварных соединений без разрушения (образования холодных трещин) выдерживать термомеханическое

воздействие во время дуговой сварки штучными электродами оценивали на образцах трубных сталей типовых марок 17Г1С и Х60, которые широко применялись в строительстве МГП в 80-е годы прошлого века. Это дало возможность наиболее приближенно имитировать реальные сварные соединения ремонтных конструкций [4]. Так, для продольных стыков муфт (рис. 1, а, б) это была технологическая проба Теккен; для нахлесточно-стыковых соединений конструктивных элементов с трубопроводом (рис. 1, в) — проба Имплант; для соединений патрубков-муфта (рис. 1, з) — проба «окно»; для ремонтной конструкции «заплата-муфта» — круговая проба. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Для сравнительного анализа сталей с учетом условий предварительного подогрева, обеспечивающих требуемую стойкость к трещинообразованию, были проведены эксперименты на пробах Теккен [6] из пластин толщиной 16 мм, т. к. прокат большей толщины пока не применяется для изготовления усиливающих конструктивных элементов [7]. Для определения температуры предварительного подогрева к поверхности пластин вблизи скоса кромок приваривали термпары. Сварку контрольного участка соединения выполняли электродами с основным типом покрытия УОНИ-13/55 диаметром 3 мм и электродами с целлюлозным покрытием Lincoln Electric Shield-Arc 65 диаметром 3,2 мм при исходной температуре основного металла 20, 50, 100, 150 и 200 °С. После сварки из контрольного участка вырезали макрошлифы для оценки наличия/отсутствия трещин. Относительную протяженность трещин определяли с помощью микроскопа МБС-2 как отношение длины трещины в шве к общей длине шва.

На основании проведенных исследований построены графические зависимости относительной протяженности трещин $L_{тр}$ от температуры предварительного подогрева $T_{п}$ (рис. 2). Они показали, что сварные соединения стали Х60 более склонны к образованию холодных трещин, чем выполненные из стали 17Г1С. Применение электродов с целлюлозным типом покрытия значительно снижает трещиностойкость обоих сварных соединений из-за высокого содержания диффузионного водорода, которое может достигать в наплавленном металле

Таблица 1. Химический состав исследуемых трубных сталей

Сталь	Состав, мас. %									C _{экв} , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	V	Nb	
17Г1С	0,170	0,467	1,60	0,06	0,05	0,025	0,036	0,02	0,005	0,46
Х60	0,121	0,219	1,54	0,10	0,05	0,011	0,027	0,04	0,051	0,41
Плавка № 47	0,160	0,292	1,50	0,12	0,16	0,045	0,008	0,02	0,005	0,45
Плавка № 65	0,148	0,179	1,49	0,11	0,07	0,030	0,007	0,02	0,005	0,33

* Углеродный эквивалент рассчитывали по формуле $C_{экв} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$.

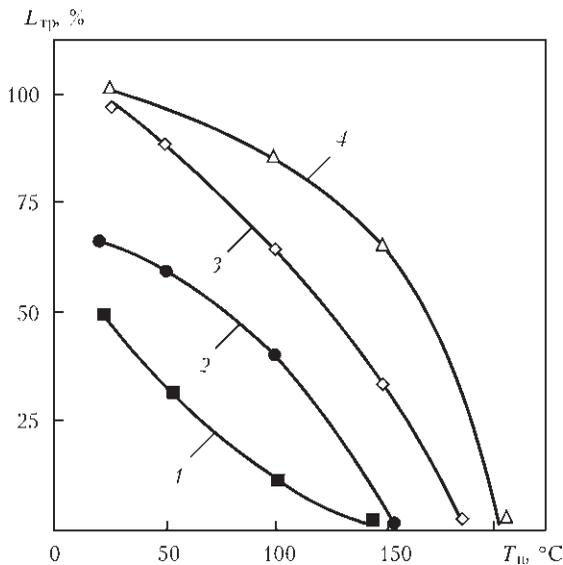


Рис. 2. Зависимость длины трещин от температуры предварительного подогрева, типа покрытия электрода и марки стали для контрольного шва пробы Теккен: 1, 3 — сталь 17Г1С; 2, 4 — X60; 1, 2 — электроды УОНИ 13/45; 3, 4 — Shield-Arc 65

40 см³/100 г [8]. Согласно методике Теккен оптимальная температура предварительного подогрева для предотвращения образования холодных трещин в реальных сварных соединениях выбирается по критерию суммарной длины трещины 50 % в контрольном шве. Таким образом, при сварке электродами с основным типом покрытия $T_{п} = 20...50$ и $70...100$ °C для стали соответственно 17Г1С и X60, а при использовании электродов с целлюлозным покрытием температура предварительного подогрева будет выше на $60...80$ °C (см. рис. 2).

С целью определения условий трещинообразования в сварных соединениях ремонтной кон-

струкции «заплата-муфта» [4] исследования проводили на круговой пробе (образце Марин Морского департамента США) по методике работы [6]. Минимальный диаметр пробы составлял 100 мм, ширина муфты — 500 мм. Результаты исследования влияния зазора a между стыкуемыми элементами конструкции и погонной энергии сварки q на склонность к образованию холодных трещин представлены на рис. 3, а. Наличие/отсутствие трещин определяли на поперечных макрошлифах, вырезанных из замыкающей четверти кругового шва, где создаются наиболее высокие растягивающие напряжения при усадке металла шва. Было очевидно, что трещина зарождается у концентратора напряжений — в месте перехода наплавленного металла к основному (рис. 3, б), и именно в зонах концентрации растягивающих напряжений резко повышается содержание диффузионного водорода, способствующего зарождению холодных трещин [9].

Из рис. 3 ясно, что с увеличением зазора в разделке и соответственно с повышением тепловложения при выполнении корневого прохода протяженность трещин уменьшается. При $a > 8$ мм в сварных соединениях стали X60 трещины практически не образуются. Для исключения вероятности образования холодных трещин в металле шва круговой пробы из стали 17Г1С достаточно $a > 6$ мм. Причем коэффициент формы шва $K_{ш}$ при максимальном трещинообразовании близок к единице, а при отсутствии трещин $K_{ш} \sim 4$. Как известно, сопротивление швов образованию холодных трещин зависит также от структуры их металла, которая определенным образом взаимосвязана с коэффициентом формы шва [10].

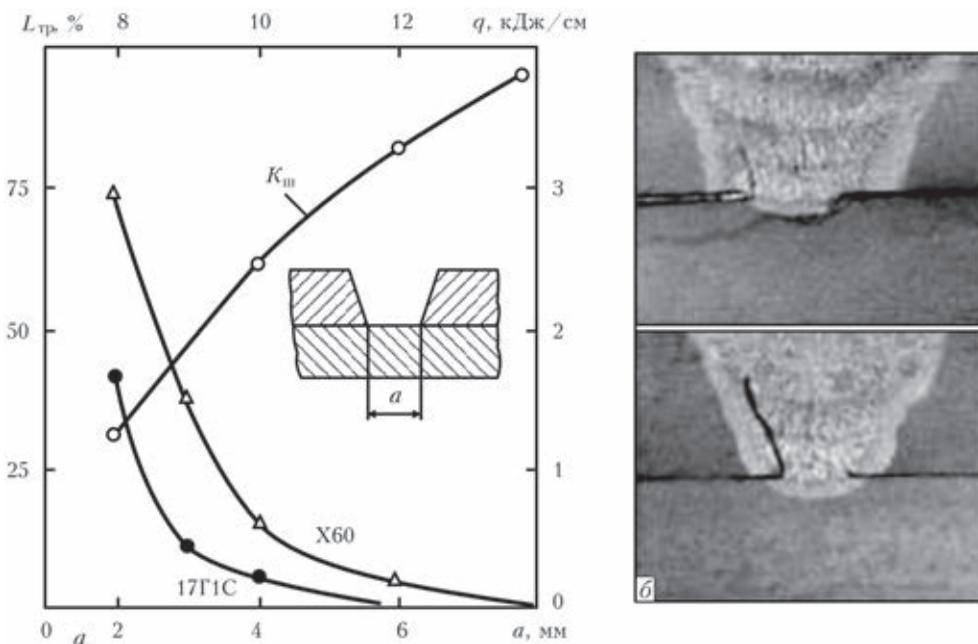


Рис. 3. Условия трещинообразования в круговой пробе (a) и область зарождения трещины ($б$)

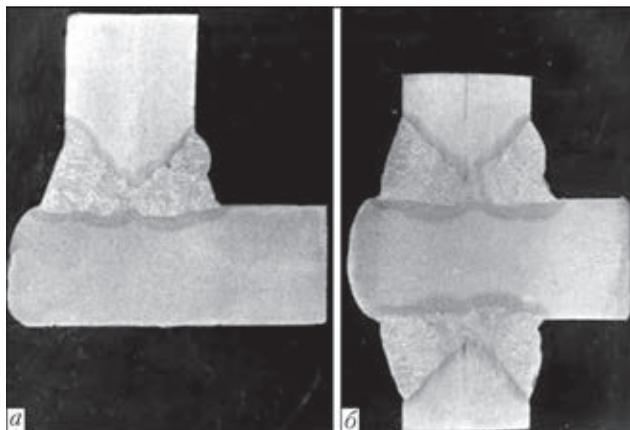


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений для изготовления составных образцов Имплант с надрезом параллельно прокатке для испытаний на растяжение по оси Z (а); на ударную вязкость и критическое раскрытие трещины (б)

Следует отметить, что при проведении испытаний на образцах Марин не учитывался эффект дополнительного охлаждения сварных соединений в процессе сварки за счет транспортируемого по трубопроводу продукта. Поэтому при установке таких ремонтных конструкций на МГП вблизи компрессорных станций, в условиях интенсивного теплоотвода движущимся с высокой скоростью газом, очевидно, потребуется предварительный подогрев до 100...150 °С.

Наиболее эффективным методом оценки стойкости сварных соединений низколегированных сталей к образованию холодных трещин, на наш взгляд, является Имплант [11]. Эта методика учитывает практически все факторы, вызывающие образование холодных трещин, а именно: малопластичную структуру металла ЗТВ, высокий уровень растягивающих напряжений, наличие концентратора напряжений и значительное содержание диффузионного водорода. Высокие растягивающие напряжения, которые создаются у концентраторов геометрического происхождения (это, например, межслойный зазор в нахлесточно-стыковых соединениях усиливающих элементов с трубопроводом), даже при незначительном содержании водорода могут привести к возникновению холодных трещин и дальнейшему разрушению сварных соединений при длительном нагружении.

Эксперименты проводили согласно рекомендациям МИС [11] для двух вариантов. В первом случае образцы вырезали из пластин сталей 17Г1С и Х60 вдоль прокатки с целью исследования влияния структурного фактора, диффузионно-подвижного водорода и техники сварки на критические напряжения при замедленном разрушении сварных образцов на испытательной машине АИМІ-5. Во втором случае образцы Имплант вырезали из тавровых соединений (рис. 4) всех исследуемых

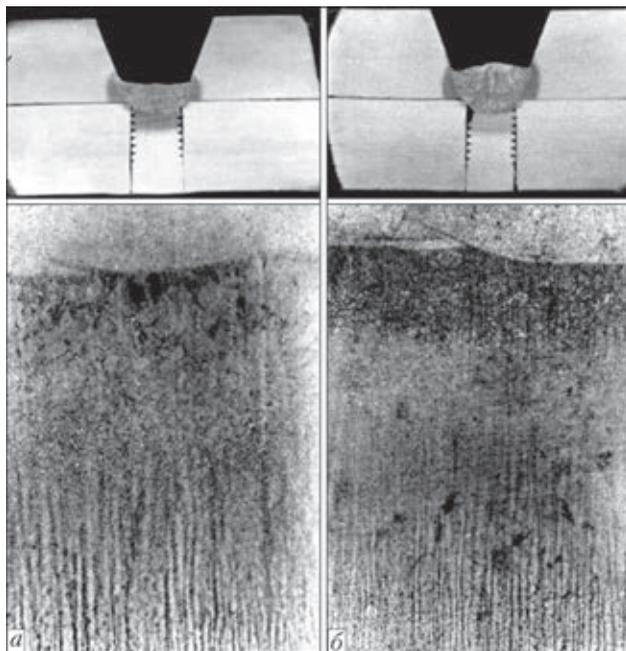


Рис. 5. Одно- (а) и двухпроходная (б) сварка образцов Имплант для получения соединений, имитирующих реальные сталей для изучения влияния диффузионного водорода и вредных примесей (серы) на склонность к образованию холодных трещин при действии напряжений в направлении, перпендикулярном текстуре металла.

Сварку образцов, имитирующих реальные сварные соединения ремонтных конструкций (рис. 5), выполняли штучными электродами с основным и целлюлозным покрытием диаметром 3,0 и 3,2 мм на режиме $I_{св} = 110...120$ А, $U_d = 24...26$ В, $v_{св} = 1,9...2,5$ мм/с, обеспечивающем погонную энергию $q = 0,8...1,2$ кДж/мм. При двухпроходной сварке термоотжигающий слой наплавляли на погонной энергии в 1,4...1,7 раза выше, чем при однопроходной сварке. После охлаждения металла шва до 100 °С образцы подвергали постоянному нагружению на стандартной машине.

За критерий оценки стойкости сварных соединений к образованию холодных трещин принимали критические напряжения, под действием которых трещины не появляются в образце в течение 16 ч. Содержание диффузионного водорода в металле шва определяли хроматографическим методом [12] на образцах, выполненных в идентичных условиях.

Установлено, что в соединениях, сваренных электродами Shield-Arc 65, содержание диффузионно-подвижного водорода $[H]_{диф} = 19...24$ см³/100 г. В свою очередь, электроды УОНИ 13/55 после прокатки при 380...400 °С обеспечивают уровень 5,0...7,4 см³/100 г, а без прокатки (после выдержки на воздухе с относительной влажностью 90 % более 3-х суток) отмечено значительное повыше-

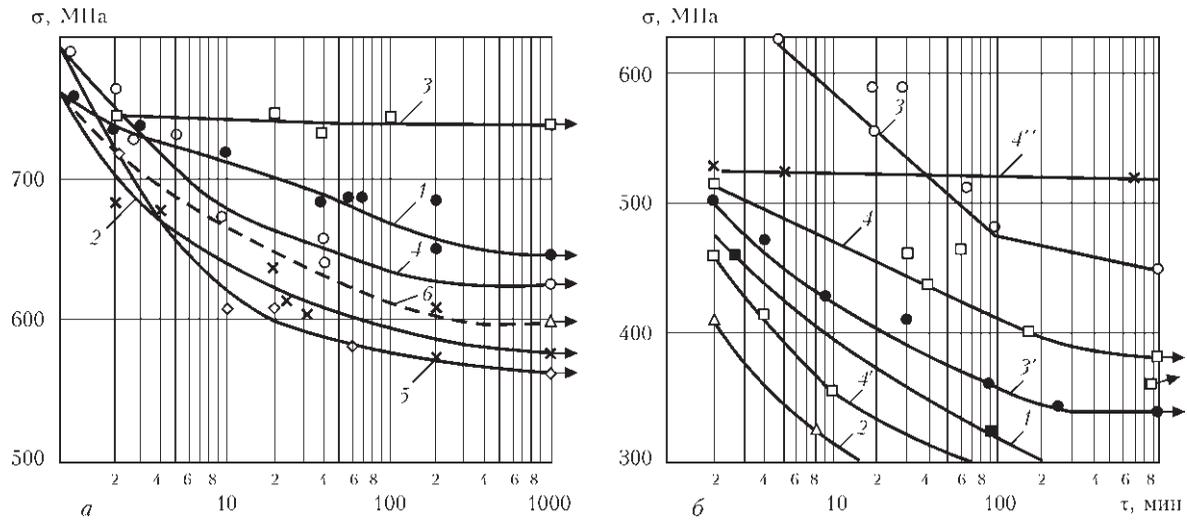


Рис. 6. Результаты испытаний образцов Имплант на длительную прочность при действии нагрузки вдоль прокатки (а) (1, 4 — электроды УОНИ 13/55 после прокатки, $[H]_{диф} = 4,0...7,4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 2, 5 — Shield-Arc 65, $[H]_{диф} = 19...24 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 3 — термоотжигающий проход; 4, 6 — УОНИ 13/55 без прокатки, $[H]_{диф} = 12...16 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 1–3, 6 — сталь 17Г1С; 4, 5 — X60) и по оси Z (б) (1 — плавка № 65; 2 — № 47; 3 — сталь X60; 4 — 17Г1С; 1–4, 4'' — электроды УОНИ 13/55; 3', 4' — Shield-Arc 65; 4'' — нагрев после сварки)

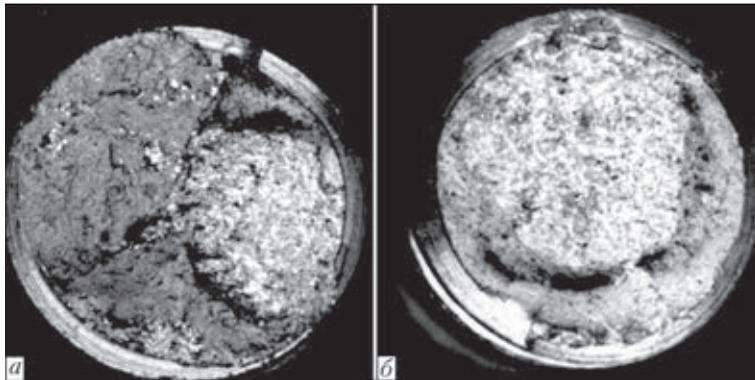


Рис. 7. Поверхность изломов ($\times 10$) образцов Имплант из стали X60, выполненных электродами Shield-Arc 65: а — $\sigma = 615 \text{ МПа}$, $\tau = 40 \text{ мин}$; б — $\sigma = 565 \text{ МПа}$, $\tau = 100 \text{ мин}$

ние содержания водорода в наплавленном металле — до $[H]_{диф} = 12...16 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

По результатам испытаний сварных образцов Имплант, вырезанных из исследуемых сталей вдоль прокатки, построены графические зависимости изменения напряжений замедленного разрушения во времени для разного содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, а также для случая применения термоотжигающего слоя (рис. 6, а). Эти графики подтвердили протекание замедленного разрушения в образцах, сваренных за один проход, и ведущую роль водорода в этом процессе. С повышением содержания диффузионного водорода снижается критическое напряжение разрушения, а также сокращается время инкубационного периода зарождения трещины. Это хорошо иллюстрирует поверхность изломов образцов Имплант (рис. 7). Применение электродов с основным типом покрытия без прокатки (см. рис. 6, а; кривая б) приводит к снижению трещиностойкости соединений почти до уровня значений, полученных при применении электродов с

целлюлозным покрытием (кривая 2). Использование термоотжигающего эффекта при наплавке второго слоя шва (кривая 3) позволяет снизить вероятность замедленного разрушения благодаря улучшению микроструктуры ЗТВ (см. рис. 5, б) и, очевидно, снижению содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле.

При проведении испытаний образцов с механическим надрезом, выполненным вдоль прокатки (рис. 8, а), исследовали комбинированное влияние водорода и неметаллических включений (по содержанию серы) на сопротивляемость трещинам. Для этого помимо серийных трубных сталей использовали опытные плавки низколегированных сталей ИЭС им. Е. О. Патона (см. табл. 1), химический состав которых изменяли за счет содержания основных легирующих элементов (углерода, кремния, марганца), а также серы.

Результаты испытаний составных образцов Имплант показали (рис. 6, б), что характер сопротивляемости трубных сталей замедленному разрушению существенно изменился по сравнению со случаем действия нагрузки вдоль прокатки (рис. 6, а). Сварные соединения стали X60 (рис. 6, б; кривые 3, 3') демонстрируют большее сопротивление образованию трещин, чем соединения стали 17Г1С (кривые 4, 4'). Это, на наш взгляд, связано с меньшим содержанием серы и отсутствием строчечной структуры основного металла, хотя в целом абсолютные значения критических напряжений замедленного разрушения были значительно ниже, чем для образцов Имплант с надрезом поперек прокатки металла. Характер

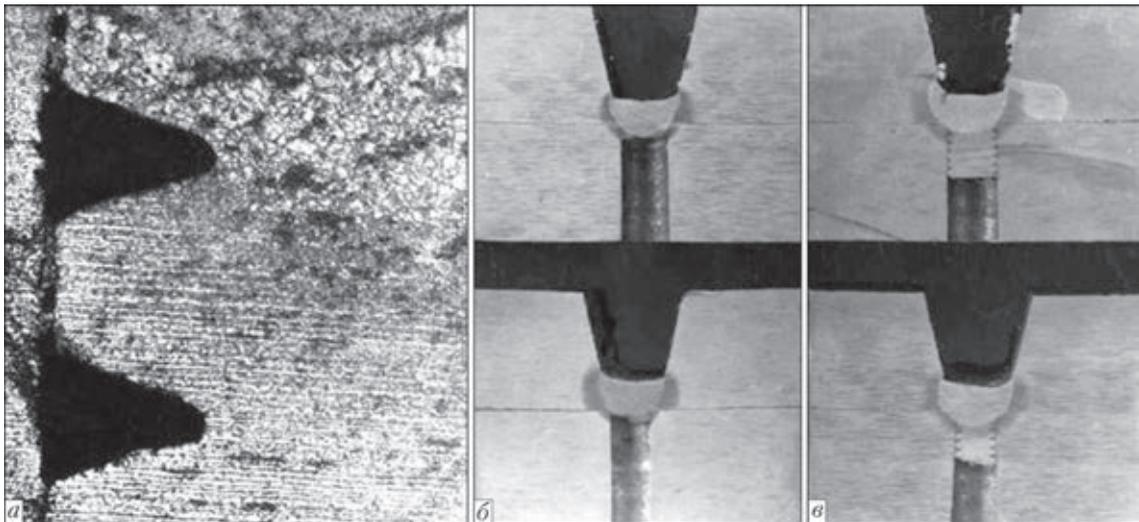


Рис. 8. Расположение надреза в ЗТВ образца Имплант (*a* — $\times 63$), разрушение по ЗТВ (*б*) и основному металлу (*в*)

разрушения образцов из стали 17Г1С с высоким содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле после проведенного нагрева и выдержки при 150 °С в течение 16 ч иллюстрирует рис. 8, б, в. Заметим, что после удаления водорода из ЗТВ образцы разрушались по основному металлу в сечениях, ослабленных неметаллическими включениями (рис. 8, в), критические напряжения разрушения находились на достаточно высоком уровне (см. рис. 6, б, кривая 4''), разрушение образцов при исходном содержании диффузионного водорода проходило по ЗТВ (рис. 8, б).

При действии напряжений по толщине металла (надрез параллелен прокатке) проявляется совместное негативное влияние диффузионного водорода и неметаллических включений (сульфидов) на сопротивление сварных соединений замедленному разрушению. Водород накапливается в содержащих включения пустотах, преобразуясь из атомарного в молекулярный, и созда-

ет в них высокое давление, тем самым облегчая разрушение металлической матрицы при малых радиусах кривизны краев включений (значительной концентрации напряжений на границе матрица–включение). Это подтверждается результатами испытаний других опытных сталей с различным содержанием серы (см. рис. 6, б; кривые 1, 2) и фрактографического анализа поверхности излома образцов Имплант (рис. 9) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-35CF. Исследования показали, что для образцов из стали 17Г1С характерна крупнозернистая структура, содержащая сульфидные и сульфосиликатные неметаллические включения эллипсоидной, глобулярной и пластинчатой формы (рис. 9, а). Сталь Х60 имеет мелкозернистую структуру с незначительным количеством неметаллических включений глобулярной формы размером менее 2 мкм (рис. 9, б). На поверхности изломов стали плавки № 47 с наибольшим содержанием серы (см. табл. 1) наблю-

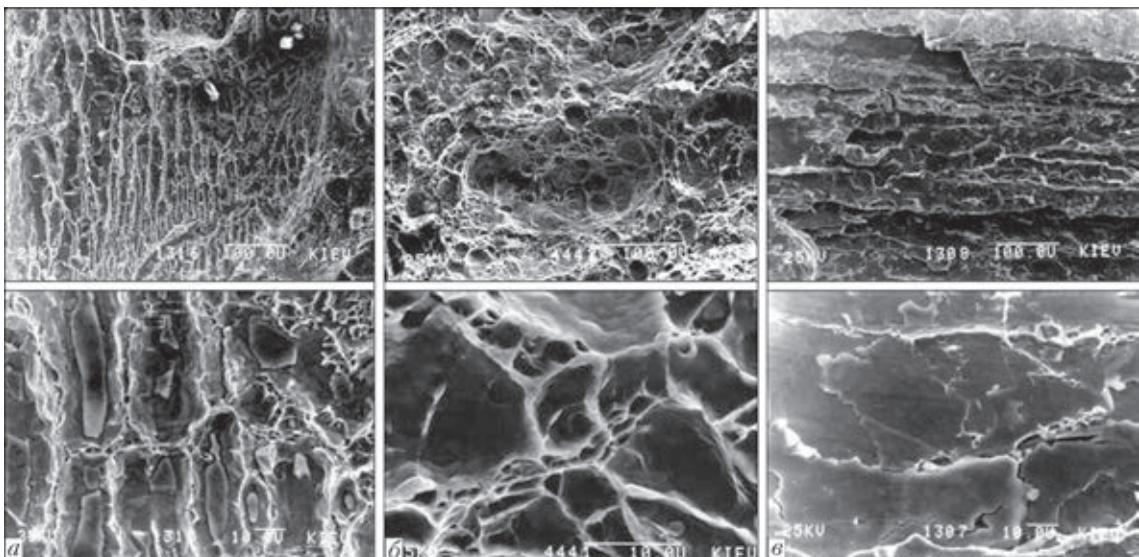


Рис. 9. Фрактограммы поверхности изломов образцов с разрушением по оси Z: *a* — сталь 17Г1С; *б* — Х60; *в* — плавка № 47 (верхний ряд — $\times 300$, нижний ряд — $\times 3000$)



дается значительное количество неметаллических включений пластинчатой формы (рис. 9, в).

Таким образом, подводя итоги испытаний сварных образцов на стойкость к образованию холодных трещин, можно сделать следующие выводы. Во-первых, для ремонтных работ на действующих МГП следует применять электроды с основным покрытием, обеспечивающие низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле. Во-вторых, нужно использовать термоотжигающий эффект второго прохода многослойного шва, который улучшает микроструктуру ЗТВ и способствует частичной эвакуации водорода из проблемной зоны. В-третьих, необходимо проводить послесварочный нагрев соединений, в которых в дальнейшем нагрузки могут действовать в направлении, перпендикулярном текстуре металла трубы. И, наконец, в условиях интенсивного теплоотвода на ремонтируемом участке МГП требуется традиционный предварительный подогрев до 100...150 °С.

Оценка склонности сварных соединений стали к слоистому растрескиванию. Одним из распространенных видов трещин в сварных конструкциях является слоистое растрескивание. Определение склонности материала к образованию слоистых трещин — важный аспект оценки свариваемости низколегированных сталей. Ступенчатая форма трещин и их расположение, в основном вне ЗТВ, позволяет отличать эти трещины от холодных. Характерно, что такие меры предосторожности, как предварительный подогрев и использование электродов с низким содержанием водорода, которые являются эффективными для предотвращения образования холодных трещин, незначительно влияют на вероятность возникновения слоистых трещин.

Как показывает мировой опыт, в нахлесточно-стыковых и тавровых сварных соединениях низколегированных сталей возможно образование слоистого растрескивания при действии растягивающих напряжений по толщине проката. Эта проблема актуальна и для сварных соединений конструкций (усиливающие муфты, тройники), установленных на МГП в условиях эксплуатации, поскольку при снижении внутреннего давления в трубопроводе в кольцевых нахлесточно-стыковых соединениях возникают значительные радиальные напряжения, что связано с различной деформационной способностью сварных оболочек.

Известно [13], что на склонность сварных соединений к слоистому растрескиванию влияют следующие факторы:

– высокое содержание неметаллических включений типа сульфидов и окисульфидов марганца и железа;

– неблагоприятная морфология неметаллических включений;

– ослабление матрицы металла из-за высокого содержания неметаллических включений в одной плоскости проката;

– значительная протяженность границ сплавления вдоль прокатки (параллельно текстуре металла);

– действие напряжений по толщине проката (оси Z).

Для сравнительной оценки склонности основного металла к слоистому растрескиванию дополнительно были использованы стали разных классов прочности (20, 09Г2С, Х70). Эксперименты проводили на цилиндрических составных образцах с рабочей частью диаметром 6 мм, которые изготавливали из крестообразных сварных соединений (см. рис. 4, б), из стали каждой марки изготавливали по 6 образцов и испытывали их при одноосном растяжении, когда на исследуемом участке металла напряжения действуют по оси Z. После разрушения цилиндрических образцов измеряли относительное сужение ψ на стыке изломов согласно методике [13]. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Для наглядности по средним значениям относительного сужения была построена гистограмма распределения сталей по этому показателю (рис. 10). Наибольшей пластичностью при действии напряжений по толщине листа, а, значит, и меньшей склонностью к слоистому растрескиванию обладают стали 20, Х60, Х70, наименьшей — 17Г1С и опытные плавки № 65 и 47.

Фрактограммы изломов образцов Имплант, разрушенных по основному металлу, также характеризуют пластичность стали в направлении оси Z. Используя критерии, предложенные в работе [13], полученные результаты можно оценить следующим образом (табл. 2): образование слоистых трещин в сварных соединениях сталей 20 и Х70 маловероятно ($\psi \geq 25\%$); для сталей 17Г1С, 09Г2С

Таблица 2. Результаты испытаний составных образцов на склонность к слоистому растрескиванию

Сталь	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	ψ , %
17Г1С	504...546	11,0...17,6
	516	14,7
Х60	572...580	20,2...26,0
	574	23,2
Плавка № 47	420...480	6,1...11,3
	452	7,4
Плавка № 65	464...510	10,0...14,2
	485	13,0
20	466...480	22,1...30,6
	469	25,7
09Г2С	470...492	19,0...27,2
	481	20,3
Х70	642...660	21,6...28,2
	648	26,1

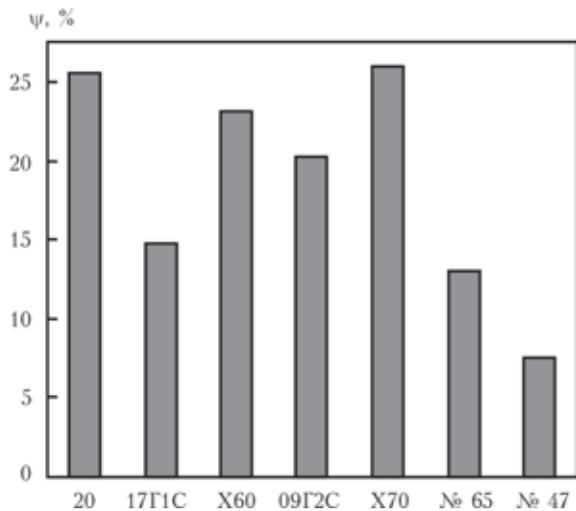


Рис. 10. Распределение сталей по показателю склонности к слоистому растрескиванию в зависимости от относительного сужения по оси Z

и X60 требуется проверка на контрольных жестких соединениях типа «окно» ($15 \leq \psi < 25\%$); стали плавки № 47 и 65 склонны к слоистому растрескиванию и не рекомендуются для изготовления ответственных сварных конструкций ($\psi < 15\%$).

Было изучено влияние содержания серы на физико-механические свойства металла при выполнении надреза параллельно прокатке, что также характеризует склонность сталей к слоистому растрескиванию [14]. Оценку вязкости проводили на образцах Менаже при ударном нагружении, а склонность к хрупкому разрушения — на образцах, позволяющих регистрировать критическое раскрытие трещины (КРТ) при трехточечном изгибе. Все образцы вырезали из крестообразных сварных соединений (см. рис. 4, б). Результаты испытаний составных образцов представлены

на рис. 11. Видно, что ударная вязкость металла снижается с повышением в нем содержания серы, особенно при отрицательных температурах (рис. 11, а). Что касается трубных сталей, то X60 имеет более высокие характеристики, чем 17Г1С, которая содержит большее количество серы (см. табл. 1). Это еще раз подтверждает выводы работы [14], что содержание серы в стали выше 0,012 % приводит к снижению надежности сварных конструкций.

Изготовление и испытание образцов для определения КРТ выполняли согласно методике [15]. По КРТ, которое характеризует сопротивление металла хрупкому разрушению при статическом трехточечном нагружении образцов с надрезом, параллельным прокатке, получены аналогичные температурные зависимости (рис. 11, б). Из графиков видно, что сталь плавки № 47 (кривая 2) с высоким содержанием серы имеет очень низкие значения КРТ при трехточечном изгибе во всем температурном диапазоне испытаний и по критерию стойкости металла к хрупкому разрушению ($\delta_c > 0,12$ мм) не может применяться для изготовления ответственных сварных конструкций. Сталь плавки № 65 (кривая 1) при условии действия растягивающих напряжений по толщине листа может эксплуатироваться только при положительных температурах, сталь 17Г1С (кривая 4) — до -15°C , X60 (кривая 3) — до -40°C .

Для проверки склонности сварных соединений к слоистому растрескиванию была выбрана сталь 17Г1С, имеющая промежуточные показатели вязкости и пластичности из полученных на всех составных образцах. Из нее изготовили образец, свариваемый в паз на жесткой пластине толщиной 25 мм и размером 300×300 мм из стали

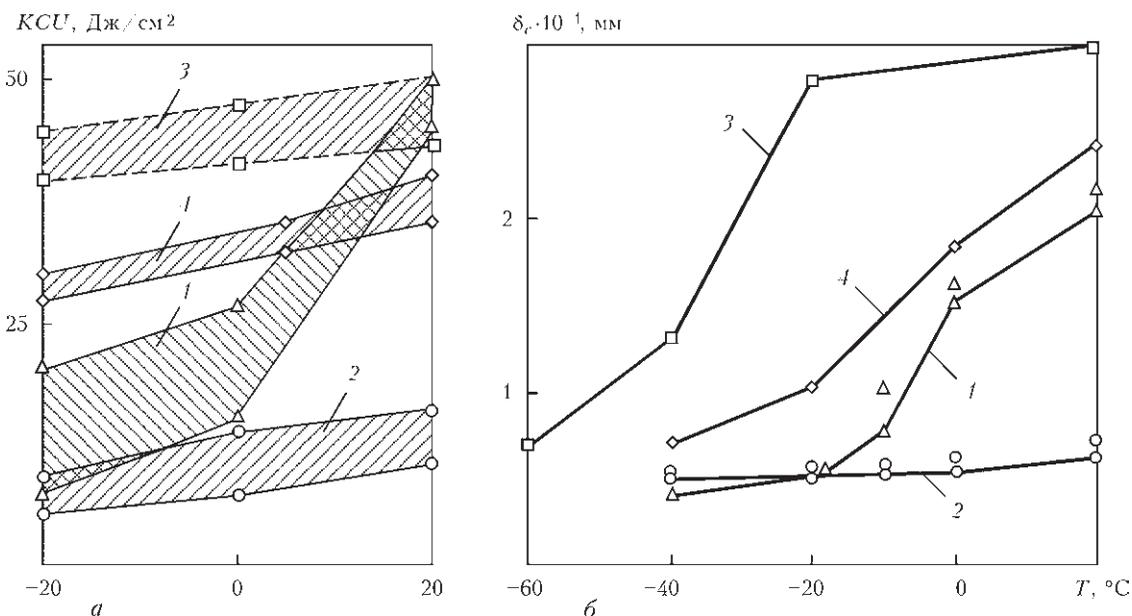


Рис. 11. Вязкость образцов с надрезом параллельно прокатке при ударном нагружении (а) и трехточечном изгибе (б): 1 — плавка № 65; 2 — № 47; 3 — сталь X60; 4 — 17Г1С

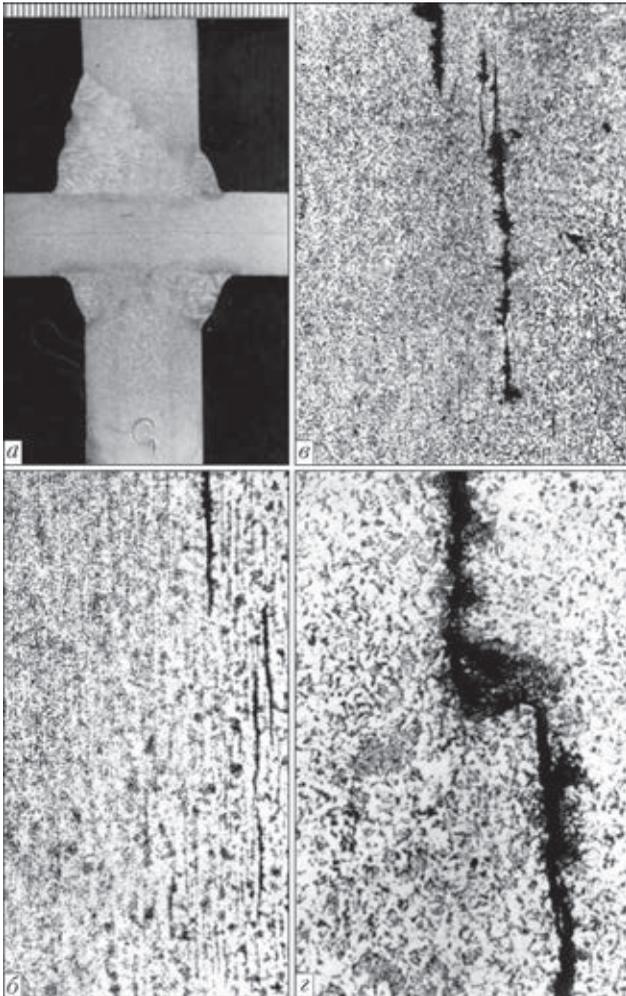


Рис. 12. Макрошлиф пробы «окно» (а), образование слоистых трещин в основном металле (б — $\times 100$) и ЗТВ (в — $\times 100$; г — $\times 500$)

09Г2С. Эта проба, согласно [16], имеет название «окно» и позволяет создавать в исследуемом металле высокий уровень растягивающих напряжений по толщине проката при усадке замыкающего многослойного шва в V-образной разделке. Макрошлиф этого сварного соединения и образование в нем слоистых трещин показаны на рис. 12. Трещины находятся в основном металле, ЗТВ и на некотором удалении от нее. Видно, что раскрытие трещины произошло в местах расположения цепочки неметаллических включений неблагоприятной пластинчатой формы с острыми краями.

Таким образом, для трубопроводов, изготовленных из сталей подобного химического состава, после приварки ремонтных конструкций без остановки эксплуатации недопустимы значительные перепады внутреннего давления или же при установке усиливающих элементов необходимо предусматривать конструктивно-технологические меры, снижающие вероятность слоистого растрескивания. Наиболее эффективным способом уменьшения склонности к слоистому растрескиванию является регулирование содержания

серы в стали при выплавке путем введения редкоземельных металлов, которые не только являются активными раскислителями, но и связывают серу в мелкодисперсные глобулярные частицы оксисульфидов и сульфидов, равномерно распределенные в стали. Как уже упоминалось, остаточное содержание серы в стали не должно превышать 0,012 %, а соотношение РЗМ:S \geq 4:1 [14].

Ремонтные работы выполняются на давно построенных МГП, использованная для них трубная сталь не совсем благоприятна по химическому составу с точки зрения свариваемости, так что сварщикам остается применять конструктивно-технологические меры предупреждения слоистого растрескивания ремонтных конструкций. Одним из таких подходов, апробированным на практике, является предварительная наплавка буферного слоя металла меньшей прочности, чем металл шва, которая легла в основу технического решения присоединения отводов к действующим МГП [17]. Еще одним эффективным решением при ремонте можно считать предварительную выборку поверхностного слоя стенки трубы с последующим заполнением канавки сварочным материалом, обеспечивающим прочность шва на уровне значений металла трубы [18].

В этой связи перспективным будет проведение исследовательских работ по оценке эффективности локального переплава поверхностного слоя стенки трубы, находящейся под давлением, аргоно-дуговым или плазменным методом с целью уменьшения содержания неметаллических включений в выполняемых сварных соединениях и, следовательно, снижения вероятности слоистого растрескивания.

Выводы

1. Сравнительные испытания с использованием пробы Теккен показали более высокую трещиностойкость сварных соединений стали 17Г1С, чем стали Х60. Установлено, что при сварке электродами с основным типом покрытия для предотвращения образования холодных трещин температура предварительного подогрева должна составлять 20...50 °С для стали 17Г1С и 70...100 °С для стали Х60. При использовании электродов с целлюлозным покрытием температуру необходимо повышать на 60...80 °С.

2. Испытания образцов Имплант с надрезом параллельно и поперек прокатки показали различия в сопротивляемости сталей замедленному разрушению. В первом случае вследствие совместного негативного влияния диффузионного водорода и сульфидных включений стойкость к образованию холодных трещин стали Х60 была выше, чем стали 17Г1С. Во втором случае сталь 17Г1С име-



ла более высокие значения критических напряжений разрушения.

3. По результатам испытаний образцов на растяжение по оси Z проведена градация исследуемых сталей по склонности к слоистому растрескиванию в зоне соединения в зависимости от содержания серы.

4. Установлена возможность прогнозирования вероятности слоистого растрескивания по следующим показателям: относительное сужение по оси Z; ударная вязкость и критическое раскрытие трещины на образцах с надрезом параллельно прокатке; критические напряжения замедленного разрушения; фрактограммы поверхности излома основного металла.

5. С целью снижения риска образования холодных трещин при выполнении ремонтных работ на действующих МГП необходимо применять электродные материалы, обеспечивающие низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, использовать термоотжигающий эффект от последующего прохода многослойного шва, проводить послесварочный нагрев сварного соединения в случае действия нагрузок в направлении, перпендикулярном поверхности трубы.

6. Для предотвращения слоистого растрескивания в ремонтных конструкциях на магистральных трубопроводах целесообразно предварительно выполнять наплавку буферного слоя металлом меньшей прочности или выборку поверхностного слоя стенки трубы с последующим ее заполнением сварочным материалом, обеспечивающим равнопрочность сварного соединения.

1. Бут В. С., Грецький Ю. Я., Розгонюк В. В. Обґрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском // Нафт. і газ. пром-ть. – 2001. – № 4. – С. 33–39.
2. Дрогомирецький М. М. Внутрішньотрубна діагностика магистральних газопроводів і ремонт виявлених дефектів // Сб. тр. научн. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта» (Киев, 11 апр. 2006 г.). – Киев: Экотехнология, 2006.

3. Бут В. С., Олейник О. И. Основные направления развития технологий ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 42–48.
4. ГБН В.3.1-00013741-12:2011: Магистральные газопроводы. Ремонт дуговой сваркой в условиях эксплуатации. – Введ. 06.09.2011. – Киев: Мин-во энергетики и угольной пром. Украины, 2011. – 152 с.
5. Бут В. С., Олейник О. И. Оцінка технологічної та конструкційної міцності зварних з'єднань ремонтних конструкцій на магистральних трубопроводах // Сб. тр. Междунар. научно-практ. конф. «Остаточный ресурс и проблемы модернизации систем магистральных и промышленных трубопроводов» (Киев, 12–13 апр. 2011 г.). – Киев: ЦТТ ИЭС им. Е. О. Патона, 2001.
6. Шориоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. – М.: Металлургия, 1972. – 218 с.
7. ТУ У 27.2-19305558-001:2007. Елементи трубопроводів підсилюючі конструктивні. – Чинні від 03.07.07. – 79 с.
8. Kobelco Welding Today. – 1998. – 2, № 2.
9. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
11. Recommendation for the use of Implant test as a complementary information test on the cold cracking susceptibility during the welding of steels / H. J. Granjon // IIW Doc. IX 830–73.
12. 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.
13. Suzuki H. Weldability of modern structural steels in Japan // Trans. Iron and Steel Inst. of Japan. – 1983. – 23, № 3. – P. 189–204.
14. Вихлевицук В. А., Черногрицкий В. М., Федорова И. П. и др. Повышение надежности сварных конструкций путем снижения содержания серы в стали // Автомат. сварка. – 1989. – № 4. – С. 1–6.
15. Кирьян В. И. Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязким разрушениям // Там же. – 1984. – № 11. – С. 1–6.
16. Farrar J. C. M., Dolby R. E., Baker R. G. Lamellar tearing in welded structural steels. – Weld. J. – 1969. – № 7. – P. 274–282.
17. Пат. 40033 Украина, F16L 41/00. Способ присоединения отвода к действующему газопроводу / В. С. Бут, Я. С. Марчук, А. С. Мандра. – Оpubл. 25.03.2009; Бюл. № 6.
18. Пат. 11796 Украина, F16L 55/16, E21F5/00. Процесс ликвидации технологических отверстий в магистральных трубопроводах / В. С. Бут, С. Ю. Максимов, О. И. Олейник и др. – Оpubл. 16.01.2006; Бюл. № 1.

Поступила в редакцию 05.06.2014

Разработано в ИЭС

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА СТАЛЬНЫХ ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Широкий ассортимент порошковых проволок (ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-Нп-35В9Х3СФ, ПП-АН132, ПП-АН147), разработанных в ИЭС специально для наплавки валков, дает возможность выбрать оптимальный состав наплавленного металла исходя из конкретных условий работы валков, характера и интенсивности их износа, обрабатываемости наплавленного металла, цены и др. Количество повторных наплавов — 4...5 раз. Благодаря этому многократно увеличивается срок службы валков и сокращается их расход.



Автоматическая дуговая наплавка валка пильгер-стана на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе



УДК 621.731:669.2/8

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СВАРИВАЕМОСТЬ МЕДИ

В. А. АНОШИН¹, В. М. ИЛЮШЕНКО¹, А. Н. БОНДАРЕНКО¹, Е. П. ЛУКЬЯНЧЕНКО¹, А. К. НИКОЛАЕВ²

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² ОАО «Институт «Цветметобработка». 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 5. E-mail: post@cmet.ru

Широкое применение во многих отраслях промышленности технических марок меди, содержащих различные примеси, требует углубленного анализа их влияния на свариваемость. В настоящей работе проведена комплексная оценка влияния основных примесей на склонность меди к образованию трещин и пор с использованием электронно-фрактографического и рентгеноспектрального анализа, а также разработанных авторами новых методик оценки склонности меди к образованию кристаллизационных трещин. Показано, что одновременное присутствие в меди различных примесей в отличие от бинарной системы медь–примесь уменьшает ее склонность к образованию кристаллизационных трещин. Содержание 0,2 % никеля повышает стойкость меди к трещинообразованию. Установлено, что степень влияния легкоплавких примесей на образование трещин в металле шва и околошовной зоне зависит от их коэффициента распределения. Впервые установлено, что легкоплавкие поверхностно-активные примеси с малым коэффициентом распределения ($K < 0,05$) повышают склонность сварных швов к образованию пор. Полученные результаты исследования позволяют разрабатывать новые сварочные материалы для сварки меди и ее сплавов. Библиогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: медь, примеси, кристаллизационные трещины, поры, электронно-фрактографический и рентгеноспектральный анализ, коэффициент распределения

Медь широко применяется в различных отраслях промышленности, в том числе при изготовлении сварных узлов и конструкций. Практический опыт показывает, что медь при сварке обладает повышенной склонностью к образованию трещин и пор [1–7]. Ранее совместно с институтом «Гипроцветметобработка» (г. Москва) были проведены исследования влияния вредных примесей на склонность к образованию трещин в металле шва на бинарных системах медь–примесь [7]. Некоторые результаты этих исследований представлены на рис. 1.

В настоящей работе приведены результаты исследований влияния различных комбинаций примесей (13 примесей в пределах ГОСТ 859–78

«Медь. Марки» для меди М2) на склонность к образованию кристаллизационных трещин.

Для проведения этих исследований методом математического планирования экспериментов были рассчитаны составы опытных плавок меди с различным содержанием примесей, в институте «Гипроцветметобработка» в вакуумной индукционной печи выплавлены слитки, из которых после прокатки на полосы толщиной 3 мм вырезали образцы типа ЛТПМ (60×25×3 мм). По описанной в работе [7] методике оценивали склонность опытных плавок меди к образованию трещин в металле шва. Химсостав опытных плавок и результаты испытаний приведены в табл. 1.

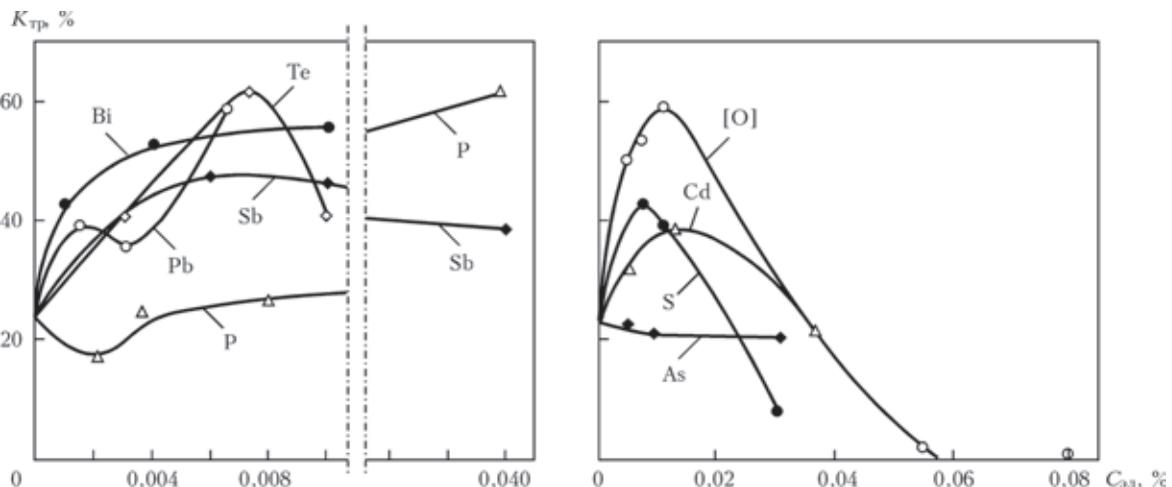


Рис. 1. Влияние примесей на трещинообразование в меди [7]

© В. А. Аношин, В. М. Илюшенко, А. Н. Бондаренко, Е. П. Лукьянченко, А. К. Николаев, 2014



Таблица 1. Расчетное содержание примесей и склонность к трещинообразованию опытных плавок меди

Номер сплава	Содержание, мас. %													$K_{тр}^2$ %, при $v_{ср}^2$ м/ч		
	Bi	S	Pb	[O]	P	Sb	As	Cd	Se	Te	Fe	Ni	Sn	14	8	6
201	0	0	0,005	0,01	0,01	0	0,01	0	0,005	0,005	0,05	0	0,05	27	14	6
202	0,002	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	21	9	5
203	0	0,005	0	0,01	0,01	0	0	0,01	0,005	0,005	0	0,2	0	23	8	0,5
204	0,002	0,005	0,005	0,01	0,01	0,005	0	0	0,005	0	0,05	0	0,05	41	20	11
205	0	0	0	0	0	0,005	0,01	0,01	0	0,005	0	0	0	26	12	8
206	0,002	0	0,005	0	0,01	0,005	0,01	0	0,005	0,005	0	0,2	0,05	42	22,5	0
207	0	0,005	0,005	0	0	0,005	0,01	0	0,005	0	0,05	0,2	0	31	0,5	0,5
208	0,002	0,005	0	0	0	0	0	0,01	0	0,005	0	0	0	42,5	3,5	2
209	0	0	0,005	0	0	0,005	0	0,01	0	0,005	0,05	0,2	0,05	31	6	6
210	0,002	0	0	0	0	0,005	0	0	0	0	0	0,2	0,05	29	7	6
211	0	0,005	0	0	0,01	0	0,01	0	0,005	0	0	0	0	41	14	6
212	0,002	0,005	0,005	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0,2	0	23	5	0,5
213	0	0	0	0,01	0,01	0,005	0	0,01	0	0,005	0,05	0,2	0	27	0,5	0
214	0,002	0	0,005	0,01	0	0	0,01	0,01	0,005	0,005	0,05	0	0	44	4	5
215	0	0,005	0,005	0,01	0	0	0,01	0,01	0,005	0	0,05	0,2	0,05	51	9	0,5
216	0,002	0,005	0	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01	0	0	0,05	0	0,05	44	16	13
41	Медь марки М00 по ГОСТ 859–78													23	9	0,5

Как видно из таблицы, совместное присутствие в меди различных примесей уменьшает ее склонность к образованию трещин по сравнению с бинарными системами медь–примесь [7]. Особенно это заметно на примере плавок № 201, 202, 205, что, на наш взгляд, связано с образованием химических соединений между примесями (Bi_2O_3 , Bi_2S_3 , PbO , PbS , $PbSe$, $PbTe$, As_2Te_3 , Cd_3As_2 , $CdSe$, $CdTe$, Se_2Te_3 , Sb_2Se_3) и соответственно снижением их поверхностной активности. Подобное явление наблюдается при сварке малоуглеродистой

стали, когда введение кислорода в металл шва связывало серу в легкоплавкие оксисульфиды, но при этом снижалась поверхностная активность серы и возрастала стойкость к образованию кристаллизационных трещин. Наличие в меди 0,2 % никеля (медь М2, М3 по ГОСТ 859–78) заметно снижает ее склонность к трещинообразованию (см. табл. 1, плавки № 203, 207, 212, 213), а ее стойкость к образованию кристаллизационных трещин находится на уровне меди М00 (плавка № 41). На наш взгляд, это также объясняется образованием химических соединений

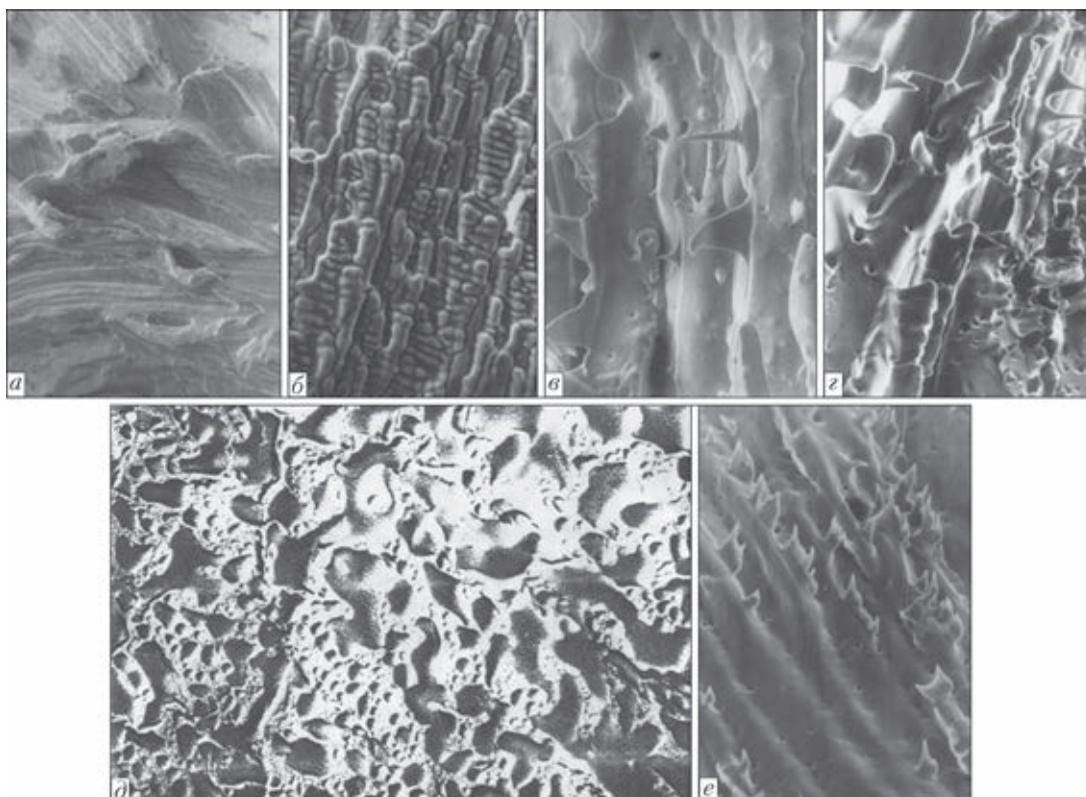


Рис. 2. Типичный межкристаллитный характер трещин (а — $\times 100$), структура поверхности трещин на меди, содержащей висмут (б — $\times 1000$), серу (в — $\times 600$), свинец (з — $\times 800$), селен (д — $\times 12000$), и на меди М1 (е — $\times 800$)



вредных примесей с никелем (NiO, NiSe, NiTe, NiSb, Ni₃P, NiBi).

С целью изучения характера трещинообразования, вызываемого вредными примесями, был проведен электронно-фрактографический и рентгеноспектральный анализ структуры и состава поверхности трещин. Как видно из рис. 2, а, трещины имеют межкристаллитный характер. На поверхности трещин в меди, содержащей вредные примеси (висмут, серу, свинец), наблюдаются следы жидкой фазы в виде каплеобразных отростков, валиков и дендритной корки (рис. 2, б–г). На рис. 2, д представлена жидкая прослойка, содержащая селен; на рис. 2, е — структура поверхности трещины на меди марки М1 без введения каких-либо примесей. Результаты электронно-фрактографического анализа поверхности трещин свидетельствуют о кристаллизационном характере трещин, образующихся при сварке меди.

Рентгеноспектральный анализ состава поверхности трещин показал значительное (на порядок и выше) обогащение жидкой прослойки вредными примесями. Необходимо отметить, что исследуемые легкоплавкие примеси являются поверхностно-активными элементами. Это показали наши расчеты по критерию Жуковичского ($\Delta\sigma = \sigma_{\text{ме}} - \sigma_{\text{пр}} \gg 0$), а также экспериментальные данные [8–11] для некоторых примесей (висмута, свинца, фосфора, сурьмы). Механизм влияния вредных примесей на склонность к образованию кристаллизационных трещин, на наш взгляд, связан с проявлением эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности (жидкометаллического охрупчивания) в результате физико-химического взаимодействия кристаллизующегося жидкого металла, обогащенного вредными примесями, с твердой фазой. Это подтверждается резким охрупчивающим действием жидкого висмута в контакте с медью во время испытаний при повышенных температурах. Такой же охрупчивающий эффект наблюдается при воздействии серы и других поверхност-

но-активных элементов на никель и медь, а также сплав никеля с медью [12].

Для изучения влияния некоторых вредных примесей (висмута, свинца, фосфора) на склонность к образованию трещин в околошовной зоне в ИЭС им. Е. О. Патона в вакуумной индукционной печи были выплавлены слитки бинарного сплава медь–примесь с различным содержанием указанных примесей. Сплавы предварительно прокатывали на полосы толщиной 5 мм. Оценку опытных сплавов проводили по разработанной нами специальной методике [13] на образцах «рыбий скелет» с переменной жесткостью. Образцы сваривали вольфрамовым электродом с неполным проваром в аргоне на различных погонных энергиях.

Из результатов испытаний (табл. 2) видно, что наибольшее отрицательное действие оказывают висмут и свинец (трещины в околошовной зоне образуются на поперечных и продольных надрезах) и в меньшей степени — фосфор, отрицательное влияние которого начинает сказываться только при более высоких концентрациях (> 0,005 %). Наблюдается корреляция между коэффициентом распределения примеси и склонностью к образованию околошовных трещин — чем он ниже, тем больше границы зерен будут обогащены вредной примесью и, соответственно, большей будет склонность к образованию трещин.

Было изучено также влияние висмута и свинца на пористость швов на меди, содержащей 0,04 % фосфора. Результаты испытаний опытных образцов, проплавленных вольфрамовым электродом в аргоне, показали, что при отсутствии висмута и свинца пористость не наблюдается, при 0,003 % Bi обнаружено 10 пор, при 0,003 % Bi и 0,03 % Pb выявлено 20 пор. Таким образом, висмут и его совместное действие со свинцом увеличивают пористость швов даже при малых их концентрациях. На наш взгляд, это объясняется тем, что вследствие низкого коэффициента распределения этих элементов

Т а б л и ц а 2. Склонность к трещинообразованию сварных образцов меди и равновесный коэффициент распределения в них примесей

Содержание примеси, мас. %		Режим сварки						K
		$I_{\text{св}} = 160 \text{ А, } v_{\text{св}} = 17 \text{ м/ч}$		$I_{\text{св}} = 200 \text{ А, } v_{\text{св}} = 23 \text{ м/ч}$		$I_{\text{св}} = 200 \text{ А, } v_{\text{св}} = 26 \text{ м/ч}$		
		$n_{\text{пр}}$	$a_{\text{тр}}, \text{ мм}$	$n_{\text{пр}}$	$a_{\text{тр}}, \text{ мм}$	$n_{\text{пр}}$	$a_{\text{тр}}, \text{ мм}$	
Bi	0,001	++	---	+++	---	+-	10-	0,0001
	0,004	+	13, 15	-+	-- 15	+	- 13-	
	0,1	+	10, 13, 15, 18	+	13, 15, 18	+	10, 13, 15, 18	
Pb	0,005	+	13	+	10, 13	+	10, 13, 15	0,01
	0,01	+	13	+	15	-	13	
	0,05	+	10, 13, 15, 18	+	10, 13, 15, 18	+	10, 13, 15	
P	0,005	-	-	-	-	-	-	0,2
	0,05	+	-	+	10	+	10	

Примечания: 1. $n_{\text{пр}}$ — наличие/отсутствие трещин в продольном надрезе. 2. $a_{\text{тр}}$ — расстояние между поперечными надрезами.

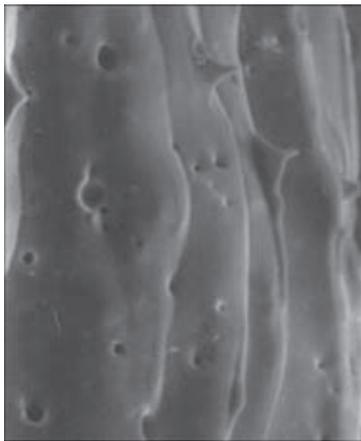


Рис. 3. Поры в жидкой прослойке по границам кристаллитов при наличии примесей с $K < 0,05$ ($\times 1250$)

в меди они существенно (как было отмечено выше, на порядок и больше) обогащают жидкий металл на фронте кристаллизации и на завершающей стадии затвердевания. Являясь поверхностно-активными элементами, они снижают поверхностное натяжение жидкой меди и, тем самым, уменьшают критический радиус газового зародыша:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma M}{\rho RT \ln(c/c_s)} \quad [14],$$

что, в свою очередь, значительно снижает работу его образования:

$$\Delta G_{кр} = \frac{4}{3} \pi r_{кр}^2 \sigma.$$

Кроме того, легкоплавкие примеси с малым коэффициентом распределения вследствие концентрационного переохлаждения способствуют образованию зубчатого (ячеистого) фронта кристаллизации, что также повышает вероятность зарождения пор. Для сравнения влияния примесей на порообразование ниже приведены значения равновесного коэффициента их распределения, рассчитанные нами по диаграммам состояния медь–примесь: $K = 0,0001$ (Bi); $0,002$ (Te); $0,004$ (S); $0,008$ (Se); $0,01$ (Pb); $0,01$ ([O]); $0,036$ (Cd); $0,2$ (P); $0,35$ (Sb).

Электронно-фрактографический анализ показал (рис. 3) наличие микропор (зародышей), образующихся в жидкой прослойке по границам кристаллитов под влиянием примесей с малым коэффициентом распределения ($K \leq 0,05$). При наличии в меди сурьмы ($K = 0,35$) и фосфора ($K = 0,2$) поры не выявлены. Очевидно, что фосфор способствует подавлению порообразования как раскислитель, нейтрализующий вредное влияние кислорода [15].

Выводы

1. Изучение влияния совместного действия различных примесей на склонность меди к образо-

ванию трещин показало, что одновременное присутствие в меди различных примесей, в том числе $0,2\%$ никеля, повышает ее стойкость к трещинообразованию, что, на наш взгляд, обусловлено образованием химических соединений и снижением поверхностной активности примесей.

2. Повышенное содержание в меди висмута и свинца (в пределах ГОСТ 859–78) способствует образованию трещин в околошовной зоне.

3. Степень влияния легкоплавких примесей на образование трещин в металле шва и околошовной зоне зависит от их коэффициента распределения.

4. Впервые установлено, что легкоплавкие поверхностно-активные примеси с малым коэффициентом распределения ($K < 0,05$) повышают склонность сварных швов к порообразованию.

1. Николаев А. К., Костин С. А. Медь и жаропрочные сплавы: Фундамент. справ. – М.: ДПК Пресс, 2012. – 720 с.
2. Коренюк Ю. М. Стойкость против образования трещин в швах, содержащих примеси Bi и Pb при сварке меди // Свароч. пр-во. – 1967. – № 4. – С. 8–10.
3. Абрамович В. Р., Демянцевич В. П., Ефимов Л. А. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. – Л.: Машиностроение, 1988. – 215 с.
4. Kobayashi T., Kuwana T., Ando M. et al. Gas metal-arc welding of copper // Transact. of JWS. – 1970. – 1, № 1. – P. 61–71.
5. Littleton J., Lammas J., Jordan M. E. Nitrogen porosity in shielded gas arc welding of copper. – Weld. J. – 1974. – 53, № 2. – P. 561–566.
6. Илюшенко В. М. Свариваемость технических марок меди // Прогрессивные методы сварки и наплавки тяжелых цветных металлов и сплавов. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 3–5.
7. Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе / Сост.: В. М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. – Киев: МА «Сварка», 2013. – С. 202–205.
8. Яцимирский В. К., Вязьмитинова О. М. Поверхностная активность компонентов в сплавах и их каталитические свойства // Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. – Киев: Наук. думка, 1972. – С. 134–136.
9. Влияние паров металлов на поверхностное натяжение твердой меди / А. Г. Григорьев, В. С. Альшевский, А. А. Жуковичкий, Ю. И. Березников // Там же. – С. 171–174.
10. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение металлов и сплавов: Справ. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.
11. Семенченко В. К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Гос. изд-во техн.-эконом. лит-ры, 1957. – 491 с.
12. Влияние поверхностно-активных элементов на деформационную способность никеля и монеля / В. А. Аношин, С. М. Гуревич, В. М. Илюшенко, В. Н. Баранова // Автомат. сварка. – 1981. – № 7. – С. 46–48.
13. А. с. СССР 747662, МКИ В 23 К 28/00. Способ оценки склонности металлов к образованию трещин / В. А. Аношин, В. М. Илюшенко, А. Н. Бондаренко и др. – Опубл. 15.07.1980; Бюл. № 26.
14. Пацкевич И. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления в сварочных процессах. – М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
15. Свариваемость меди, раскисленной фосфором / В. М. Илюшенко, В. А. Аношин, А. Н. Бондаренко, А. К. Николаев // Автомат. сварка. – 1981. – № 12. – С. 59–60.

Поступила в редакцию 19.06.2014



УДК 621.791.92.04–419

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. П. ЖУДРА

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

Приведены результаты лабораторных исследований износостойкости композиционных сплавов на основе плавленных карбидов вольфрама $WC + W_2C$ (релит) в условиях газоабразивного изнашивания. Дана техническая характеристика лабораторного стенда ОБ-876Ц для испытаний наплавленного металла на газоабразивный износ. Разработана схема испытаний, которая максимально соответствует реальным условиям эксплуатации деталей при воздействии абразивного потока в температурном диапазоне 25...450 °С. Установлено, что износ композиционных сплавов носит избирательный, циклический характер и несущественно зависит от свойств и твердости матрицы при малых углах атаки. Применение карбида вольфрама со сферическими гранулами увеличивает износостойкость композиционного сплава, а повышение температуры до 400 °С существенно ее снижает за счет окисления карбидной составляющей сплавов. При комнатной температуре износостойкость композиционного сплава в 2,7 раза превосходит износостойкость никелькарбидохромового сплава. Библиогр. 9, рис. 3, табл. 3.

Ключевые слова: газоабразивный износ, композиционные сплавы, плавленный карбид вольфрама, сферические гранулы, матрица, микротвердость, плазменно-порошковая наплавка, относительная износостойкость, испытательный стенд

Настоящая работа является продолжением ранее выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований по газоабразивному износу различных типов наплавочных сплавов [1–4], среди которых особый интерес представляют композиционные сплавы на базе плавленных карбидов вольфрама $WC + W_2C$ (релит). Эти сплавы отличаются уникальной износостойкостью и широко применяются для наплавки бурового инструмента и ряда ответственных деталей в металлургии и машиностроении. В работе [2] исследования износостойкости таких сплавов в условиях газоабразивного изнашивания проводили на установке ОБ-876 [5] при температуре 400 °С на цилиндрических образцах диаметром 60 мм с разными составами матричных сплавов, армированных плавными карбидами вольфрама грануляцией от 0,18 до 2,0 мм. Образцы изготавливали лабораторным способом в индукционной печи путем засыпки через слой флюса гранул дробленого карбида вольфрама в матричный расплав с последующей вырезкой наиболее армированных участков анодно-механическим способом. Полученные таким способом композиционные слои на образцах существенно отличаются от реальных, наплавленных дуговым или газовым способом. Поэтому представляло интерес исследовать износостойкость композиционных слоев, полученных промышленными традиционными способами наплавки, среди которых наиболее характерным, для получения таких сплавов, является способ

плазменно-порошковой наплавки, получивший за последние годы широкое развитие в мировой практике. Этот способ ограничивает тепловое воздействие дуги на гранулы карбидов при подаче их в сварочную ванну, что существенно уменьшает их растворение в матричном сплаве. При этом концентрация армирующей фазы в наплавленном слое может достигать 50 %.

Для испытаний были подготовлены образцы, наплавленные плазменно-порошковым методом композиционными сплавами в один слой. В качестве армирующей фазы использовали порошки плавных карбидов вольфрама $WC + W_2C$ (релит) с традиционными дроблеными, а также сферическими гранулами. Сферические гранулы, полученные по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона технологии термоцентробежного распыления слитков плавных карбидов вольфрама [6, 7], отличаются высокой микротвердостью, однородной структурой и по физико-механическим свойствам превосходят аналогичные отечественные и зарубежные материалы, полученные по другим технологиям [8, 9].

Грануляция порошка дробленого и сферического карбидов вольфрама находилась в пределах 50...250 мкм. Усредненный химический состав и микротвердость обоих видов карбидов приведены в табл. 1.

Для матричного сплава использовали порошок на никелевой основе ПГ-СР2 и никель-медной



Таблица 1. Химический состав и твердость карбидов вольфрама со сферическими и дроблеными частицами (вольфрам — основа)

Тип гранул карбида вольфрама	Химический состав, мас. %				Микротвердость HV100
	C _{общ}	C _{св}	Fe	При-меси	
Сферические	3,98	0,05	0,10	0,95	2600...3100
Дробленые	3,89	0,15	0,14	1,45	1900...2200

Таблица 2. Химический состав и твердость сплава матриц (никель — основа)

Тип порошка матричного сплава	Химический состав, мас. %					Твердость HRC
	C	Cr	Si	B	Cu	
ПГ-СР2	0,53	13,82	2,43	2,25	-	58,63
ПР-НД42СР	0,15	-	1,05	1,0	42,5	38,46

основе ПР-НД42СР, усредненный химический состав которых приведен в табл. 2.

После наплавки толщина композиционного слоя на образцах составляла 5,0...5,5 мм. При этом следует отметить, что армирующие гранулы карбида вольфрама вследствие большой массы, как правило, располагаются в нижней части сварочной ванны. Поэтому для получения оптимальной концентрации армирующей фазы на поверхности наплавленного слоя образцы шлифовали, как чисто, на глубину 1,0...1,5 мм. В конечном итоге толщина наплавленного слоя составила приблизительно 4 мм, а концентрация карбидных включений на испытываемые поверхности образцов колебалась в пределах 45...50 %.

Эталоном служили образцы, наплавленные никелькарбидохромовым сплавом порошковой лентой ПЛ АН-111 в три слоя с толщиной наплавки после шлифовки 12 мм. Тип наплавленного металла 500Х40Н40С2ГРЦ. Химический состав эталонов, мас. %: 5,1 С; 34 Cr; 36 Ni; 2,1 Si; 1,2 Mn; 0,3 В; 0,3 Zr, твердость эталонов HRC 52...55.

Во всех случаях наплавку выполняли на пластины из стали марки Ст3 толщиной 20 мм.

В табл. 3 приведены типы образцов наплавленных композиционных сплавов для испытаний на газоабразивный износ при температурах 25 и 400 °С. Каждый тип сплава для получения максимально достоверных данных представлен тремя образцами.

Таблица 3. Типы образцов для испытаний на газоабразивный износ

Маркировка образцов	Состав матрицы	Твердость матрицы HRC	Вид армирующей фазы	Твердость армирующей фазы HV100
КН-1	Ni-Cr-Si-B	58...63	50 % дробленые 50 % сферические	1800...2200 2800...2930
КН-2	Ni-Cr-Si-B	58...64	100 % сферические	2650...2880
КН-3	Ni-Cr-Si-B	54...59	«-»	2730...3000
КМ-4	Ni-Cu-Si-B	38...46	«-»	2750...3050
КМ-5	Ni-Cu-Si-B	39...49	«-»	2800...2980
Эталон	C-Cr-Ni-Si-Mn	55...62	-	-



Рис. 1. Общий вид стенда ОБ-876Ц

Испытания износостойкости композиционных сплавов, наплавленных плазменно-порошковым способом, проводили в условиях моделирования газоабразивного изнашивания на модернизированном стенде ОБ-876Ц. Стенд позволяет осуществлять изнашивание образцов воздушно-абразивным потоком по определенной схеме.

Разгон абразивных частиц осуществляется центробежным ускорителем в виде диска-ротора, в центре которого в приемное отверстие самотеком подается абразив — кварцевый песок, грануляцией 0,05...0,5 мм.

Частицы песка разгоняются по четырем внутренним каналам до скорости 200 м/с. Достигнув наружного диаметра ротора, абразивный поток преодолевает воздушный промежуток длиной 25 мм и ударами частиц абразива изнашивает одновременно рабочие поверхности шести образцов размером 170×70×19 мм. При этом угол атаки абразива по отношению к поверхности образцов составляет 15°. Кассета с образцами расположена в камере, температура в которой может регулироваться в пределах 25...450 °С. Внешний вид стенда ОБ-876Ц и кассета с образцами показаны на рис. 1 и 2, а его основные технические характеристики представлены ниже.

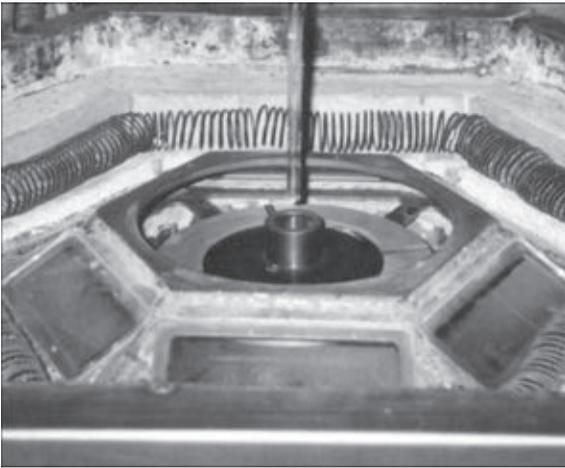


Рис. 2. Кассета с образцами в камере нагрева

Технические характеристики стенда ОБ-876Ц

Диаметр ротора, мм	220
Число оборотов ротора, об/мин	6000
Угол атаки абразивного потока, град	5...70
Температура нагрева образцов, °С	до 450
Продолжительность нагрева образцов до 400 °С, ч	3,5
Расход абразива, см ³ /с.....	0,5...0,3
Мощность электродвигателя привода ротора, кВт	0,75
Количество испытуемых образцов, шт.	6

Износ образцов оценивали по уменьшению объема в см³, который определяли методом гидростатического взвешивания. Также определяли интенсивность изнашивания в см³ при расходе каждых 100 кг абразива и относительную износостойкость к эталону, наплавленному никель-карбидохромовым сплавом. Усредненные данные исследований трех образцов каждого типа композиционного сплава приведены на рис. 3.

Как и ожидалось, общей закономерностью износа композиционных сплавов при газоабразивном изнашивании является его избирательность и цикличность, т. е. изменение износостойкости во времени. Первоначально интенсивно изнашивается матрица, оголяя карбиды, которые за счет теневого эффекта защищают матрицу и существенно замедляют износ сплава. После износа матрицы и вымывания карбидов цикл повторяется. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными исследований, описанных в работе [2].

При угле атаки абразива 15° состав матрицы и ее твердость практически не влияет на износостойкость композиционного сплава.

В условиях комнатной температуры наибольшую износостойкость имеют композиционные сплавы КН-2, КН-3, состоящие из сферических гранул карбида вольфрама и матрицы типа Ni-Cr-Si-W. Их износостойкость ориентировочно превосходит в 2,7 раза износостойкость эталона из никелькарбидохромового сплава. Сплав КН-1 с аналогичной матрицей, но содержащий смесь сферических и дробленых гранул карбида вольфрама имеет износостойкость приблизительно на

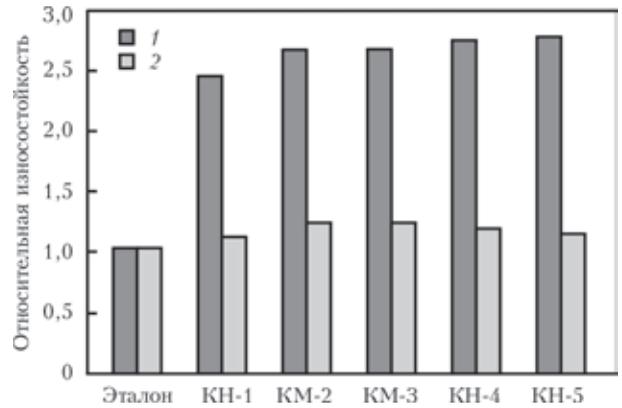


Рис. 3. Относительная износостойкость образцов композиционных сплавов при температурах 25 (1) и 400 (2) °С

10...12 % ниже, что соответствует более низким прочностным характеристикам дробленых частиц по сравнению со сферическими.

При температуре 400 °С износостойкость композиционных сплавов существенно снизилась, хотя тенденция повышенной стойкости композиций со сферическими гранулами карбидов по сравнению со смесью сохранилась. Увеличение износа при повышенных температурах прежде всего связано с окислительными процессами карбидной составляющей сплавов. Износ карбидов вольфрама происходит не только за счет воздействия абразивного потока, но и за счет их окисления. Этот фактор следует учитывать при упрочнении композиционными сплавами на базе карбидов вольфрама деталей, работающих при высоких температурах в окислительной среде. В восстановительной или инертных средах температура практически не влияет на износостойкость композиционных сплавов. На практике это прослеживается при эксплуатации засыпных аппаратов доменных печей, наплавленных композиционными сплавами на основе релита, которые эксплуатируются в восстановительной газовой среде. Такие аппараты трудоемкие в изготовлении, однако их стойкость в несколько раз превышает аппараты, наплавленные карбидохромовыми сплавами.

Выводы

1. Износ композиционных сплавов на базе плавляемых карбидов вольфрама в условиях воздействия газоабразивного потока носит избирательный, циклический характер и несущественно зависит от свойств и твердости матрицы при угле атаки 15°.

2. Даже частичное использование сферических гранул карбидов вольфрама в качестве армирующей фазы взамен дробленых увеличивает износостойкость композиционного сплава на 10...12 %.

3. Износостойкость композиционных сплавов в условиях газоабразивного износа при комнатной



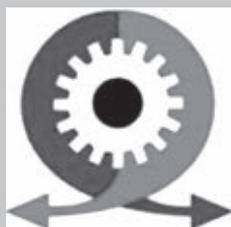
температуре ориентировочно в 2,7 раза превосходит износостойкость никелькарбидохромового сплава, а при температуре 400 °С существенно снижается за счет окисления карбидной составляющей сплава.

1. Терещенко Н. Ф., Гавриш В. А. Стойкость сплавов при газоабразивном изнашивании // Физ.-хим. механика материалов. – 1971. – № 4. – С. 18–21.
2. Особенности газоабразивного износа композиционных сплавов / Ю. А. Юзвенко, А. П. Жудра, Е. И. Фрумин, В. А. Гавриш // Автомат. сварка. – 1972. – № 8. – С. 35–38.
3. Юзвенко Ю. А., Жудра А. П., Фрумин Е. И. Абразивный износ композиционных сплавов // Там же. – 1973. – № 7. – С. 62–63.
4. Юзвенко Ю. А. Исследование и разработка материалов и технологий механизированной наплавки открытой ду-

гой: Дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1978. – С. 80–137.

5. Юзвенко Ю. А., Гавриш В. А. Установка для оценки износостойкости наплавленного металла при газоабразивной эрозии // Автомат. сварка. – 1972. – № 6. – С. 73–74.
6. Литвиненко А. И., Жудра А. П., Белый А. И. Анализ и кинетика процесса термоцентробежного распыления слитков из плавящихся карбидов вольфрама // Современ. электротехнология. – 2013. – № 2. – С. 29–36.
7. Дзыкович В. И. Влияние процесса термоцентробежного распыления на свойства сферических частиц карбида вольфрама // Автомат. сварка. – 2009. – № 4. – С. 52–55.
8. Дзыкович В. И., Жудра А. П., Белый А. И. Свойства порошков карбида вольфрама, полученных по различным технологиям // Там же. – 2010. – № 4. – С. 28–31.
9. Белый А. И. Износостойкость и прочность карбида вольфрама WC+W₂C, полученных различными способами // Там же. – 2010. – № 12. – С. 20–24.

Поступила в редакцию 01.10.2014



УКРАИНА на 56-й МЕЖДУНАРОДНОЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ВЫСТАВКЕ «MSV 2014» в г. БРНО (ЧЕХИЯ)

С 29 сентября по 3 октября 2014 г. в Брно прошла 56-я Международная выставка «Машиностроение». Она проходит ежегодно, начиная с 1958 г., и является крупнейшей в Центральной и Восточной Европе; на ней традиционно представлены все ключевые направления машиностроительной и электротехнической отраслей: горнодобывающее, металлургическое, литейное, материалы и компоненты для машиностроения, приводы, гидравлическое и пневматическое оборудование, техника кондиционирования воздуха, пластмассы, резиновая промышленность и химия, металлообработка, энергетика и электротехника, электроника, автоматизация, измерительная техника, экологическая техника.

В этом году выставочный комплекс включал 14 павильонов, общая площадь выставочных площадей — 667 квадратных метров. Ее главной тематикой стала «Промышленная автоматизация».

В этом году выставка объединила 1600 участников из 32 стран. Украину представила делегация Запорожской Торгово-Промышленной Палаты с коллективной экспозицией предприятий Запорожского региона, работающих в сфере машиностроения и металлургии.

В составе делегации — ООО «Триада ЛТД Ко» (интегратор промышленных роботизированных сварочных комплексов, специализированный поставщик сварочных материалов и оборудования), ООО «Таврическая литейная компания «ТАЛКО» (отливки из алюминиевых сплавов), ООО «Корундкерамика плюс» (керамические изделия для металлургической, электротехнической и других отраслей промышленности) и другие компании. Кроме того, компания «Триада ЛТД Ко» на выставке представила свою новую разработку по производству защитных сварочных шторок WELD-ZAKHYST — это современные мобильные конструкции, предназначенные для защиты людей и окружающего пространства от сварочных брызг.

В рамках выставки представители Украины приняли участие в контактной бирже «Kontakt — Kontrakt». Насыщенная программа выставки способствовала профессиональному общению, обмену опытом, установлению новых деловых связей.





УДК 621.791.61

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ БИПОЛЯРНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКЕ

Ю. Н. ЛАНКИН, Л. Ф. СУШИЙ, Е. Н. БАЙШТРУК

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

Высокочастотная сварка мягких биологических тканей биполярным электрохирургическим инструментом концептуально подобна контактной точечной сварке металлов. Физико-биологические процессы, происходящие в тканях при сварке, в основном являются следствием их нагрева и приложенного давления. Поэтому знание температуры в свариваемом контакте тканей имеет важное значение. Публикации по оборудованию и измерению температуры при сварке биологических тканей практически отсутствуют. В качестве датчиков температуры выбраны стандартные термопары с малым (70 мкм) диаметром проволок как наиболее миниатюрные. Тепловыделение в термопаре проходящим через нее сварочным током по сравнению с тепловыделением в ткани практически отсутствует. Искажением электрического и температурного поля вблизи термопары можно пренебречь. Тепловая постоянная времени выбранной термопары по литературным данным порядка 8 мс. Измерительная система состоит из хромель-алюмель термопары с диаметром проволок 70 мкм, усилителя термоЭДС, аналогового фильтра нижних частот, АЦП и ноутбука. Экспериментально показано, что термопара может быть представлена инерционным звеном первого порядка с чистым запаздыванием. Термическая постоянная времени термопары 4,3 мс, время запаздывания около 1 мс. Аналоговый фильтр нижних частот полностью подавляет помехи от сварочного тока и определяет общую полосу системы измерения температуры шириной 25 Гц. Разработанная система позволяет измерять температуру контакта биологических тканей при высокочастотной сварке биполярным электрохирургическим инструментом без динамических погрешностей и не внося искажений в температурное поле ткани. Библиограф. 9, рис. 6.

Ключевые слова: сварка биологических тканей, измерение температуры, термопара, тепловая постоянная времени, фильтрация помех от сварочного тока

Концептуально биполярная высокочастотная сварка биологических тканей полностью подобна контактной точечной сварке металлов. Две части ткани сжимаются двумя электродами с некоторым усилием с последующим нагревом протекающим через ткань током. В результате совместного действия тепла и приложенного давления ткань существенно изменяется: она денатурирована, полностью деструктурирована и представляет собой гомогенную массу коллагена, эластина и основных субстанций ткани с существенно уменьшенными границами между ними, образуя сварное соединение двух первоначально раздельных участков ткани. Таким образом, при высокочастотной сварке биологических тканей определяющим является их нагрев. Поэтому знание температуры ткани в формируемом сварном соединении при исследовании всех аспектов сварки чрезвычайно важно. Однако трудности измерения температуры сварного соединения в процессе сварки привели к тому, что этот вопрос практически не изучен.

Нам известна лишь одна публикация, где приведены экспериментальные кривые изменения температуры альбумина и стенки артерии во время нагрева высокочастотным электрическим током с помощью биполярного хирургического инструмента [1] (рис. 1).

Кривые рис. 1 явно сильно ретушированы и приведены лишь для иллюстрации закономерностей хода кривых.

В самом первом отчете ИЭС по сварке биологических тканей [2] также приведено несколько

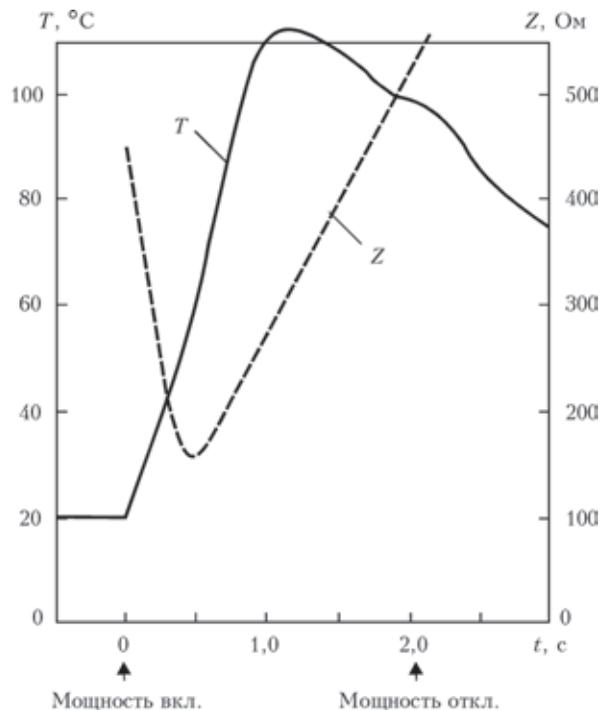


Рис. 1. Изменение температуры T и импеданса Z артерии при нагреве высокочастотным током [1]

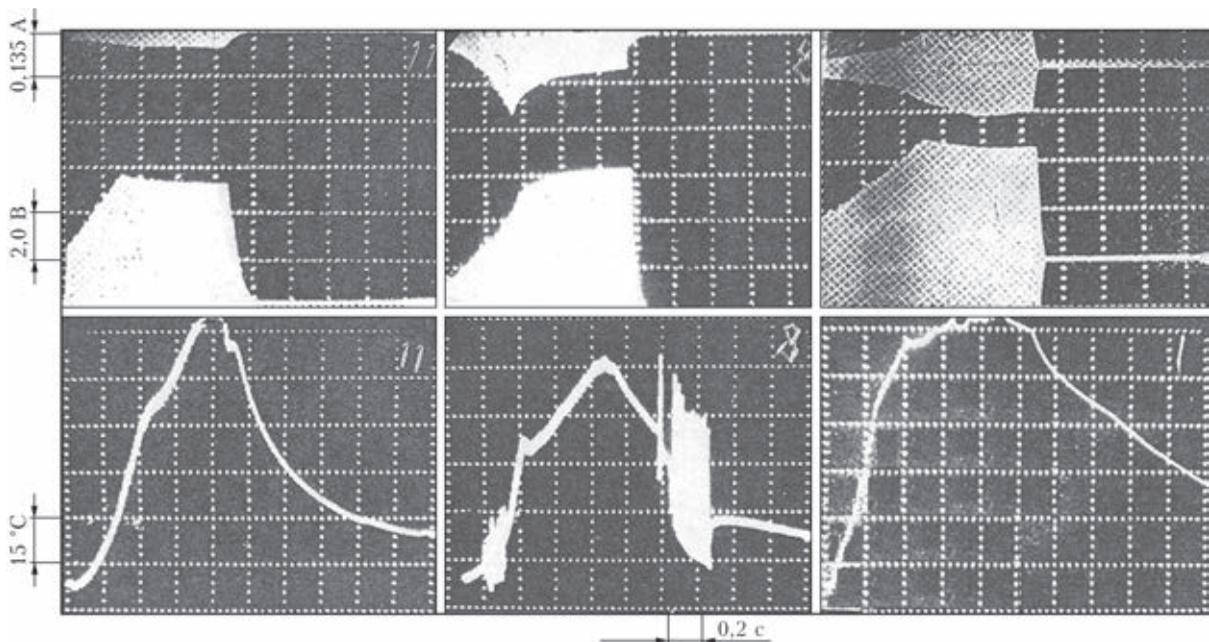


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения сварки, температуры сварочного контакта при вариациях параметров режима сварки [2]

осциллограмм изменения температуры ткани в сварочном контакте (рис. 2). К сожалению, в отчете не приведена методика измерения температуры. Лишь указано, что температура измерялась в «зоне сварки».

В дальнейшем измеряли только температуру поверхности свариваемой ткани вблизи электрода с помощью пирометра. Опыт контактной точечной сварки металлов не подтверждает достаточно высокой корреляции этой температуры с параметрами сварочного ядра. Интегральная температура поверхности ткани вблизи электрода характеризует ширину зоны термического влияния и в гораздо меньшей степени собственно сварное соединение. Следует отметить, что ширина зоны термического влияния оказывает решающее влияние на последующую регенерацию тканей в сварном соединении.

Известно несколько патентов на сварочный инструмент с измерением температуры электродов с помощью термопар с целью контроля и автоматического регулирования процесса сварки [3–7]. Как и при точечной контактной сварке металлов этот способ не получил практического применения ввиду сложности и ненадежности инструмента, а в основном из-за низкой корреляции температуры контактной поверхности электрода с температурой сварочного контакта.

Датчик температуры. Толщина ткани в сварном соединении может быть менее миллиметра, что приводит к необходимости применения как можно более миниатюрных датчиков температуры. Оптимальным решением является использование термопар малого диаметра. Промышленностью выпускаются термопары с диаметром

проволок до 4,5 мкм [8]. Диаметр бусинки спая такой термопары равен приблизительно трем диаметрам ее проволоки, т. е. 15 мкм. Для имеющего место при сварке биологических тканей диапазона температур 40...200 °С вполне подходят широко распространенные термопары типа *J* (железо–константан) или *K* (хромель–алюмель). Нами были выбраны термопары *K*-типа диаметром 70 мкм (0,0031").

Как и при точечной контактной сварке металлов сварка биологических тканей проводится внахлестку или по отбортовке. Термопара помещается между свариваемыми тканями по оси электродов. В результате через нее проходит часть сварочного тока. Оценим нагрев термопары проходящим через нее током. Тепло, выделяющееся в термопаре, пропорционально удельному сопротивлению материала термопары ρ . Удельные сопротивления материала проволоки применяемой термопары типа *K* (хромель и алюмель) равны 0,66 и 0,33 мкОм·м соответственно. Удельное сопротивление наиболее электропроводного вещества тела человека — плазмы крови — 0,66 Ом·м, т. е. на 6 порядков больше удельного сопротивления материалов термопары. Поэтому сварочный ток, проходящий через спай термопары, никак не может вызвать ее дополнительный нагрев и тем самым исказить результаты измерения.

Вследствие высокой электропроводности материала термопары она искажает электрическое поле вблизи измерительного спая. Представим термопару в виде цилиндра. Для проводящего цилиндра сравнительно малого диаметра во внешнем электростатическом поле напряженность поля на поверхности пропорциональна косинусу угла между вектором



напряженности поля и соответствующим радиусом-вектором цилиндра [9]. Соответственно в этой области изменяется плотность тока и выделяющееся тепло. Однако среднее по поверхности цилиндра тепловыделение изменяется мало и составляет всего 0,785 часть от невозмущенного электростатического поля. Поскольку теплопроводность материала термопары около 90 Вт/(м·К), а воды, определяющей теплопроводность биологических тканей, около 0,68 Вт/(м·К), т. е. на два порядка меньше, температура термопары во всем объеме одинакова и выравнивает неравномерность температуры в прилегающей к термопаре ткани. Таким образом, в первом приближении можно пренебречь влиянием сравнительно малой термопары на температуру ткани при сварке.

Динамическая погрешность термопары зависит от диаметра ее проволок. Экспериментальная тепловая постоянная времени железо-константановой термопары с диаметром проволок 0,005", измеренная при выдержке в спокойной воде с температурой 93 и 38 °С, равна 0,04 с [8]. Согласно теории подобия постоянная времени нагрева пропорциональна квадрату диаметра проволок термопар. Следовательно, для термопары 0,0031" постоянная времени будет 0,015 с.

Экстраполируем данные термопар типа *J* на термопары типа *K*. Согласно критерию гомохронности постоянная времени обратно пропорциональна коэффициенту температуропроводности материала. Примем температуропроводность термопары типа *J* как среднюю для железа ($1,626 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) и константана ($0,612 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) $1,119 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Материал термопар типа *K* на 90 % состоит из никеля. Коэффициент температуропроводности никеля $2,29 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Таким образом, можно ожидать, что постоянная времени применяемой хромель-алюмелиевой термопары будет вдвое ниже, чем у термопары типа *J*, т. е. порядка 8 мс.

Система измерения температуры. Экспериментальная система измерения температуры при сварке биологических тканей приведена на рис. 3. Система состоит из термопары 1, усилителя термо ЭДС 2, внешнего модуля АЦП Е14-440 «Л-Кард» 3, ноутбука с программным обеспечением «PowerGraph» 4. При измерениях использовали биполярный электрохирургический зажим 5 и ВЧ-электрокоагулятор ЕК-300М1 6 (серийно выпускается Международной Ассоциацией «Сварка»).

Усилитель термоЭДС термопары выполнен на специализированной микросхеме AD595 Analog Device (рис. 4). Микросхема преобразует термоЭДС тер-

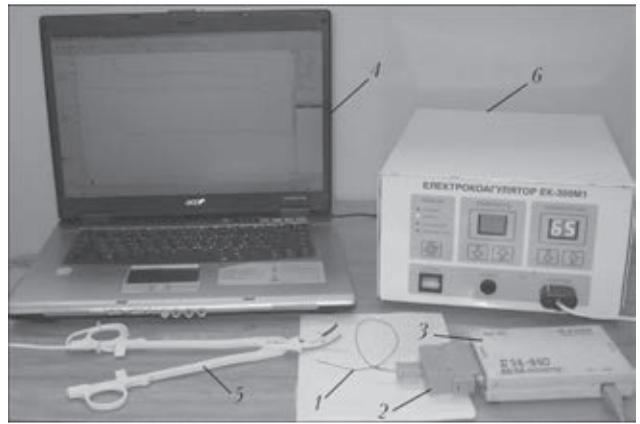


Рис. 3. Общий вид системы измерения температуры при биполярной высокочастотной сварке мягких биологических тканей (описание 1–6 см. в тексте)

мопары в нормализованное напряжение с коэффициентом преобразования 10 мВ/°С. Микросхема реализует встроенную компенсацию холодного спая и линеаризацию передаточной характеристики для термопар типа *K*, в результате чего обеспечивается точность измерения 1 °С во всем диапазоне измеряемых температур.

Для аппаратной фильтрации помех от напряжения сети и сварочного источника применены входной *C1*, *R1*, *R2*, *C2* и выходной *R3*, *C3* фильтры нижних частот.

Основные помехи в канале измерения температуры появляются при пропускании тока через свариваемую ткань (рис. 5, а). Как видно из рис. 5, уровень помех в выходном сигнале температуры при отсутствии фильтрации весьма высок. Примененный многорезонансный фильтр практически полностью устраняет помехи и в то же время обеспечивает приемлемую полосу пропускания системы измерения 25 Гц.

Для экспериментальной оценки инерционности термопары с нормирующим усилителем рис. 3 проведены следующие эксперименты. С помощью специально сконструированного устройства типа пружинного спускового механизма термопара быстро помещалась в горячую воду и фиксировалась кривая изменения ее температуры — кривая раз-

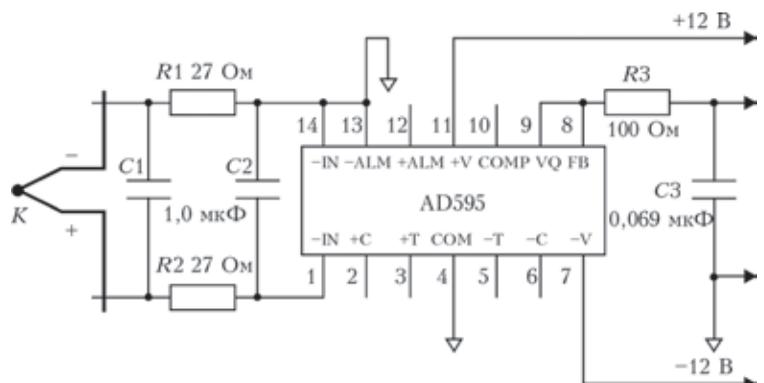


Рис. 4. Принципиальная схема усилителя термоЭДС хромель-алюмелиевой термопары

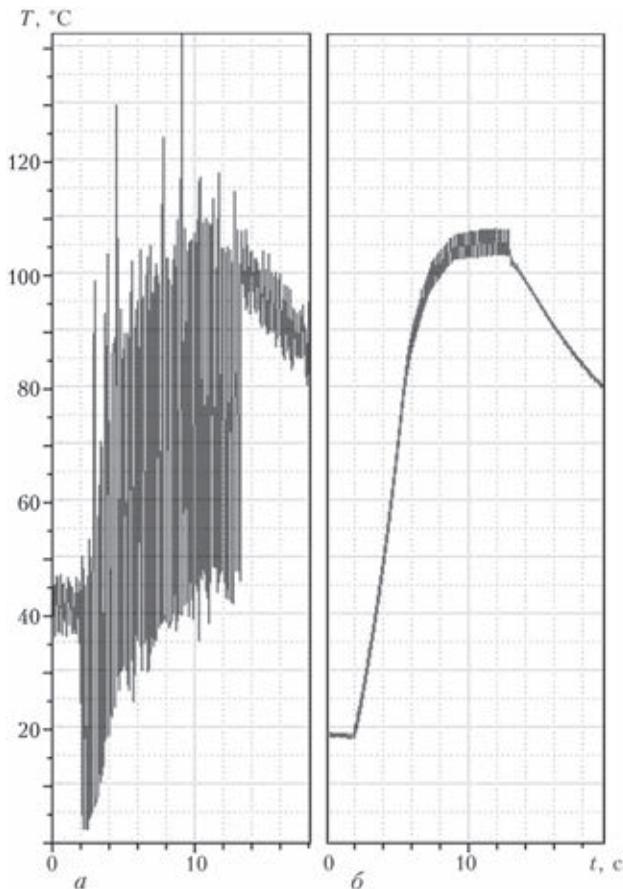


Рис. 5. Запись температуры при сварке свиной кишки: а — без фильтрации; б — при наличии аппаратных фильтров нижних частот по рис. 4

гона. Для измерения только тепловой постоянной времени термопары фильтры помех из схемы усилителя рис. 4 были исключены. На рис. 6 приведена одна из полученных кривых разгона. Она имеет вид, типичный для кривых нагрева реальных физических тел, и обычно описывается экспонентой с постоянной времени T и временем чистого запаздывания τ . Из рис. 6 находим $T = 4,3$ мс и $\tau = 1,2$ мс. Реально значение τ несколько меньше, так как в него вошло время нагрева термопары парами при ее движении к поверхности воды.

Считается, что теплофизические свойства свариваемых биологических тканей близки к свойствам воды. Коэффициент температуропроводности воды в диапазоне температур 40...90 °С приблизительно равен $16 \cdot 10^{-8}$ м²/с, что на два порядка ниже коэффициента температуропроводности материала термопар. Следовательно, тепловая постоянная времени биологической ткани в сто

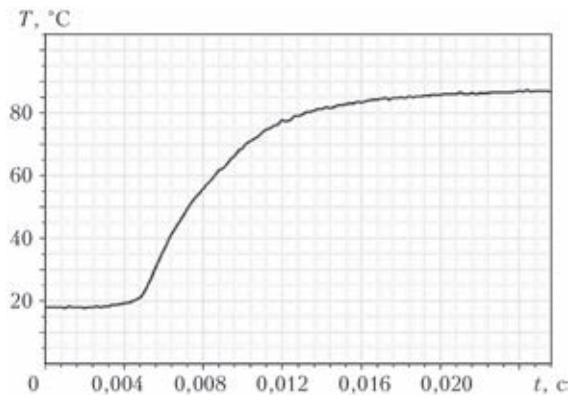


Рис. 6. Кривая нагрева термопары в воде

раз выше постоянной времени термопары. Поэтому можно предполагать, что инерционность термопары не вносит значительных динамических погрешностей измерения температуры при сварке биологических тканей даже при модуляции сварочного тока. Основная инерционность системы измерения температуры в нашем случае определяется полосой пропускания электрического фильтра помех от сварочного тока, проходящего через ткань в области горячего спая термопары, и помех питающей сети.

В заключение следует отметить, что разработанная система позволяет измерять истинную температуру контакта биологических тканей при высокочастотной сварке биполярным электрохирургическим инструментом без динамических погрешностей и не внося значительных искажений в температурное поле ткани.

1. Bergdahl B., Vällfors B., *Neurosurg J. Studies on coagulation and development of an automatic computerized bipolar coagulator* // J. Neurosurg. – 1991. – Vol. 75, N 8. – P. 148–151.
2. *Разработка способов сварки кровеносных сосудов (Отчет) / ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины; Руководитель темы Б. Е. Патон. – № UA01009046P; Инв. № 492. – Тема 1/34. – Киев, 1994.*
3. *Pat. 4,938,761 U.S. Ensslin F. H. Bipolar electro-surgical Forceps. – MDT Corporatio. – Оpubл. 07.1990.*
4. *Pat. 5,496,312 U.S. Klicek M. S. Impedance and temperature generator for control. – Valleylab Inc. – Оpubл. 03.1996.*
5. *Pat. 5,540,681 U.S. Strub B., Alto P. Method and system for radiofrequency ablation of tissue. – Medtronic Cordiorhythm. – Оpubл. 07.1996.*
6. *Pat. 5,540,684 US. Hassler W. L. Method and apparatus for electro-surgically treating tissue. – Оpubл. 07.1996.*
7. *Pat. 6,083,223 US. Baker J. A. Method and apparatus for welding blood vessels. – Оpubл. 07.2000.*
8. *Omega complete temperature measurement handbook and encyclopedia. – Engineering INC. – 1992. – Vol. 28.*
9. *Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968. – 488 с.*

Поступила в редакцию 30.04.2014

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МИРОВОГО И РЕГИОНАЛЬНЫХ РЫНКОВ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ (Обзор)*

А. А. МАЗУР, С. В. ПУСТОВОЙТ, О. К. МАКОВЕЦКАЯ, Н. С. БРОВЧЕНКО, В. С. ПЕТРУК
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Электродуговая сварка является одной из базовых технологий индустриальной экономики, с ее помощью создается значительная доля ВВП промышленно развитых стран. Для таких стран характерно устойчивое развитие сварочного производства, которое определяется ростом потребления конструкционных материалов, появлением на рынке новых материалов, технологий и оборудования для сварки. Основным конструкционным материалом для изготовления сварных конструкций является сталь, поэтому состояние индустрии ее производства во многом определяет динамику развития сварочного производства. Экономико-статистическая информация о развитии мирового производства и потребления стали, динамике мирового рынка сварочных материалов позволяет сделать вывод об увеличении объемов сварочного производства в мире в обозримом будущем и росте спроса на сварочные материалы. В настоящее время стоимостный объем мирового рынка сварочных материалов составляет почти половину объема рынка сварочной техники. Рост потребления сварочных материалов в мире определяется темпами развития сварочного производства в Китае, намного опережающего в этом отношении остальные страны и регионы. За счет сокращения доли ручной дуговой сварки и более широкого применения полуавтоматической и автоматической сварки постоянно повышается уровень механизации и автоматизации дуговой сварки как в отдельных странах, так и по миру в целом. Библиогр. 12, табл. 5, рис. 9.

Ключевые слова: сварка, сварочное производство, конструкционные и сварочные материалы, технологии, производство стали, рынок, состояние, перспективы

Электродуговая сварка, ставшая в XX веке одной из базовых технологий индустриальной экономики, и сегодня не потеряла своего значения. Она является ключевым способом создания неразъемных соединений металлов и неметаллов, обеспечивая создание значительной доли ВВП промышленно развитых стран [1–3]. Невозможно представить современную цивилизацию без сварки и других родственных ей процессов. Если вдруг развалится все сварные, паяные и другие неразъемные соединения, человечество останется без большинства машин, механизмов и других средств производства и связи, без транспорта, энергии, зданий и сооружений, без привычной для нас бытовой техники, без космоса. И даже без компьютеров, современной электроники и других материальных элементов IT-технологий, без которых невозможно создание информационного общества – общества будущего.

Стратегии развития национальных сварочных производств на среднесрочную перспективу практически не имеют резких отличий и ориентированы на решение актуальных задач: увеличение объемов и расширение областей применения сварки и родственных технологий, повышение производительности сварки при одновременном обеспечении высокого качества соединений; рост уров-

ня механизации и автоматизации сварочных работ, снижение энергопотребления и затрат на сварку и родственные технологии; расширение применения в сварных конструкциях и сооружениях новых прогрессивных металлических, композитных и неметаллических материалов.

Устойчивое и эффективное развитие сварочных производств в промышленных странах базируется на использовании результатов фундаментальных и прикладных исследований, высоком научно-инженерном потенциале, квалифицированных трудовых ресурсах и активном трансфере высоких сварочных технологий и других инноваций.

Отсюда то внимание, которое уделяется во всем мире развитию сварочной науки и техники, совершенствованию технологических процессов сварки, в том числе дуговой сварки плавлением. По мнению отечественных и зарубежных специалистов, она и в обозримом будущем останется ведущим способом создания неразъемных соединений (табл. 1).

Научно- и инженероемкое сварочное производство носит межотраслевой характер, а в металлообрабатывающих отраслях и в строительстве это, как правило, самостоятельный производствен-

По материалам доклада, представленного на VIII Международной конференции «Сварочные материалы», Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 16–18 июня 2014 г.

© А. А. Мазур, С. В. Пустовойт, О. К. Маковецкая, Н. С. Бровченко, В. С. Петрук, 2014



Таблица 1. Развитие европейского рынка сварочной техники и технологий (на ближайшие 10 лет)

Технологический сектор рынка	Без изменений или незначительный прирост	Прирост	Значительный прирост
Дуговая сварка плавящимся электродом		X	
Дуговая сварка неплавящимся электродом	X	X	
Дуговая сварка под флюсом и электрошлаковая сварка	X	X	
Плазменно-дуговая сварка	X	X	
Лазерная сварка		X	X
Электронно-лучевая сварка		X	X
Контактная точечная и шовная сварка	X	X	
Контактная стыковая сварка		X	X
Сварка трением	X	X	
Ультразвуковая сварка		X	X
Высокочастотная сварка		X	X
Пайка		X	
Склеивание		X	X
Механическое соединение	X	X	

но-технологический сектор, тесно интегрированный в общий производственный процесс.

Основными конструкционными материалами для сварных конструкций являются сталь (93...95%), алюминий, титан и другие цветные металлы и пластмассы (суммарно 5...7%), поэтому развитие индустрии производства стали является одним из главнейших факторов, определяющих состояние и динамику развития сварочного производства не только сегодня, но и в обозримом будущем.

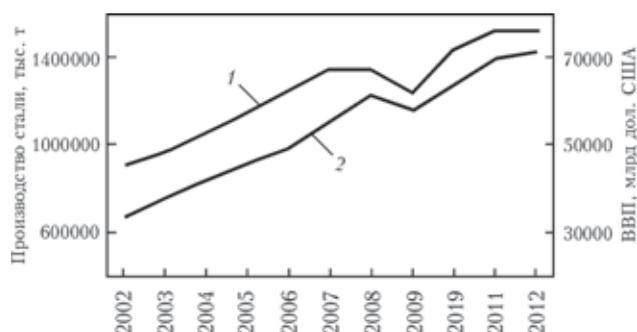


Рис. 1. Динамика мировых показателей производства стали (1) и ВВП (2)

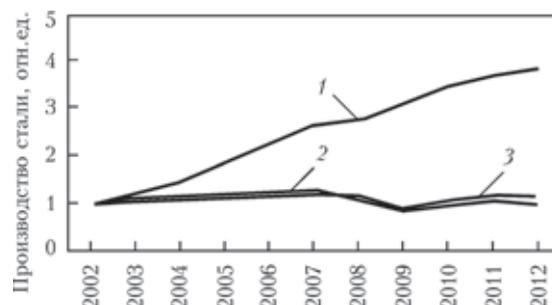


Рис. 2. Производство стали в Китае (1), Украине (2) и мире (3) (без Китая) (объем производства в 2002 г. принят за единицу)

Ни один другой материал не имеет такого сочетания прочности, пластичности, гибкости и стоимости, как сталь. Вся производимая сталь становится ресурсом с неограниченным циклом использования и может быть повторно переработана.

В мировом производстве стали занято более 4 млн работников, еще 4 млн человек заняты во вспомогательных отраслях. Индустрия производства стали — вторая в мире по потреблению энергии, несмотря на то, что энергоемкость ее производства за последние 30 лет сократилась на 50%. Она является двигателем, который обеспечивает развитие мировой промышленности, а показатели отрасли отражают глобальную экономическую ситуацию [4, 5]. На рис. 1 показана тесная взаимосвязь между мировым производством стали, стального проката и ВВП. За последнее десяти-



Рис. 3. Распределение мирового объема потребления стали по регионам (а) и по отраслям промышленности (б) в 2012 г.

Таблица 2. Распределение потребления стали по отраслям в мире, Китае и ЕС (%)

Отрасль	Мир	Китай	ЕС
Строительство	48	50	38
Машиностроение	23	19,2	24
Транспорт	11	7,1	12
Судостроение	6	4,3	2
Нефть и газ	7	7,1	12
Прочие	5	7,1	8

летие мировой объем выпуска стали увеличился в 1,7 раза, ВВП — более чем в 2 раза. В среднем на каждые 100 дол. США прироста ВВП необходимо изготовить 2 кг стали.

В 2012 г. по данным World Steel Association (WSA) потребление стали в мире составило 218 кг на одного человека, в том числе в Китае — 500 кг, ЕС — 340, России — 330, США — 310, Украине — 160, Африке — 30.

Китай с 1996 г. является мировым лидером в производстве стали. В 2012 г. его доля составила 46 % (731 млн т) мирового объема. Второе место заняла Япония, третья — США. Украина в 2012 г. по сравнению с 2011 г. уменьшила производство стали на 2,4 млн т и снизилась на две позиции в рейтинге крупнейших производителей, став десятой с показателем 32,9 млн т [6].

На рис. 2 показана динамика роста производства стали в Китае, Украине и мире (без Китая) по сравнению с 2002 г.

В табл. 2 и на рис. 3 показано распределение мирового объема потребления стали по регионам и по отраслям промышленности.

Структура потребления стального металлопроката по маркам стали, приведенная на рис. 4, свидетельствует о том, что 94,9 % металлопроката выпускается с использованием углеродистой и низкоуглеродистой стали — основного конструкционного материала, используемого при сварке.

Несмотря на то, что индустрия производства стали сталкивается с большим количеством препятствий, таких, как избыточные мощности, волатильность сырьевых и энергетических рынков, риски протекционистской политики, сталь и в дальнейшем остается одним из наиболее важных материалов для современной экономики.

По оценкам экспертов World Steel Association, а также экспертов Международного института чугуна и стали (IISI), к 2025 г. спрос на сталь увеличится до 2,3 млрд т в год. Среднегодовые темпы роста в 2014–2025 гг. составят 3,7 %. На строительный сектор будет приходиться 64 % потребления стали, автомобилестроение — 17 %, производство технологических машин и оборудования (машиностроение) — 15 %.

До 2025 г. 90 % ожидаемого увеличения потребления стали обеспечат следующие отрасли:

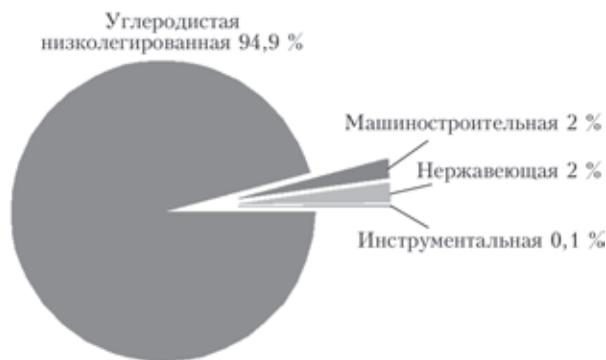


Рис. 4. Структура потребления металлопроката в 2012 г.

- ♦ строительство жилья, инфраструктурные проекты в странах с развивающейся экономикой (68 % роста);

- ♦ технологическое машиностроение (13 %);
- ♦ нефтегазовые и другие трубы (9 %).

Приведенная выше информация о состоянии и перспективах развития индустрии производства стали позволяет утверждать, что объемы сварочного производства в обозримом будущем будут возрастать и, соответственно, будет увеличиваться рынок сварочных материалов.

Можно ожидать, что к 2025 г. объемы потребления металлопроката могут достигнуть 2500 млн т, сварочных материалов — 11 млн т. Основанием для такого утверждения могут служить приведенные на рис. 5 данные о мировом потреблении металлопроката, сварочных материалов и массы наплавленного при сварке металла за 1998–2012 гг., а также приведенные выше данные о росте к 2025 г. спроса на сталь.

Наиболее ярким примером, подтверждающим общую тенденцию зависимости между ростом потребления стали и общим экономическим уровнем стран, которым присущ высокий темп роста ВВП, является Китай (см. рис. 2), который в последние годы имеет самый высокий и устойчивый темп прироста ВВП (8...10 %) и занимает первое

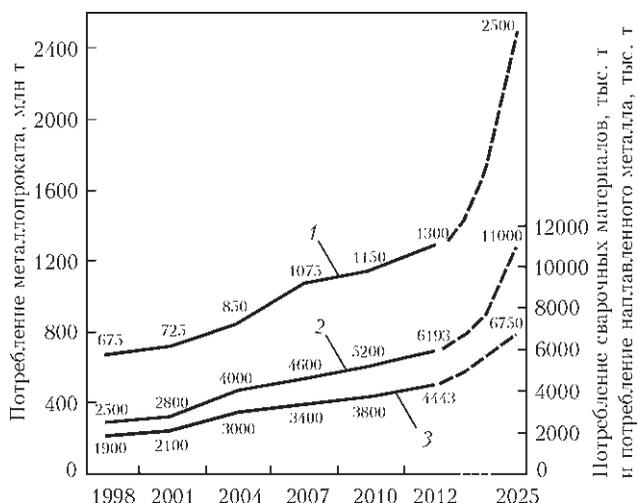


Рис. 5. Мировое потребление металлопроката (1), сварочных материалов (2) и наплавленного металла (3)



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

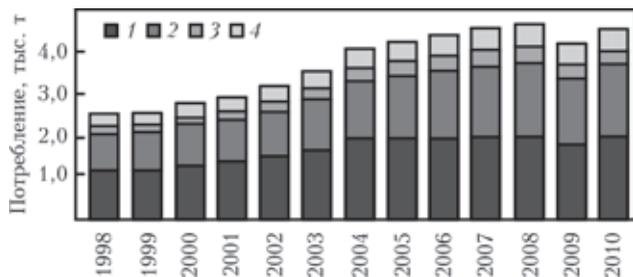


Рис. 6. Динамика потребления по основным видам сварочных материалов, тыс. т (1 — электроды; 2 — сплошная проволока; 3 — проволока для сварки под флюсом; 4 — порошковая проволока)

место в мире по объему и темпам прироста потребления стали [7]. Доля этой страны в мировом потреблении стали возросла с 20,1 % в 2002 г. до 46 % в 2012 г.

В качестве другого примера могут быть приведены страны ЕС, у которых прирост потребления стали составляет 1...3 %. Такое умеренное развитие потребительского рынка стали соответствует и умеренному росту ВВП в этих странах, в среднем 2...3 % в год.

В мировой научно-технической литературе иногда смешивают два понятия: «сварочные материалы» и «материалы для сварки», что ведет к недоразумениям при сопоставлении статистических показателей. К первым относятся материалы, большая часть которых в процессе сварки переходит в состав металла сварного шва (для дуговой сварки это сплошные и порошковые проволоки, покрытые и другие плавящиеся электроды, флюсы), а вторые — это защитные активные и инертные газы и другие материалы, в том чис-

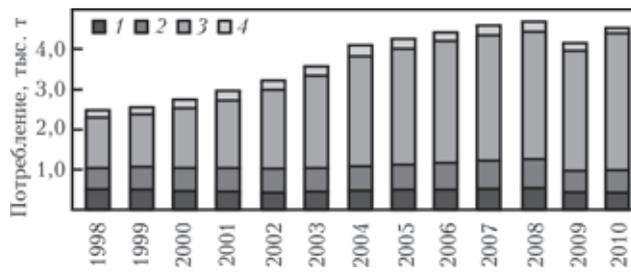


Рис. 7. Динамика потребления сварочных материалов по основным регионам, тыс. т: 1 — Северная Америка; 2 — Европа; 3 — Азия; 4 — другие регионы

Таблица 3. Потребление сварочных материалов в мире и регионах, странах [10, 11]

Страна, регион	Расход сварочных материалов, тыс. т	
	2011 г.	2012 г.
Мир	5945,6	6193
Китай	3000	3200
ЕС	570	550
Северная Америка	430	430
Япония	285	283
Индия	260	270
Корея	230	240
Россия, СНГ	220	230
в том числе Украина	69	63
Латинская Америка	210	220
Ближний и Средний Восток	180	190
Африка	140	150
Тайвань	80	80
АСЕАН	270	280
Прочие	70	70

ле вспомогательные, которые принимают участие в обеспечении процессов сварки. Можно спорить об отнесении к сварочным материалам сварочных

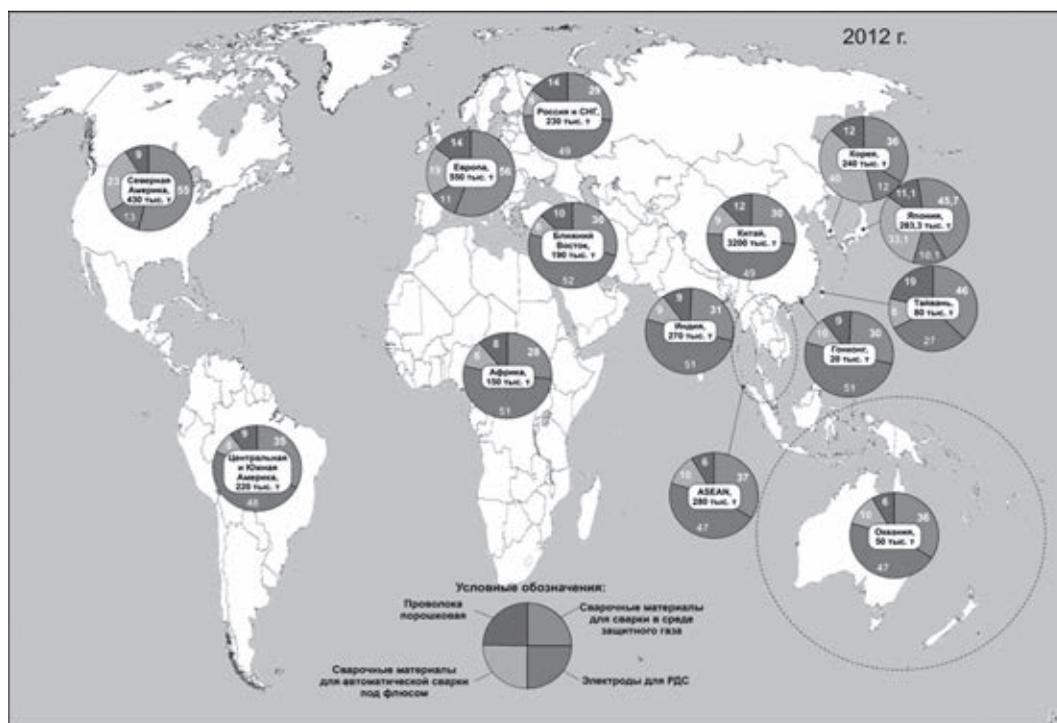


Рис. 8. Потребление сварочных материалов в мире и регионах в 2012 г.

Таблица 4. Технологическая структура способов дуговой сварки в мире (% по наплавленному металлу)

Страна	Способ сварки	Годы						
		1965	1975	1985	1995	2000	2005	2012*
Западная Европа	РДС	74	58	34	18	15	12	8,9
	CO ₂		31	56	70	71	75	63,9
	ПП		2	3	6	6,5	6,5	19,1
	АФ		9	7	6	7,5	6,5	8,1
США	РДС	71	53	42	25	19,5	15	10,3
	CO ₂		25	38	54	54	58,5	61,4
	ПП		13	13	19	19	19,5	22,1
	АФ		9	7	7	7,5	7	6,2
Япония	РДС	85	67	44	22	14	12	7,3
	CO ₂		20	39	52	54	54,5	49,5
	ПП		1	11	25	25	27	35,9
	АФ		9	10	7	7	6,5	7,3
Украина	РДС	65,6	52,4	44,9	65,1	66,6	64,8	48,9
	CO ₂	9,5	23,7	35	26,5	23,3	16,1	32,5
	ПП	0,5	3,2	3,4	0,9	0,5	3,2	1,4
	АФ	27	20,7	16,7	7,5	9,6	15,9	17,2

* Данные из «The Japan Welding News For The World» и ИЭС им. Е. О. Патона.

флюсов, но это сложившаяся у нас практика. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать именно такое толкование термина «сварочные материалы», хотя в ряде стран национальная статистика учитывает именно «материалы для сварки», что следует иметь в виду при международных сопоставлениях соответствующих показателей.

В стоимостном объеме мирового рынка сварочной техники, по оценке специалистов фирмы «ESAB», сварочные материалы составляли в 1996 г. 70 %, сварочное оборудование 30 %. К 2006 г. соотношение этих показателей соответственно было 45 и 55 %. В настоящее время можно считать, что стоимостный объем мирового рынка сварочных материалов составляет около половины всего объема рынка сварочной техники.

На рис. 6 и 7 приведены данные компании «ESAB» об объемах потребления по основным видам сварочных материалов и регионам [8, 9].

Мы периодически выборочно сопоставляем наши данные с данными «ESAB» и японскими данными, ежегодно публикуемыми в «The Japan Welding News For The World» [10, 11], чтобы быть уверенными в их достоверности.

Данные корпорации «ESAB» в достаточной степени близки к тем результатам, которые мы получаем в ходе своих исследований. То же можно сказать и о японских данных (табл. 3 и рис. 8). Достоинство последних заключается в более широком охвате регионов и, самое главное, в регулярности и оперативности опубликования в печати.

Мировой объем потребления сварочных материалов, который в 2011 г. составил 5946 тыс. т, в 2012 г. вырос на 4,2 % и достиг 6193 тыс. т. Рост мирового объема потребления сварочных мате-

риалов определялся темпами развития сварочного производства Китая, намного опережающего в этом отношении остальные регионы. На Китай в 2012 г. приходилось 51,7 % всего мирового потребления сварочных материалов (3200 тыс. т). Далеко отстали страны ЕС — 8,9 % (550 тыс. т) и Северная Америка (США, Канада, Мексика) — 6,9 % (430 тыс. т).

От 300 до 200 тыс. т в год потребляют Япония (283 тыс. т), АСЕАН (280 тыс. т), Индия (270 тыс. т), Корея (240 тыс. т), страны СНГ (230 тыс. т), Латинская Америка (210 тыс. т). Ближний и Средний Восток (190 тыс. т), Африка (150 тыс. т). Замыкают этот список регионов Тайвань (80 тыс. т) и прочие более мелкие страны с суммарным потреблением 70 тыс. т.

Наличие достоверной и полной информации об объемах потребления сварочных материалов позволяет определить видовую структуру применяемых в мире, регионах и в конкретной стране способов дуговой сварки плавлением. Обычно в качестве критерия используется масса напла-

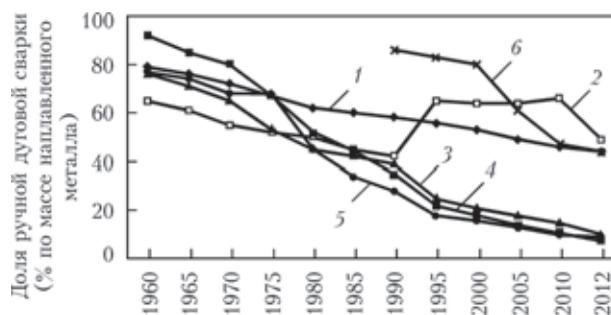


Рис. 9. Доля ручной дуговой сварки в мире: 1 — Россия; 2 — Украина; 3 — США; 4 — Япония; 5 — Западная Европа; 6 — Китай (2012 г. — по данным «The Japan Welding News For The World» и ИЭС им. Е. О. Патона)



Таблица 5. Структура способов дуговой сварки по миру, регионам и странам в 2012 г. (% по массе наплавленного металла)

Страна	Способ сварки			
	РДС	СО ₂	ПП	АФ
Мир	33,7	44,4	14	7,9
Китай	43,7	38,4	9,3	8,7
ЕС	8,9	63,9	19,1	8,1
Северная Америка	10,3	61,4	22,1	6,2
Япония	7,3	49,5	35,9	7,3
Индия	45	39,4	9,2	6,5
Корея	9,6	43	40	7,5
Россия, СНГ	44	38,7	7,1	10,3
Украина	48,9	32,5	1,4	17,2
Латинская Америка	41,8	30,9	8	6,4
Ближний и Средний Восток	46,5	38,5	8,2	7,3
Африка	51,2	36,2	7,1	5,9
Тайвань	21,6	54,8	18,8	5,2
АСЕАН	40,3	45,8	10,1	4,2
Прочие	44,4	42,5	7,7	6,8

ленного металла, с помощью которого в процентах определяется доля ручной дуговой сварки покрытыми электродами (РДС), сварки сплошной электродной проволокой в защитных газах (СО₂), сварки порошковой проволокой (ПП) и автоматической сварки под флюсом (АФ).

Отделом экономических исследований ИЭС с момента его создания в 1965 г. ведутся постоянные исследования технологической структуры способов дуговой сварки в ряде стран, результаты которых приведены в табл. 4 и рис. 9.

Наличие более полных японских данных о мировом и региональном потреблении сварочных материалов (рис. 8) позволило установить структуру использования способов дуговой сварки по ведущим странам, регионам и по миру в целом (табл. 5).

Использование в табл. 4 и на рис. 9 данных «The Japan Welding News For The World» по 2012 г. (табл. 5) показывает, что они достаточно точно встраиваются в динамику показателей по данным ИЭС, что свидетельствует о весьма высокой степени достоверности информации обоих источников.

Информация, приведенная на рис. 9, свидетельствует, что доля ручной дуговой сварки, составлявшая в 1965 г. в ведущих странах 80...90 %, за 25 лет снизилась вдвое и в 1990 г. была на уровне 35...45 %. Супероптимисты технического прогресса в сварочном производстве настаивали тогда, что за следующие 25 лет доля ручной дуговой сварки покрытыми электродами практически будет равна нулю или ненамного выше. Мы в своих прогнозах считали, что этот способ сварки и в обозримом будущем будет иметь право на существование, а его доля составит около 20 %. Как видим, в прогнозах ошиблись не только супе-

роптимисты, но и мы — на сегодня доля ручной дуговой сварки в Японии составляет 7,3 %, в ЕС — 8,9 %, в Южной Корее — 9,6 % и в Северной Америке (США, Канада и Мексика) — 10,3 %. В целом по миру доля ручной дуговой сварки постоянно снижается и в 2012 г. составляла 33,7 %, в основном за счет Китая (43,7 %), Индии (45 %), СНГ (44 %) и остальных стран, где доля ручной дуговой сварки составляет 22...52 %.

Доля сварки в защитных газах в целом по миру составляет 44 %. Лидерами в использовании этого способа сварки являются ЕС (63,9 %), США (61,4 %), Тайвань (54,8 %) и Япония (49,5 %). Лидерами в использовании сварки порошковой проволокой являются Южная Корея (40 %), Япония (35,9 %) и США (22,1 %). В целом по миру сварка порошковой проволокой составила в 2012 г. 14 %.

Автоматическая сварка под флюсом, которая в целом по миру составляет всего 7,9 % наплавленного при сварке металла, наиболее широко применяется в Украине (17,2 %), России (10,3 %), Китае (8,7 %) и в ЕС (8,1 %). За последние 40 лет доля автоматической сварки под флюсом практически стабильна, ее колебания составили: в ЕС от 6 до 8,1 %; в США от 9 до 6,2 %; в Японии от 9 до 7,3 %; в Украине от 20,7 до 17,2 %.

В заключение можно отметить, что сварка является базовой технологией во многих отраслях промышленности и строительстве. Для промышленно развитых стран характерна достаточно устойчивая динамика развития сварочного производства и сварочного рынка, которая определяется стабильным ростом потребления конструкционных материалов и расширением их сортамента, а также появлением на сварочном рынке новых прогрессивных материалов, технологий и оборудования для сварки и связанных с ней процессов.

Экономико-статистическая информация о состоянии и перспективах развития мирового производства и потребления стали – основного конструкционного материала при изготовлении сварных металлоконструкций, а также динамика мирового рынка сварочных материалов позволяют утверждать, что объемы мирового сварочного производства в ближайшем будущем будут расти. Соответственно, невзирая на временные кризисные явления на отдельных региональных рынках, будет расти спрос на сварочные материалы.

Уровень механизации и автоматизации сварочных работ, который определяется, главным образом, объемом применения ручной дуговой сварки, постоянно повышается за счет сокращения ее доли и роста массы наплавленного металла с помощью полуавтоматической и автоматической сварки в среде защитных газов, а также порошковой проволокой.

1. *Бернадский В. Н., Мазур А. А.* Состояние и перспективы мирового сварочного рынка // Автомат. сварка. – 1999. – № 11. – С. 49–55.
2. *Бернадский В. Н., Маковецкая О. К.* О вкладе сварки в экономику США // Там же. – 2004. – № 3. – С. 32–38.
3. *Бернадский В. Н., Маковецкая О. К., Мазур А. А.* Сварочное производство и рынок сварочной техники в совре-

менной экономике // Докл. VII Междунар. симпозиума «Сварка и родственные технологии». – Минск, 26 марта 2008 г. – Минск: Ин-т сварки и защитных покрытий, 2008. – С. 5–9.

4. *World Steel Association.* Steel Statistical Yearbook 2013. Режим доступа: <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf>
5. *СВЭСТА–2010.* Режим доступа: <http://paton.kiev.ua/images/stories/svesta/pdf/swesta-2010.pdf>
6. *World Steel Association.* World steel in figures 2014. Режим доступа: <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/World-Steel-in-Figures-2014/document/World%20Steel%20in%20Figures%202014%20Final.pdf>
7. *Ма Пун.* Исследования рыночной среды технологий сварочных производств: мировые тенденции и опыт Китая. Режим доступа: old.nuwm.rv.ua/methods/asp/vd/v39ek24.doc
8. *Pekkari B.* The welding world in changing // Lume sudarii. – 2006. – № 2. – P. 3–12.
9. *Мидельдорф К., Д. фон Хофе.* Тенденции развития технологий соединения материалов // Мир техники и технологий. – 2009. – № 11. – С. 12–16.
10. *Worldwide demand for welding consumables // The Japan Welding News For The World Spring Issue 2012 – Vol. 16 – No. 59. – P. 5.*
11. *Worldwide demand for welding consumables // The Japan Welding News For The World Spring Issue 2013 – Vol. 17 – No.63. – P. 6.*
12. *Мазур О. А., Петрук В. С., Любовна Л. Б.* та ін. Економіко-статистичний огляд зварювального виробництва і ринку зварювальної техніки України в 1990–2012 роках. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 2013. – 71 с.

Поступила в редакцию 02.09.2014

Технологический комплекс для переплава отвальных шлаков производства ферросплавов и цветных металлов

В НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона» разработан технологический комплекс для электрошлакового переплава отвальных шлаков.

Технологический комплекс включает:

- ◆ электрошлаковую тигельную печь;
- ◆ источник питания;
- ◆ блок управления;
- ◆ газоочистной аппарат.

Утилизация отвальных шлаков методом электрошлакового переплава позволяет снизить антропогенное воздействие на окружающую среду и получить полезные компоненты, содержащиеся в отходах.

Электрошлаковая печь представляет собой плавильный агрегат, в котором плавка шихтовых материалов производится в футерованном тигле с подовым электродом в нижней части. Вторым токоподводящим электродом печи служит подвижной электрод диаметром 100...150 мм. Источник питания постоянного тока построен по модульному принципу и состоит из нескольких однотипных независимых выпрямителей. Аппаратура управления комплекса размещена в шкафу управления, а органы управления и измерительные приборы — на пульте управления. Газоочистной аппарат оснащен рукавами из фильтровального лавсана и снабжен блоком автоматического управления и тягодутьевыми средствами.

Технологический комплекс электрошлакового переплава, установленный на Стахановском ферросплавном заводе, обеспечивает получение ферросилиция марок ФС20, ФС25, ФС45 и ФС65 с пониженным содержанием серы и фосфора. Вторичный шлак не содержит металлических включений, экологически безопасен и пригоден для производства строительных материалов.





ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ДЛИТЕЛЬНОЙ НАРАБОТКОЙ

В. В. КНЫШ, С. А. СОЛОВЕЙ, А. З. КУЗЬМЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: otde13@ukr.net

Исследована циклическая долговечность стыковых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С, упрочненной технологией высокочастотной механической проковки (ВМП) на различных стадиях усталостного разрушения: в исходном после сварки состоянии, при накоплении 70 % усталостных повреждений, при образовании поверхностных трещин усталости. Цель данных исследований — установление эффективности применения обработки ВМП стыковых сварных соединений с длительной наработкой в условиях переменного нагружения. Показано, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений сразу после сварки повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 50 % — со 180 до 270 МПа, а циклическую долговечность — в 5...10 раз. Экспериментально подтверждено, что эффективность упрочнения сварных соединений с 70 % накопленными усталостными повреждениями зависит от уровней прикладываемых максимальных напряжений до упрочнения. Так, остаточная циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240...260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки. Установлено, что применение технологии ВМП повышает остаточную циклическую долговечность сварных соединений с поверхностными трещинами усталости (глубиной до 2 мм) в 2,5 раза по сравнению с долговечностью до образования трещины. Библиогр. 11, рис. 5.

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, повышение циклической долговечности, усталость, сварное соединение, накопленные усталостные повреждения

Применение методов поверхностного пластического деформирования (ППД) металла позволяет значительно повысить характеристики сопротивления усталости сварных соединений. Эффективным способом упрочнения сварных конструкций, работающих в условиях переменного нагружения, является высокочастотная механическая проковка (ВМП). Применение данного способа обработки сварных соединений на стадии изготовления конструкций достаточно хорошо изучено: установлены основные закономерности повышения циклической долговечности и пределов выносливости сварных соединений в зависимости от класса прочности стали, типа соединения, характеристик цикла переменного нагружения; определены его преимущества сравнительно с другими способами поверхностного пластического деформирования металла [1–6]. В этом комплексе исследований ряд работ посвящен оценке эффективности упрочнения сварных узлов и элементов эксплуатируемых металлоконструкций, выполненных угловыми швами [7–11]. Показано, что увеличение остаточной долговечности сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями после упрочнения технологией ВМП существенно зависит от уровня и длительности прикладываемых максимальных напряжений до упрочнения.

© В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. З. Кузьменко, 2014

Что касается экспериментальных данных по эффективности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений эксплуатируемых конструкций, то такие данные в известной литературе отсутствуют.

Цель настоящей работы — установить эффективность упрочнения ВМП стыковых сварных соединений с длительной наработкой в условиях переменного нагружения.

Материал и методика исследований. Экспериментальные исследования проводили на образцах стыковых соединений низколегированной стали 09Г2С ($\sigma_T = 375$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа) толщиной 12 мм. Заготовки под образцы 600×180 мм вырезали из горячекатаного листового проката 12 категории. Двухстороннюю автоматическую сварку под флюсом ОК Flux 10.71 осуществляли без разделки проволокой 08ГА диаметром 4 мм. Параметры сварки: сварочный ток 590...620 А, сварочное напряжение 30...32 В, скорость сварки 28,2 м/ч. После сварки с каждой пластины вырезали 8 образцов. Форма и геометрические размеры образцов приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширина рабочей части образца выбиралась исходя из мощности испытательного оборудования. Изго-

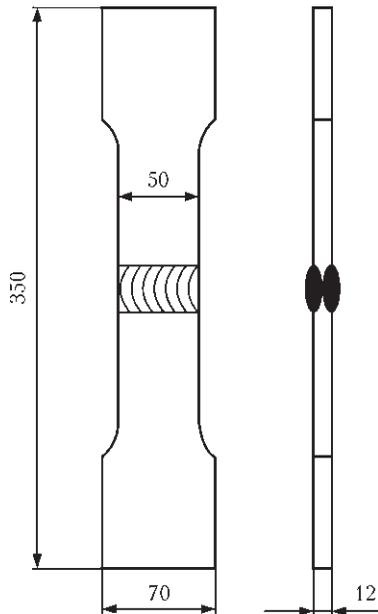


Рис. 1. Форма и размеры образца стыкового сварного соединения стали 09Г2С

тавливали четыре серии образцов для испытаний на усталость: исходное состояние (первая серия), ВМП сразу после сварки (вторая), ВМП после накопления 70 % усталостных повреждений (третья) и ВМП после образования поверхностных усталостных трещин заданной длины (четвертая серия). При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва к основному металлу. Упрочнение производили ручным ударным инструментом с пьезокерамическим преобразователем, соединенным с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. В качестве упрочнителя использовали однорядную четырехбойковую насадку, диаметр бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП 3 мм/с, амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента 25 мкм. Усталостные испытания образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. В качестве критериев завершения испытаний принимали полное разрушение образца и превышение базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

Результаты исследований. Первоначально по результатам испытаний образцов первой и второй серий были установлены кривые усталости стыковых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и в упрочненном технологией ВМП сразу после сварки состояниях, соответственно (рис. 2). Упрочнение технологией ВМП повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) стыковых сварных соединений на 50 % — со 180 до 270 МПа, а циклическую долговечность — в 5...10 раз. При этом существенно уменьшается разброс экспериментальных данных.

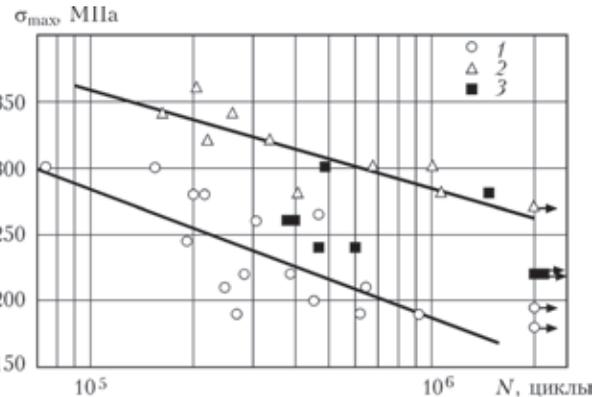


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений стали 09Г2С в исходном (1), упрочненном технологией ВМП после сварки (2) и в упрочненном технологией ВМП при накоплении 70 % усталостных повреждений (3) состояниях

Образцы третьей серии подвергали предварительному циклическому нагружению до наработки 70 % долговечности от установленной кривой усталости сварных соединений в неупрочненном состоянии, а затем обрабатывали технологией ВМП. После упрочнения технологией ВМП усталостные испытания продолжали при тех же уровнях нагружения, что и до упрочнения. Результаты усталостных испытаний приведены на рис. 2. Упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений с 70 % накопленными усталостными повреждениями повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 22 % — со 180 до 220 МПа. При этом остаточная циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240... 260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки. Следует отметить, что большинство образцов третьей серии разрушились по основному металлу вдали от линии сплавления (рис. 3). Аналогичное повышение характеристик сопротивления усталости сварных соединений было получено при исследовании влияния предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения технологией ВМП тавровых сварных соединений [8, 10]. Полученные экспериментальные данные на стыковых сварных соединениях подтверждают, что при предварительном циклическом нагружении сварных соединений с максимальными напряжениями цикла, отвечающими соотношению $\sigma_T > \sigma_T / \alpha_\sigma$ (где σ_T — предел текучести материала, α_σ — коэффициент концентрации напряжений), последующее упрочнение технологией ВМП приводит к более высокому повышению характеристик сопротивления

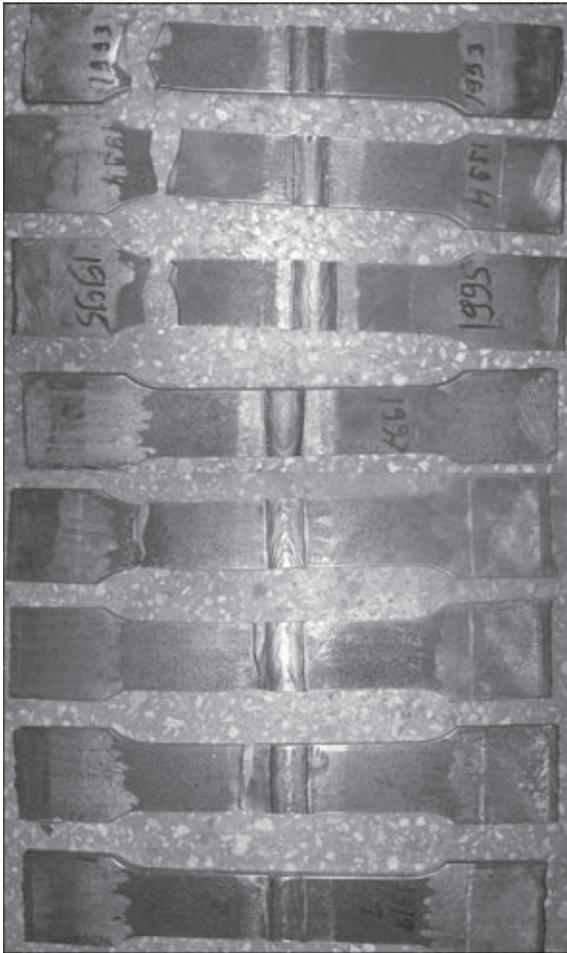


Рис. 3. Внешний вид образцов стыкового соединения стали 09Г2С, упрочненных при накоплении 70 % усталостных повреждений, после испытаний на усталость

усталости соединений в сравнении с упрочнением сразу после сварки. Это вызвано тем, что при уровнях максимальных напряжений, отвечающих указанному выше неравенству, в зонах концентраторов сварных соединений происходит полная релаксация остаточных сварочных напряжений растяжения. Способ повышения характеристик

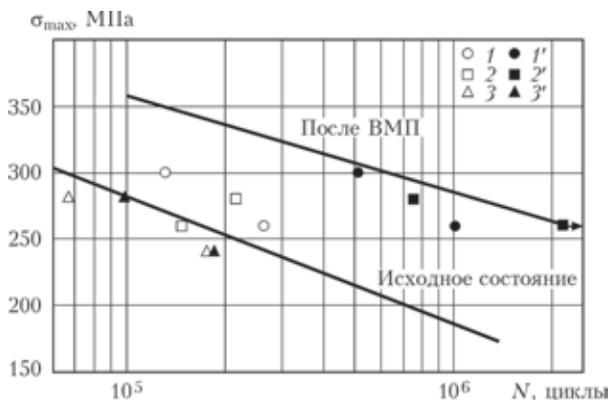


Рис. 4. Кривые усталости стыковых соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях, а также результаты усталостных испытаний образцов: 1–3 — до образования трещины длиной 5, 20 и 50 мм соответственно; 1'–3' — после упрочнения ВМП трещин длиной 5, 20 и 50 мм соответственно

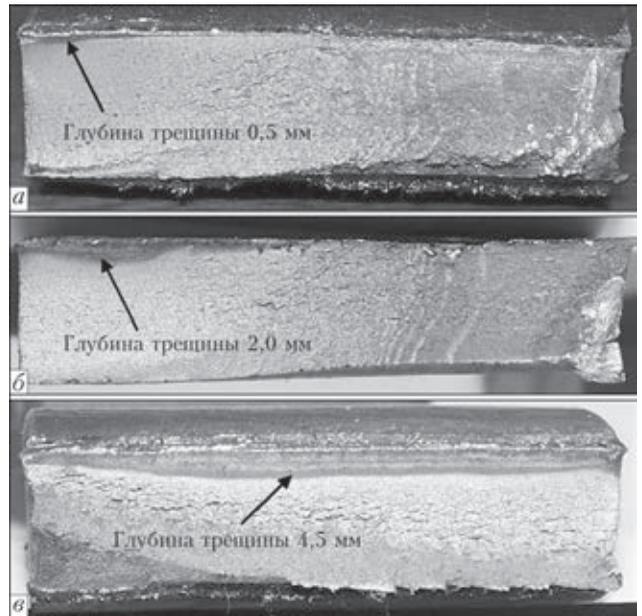


Рис. 5. Усталостные изломы образцов стыкового соединения стали 09Г2С, упрочненных при образовании усталостных трещин длиной 5 (а), 20 (б) и 50 мм (в)

сопротивления усталости сварных соединений предварительным нагружением более высокими уровнями напряжений получил в научной литературе название «перегрузка». Полученные результаты показывают высокую эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности стыковых сварных соединений с длительной наработкой.

Четвертую серию образцов упрочняли технологией ВМП после образования поверхностных усталостных трещин длиной 5 мм (2 образца), 20 мм (2 образца) и 50 мм (2 образца). Для определения фронта трещины сварное соединение в исходном состоянии смазывали индикаторной жидкостью, состоящей из керосина и тонера. После образования трещины заданной длины (все трещины образовывались по линии перехода металла шва на основной металл) остатки индикаторной жидкости удаляли продувкой сжатым воздухом. Упрочнению технологией ВМП подвергали не только линию сплавления, содержащую трещину, а все четыре линии перехода металла шва на основной металл. После упрочнения ВМП индикаторную жидкость не применяли. Таким образом, на изломах образцов после испытаний на усталость четко виден фронт трещины, которую обрабатывали технологией ВМП. Результаты усталостных испытаний приведены на рис. 4, а фотографии разрушенных образцов на рис. 5.

Обработка технологией ВМП образцов сварных соединений с трещинами длиной 50 мм (глубиной до 5 мм) не привела к увеличению циклической долговечности. Образцы разрушились в пределах разброса экспериментальных данных неупрочненных сварных соединений. Упрочнение

сварных соединений с усталостными трещинами длиной 5 мм (глубиной 0,5 мм) и 20 мм (глубиной 2 мм) увеличило их остаточную долговечность в 2,5 раза по сравнению с долговечностью до образования трещины. При этом один из образцов с трещиной длиной 5 мм после упрочнения технологией ВМП не разрушился в пределах базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений (увеличение остаточной циклической долговечности более чем в 10 раз по сравнению с долговечностью до образования трещины). Аналогичное повышение технологией ВМП остаточной долговечности сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами незначительной глубины было получено на тавровых сварных соединениях [11]. Таким образом, подтверждена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности сварных соединений с трещинами усталости до 2 мм.

Выводы

1. Установлено, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений стали 09Г2С с 70 % накопленными усталостными повреждениями (трещины усталости отсутствовали) повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 22 % — со 180 до 220 МПа. При этом циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240... 260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки.

2. Показано, что упрочнение технологией ВМП всех четырех околошовных зон стыковых сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами длиной 5...20 мм (глубиной от 0,5 до 2 мм) в 2,5 раза увеличивает их остаточную долговечность по сравнению с долговечностью до образования трещины.

1. *Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie* / U. Kuhlmann, A. Dürr, P. Günther et al. // Schweissen und Schneiden. — 2005. — Vol. 57, № 8. — P. 384–391.
2. *Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор)* / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
3. *The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints* / D. Yin, D. Wang, H. Jing, L. Huo // Materials & Design. — 2010. — Vol. 31, № 7. — P. 3299–3307.
4. *Martines L. L. Fatigue life extension procedure by ultrasonic peening.* — [2010]. — 14 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2316–10).
5. *Yildirim H. C., Marquis G. B. Overview of fatigue data for high frequency treated welded joints.* — [2011].— 22 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2362r1–11).
6. *Abdullah A., Malaki M., Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening* // Materials & Design. — 2012. — Vol. 38. — P. 7–18.
7. *Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке* // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
8. *Fatigue life improvement of tubular welded joints by ultrasonic peening* / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, G. Prokopenko. — [2006]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2117–06.)
9. *Zhao X., Wang D., Huo L. Analysis of the S–N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment* // Materials & Design. — 2011. — Vol. 32, № 1. — P. 88–96.
10. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Влияние предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения сварных соединений высокочастотной проковкой* // Автомат. сварка. — 2011. — №10. — С. 44–48.
11. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами* // Там же. — 2009. — № 1. — С. 38–43.

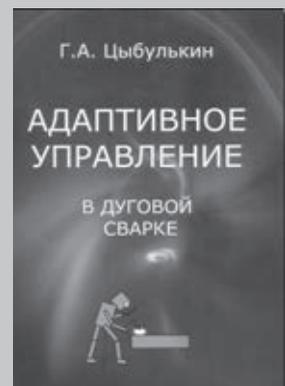
Поступила в редакцию 04.04.2014

НОВАЯ КНИГА

Г. А. Цыбулькин. Адаптивное управление в дуговой сварке. — Киев: Сталь, 2014. — 171 с.

Монография посвящена вопросам построения систем специального класса — электродуговых адаптивных систем, главное назначение которых заключается в том, чтобы придать сварочному автомату или роботу способность самостоятельно, без вмешательства человека-оператора, корректировать свое поведение в зависимости от изменения условий дуговой сварки и геометрических параметров свариваемых изделий. Изложение теоретических положений иллюстрируется примерами и результатами компьютерного моделирования. Даны практические рекомендации по выбору и расчету основных характеристик рассматриваемых систем.

Адресована широкому кругу инженеров и научных работников, интересующихся вопросами автоматизации и роботизации сварочных процессов.





УДК 669.187.56.001:4

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ЛИСТОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА ВТ1-0, УПРОЧНЕННОГО АЗОТОМ В ПРОЦЕССЕ ДУГОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА, И СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

В. Я. САЕНКО, А. А. ПОЛИШКО, В. А. РЯБИНIN, С. Н. СТЕПАНЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton/kyiv/ua

Показана эффективность применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения равнопрочного сварного соединения из проката технического титана толщиной 35 мм, упрочненного азотом до 0,1 мас. % в процессе дугошлакового переплава (ДШП). Данные рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о равномерном распределении азота, алюминия, титана, железа, кислорода как в прокате ДШП, так и в сварном соединении. Металлографические исследования подтвердили получение качественного сварного соединения без трещин, пор и других дефектов. Металл шва и основной металл характеризуются однородной структурой. Установлено равномерное распределение твердости *НВ* и микротвердости *НV* в листовом техническом титане и полученном сварном соединении. При содержании в титане до 0,1 мас. % азота твердые включения нитрида титана отсутствуют и в листовом прокате ДШП, и в металле шва, выполненного ЭЛС. Библиогр. 13, рис. 5.

Ключевые слова: технический титан, дугошлаковый переплав, упрочнение титана азотом из газовой фазы, листовой прокат, электронно-лучевая сварка, макро- и микроструктура, механические свойства сварного соединения

Разработанный в начале 1970-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона новый способ переплава расходуемого электрода электрической дугой, горящей между торцом электрода и поверхностью жидкой шлаковой ванны в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, был запатентован в 1982 г. под названием дугошлаковый переплав (ДШП) [1]. В дальнейшем проведенные исследования, в том числе в заводских условиях, показали, что по сравнению с традиционным электрошлаковым переплавом новый способ ДШП экономически выгоден и позволяет получить металл, не уступающий по качеству металлу ЭШП.

Первые результаты исследований ДШП титана и его сплавов, проведенных в ИЭС в лабораторных и заводских условиях, показали [2–4] перспективность этого способа в решении задач удешевления производства полуфабрикатов титана и его сплавов, прежде всего технического чистого титана. Возможность получения крупнотоннажных слитков ДШП прямоугольного сечения с удовлетворительной поверхностью, не требующих механической обработки для непосредственной прокатки, позволяет существенно сократить потери металла при производстве титановых полуфабрикатов и снизить себестоимость готовой продукции.

Также важным фактором для удешевления титановой продукции является возможность реали-

зации одностадийного процесса ДШП губчатых прессованных электродов [5–7].

Титан и его сплавы отличаются лучшим сочетанием высоких механических свойств и низкой плотности по сравнению с другими конструкционными материалами. Технический титан ВТ1-0 при значительной коррозионной стойкости в различных агрессивных средах имеет сравнительно невысокие прочностные свойства ($\sigma_b \leq 400$ МПа). Однако проблема успешно решается путем легирования титана алюминием, ванадием, марганцем, молибденом



Рис. 1. Макрошлифы углового и стыкового соединений листового технического титана, выполненных ЭЛС

* Работа выполнена под руководством чл.-корр. НАН Украины О. К. Назаренко и В. М. Нестеренкова.

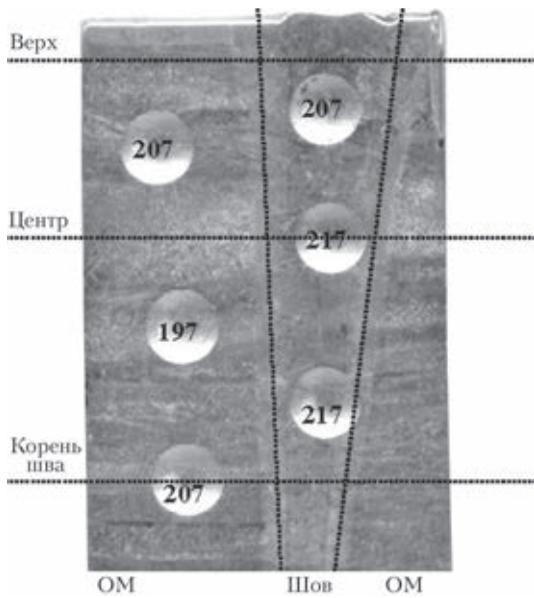


Рис. 2. Внешний вид образца сварного соединения листового технического титана и значения твердости по Бринеллю, полученные в продольном сечении

и другими элементами, причем без существенного снижения его пластических свойств. Как известно, на прочностные и пластические свойства технического титана значительное влияние оказывает содержание в нем кислорода и азота [8, 9]. Комплекс исследований, проведенных в ИЭС, показал возможность повышения прочностных характеристик технического титана ВТ1-0 за счет его легирования азотом до 0,1 % из газовой фазы в процессе ДШП [10]. В результате был получен технический титан ДШП, имеющий прочност-

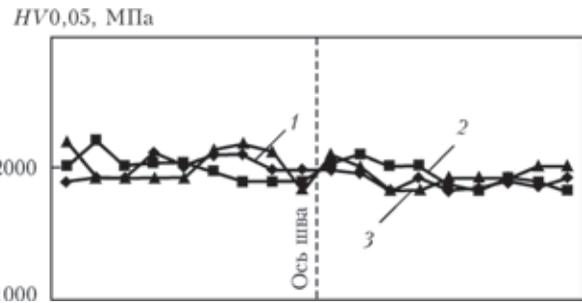


Рис. 3. Распределение микротвердости поперек сварного соединения, выполненного ЭЛС на листовом техническом титане: 1 — верх; 2 — центр; 3 — корень шва

ные характеристика на уровне или выше значений ГОСТ 23755–79 [11].

Следующим этапом исследований была оценка возможности получения равнопрочного сварного соединения листового проката технического титана ВТ1-0, упрочненного азотом до 0,1 % из газовой фазы в процессе ДШП (далее — листовой технический титан), толщиной 35 мм, выполненного электроннолучевой сваркой (ЭЛС).

Известно, что при легировании титана азотом из твердой фазы образуются нитриды различного химического состава, в частности, в процессе переплава титановой губки и последующего получения титановых сплавов. Наряду с нитридами титана могут образовываться твердые включения, обогащенные азотом. Поэтому одна из задач заключалась в оценке вероятности образования твердых включений нитрида титана в листовом техническом титане и его сварном соединении при ЭЛС. Была также изучена возможность рас-

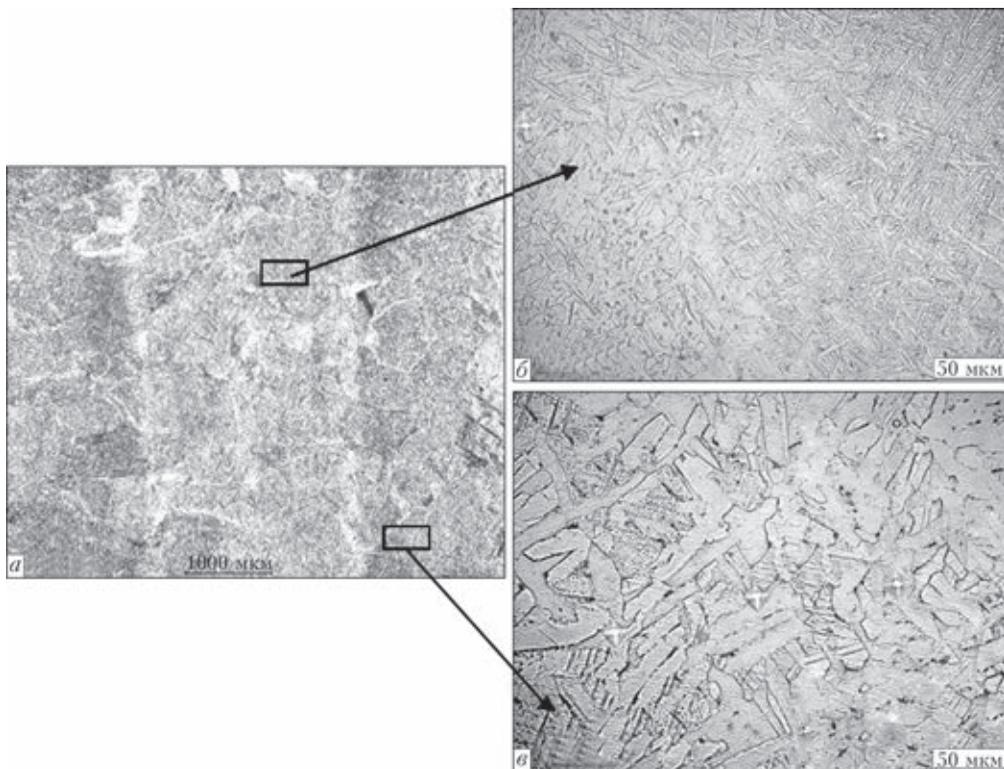


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения (а — $\times 25$), шва (б — $\times 400$) и основного металла (в — $\times 400$)

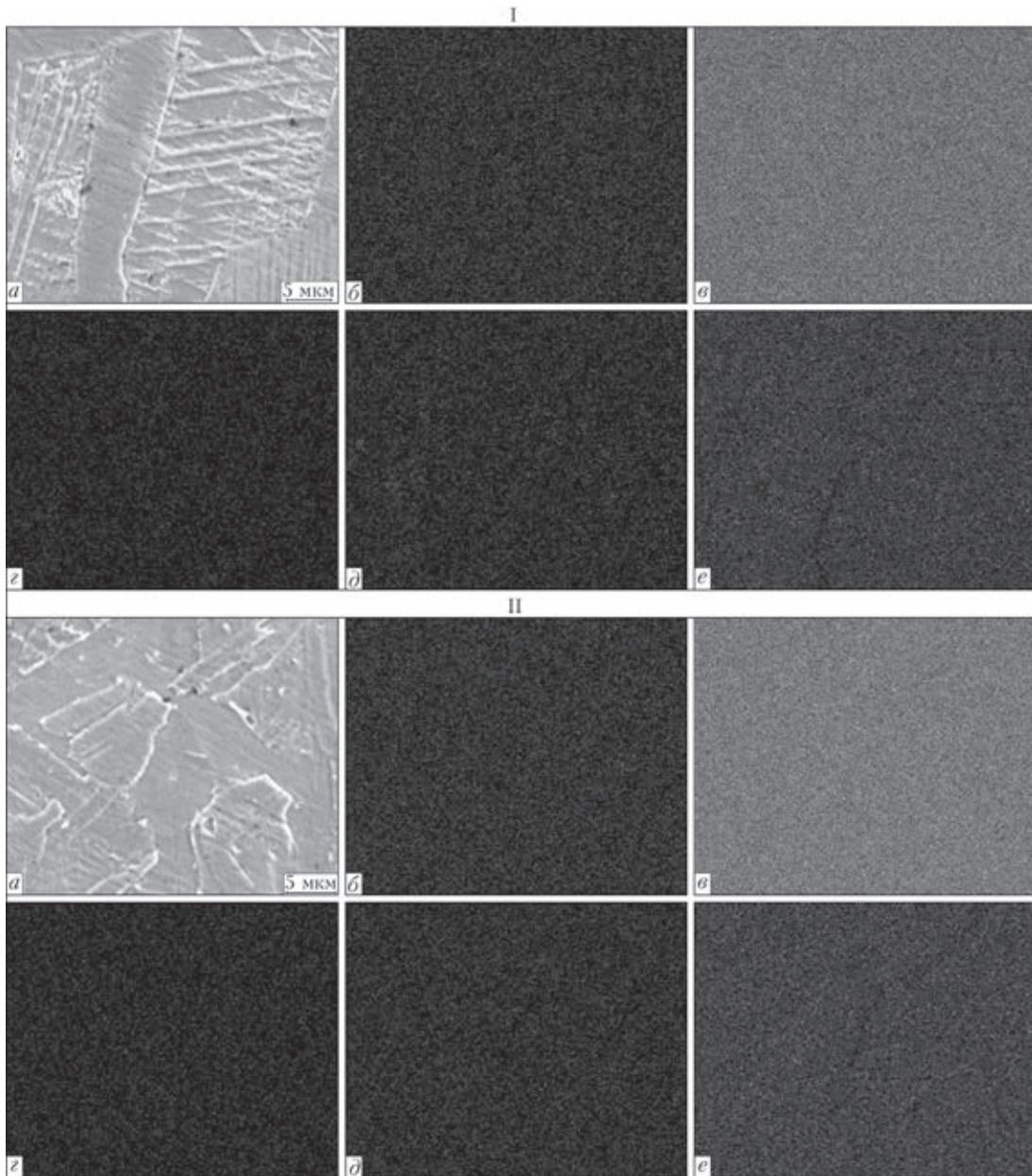


Рис. 5. Микроструктура ($\times 2000$) основного металла (I, *a*), металла шва (II, *a*) и концентрационные карты распределения алюминия (I, II, *b*), титана (*в*), железа (*д*), кислорода (*д*), азота (*е*)

творения твердых частиц нитрида титана в жидком титане [12].

Были выполнены угловые и стыковые соединения листового технического титана, внешний вид которых показан на рис. 1. В обоих случаях отмечено хорошее формирование шва и отсутствие каких-либо дефектов в металле шва и околошовной зоны.

Уровень твердости по Бринеллю оценивали в продольном сечении образца. Замеры проводили при нагрузке 3000 кг шариком диаметром 10 мм. Металл шва имел HV 207...217, основной металл HV 197...207 (рис. 2). Микротвердость измеряли на твердомере LECO M-400 при нагрузке 50 г с шагом 100 мкм в разных зонах сварного соединения. Как показали измерения (рис. 3), значения довольно равномерно распределены во всем объ-

еме сварного соединения и составляют в верхней части шва $HV = 1830...2120$, в центре $HV = 1830...2210$ и в корне $HV = 1830...2200$ МПа.

Для исследования микроструктуры образцов сварных соединений использовали химическое травление реактивом $HCl + HNO_3 + H_2O$ и применяли микроскоп Neophot-32. Структура зоны соединения, шва и основного металла представлена на рис. 4. Металлографические исследования* показали, что получено качественное бездефектное сварное соединение с однородной структурой. Шов шириной около 3 мм имеет игольчатую структуру с иглами разной длины (15...40 мкм), расположенными под углом 60° . Основной металл

* Работа выполнялась при участии канд. техн. наук А. Ю. Туника.

содержит более крупное зерно (50...100 мкм), основной структурной составляющей является α' -фаза.

Для рентгеноспектральных исследований использовали аналитический комплекс, который состоит из сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF (JEOL, Япония) и системы для энергодисперсионного микроанализа INCA Energy-350 («Oxford Instruments», Великобритания). Эксперименты проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ, 200-...10000-кратном увеличении, элементный анализ выполняли в диапазоне от бора до урана.

Данные рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о равномерном характере распределения элементов (азота, кислорода, алюминия, железа) в структуре основного металла, упрочненного азотом до 0,1 %, и металла шва, выполненного ЭЛС (рис. 5). При четко выявленном рельефе структуры (рис. 5, I, II, а) химической неоднородности по основным элементам не наблюдается. Результаты исследований подтверждают также, что при содержании в титане до 0,1 % азота твердые включения нитрида титана отсутствуют.

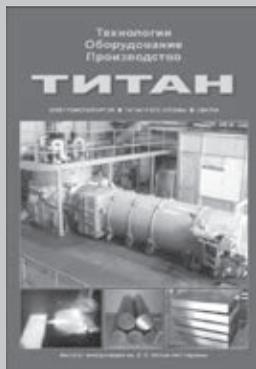
В заключение следует подчеркнуть актуальность проводимых работ по совершенствованию технологических процессов получения технического титана [13] и повышению его прочностных характеристик путем регламентированного введения примесей, в частности, элементов внедрения. Для получения равнопрочного соединения листового технического титана, упрочненного азотом до 0,1 % в процессе ДШП, толщиной 35 мм эффективно применение ЭЛС. При такой концентрации азота во всех зонах сварного соединения отсутствуют твердые включения нитрида титана. Отмечено равномерное распределение азота, алюминия, титана, железа, кислорода, формирование однородной микроструктуры и довольно равно-

мерное распределение твердости и микротвердости. Важно также, что такой упрочненный технический титан может найти широкое применение в промышленности и медицине.

1. А. с. 520784 СССР, МКП С21С5/56. Способ переплава расходуемого электрода / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др. – Заявл. 09.08.1974. Опубл. 30.05.1982; Бюл. № 20.
2. Paton B. E., Medovar B. I., Saenko V. Ya. et al. Arc-slag remelting of titanium and titanium alloys // Proc. of Intern. Symp. (USA, CA, June 29–July 2, 1992). – Vol. 3. – P. 2429–2431.
3. Дугошлаковый переплав титана и титановых сплавов / Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин // Пробл. спец. электротехнологии. – 1992. – № 2. – С. 13–15.
4. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. и др. Переплав губчатых титановых расходуемых электродов методами ЭШП и ДШП // Там же. – 1994. – № 3/4. – С. 7–11.
5. Патон Б. Е., Саенко В. Я., Помарин Ю. М. и др. Возможности дугошлакового переплава как одного из методов специальной электротехнологии // Специальная электротехнология: вчера, сегодня, завтра: Матер. Междунар. научно-техн. конф. (Киев, 8–9 окт. 2002 г.). – К.: Політехніка, 2002. – С. 123–137.
6. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Федоровский Б. Б. Дугошлаковый переплав титана и его сплавов // Сб. тр. Междунар. конф. «Титан-2007 в СНГ» (Ялта, 15–18 апр. 2007 г.). – С. 177–180.
7. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. и др. Совершенствование дугошлакового переплава титана и его сплавов // Титан. – 2010. – № 3. – С. 15–19.
8. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
9. ASM metals handbook. – Vol. 3. – Ohio: ASM, 1980.
10. Упрочнение титана путем легирования азотом из газовой фазы в процессе дугошлакового переплава / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Кумыш, В. А. Рябинин и др. // Пробл. спец. электротехнологии. – 1994. – № 3/4. – С. 12–17.
11. Medovar B. I., Saenko V. Ya., Grigorenko G. M. et al. Arc-slag remelting of steel and alloys. – Cambridge: Intern. Sci. Publ., 1996.
12. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю. и др. О растворении твердых частиц TiN в жидком титане во время плавки // Совр. электротехнология. – 2008. – № 2. – С. 49–51.
13. Александров А. В., Прудковский Б. А. Разные грани титана и его сплавов // Титан. – 2005. – № 1. – С. 64–70.

Поступила в редакцию 13.05.2014

ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 270 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 54 статьи, опубликованные в журналах «Современная электротехнология» и «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по электротехнологии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Представлены обзоры по дисперсионному упрочнению титановых сплавов и по сварке сплавов алюминид титана, а также обзор мирового и региональных рынков титана.

Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.



ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОМЫВОЧНОГО КАНАЛА СТАЛЬНОГО БУРОВОГО ДОЛОТА

Б. В. СТЕФАНИВ, В. Ф. ХОРУНОВ, О. М. САБАДАШ, С. В. МАКСИМОВА, В. В. ВОРОНОВ

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

Рассмотрены особенности дефектов изношенного стального бурового долота, полученного в процессе эксплуатации при бурении газовых скважин; описаны повреждения аномального износа рабочего органа промывочного канала; описаны способы подготовки изношенного участка к его восстановлению методом сварки и наплавки защитного покрытия. Особое внимание уделено анализу микроструктуры и химической неоднородности границы соединения сталь 40X + защитное износостойкое покрытие, нержавеющая сталь 08X18H10T + защитное износостойкое покрытие, нержавеющая сталь 08X18H10T + сталь 40X + защитное износостойкое покрытие; определена микротвердость наплавленного слоя. Показано, что наплавка износостойкого покрытия обеспечивает эффективную защиту от эрозионного и абразивного износа долот при бурении средних и крепких пород. На основании полученных данных разработана технология восстановления рабочего органа промывочного канала данного долота. Буровое долото прошло успешную апробацию при бурении газовых и нефтяных скважин мягких, средне-твердых и твердых пород на предприятии «Представительства USEIS SA» в Полтавской области. Библиогр. 2, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: буровые долота, сверхтвердые материалы, защитное покрытие, наплавка, износостойкость, сварка, микротвердость, прочность, реставрация рабочих органов

При бурении газовых и нефтяных скважин рабочие органы корпусов стальных долот и головок подвергаются интенсивному абразивному, эрозионному, коррозионному, кавитационному, гидроабразивному, ударному износу, в результате чего происходит изменение первоначальной формы и снижение технико-экономических показателей бурового инструмента, поэтому повышение эксплуатационного ресурса рабочих органов стальных и матричных корпусов отечественных и зарубежных буровых долот и головок является актуальной задачей для Украины. Важным резервом продления ресурса долот и бурильных головок является реставрация, которая повышает эффективность их использования и снижает затраты при разработке проблемных месторождений.

Развитие технологических процессов ремонта бурового инструмента не стоит на месте, и на данный момент предприятия и фирмы в Украине и за рубежом предлагают разные методы восстановления изношенных рабочих органов. В 2010–2012 гг. по программе «Ресурс» были проведены исследования степеней износа и особенностей дефектов алмазно-твердосплавных резцов (АТР) стальных и матричных буровых долот, применявшихся при бурении газовых и нефтяных скважин в горных породах. На основе этих исследований созданы таблицы износа и дефектов АТР согласно классификации Международной ассоциации буровых подрядчиков (IADC) в зависимости от физико-механических характеристик горных пород [1], разработан технологический процесс ремонта

стальных и матричных долот разного сортамента с АТР [2].

Задачей данной работы является оценка особенностей повреждений промывочного канала в результате аномального износа корпуса бурового стального долота с защитными покрытиями и определение критериев его ремонтпригодности для последующего восстановления рабочего органа.

Объектами исследований являются инструменты вращательного способа бурения — долота и бурильные головки. Зарубежный буровой инструмент в основном выполняется из твердых сплавов В25 и В35 производства шведской компании «Sandvik Coromant» (отечественные аналоги — сплавы ВК6 и ВК8) и оснащен поликристаллическими алмазными резами серий ХТ, НСR, НОТ, SQС, GDC и др. производства ведущих мировых компаний «Genesis», «Smith Bits», «Element Six». Рабочие органы бурового инструмента защищены поверхностными покрытиями, обладающими высокими трибологическими свойствами в условиях гидроабразивного износа.

Для реставрации изношенных буровых долот необходимо было разработать технологический регламент, включающий:

- анализ износа долота по классификации IADC;
- дефектную ведомость рабочих органов изношенного бурового долота;
- механическую обработку дефектных участков рабочих органов;

- специальную подготовку участков на поврежденных дефектных поверхностях;
- процесс восстановления первоначальной формы рабочих органов корпуса долота методами сварки;
- процесс восстановления защитных покрытий рабочего органа с сохранением исходных размеров долота.

Особенности реставрации долот с аномальным износом рабочего органа показаны на примере ремонта промывочного канала стального бурового долота диаметром 215,9 мм производства компании «Smith Bits» (США). Рабочие органы такого долота при вращательном бурении скважины, находясь под осевой нагрузкой при разрушении горной породы, перемещаются с различной скоростью по забою скважины и подвержены аномальному износу. Кроме того, вынос продуктов разрушения осуществляется буровым раствором под большим (1500 МПа) давлением, что создает дополнительную опасность разрушения промывочных каналов долота. Оценка состояния бурового долота после проходки 1000 м показала значительное повреждение отверстия промывочного канала стального корпуса с упрочняющим защитным покрытием — вырыв резьбовой втулки, изготовленной из сплава ВК8 (рис. 1), на которой крепилась твердосплавная насадка, и значительные нарушения формы канала. Причиной вырыва втулки с насадкой из корпуса долота, по нашему мнению, стало несоблюдение технологии изготовления резьбовой втулки промывочного канала. Итоговая оценка износа долота согласно классификации IADC: 3 7 LN N X (LN, NO) PR — «ремонту подлежит».

В процессе реставрации промывочного канала были проведены исследования по выбору материала, который бы соответствовал всем физико-химическим свойствам металла корпуса долота. Для осуществления этой задачи по результатам предварительных работ была разработана новая конструкция переходной втулки с соответствующей резьбой из коррозионностойкой стали 08X18H10T и технология реставрации поврежденного промывочного канала. Отработку сварки и наплавки проводили на макетных образцах: сталь 40X + защитное износостойкое покрытие; нержавеющая сталь 08X18H10T + защитное износостойкое покрытие; нержавеющая сталь 08X18H10T + сталь 40X + наплавленный металл.

Для экспериментов была выбрана ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадочной проволокой 12X18H10T диаметром 1 мм. Одной из наиболее эффективных технологий реставрации долот является малозатратный и технологически приемлемый способ электродуговой

наплавки. Для наплавки защитного покрытия на макетные образцы применяли инверторный аппарат «Коралл-300» и использовали присадочный шнур TeroCote 7888 T диаметром 5 мм с сердечником 1,2 мм производства компании «Castolin Eutectic». Наплавку выполняли на оптимальных режимах с наименьшим тепловложением: $I = 80 \dots 100$ А, $U = 10 \dots 12$ В. Толщина наплавки составляла 2...3 мм.

Металлографические исследования сварных и наплавленных образцов проводили с помощью оптического микроскопа МИМ-8М и сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU. Микротвердость по Виккерсу наплавленного слоя определяли на твердомере фирмы LECO (нагрузка 0,01...2 кг).

Для исследований использовали микрошлифы с износостойким покрытием TeroCote 7888 T, наплавленным на пластины из стали 40X и нержавеющей стали 08X18H10T.

На износостойкость изделий оказывает влияние целый ряд параметров: состав, структурные составляющие, твердость наплавленного металла. Например, на твердость поверхностного слоя защитного покрытия значительно влияет распределение твердых частиц карбида вольфрама в объеме наплавленного слоя. Естественно, с увеличением количества карбида вольфрама с высокой микротвердостью будет повышаться функциональная эффективность наплавленного покрытия. TeroCote 7888 T — высокоэффективный износостойкий материал в виде гибкого шнура, который состоит из никель-хромового проволоочного сердечника, покрытого эластичным связующим, содержащим смесь карбидов неправильной формы и порошкообразный никелевый сплав. Покрытие из TeroCote 7888 T исключительно твердое, состоит из плотной массы ультратвердых частиц карбидов вольфрама, интегрированных в вязкую никель-хромовую матрицу.



Рис. 1. Внешний вид износа рабочего органа промывочного канала стального корпуса с упрочняющим защитным покрытием

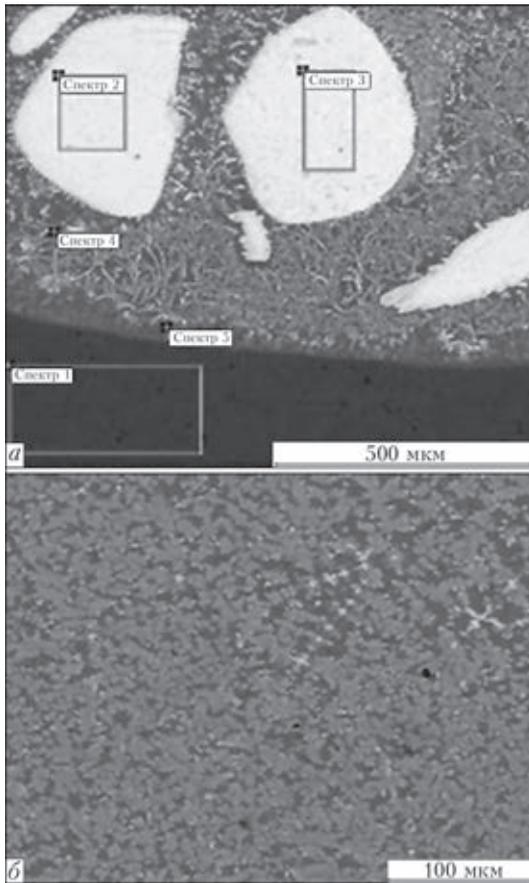


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла TeroCote 7888 T на подложке из стали 40X (а) и его верхней зоны (б)

Покрытие TeroCote 7888 T, наплавленное на сталь 40X, характеризуется литой неоднородной структурой (рис. 2, а). В нижней зоне наплавки сосредоточены довольно крупные карбидные частицы длиной до 500 мкм. В матрице наплавки на основе никеля (33,7 %), содержащей железо (26,80 %), вольфрам (25,95 %) и другие элементы (табл. 1), выявлены иглоподобные дисперсные выделения светлой фазы на основе вольфрама, в состав которых входит хром, железо, никель.

В структуре металла верхней зоны наплавки в отличие от структуры нижней зоны не содержится крупных карбидов (рис. 2, б). Микротвердость верхней зоны наплавки составляет 4460...4830 МПа, что несколько ниже микротвердости нижней зоны (4460...5420 МПа). Следует отметить, что микротвердость карбидной фазы стабильна и составляет 18540 МПа.

В металле наплавки TeroCote 7888 T на нержавеющей стали 08X18H10T тоже содержатся крупные карбиды вольфрама в нижней зоне (рис. 3, а, табл. 2).

В металле верхней зоны наплавки меньше карбидов, на некоторых участках они вовсе отсутствуют (рис. 3, б). Микротвердость матрицы наплавки в верхней

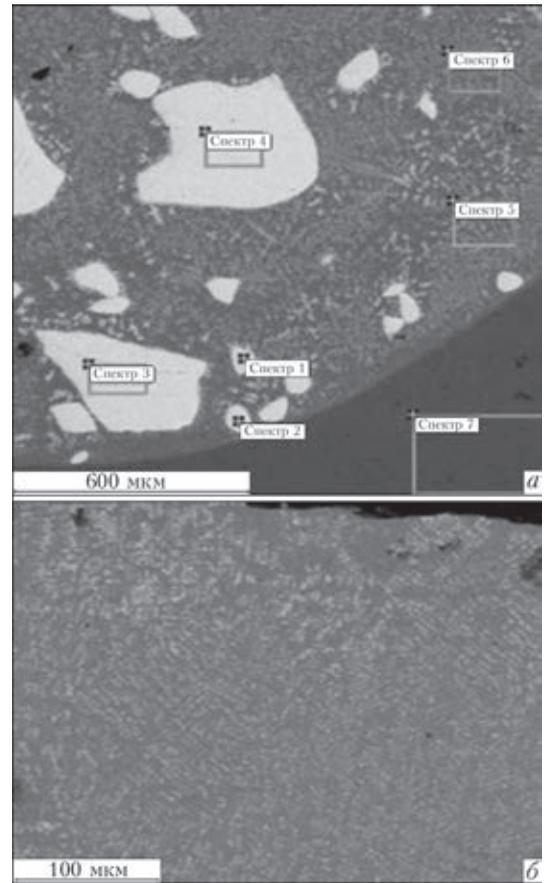


Рис. 3. Микроструктура нижней (а) и верхней (б) зоны наплавленного металла TeroCote 7888 T на подложке из стали 08X18H10T

зоне снижается до 3510...3760 МПа, в нижней — до 3360...4210 МПа.

Металлографические и микрорентгено-спектральные исследования соединения сталь 08X18H10T + сталь 40X + наплавленный ме-

Таблица 1. Состав наплавленного металла TeroCote 7888 T на подложке из стали 40X, мас. %

Номер спектра	C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	W
1	6,64	-	0,30	3,59	0,51	88,96	-	-
2	12,86	1,15	-	-	-	-	-	85,99
3	11,80	1,03	-	-	-	-	-	87,17
4	6,25	-	-	7,29	-	26,80	33,70	25,95
5	6,47	-	-	9,38	-	41,13	30,99	12,04

Таблица 2. Состав наплавленного металла TeroCote 7888 T на подложке из стали 08X18H10T, мас. %

Номер спектра	C	O	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	W
1	12,02	0,79	-	-	-	-	-	-	87,18
2	12,31	-	-	-	-	-	-	-	87,69
3	12,18	-	-	-	-	-	-	-	87,82
4	12,72	1,33	-	-	-	-	-	-	85,95
5	6,96	-	-	-	13,91	-	23,25	35,72	20,17
6	6,65	-	-	-	15,25	-	24,01	34,86	19,23
7	5,42	-	0,53	0,37	24,13	0,70	54,35	14,51	-

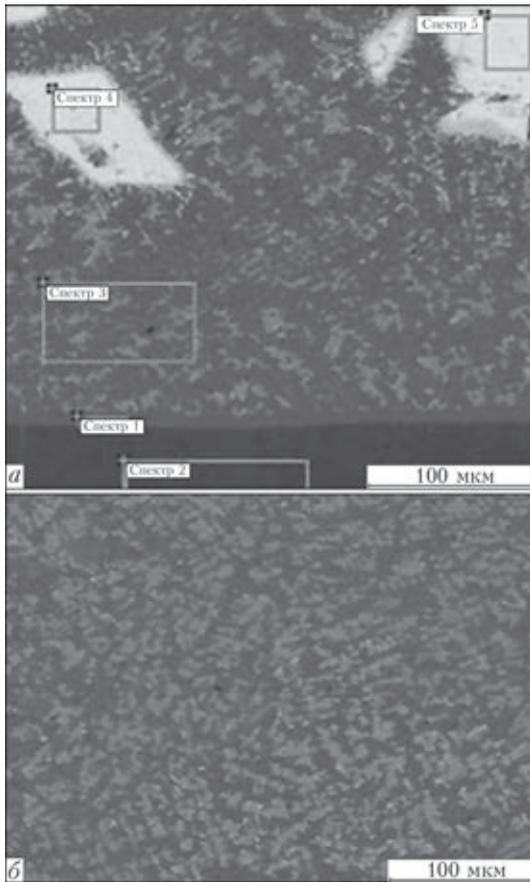


Рис. 4. Микроструктура нижней (а) и верхней (б) зоны наплавленного металла в соединении 08X18H10T + 40X + TeroCote 7888 T

Таблица 3. Состав наплавленного металла в соединении 08X18H10T + 40X + TeroCote 7888 T, мас. %

Номер спектра	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	W
1	5,51	-	10,23	-	39,12	37,35	7,79
2	6,50	0,33	4,22	0,57	88,38	-	-
3	6,60	-	12,11	-	31,27	35,33	14,69
4	12,16	-	-	-	-	-	87,84
5	11,31	-	-	-	-	-	88,69

талл показали, что в результате наплавки сформировалось соединение наплавленного материала TeroCote 7888 T + сталь 40X. Микроструктура наплавленного металла состоит из карбидов вольфрама и матрицы на основе никеля сложного состава (табл. 3). Как и в предыдущих вариантах, карбиды вольфрама содержатся преимущественно в нижней зоне наплавки (рис. 4, а) и отсутствуют в верхней зоне (рис. 4, б). Во всех наплавках наблюдается незначительная пористость.

Полученная структура наплавленного металла обеспечивает высокую микротвердость карбидной фазы и исключительно эффективную защиту от эрозионного и абразивного износа при бурении средних и крепких пород. Применяемый способ повышения износостойкости с помощью присадочного шнура TeroCote 7888 T позволяет значительно (в 2...3 раза) увеличить срок службы рабочих органов корпусов буровых долот, работающих в условиях коррозионно-абразивного изнашивания.

Полученные результаты были использованы при восстановлении рабочего органа промывочного канала на изношенном корпусе цельнофрезерованного стального бурового алмазного долота диаметром 215,9 мм. После механической обработки поврежденного отверстия промывочного канала была изготовлена втулка из нержавеющей стали 08X18H10T и установлена в отверстие корпуса с заданным углом наклона. Для соединения втулки с корпусом долота применяли сварку с небольшим тепловложением на оптимальных режимах $I = 80...120$ А, $U = 10...12$ В с целью снижения уровня остаточных напряжений в наплавленных слоях. Сварку выполняли с присадочной проволокой 12X18H10T диаметром 1 мм. Для наплавки защитного износостойкого покрытия на режиме $I = 100...120$ А, $U = 10...12$ В использовали шнур TeroCote 7888 T.

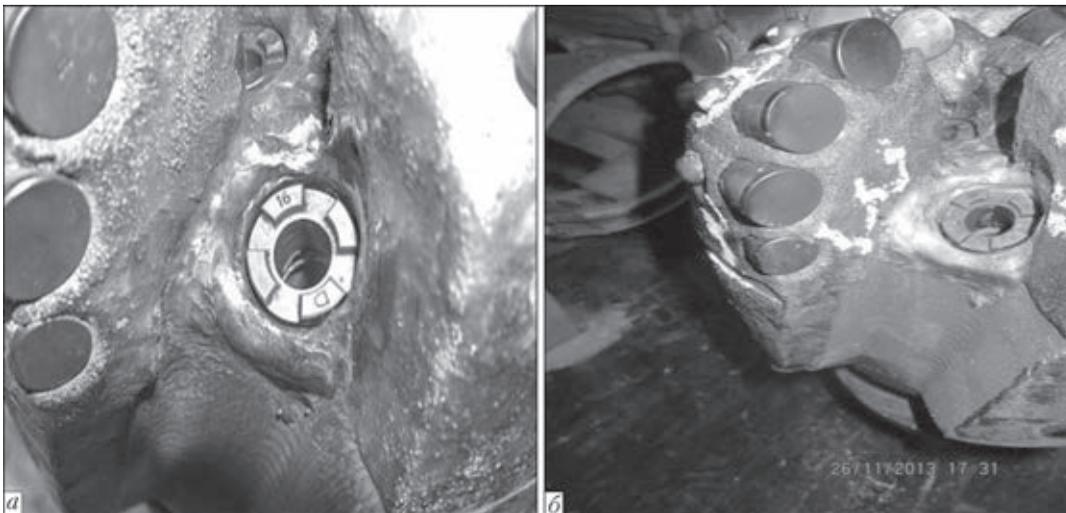


Рис. 5. Внешний вид восстановленного промывочного канала до (а) и после (б) испытаний



Для апробации восстановленного долота (рис. 5, а) проводили бурение газовых скважин Руновщина (Полтавская область). Буровое долото 8^{1/2}" SI519 BPX SD0502 отрабатывали на скважине № 101 в интервалах 533...542, 549...734, 744...886 м и на скважине № 110 в интервале 1890...2679 м (рис. 5, б). Для бурения скважин № 101 и 110 соответственно применяли буровые установки TW-100 и Skytop Brewster N-75 А. Бурение выполняли при скорости вращения установки 60...90 об/мин с усилием подачи бурового инструмента 2...12 т. Для промывки скважин и охлаждения бурового инструмента использовался буровой раствор (удельный вес 1,12...1,16 г/см³, вязкость 47 сек, рН 10...11,4, расход 20...25 л/с). Интервалы бурения представлены алевролитами, аргиллитами и абразивными песчаниками с пределом прочности при одноосном сжатии до 120 МПа.

По результатам испытаний получен акт промышленного внедрения данного долота. Общая проходка долота после реставрации составила 1125 м. Разработанная технология реставрации продлила рабочий ресурс долота на 112,5 %, после апробации износ рабочих органов, оснащенных АТР, составил 10...20 %, а восстановленного

промывочного канала — 1...2 %, т. е. возможна его очередная реставрация.

Выводы

1. Разработанная принципиальная технология реставрации стального корпуса долота соответствует классификации долот по коду IADC (промывочный канал) для эксплуатируемого бурового инструмента.

2. Технология нанесения защитного покрытия может применяться также для восстановления других дефектных участков рабочих органов стальных корпусов буровых долот с защитными покрытиями для сплошного бурения.

3. Результаты исследований могут быть использованы в горнодобывающей промышленности Украины и других стран.

1. Особенности износа и критерии ремонтпригодности буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами / В. Ф. Хорунов, Б. В. Стефанов, О. М. Сабадаш, В. В. Воронов // Автомат. сварка. – 2012. – № 10. – С. 43-47.
2. Особенности технологий ремонта буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами / В. Ф. Хорунов, Б. В. Стефанов, О. М. Сабадаш, В. В. Воронов // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2012. – С. 488–493.

Поступила в редакцию 14.05.2014

Разработано в ИЭС

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ШТАМПОВ И ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Для наплавки малогабаритных штампов применяются аппараты для аргонодуговой или микроплазменной сварки (рабочий диапазон токов 20–60 А). При этом порошковая проволока служит присадочным материалом. Для наплавки разработана гамма порошковых проволок диаметром 1,8...2,8 мм (ПП-АН130, ПП-АН132, ПП-АН140, ПП-АН147, ПП-АН148, ПП-Нп-35В9Х3СФ). В зависимости от типа штампа и условий его работы может быть выбрана оптимальная марка проволоки, позволяющая наплавить слой легированного металла с заданными служебными свойствами (термо-, тепло- и износостойкостью и т.п.) и твердостью от HRC 45 до HRC 62.

Стойкость наплавленных штампов в несколько раз выше стойкости штампов из инструментальных сталей типа 5ХНМ, 30Х2НМФ, 4Х5МФС и т. п.



Штамп для объемной штамповки колец, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН130



Вырубной штамп, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН148

КОМПЛЕКТ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ СВАРОЧНОЙ СИСТЕМЫ MIG/MAG TPS/i

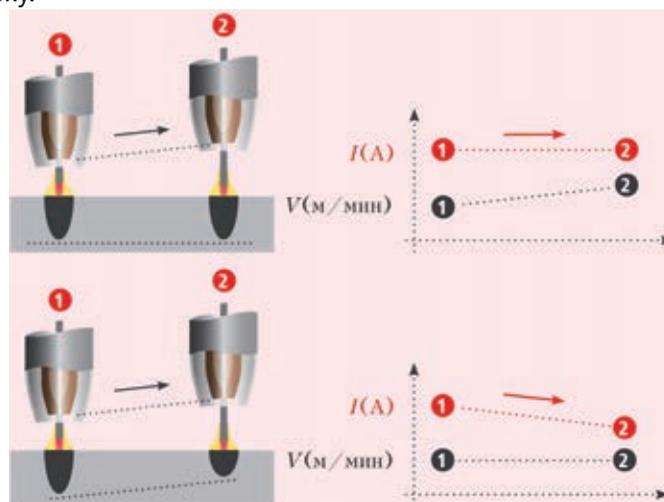
УЛУЧШЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Основываясь на функциях высокоскоростного измерения и контроля новейшей сварочной платформы MIG/MAG TPS/i, компания Fronius разработала комплект для импульсно-дуговой сварки PMC (Pulse Multi Control). Это обеспечивает сварщику доступ к широкому спектру синергетических характеристик, которые полностью используют возможности предлагаемые последним поколением аппаратов Fronius. Улучшенная функция коррекции импульса, усовершенствованный процесс SynchronPulse и полностью новые функции, такие как стабилизация проплавления и длины дуги, упрощают использование проверенного процесса сварки и позволяют достичь превосходных результатов.

Новая разработка — стабилизация проплавления, обеспечивает постоянную глубину проплавления за счет регулировки скорости подачи проволоки даже при колебаниях вылета электрода, например, в труднодоступных углах, или при изменении траектории роботизированной сварки. Благодаря высокой вычислительной мощности, большой памяти и высокоскоростной системной шине, а также динамическому изменению скорости подачи проволоки, система TPS/i способна быстро и точно выполнять функции контроля и исключить какие-либо отклонения. В результате становится возможным поддерживать длину дуги, а значит и глубину проплавления на одном уровне в довольно большой области. Это заметно упрощает сварочные работы. Сварщик может настроить максимальное значение изменения скорости подачи проволоки в пределах 10 м/мин. Это означает, что соблюдение технических условий на сварочные работы можно достичь даже при использовании стабилизатора.

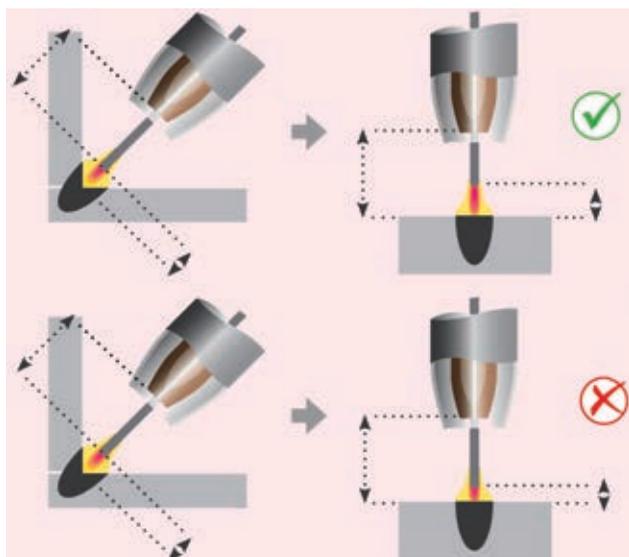
В свою очередь новая функция стабилизации длины дуги также обеспечивает преимущества при ручной и автоматизированной сварке. Используя эту функцию, сварщик может непосредственно регулировать длину дуги путем изменения сварочного напряжения. В результате при коротком замыкании дуга сокращается, что обеспечивает безопасный переход каплей металла без влияния внешних факторов. Быстрая функция контроля сокращает до минимума длительность короткого замыкания и снижает напряжение на оптимальный период времени, эффективно защищая от неполного проплавления и брызг. В случае воздействия внешних факторов (например, при изменении положения сварочной горелки, толщины листа или при неравномерном отводе тепла) пользователю не нужно выполнять ручную регулировку.

Для случаев, когда сварщики привыкли использовать знакомую функцию коррекции длины сварочной дуги или когда использование этой функции предписано техническими условиями на сварочные работы, компания Fronius интегрировала эту функцию в комплект PMC. В комплект также включена функция динамической коррекции импульса. В системах TPS/i эта функция может быть использована для ускорения (или замедления) отрыва капли. Кроме того, теперь она поддерживает подачу энергии на постоянном уровне. В комплект PMC также включена характеристика PCS (Pulse Controlled Spray-Arc). Эта характеристика позволяет сварщикам плавно переключаться между импульсной и капельной дугой, устраняя нестабильную переходную дугу.



Благодаря интегрированному процессу PMC и активной стабилизации проплавления система TPS/i точно контролирует скорость подачи проволоки с изменением вылета электрода, при этом сварочный ток остается неизменным, таким образом, обеспечивается стабилизация глубины проплавления при сварке

* Статья на правах рекламы.



Ранее нужно было каждый раз вручную регулировать длину дуги, положение горелки, толщину листа или тепловой баланс основного металла. Благодаря интегрированному процессу PMC и активному стабилизатору проплавления система TPS/i избавляет сварщика от этих трудоемких задач, автоматически обеспечивая постоянную длину дуги и автоматически поддерживая ее значение в зависимости от текущих условий сварки

процесс PMC, по окончании процесса сварки проволока втягивается. Это дополнительно снижает ток, устраняя отжиг проволоки. Обе функции не только улучшают энергетический баланс и защищают изнашивающиеся детали, но и улучшают качество сварного шва.

Поскольку в системе TPS/i все элементы, контролирующие подачу проволоки, изготовлены с большей точностью и рассчитаны на высокую динамику дуги, специальный процесс поджига SFI (Spatter Free Ignition) теперь можно использовать со стандартным оборудованием. Больше не требуется приобретать более дорогую сварочную горелку PushPull, чтобы использовать функцию поджига SFI. При использовании новой функции SFI HotStart мощность в начале сварки увеличивается на 2 с, что позволяет устранить неполное проплавление при «холодном» поджиге.

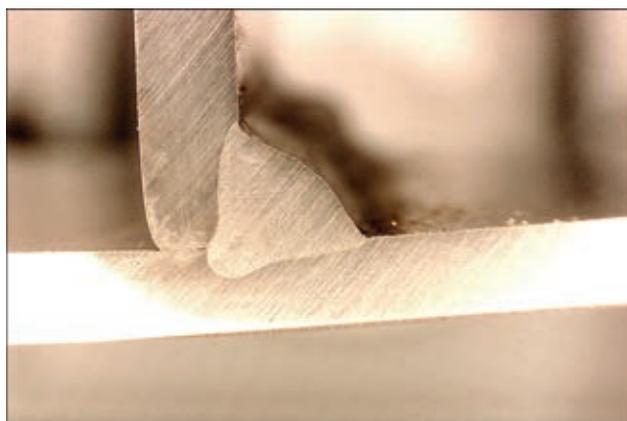
И наконец, компания Fronius улучшила функцию SynchronPulse и внедрила новый параметр сварки Duty Cycle. Благодаря этому при сварке SynchronPulse пользователь может задавать длительность импульса тока в виде процентного значения длительности каждого цикла. В результате тепловложение может контролироваться точнее, чем это было ранее, таким образом, даже менее опытные сварщики могут выполнять качественные сварные швы во всех положениях.

Fronius International GmbH — австрийская компания со штаб-квартирой в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Замтледте. Компания, штат которой насчитывает 3 344 сотрудников по всему миру, работает в области сварочного оборудования, фотовольтаики и технологий заряда аккумуляторных батарей. Более 92 % продукции компании Fronius экспортируется через 20 дочерних предприятий по всему миру, а также торговых партнеров и представителей в более чем 60 странах. Предлагая инновационные продукты и услуги, а также обладая 1 008 активными патентами, компания Fronius является мировым лидером в области технологий.



РАСШИРЯЯ ГРАНИЦЫ

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



Оптимальная форма шва достигается благодаря активной стабилизации проплавления (материал: хромоникелевый стальной лист толщиной 3 мм; проволока 308 диаметром 1,0 мм; газ: 97,5 %Ar + + 2,5 % CO₂; скорость подачи проволоки: 17 м/мин, скорость сварки 1,3 м/мин; стабилизация длины дуги 0,3, стабилизация проплавления — макс)

Более того, компания Fronius также внесла значительные усовершенствования, влияющие на начало и окончание сварки. Энергия поджига теперь зависит от температуры проволоки, и, если проволока все еще горячая, используется меньшая энергия поджига. Если установлен процесс

Инвестиции, которые окупаются!

Комплексные решения по очистке воздуха производственных помещений

Насколько важна проблема чистого воздуха для Вас? Чистый воздух является жизненно важным. Вы сможете прожить несколько дней без питьевой воды и несколько недель без еды. А без воздуха?

Работа в помещении с загрязненным воздухом не только причиняет дискомфорт, но и приводит к различным тяжелым заболеваниям. Решить проблему эффективной очистки воздуха производственных помещений помогут Вам специалисты компании «Дельтасвар», официального дистрибьютора компании ТЕКА GmbH — немецкого производителя фильтровентиляционного оборудования. С оборудованием и системами очистки воздуха фирмы ТЕКА мы хотим сделать мир немножко чище и более здоровым для работы и жизни.

Девизом компании ТЕКА является фраза: «Мы приводим воздух в движение». Фильтровентиляционные системы и установки ТЕКА GmbH имеют сертификат класса «W3». Сертификатом подтверждается, что частицы пыли и дым при сварке удаляются с эффективностью очистки воздуха более чем 99 %.

Модульная компактная конструкция ФВУ позволяет установить систему таким образом, чтобы не мешать работе грузоподъемного и прочего технологического оборудования цеха. И самое главное — удаление дыма в холодный период года может сопровождаться высоким уровнем потребления энергии для отопления помещения за счет того что имеется необходимость проветривания. С оборудованием ТЕКА это остается в прошлом!

С помощью систем вентиляции ТЕКА нет необходимости доставлять и нагревать свежий воздух в помещении цеха. Очищенный теплый воздух возвращается в рабочую область, что экономит энергию и защищает окружающую среду. «Энергоэффективность» — это волшебное слово инновационных технологий и именно с нами вы получите правильное решение!

**Не выбрасывайте Ваши деньги в окно!
Инвестируйте в энергосберегающую технику ТЕКА!**



Наиболее эффективной в плане энерго- и тепло-сбережения является центральная вытяжная система серии AIRTECH. Существует несколько модификаций данной системы, что позволяет успешно внедрять ее в производственных цехах различной планировки.



Система Push-Pull особенно благоприятно способствует равномерному распределению воздуха в помещении



Высокоэффективная система BlowTec легко настраивается в условия помещений с низкими потолками

Статья на правах рекламы.



Агрегаты серии ZPF оптимально пригодны для монтажа на улице



AIRTECH не требует установки воздухопроводов

Ваши преимущества от применения систем AIRTECH:

- ◆ Колоссальная экономия затрат на отопление за счет возврата очищенного нагретого воздуха обратно в рабочее помещение
- ◆ Значительное снижение затрат на обогревание за счет циркуляции теплых слоев воздуха
- ◆ Охрана окружающей среды благодаря снижению выбросов CO₂ в атмосферу
- ◆ Эффективная очистка воздуха благодаря использованию высококачественных фильтров с высокой степенью фильтрации (более чем 99,9 %)
- ◆ Низкие производственные затраты благодаря полностью автоматизированной очистке фильтров
- ◆ Индивидуальные решения задач по снижению концентрации А-пыли (альвеолярная пыль, т. е. мельчайшая пыль, способная проникнуть в альвеолы легких) и соответственно удовлетворению требованиям ПДК на рабочем месте.

Широкий ассортимент оборудования ТЕКА



В нашем ассортименте представлены мобильные фильтровентиляционные установки для самых различных областей промышленности, в частности, сварки, резки и металлообработки.

Из области стационарных систем очистки воздуха производственных помещений мы предлагаем установки с полностью автоматической системой очистки для рабочих цехов со средней и высокой концентрацией эмиссий, а также подвесные модели, оснащаемые 1–2 вытяжными устройствами. Официальным дистрибьютором ТЕКА в России является Компания «ДельтаСвар». Наши специалисты проконсультируют Вас по всем вопросам относительно фильтровентиляционного оборудования, организации рабочего места сварщика и средств индивидуальной защиты, помогут Вам в решении задач организации эффективной очистки воздуха на производстве!

Ермолин Александр Михайлович,
директор по развитию



ООО «ДельтаСвар»
620141, г. Екатеринбург, ул. Завокзальная, 29
тел.: +7 (343) 384-71-72 многоканальный
тел./факс: +7 (343) 287-41-52
E-mail: info@deltasvar.ru, www.DeltaSVAR.ru

ПОДПИСКА 2015 — на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	3600 руб.	7200 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информ-наука», «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 2012 г. в формате *.pdf.

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
 - Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
 - Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
 - Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
 - Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
 - 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$
- 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
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель СМΥК, разрешение 300 dpi
- **Стоимость рекламы и оплата**
- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- 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

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 22.10.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 17,00. Усл.-отт. 17,8. Уч.-изд. л. 19,20 + 2 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СВАРОЧНЫЕ ГОРЕЛКИ ОТ КОМПАНИИ «ШТОРМ»

Сварочная установка является сложной многокомпонентной системой, качество работы которой в значительной степени зависит от качества ее отдельных элементов. Одним из основных компонентов таких установок является сварочная горелка. Компания «ШТОРМ», являясь единственным официальным представителем фирмы Autogen Ritter в России, предлагает широкий диапазон сварочных горелок немецкого качества для решения большого спектра различных задач.

Горелки фирмы Autogen Ritter отличаются удобной эргономикой и надежностью. Они имеют высокие рабочие характеристики, такие как максимальный сварочный ток при сварке в различных защитных газах и режим работы, определяющий возможную продолжительность работы без перегрева элементов горелки.

Основным преимуществом данных сварочных горелок является то, что они имеют в своем составе универсальные компоненты: сопло, наконечник, диффузор, спираль. Таким образом, замена данных элементов возможна и идентичными компонентами от горелок других моделей и даже других производителей, что значительно упрощает поиск данных расходных материалов.

Линейка сварочных горелок для MIG/MAG сварки, представленная компанией «ШТОРМ», включает горелки, рассчитанные на токи от 140 до 600 А.

Данные горелки могут иметь различную систему охлаждения: воздушную или жидкостную. Они могут быть как для ручной, так и для автоматической и роботизированной сварки.

Все горелки для MIG/MAG сварки оснащены центральным евро-разъемом, который подходит для подключения практически ко всем сварочным аппаратам.

Для данных горелок характерно наличие возможности выбора различных размеров и формы гусака. Гусаки могут быть изогнутые и прямые, а также гибкие и жесткие.

Горелки с гибкими гусаками используются при сварке в труднодоступных местах, где при работе горелками с жесткими гусаками невозможно приблизиться к месту сварки.

Горелки для MIG/MAG сварки имеют различную длину: 3, 4 или 5 метров. Также доступны горелки Push-Pull, у которых в рукоятку встроен дополнительный миниатюрный подающий механизм, который позволяет протягивать сварочную проволоку к месту сварки. Из-за наличия дополнительного подающего механизма длина горелки в данном случае может быть увеличена до 8 и более метров.

Еще одним типом горелок для MIG/MAG сварки являются горелки с системой отвода газов. Основное их отличие заключается в наличии кожуха для отвода газов, образующихся при сварке, что позволяет уменьшить вредное воздействие на сварщика.

В линейку горелок для TIG сварки входят горелки на токи от 110 до 500 А. Они также могут иметь воздушную и жидкостную систему охлаждения, а также предназначаться как для ручной, так и для автоматической и роботизированной сварки.

Гусаки горелок для TIG сварки могут быть как жесткими, так и гибкими. В зависимости от задачи, для решения которой подбирается горелка, возможен выбор горелки различной длины: 4 или 8 метров.

В данном материале представлена лишь малая часть всего разнообразия сварочных горелок. Более подробную информацию по горелкам, а также квалифицированную помощь в их подборе вы можете получить у специалистов компании «ШТОРМ».

А. М. Фивейский, канд. техн. наук,
А. Ю. Мельников, инж.

* Статья на правах рекламы.