

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, В. И. Кирьян,
И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
О. К. Назаренко, В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко
(в редакционную коллегия
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 Самари, Ариэль, Израиль
В. И. Лысак
Волгоградский гос. тех. ун-т, РФ
У. Райсен
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. Туричин
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)

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

Редакторы
Т. В. Юштина, И. Ф. Соколова
Электронная верстка
И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Д. И. Серета

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

К 100-летию со дня рождения В. А. Сахарнова 4

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Тороп В. М., Гарф Э. Ф., Якимкин А. В., Гопкало Е. Е. Определение причин возникновения трещин в конструктивных элементах башни новой вентиляционной трубы на Чернобыльской АЭС 5

Гайворонский А. А., Жуков В. В., Васильев В. Г., Зубер Т. А., Шишкевич А. С. Структурные изменения в участке перегрева металла ЗТВ железнодорожных колес при дуговой наплавке 17

Суховая Е. В. Квазикристаллические сплавы-наполнители для композиционных слоев, полученных методом печной наплавки 24

Письменный А. А. Повышение энергоэффективности машин для контактной точечной сварки за счет продольной компенсации реактивной мощности 29

Махлин Н. М., Коротынский А. Е. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги 34

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лобанов Л. М., Гарф Э. Ф., Копылов Л. Н., Синеок А. Г. 40 лет сварной конструкции башни Киевского телецентра 45

Чвертко П. Н., Молтасов А. В., Самотрясов С. М. Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы 50

Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Антонюк С. Л., Петриченко И. К., Селин Р. В. Свойства соединений высокопрочного титанового сплава Т110, выполненных сваркой плавлением 54

Майданчук Т. Б. Электродные и присадочные материалы для наплавки и сварки литейных оловянных бронз (Обзор) 58

Присадочные прутки «Cobelco Welding» для выполнения корневых проходов в соединениях нержавеющей сталей без защиты обратной стороны шва 65

ХРОНИКА

Семинар «Проблемы организации сварочных работ в Украине. Новые технологии и оборудование для высококачественной сварки» ... 68

Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее» 71

ИНФОРМАЦИЯ

20 лет в мире порошковых проволок 73

Календарь выставок и конференций в 2014 г. (сварка и родственные технологии) 75

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

B. E. Paton

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko (exec. director),
I. V. Krivtsun,

S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
O. K. Nazarenko, 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)

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

Editors

T. V. Yushtina, I. F. Sokolova

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

Towards the 100th birthday anniversary of V. A. Sakharnov 4

Scientific and Technical

Torop V. M., Garf E. F., Yakimkin A. V., Gopkalo E. E. Determination of causes of crack initiation in design elements of tower of new ventilation pipe at Chernobyl NPP 5

Gaivoronsky A. A., Zhukov V. V., Vasiljev V. G., Zuber T. A., Shishkevich A. S. Structural changes in HAZ metal overheating region of railway wheels in arc surfacing 17

Sukhovaya E. V. Quasi-crystalline alloys-fillers for composite layers produced by method of furnace surfacing 24

Pismennyi A. A. Improvement of energy efficiency of machines for resistance spot welding at the expense of a longitudinal compensation of reactive power 29

Makhlin N. M., Korotynsky A. E. Analysis and method of calculation of electronic devices of series connection for contactless exciting of arc 34

INDUSTRIAL

Lobanov L. M., Garf E. F., Kopylov L. N., Sineok A. G. 40 years of welded structure of Kiev TV tower 45

Chvertko P. N., Moltasov A. V., Samotryasov S. M. Calculation of upset forces in flash-butt welding of closed-contour products 50

Akhonin S. V., Belous V. Yu., Antonyuk S. L., Petrichenko I. K., Selin R. V. Properties of high-strength titanium alloy T110 joints made by fusion welding 54

Maidanchuk T. B. Electrode and filler materials for surfacing and welding of foundry tin bronzes (Review) 58

Filler rods «Cobelco Welding» for making root passes in joints of stainless steel without shielding of weld reverse side 65

NEWS

Seminar «Problems of welding jobs organizing in Ukraine. New technologies and equipment for high-quality welding» 68

International Conference «Welding and Related Technologies — Present and Future» 71

Information

20 years in the world of flux-cored wire 73

Calendar of exhibitions and conferences in 2014 (welding and related technologies) 75

«Avtomaticheskaya 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».



У К А З
ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 650/2013

Про відзначення Б. Патона орденом «За заслуги»

За визначні особисті заслуги у зміцненні науково-технічного потенціалу
Української держави, багаторічне самовіддане служіння вітчизняній науці

П О С Т А Н О В Л Я Ю:

Нагородити орденом «За заслуги» I ступеня ПАТОНА Бориса Євгеновича –
президента Національної академії наук України, м. Київ.

Президент України Віктор ЯНУКОВИЧ
27 листопада 2013 року

У К А З
ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 655/2013

Про відзначення державними нагородами України з нагоди річниці
підтверження всеукраїнським референдумом Акта проголошення
незалежності України 1 грудня 1991 року.

За значний особистий внесок у соціально-економічний, науково-технічний,
культурно-освітній розвиток Української держави, вагомі трудові досягнення,
багаторічну сумлінну працю

П О С Т А Н О В Л Я Ю:

Нагородити орденом «За заслуги» I ступеня ЛОБАНОВА Леоніда Михайловича –
заступника директора Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України, м. Київ.

Президент України Віктор ЯНУКОВИЧ
3 грудня 2013 року

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В. А. САХАРНОВА



«Работа для меня — хобби» — так говорил Василий Алексеевич. Преданных своему делу людей много, а вот таких, кто полностью посвятил себя работе, которая стала призванием и увлечением почти на целый век — единицы.

Василий Алексеевич Сахарнов родился в Нижнем Новгороде 8 января 1914 г. После окончания кораблестроительного факультета Горьковского политехнического института молодой, талантливый и инициативный инженер работал в конструкторском бюро завода «Красное Сормово», где выпускали двигатели для подводных лодок. Кстати, в то же время по направлению Киевского индустриального института (ныне НТУУ «Киевский политехнический институт») инженером электротехнической лаборатории на сормовском заводе работал и Борис Евгеньевич Патон. Но тогда еще никто не мог предвидеть, как прочно переплетутся их судьбы на поприще создания сварочной техники.

До начала Великой Отечественной войны В. А. Сахарнов реализовал несколько рационализаторских предложений, по этой причине, вероятно, руководство завода не пустило его на фронт. Правда, с субмаринами талантливому инженеру довелось на некоторое время попрощаться: его перевели на завод, где осваивали выпуск новых двигателей для бронетанковой техники.

В 1951 г. Василий Алексеевич начал работать в ИЭС им. Е. О. Патона. При его активном участии уже в 1957 г. был разработан опытный образец машины для контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов в полевых условиях К134. И хотя в серийное производство она не попала (была достаточно «сырой»), но именно ее можно считать «первой ласточкой» машин для контактной стыковой сварки рельсов. Позже в институте был создан ряд машин, из которого железнодорожникам наиболее пришлась по душе «звездная модель» — К355. Ее создатели — конструктор В. А. Сахарнов, технологи В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко и С. А. Солодовников — были отмечены Ленинской премией за успешную разработку технологии и оборудования для сварки рельсов в полевых условиях при ремонте и строительстве железнодорожных путей.

С 1974 г. машины К355 экспортируются за границу. Кстати, именно на основе К355 было создано целое поколение подвесных рельсосварочных машин, которые до сих пор выпускает Каховский завод электросварочного оборудования.

Приложил руки Василий Алексеевич и к созданию машин для сварки труб большого диаметра. В 1960-е годы, когда Советский Союз развернул гигантское строительство нефте- и газопроводов из Сибири в западные районы страны, именно ИЭС им. Е. О. Патона впервые применил автоматический метод контактной стыковой сварки труб вместо ручной и автоматической дуговой сварки. Новая установка работала аккуратнее и производительнее, чем самый опытный электросварщик, да и освоить ее удалось в 40-градусный мороз от работы большое количество рабочих. Эти работы были отмечены высокими государственными наградами. Кроме того, под руководством В. А. Сахарнова были разработаны и внедрены в производство уникальные машины для сварки как блоков картеров мощных дизелей, так и сложных алюминиевых профилей больших поперечных сечений для летательных аппаратов. За создание оборудования для контактной стыковой сварки он награжден золотыми, серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР. Обычно Василий Алексеевич вынашивал в голове общие черты конструкции и, садясь за кульман, уже был уверен, что машина работает именно так, как он «приказал». И хотя некоторые идеи поначалу казались абсурдными, но его уверенность передавалась и зажигала сотрудников. Все принимали участие в обсуждении проекта. Рассматривались самые дерзкие суждения и в результате появлялись машины, которые завоевывали рынок и которым до сих пор нет равных в мире. Болезненно переживал Василий Алексеевич попытку заменить конструктора компьютером. «Как можно облечь озарение в математическую формулу?!» — удивлялся он.

В. А. Сахарнов — автор более 300 авторских свидетельств на изобретения и 200 патентов, в том числе США, ФРГ, Великобритании, Франции, Швеции, Канады и др. Более 40 лет он возглавлял конструкторский отдел в ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона. За это время сотни людей прошли через отдел. Кто-то задерживался, кто-то уходил, уезжал, но всех их навсегда объединило нечто общее — они считали себя «сахарновцами». Здесь, в стенах института, В. А. Сахарнов стал заслуженным изобретателем УССР (1974), заслуженным машиностроителем Украины (2009), лауреатом Ленинской премии (1966), Государственных премий СССР (1986) и УССР (1973).



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ БАШНИ НОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТРУБЫ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В. М. ТОРОП¹, Э. Ф. ГАРФ¹, А. В. ЯКИМКИН¹, Е. Е. ГОПКАЛО²

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

² Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ. 01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: office@ipp.kiev.ua

Выполнен анализ проектной и эксплуатационной документации, а также соответствие фактических нагрузок и режимов эксплуатации новой вентиляционной трубы требованиям данной документации. Проанализированы результаты неразрушающего контроля основного металла и сварных соединений конструктивных элементов новой вентиляционной трубы на ЧАЭС. Трещины в узлах башни новой вентиляционной трубы ЧАЭС носят системный характер. Они образовались в зонах сварных узловых соединений трех верхних ярусов башни, в которых элементы решетки выполнены из труб сечением 193,7×6 мм. В настоящий момент трещины выявлены в 17 узлах прорезной фасонки стойки и в 17 узлах крепления раскосов к распорке. Отобраны темплеты, представляющие собой трещиносодержащие фрагменты фасонки — конструктивных элементов новой вентиляционной трубы ЧАЭС, изготовлены образцы и проведены экспериментальные исследования химического состава, микротвердости, механических свойств и структуры основного металла, металла зоны термического влияния и металла шва. Определены причины и механизмы возникновения трещин в конструктивных элементах новой вентиляционной трубы при проведении материаловедческих исследований на двух вырезанных темплатах. Фрактографические исследования выявили усталостный характер возникновения и развития поверхностных трещин в фасонках. Аэродинамические и прочностные расчеты сооружения и отдельных его элементов убедительно показали, что причиной возникновения трещин являются резонансные колебания раскосов в верхних трех секциях башни, направленные из плоскости граней и вызывающие переменные изгибные напряжения в узлах. Определены частоты колебаний и усилия, передаваемые на узлы. Поля напряжений, вызванные периодическими усилиями в раскосах, подтверждают зону образования и развития разрушения, а максимальные уровни напряжений значительно превосходят пределы усталости сварных соединений. Сделан вывод о том, что в проекте башни использованы устаревшие конструктивные решения узлов, характеризующиеся многочисленными зонами высокой концентрации напряжений, низким сопротивлением усталости и низкой сопротивляемостью коррозионным воздействиям. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 20.

Ключевые слова: сварные соединения, сварные узлы, усталость, резонанс, долговечность, фрактография, металлографические исследования, усталостная трещина, расчет на прочность, новая вентиляционная труба, Чернобыльская АЭС

В ходе анализа проектной документации установлено, что возведение новой вентиляционной трубы (НВТ) выполнено над помещением 7001 блока В главного корпуса второй очереди Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) между осями Д1-Ж/36-37. Главный корпус второй очереди ЧАЭС представляет собой сложное сооружение, включающее 3-й энергоблок, разрушенный 4-й энергоблок (объект «Укрытие») и общий для обоих энергоблоков блок В. На отметке 74,500 м блока В между осями И-Н/36-40 расположена существующая вентиляционная труба ВТ-2.

Новая вентиляционная труба (НВТ) представляет собой башню в виде несущего стального каркаса с расположенным в нем газоотводящим стволом, диаметр которого составляет 6,0 м. Несущий каркас башни НВТ — четырехгранная пространственная решетчатая конструкция с размера-

ми в плане 8,05×8,05 м (в осях) и высотой 50,0 м. Внутри башни с шагом 7,2 м предусмотрены горизонтальные диафрагмы, совмещенные с переходными площадками. Для доступа на площадки предусмотрены вертикальные лестницы-стремянки. Башня НВТ опирается на металлический опорный контур на отметке 71,650 м. Стойки башни, основные связи и решетки между стойками выполнены из цилиндрических электросварных труб.

Газоотводящий ствол диаметром 6,0 м с четырьмя вертикальными ребрами жесткости опирается на металлический контур на отметке 71,650 м. Отметка верха газоотводящего ствола 125,000 м. Через каждые 7,2 м по высоте газоотводящий ствол закрепляется в горизонтальном направлении к диафрагмам башни. Стыки газоотводящего ствола выполняются фланцевыми соединениями на бол-



тах. Для связи газоотводящего ствола с помещением 7001 блока В предусматривается демонтаж керамзитобетонных плит покрытия на отметке 71,000 м в осях Д1-Ж/36-37.

Металлический опорный контур представляет собой систему балок, раскрепленных горизонтальными связями. На две главные балки опорного контура, располагаемые по осям Д1 и Ж, крепятся стойки башни НВТ. Главные балки опорного контура крепятся к существующим железобетонным конструкциям блока В в четырех местах на отметке 70,700 м по осям Д1-Ж/36-37. Опорные узлы крепления главных балок рассчитаны на восприятие вертикальных (в том числе и отрывающих) и горизонтальных нагрузок от НВТ.

Раскосы нижних ярусов башни НВТ – трубы диаметром 245 мм с толщиной стенки 8 мм для раскосов ВС1. Для раскосов ВС2 принята труба 219×6 мм. Раскосы ВС3, установленные на отметке 100,36...121,96 м, выполнены из трубы 193,7×6 мм. Гибкость раскосов λ ВС3 составляет 170. Гибкость раскосов ВС1 и ВС2 составляет 130 и 150 соответственно, при этом негативное влияние колебаний для этих элементов менее заметно. Следует также учитывать, что фасонки на нижних ярусах выполнены из листового проката большей толщины, чем фасонки в узлах крепления раскосов ВС3, толщина которых составляет 12 мм. Согласно данным, приведенным в [1], потенциально опасной областью возникновения автоколебаний круглых стальных стержней решетчатых конструкций являются элементы с λ от 100 до 350.

Проведенное специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины обследование узловых соединений башни НВТ и выявленные при этом трещиноподобные дефекты [2], материаловедческие исследования металла в зоне образования трещин и детальный анализ поверхности излома [3], позволяют взвешено и аргументировано подойти к установлению причины образования трещин в узлах НВТ.

В ходе обследования металлических конструкций несущего каркаса НВТ в уровне верхних ярусов каркаса башни на отметках 114,92, 107,72, 100,52 м [2] выявлены следующие недостатки:

- ♦ отсутствие монтажных болтов вследствие расцентровки отверстий в соединительных фасонках (вызвано нарушениями геометрической точности при сборке каркаса);

- ♦ наличие трещин в верхней части вертикальных фасонки стоек в местах примыкания раскосов.

Обращает на себя внимание тот факт, что расположение выявленных трещин носит системный характер. Все трещины обнаружены в трех верхних секциях башни. Общим для этих секций является

то, что элементы решетки выполнены из цилиндрических труб сечением 193,7×6 мм, а фасонки имеют толщину стенки 12 мм. В этих секциях из 24 узлов примыкания решетки к прорезной фасонке стойки башни в 17 выявлены трещины, а из 24 узлов соединения раскоса с распоркой обнаружены в 17 (рис. 1). Следует отметить, что специалисты проводили обследование в условиях высокого радиационного фона, и были ограничены во времени. Поэтому велика вероятность того, что не все трещины выявлены.

Трещины имеют разную протяженность. Они зарождаются от края в верхней части узловой фасонки (узел примыкания элементов решетки к стойке башни) и развиваются вниз вдоль фасонки и в глубину (рис. 1, а). В узле сопряжения раскосов с распоркой трещины имеют место в соединении ребра с трубой раскоса через тонкую заглушку, обеспечивающую герметизацию внутренней полости раскосов (рис. 1, б).

Еще одна характерная особенность: в узлах стойки башни трещины образуются с двух сторон фасонки, развиваясь по глубине и продвигаясь навстречу друг другу. Трещины развиваются по границе перехода от углового сварного шва, соединяющего стойку башни с прорезной фасонкой, к основному металлу фасонки. В тех случаях, когда угловые швы с одной и другой стороны фасонки имеют разные катеты, трещины развиваются с соответствующим смещением.

Характерный вид трещиноподобных дефектов, выявленных неразрушающим контролем, приведен на рис. 2.

С целью установления причин зарождения трещиноподобных дефектов в металлоконструкциях НВТ выполнены металлографические и фратографические исследования. Темплеты фасонки с предполагаемыми трещинами вырезаны на отметках 36Ж+114 (место вырезки показано на рис. 3) – темплет № 1 и 36Д1+107 (схема вырезки показана на рис. 4) – темплет № 2, соответственно. Согласно документации, металл фасонки (лист толщиной 12 мм) – низкоуглеродистая строительная сталь класса С255.

Для идентификации материала фасонки был проведен анализ химического состава основного металла фасонки (оптико-эмиссионный спектрометр Q2 ION на базе CCD детекторов) результаты которого представлены в таблице.

По химическому составу (содержанию марганца) заявленный металл фасонки не удовлетворяет требованиям, предъявляемым ГОСТ 380-94 к сталям марок Ст3Гпс и Ст3Гсп (аналогов стали С255), хотя, согласно ГОСТ 27772-88, удовлетворяет стали С255 (таблица). Кроме того, для точной идентификации марки стали фасонки были



Рис. 1. Примеры развития трещин в узлах раскосов башни (а, б — см. в тексте)

проведены механические испытания, результаты которых подтвердили их соответствие стали С255 (согласно требованиям ГОСТ 1497-84). Проведенные при температуре 20 °С механические испытания стандартных гладких образцов показали средние значения предела прочности 453 МПа, предела текучести 285 МПа, относительного удлинения 31,7 и относительного сужения 54,4.

С целью анализа (выяснения) причин и механизмов образования трещиноподобных дефектов в конструкции выполнены комплексные исследования представленных темплетов в районе сварных соединений, включающие визуальный осмотр, металлографический анализ на оптическом инвертированном микроскопе «AXIOVERT 40-MAT» и фрактографический анализ на модернизированном растровом электронном микроскопе РЭМ-100У.

Вырезку образцов для металлографических исследований проводили в плоскости поперечного сечения *S-T* фасонки перпендикулярно плоскости прокатки листа *L-T*, (где *L* — направление прокатки, совпадающее с продольным направлением сварного шва; *T* — направление в плоскости прокатки; *S* — направление, перпендикулярное к плоскости прокатки).

Темплет №1 в состоянии поставки по одной из сторон вырезан в плоскости трещины *L-S* вдоль углового сварного шва перпендикулярно плоскости прокатки листа фасонки *L-T* (рис. 5). Поверхность трещины в плоскости реза покрыта продуктами коррозии и поэтому перед фрактогра-

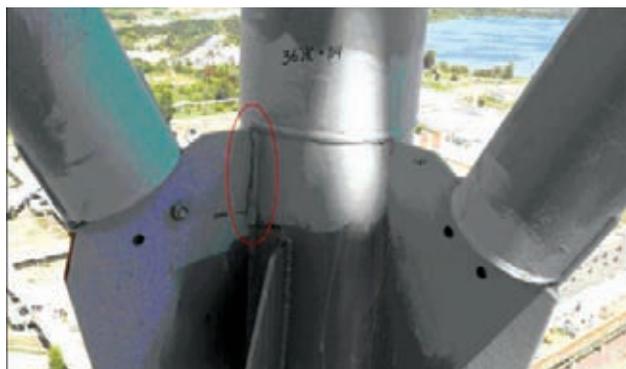


Рис. 2. Трещиноподобные дефекты в узле примыкания раскосов к стойке башни



Рис. 3. Узел примыкания раскосов к стойке башни после вырезки темплета № 1

фическим исследованием провели ультразвуковую очистку поверхностей от продуктов коррозии в ультразвуковом диспергаторе УЗДН, используя 2%-ный спиртовой раствор щавелевой кислоты, а затем чистый этиловый спирт. На рис. 5, в показан фрагмент фасонки в плоскости трещин *L-S* после снятия защитного слоя с внешних поверхностей листа и очистки поверхностей трещин от продуктов коррозии.

Фрактографические исследования поверхностей раскрытых трещин в плоскости реза позволили выявить очаги зарождения и механизмы распространения трещин в сварном соединении темплета № 1, хотя сама зона сварного шва в темплете отсутствует. На основании фрактографических исследований трещины идентифицируются как усталостные, зарождающиеся на поверхностных дефектах. Очаги усталостных трещин отмечены стрелками на рис. 5, в. На рис. 6 представлен характерный фрагмент фрактограммы фасонки с усталостной трещиной (с очагом зарождения, характерным рельефом разрушения и следами остановки фронта усталостной трещины). Магистральная трещина образовалась в результате слияния нескольких усталостных трещин, которые возникли из разных очагов на внешней поверхности фасонки и проросли вглубь образца на 5...6 мм (приблизительно на половину толщины листа фасонки). На некоторых участках изло-



Рис. 4. Схема вырезки темплета № 2 (трещиносодержащий фрагмент фасонки с полной структурой шва до конца обнаруженной трещины)



Химический состав металла, мас. %

Источник данных	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Co
Q2 ION спектрометр	0,146... ...0,158	0,134... ...0,17	0,60... ...0,62	<0,03	<0,010	0,026... ...0,032	<0,010	<0,010	<0,005	0,047	0,016
ГОСТ 27772-88 (С255)	≤0,22	0,15... ...0,30	≤0,65	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—
ГОСТ 380-94 (Ст3Гпс)	0,14... ...0,22	≤0,15	0,8...1,1	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—
ГОСТ 380-94 (Ст3Гсп)	0,14... ...0,20	0,15... ...0,30	0,81,1	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—

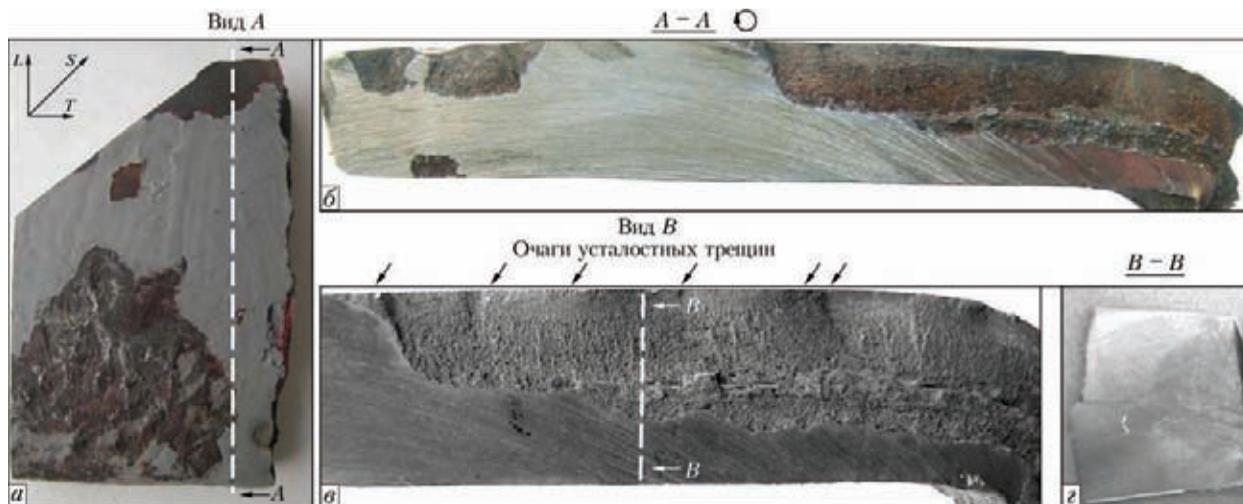


Рис. 5. Темплет № 1 с раскрытой трещиной: а — внешний вид темплета; б, в — фрагмент фасонки в плоскости трещин L-S соответственно до и после очистки поверхности трещин от продуктов коррозии (сечение А-А фасонки); г — плоскость микрошлифа в плоскости S-T (сечение В-В фасонки)

ма наблюдаются крупные глобулярные неметаллические включения по размеру соизмеримые с ферритом основного металла (ОМ) фасонки (возможно, трещина в таких местах пересекала зону сплавления).

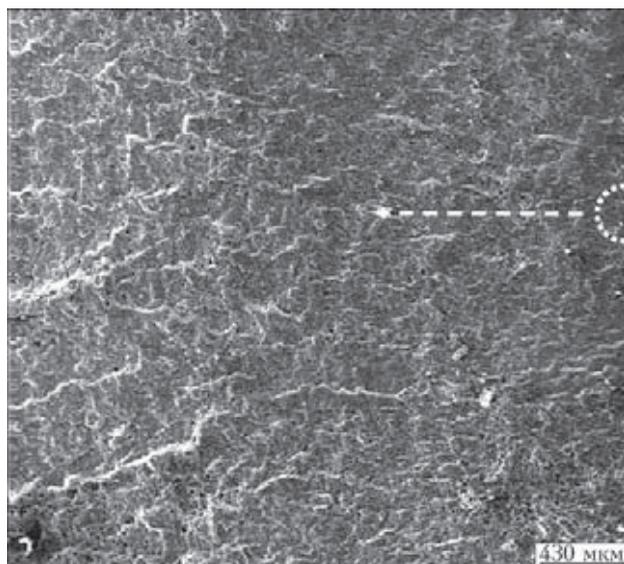


Рис. 6. Фрактограмма фасонки (темплет № 1) в плоскости L-S с усталостной трещиной (белым контуром обозначен очаг усталостной трещины, стрелка — направление фронта трещины)

Как показали металлографические исследования фрагментов профиля трещины в плоскости S-T одного из поперечных сечений, трещина зарождалась на внешней поверхности фасонки на участке крупного зерна зоны термического влияния (ЗТВ).

Причем вдоль линии профиля первичной трещины (в поперечном сечении сварного соединения) наблюдаются мелкие вторичные микротрещины расщеля длиной несколько микрометров, ориентированные вдоль текстуры прокатки, а на расстоянии порядка 5 мм от внешней поверхности образовалась уже протяженная вторичная трещина расщеля порядка 450...500 мкм (рис. 7), также обусловленная текстурой прокатки. Она распространялась вдоль вытянутых перлитных колоний и сульфидных включений, которые наблюдаются в исследуемом сечении темплета (см. увеличенный фрагмент на рис. 7).

На рис. 8 изображен фрагмент темплета № 2 сварного соединения в плоскости S-T после травления в 4%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте с обозначением участков сварного шва (СШ), ЗТВ и ОМ.

Микроструктура ОМ фасонки представляет ферритно-перлитную смесь полиэдрического фер-

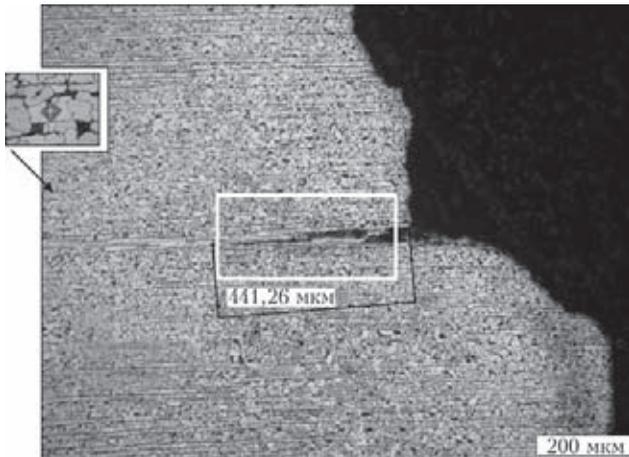


Рис. 7. Фрактограмма вторичной трещины расщеля фасонки рита с незначительным количеством мелкозернистого перлита. При общей разноразмерности феррита (14...30 мкм) средний размер ферритных зерен составляет 20...25 мкм. В ферритных зернах наблюдается высокая плотность мелкодисперсного карбида. Для ОМ фасонки характерна полосчатая структура прокатки. Измерение микротвердости при нагрузке 0,5 Н проведено на микротвердомере Т-Dugscan-20 согласно ГОСТ 9450–84. Микротвердость зерен феррита в ОМ, в зависимости от плотности мелкодисперсного карбида в них, колеблется в пределах HV 1500...1670, а перлита : $HV \sim 1770...1930$ МПа.

В зонах сварных швов дефекты в виде микротрещин не обнаружены. Микроструктура металла сварных швов представляет столбчатые кристаллиты с характерной направленной ориен-

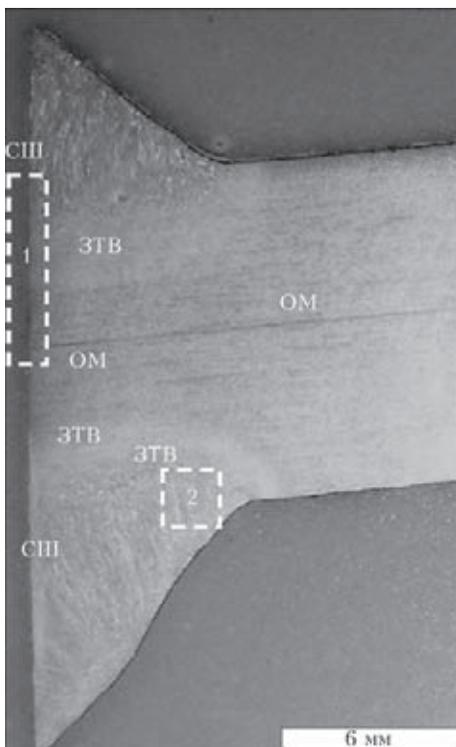


Рис. 8. Фрагмент микрошлифа сварного соединения (темплет № 2) в плоскости $S-T$

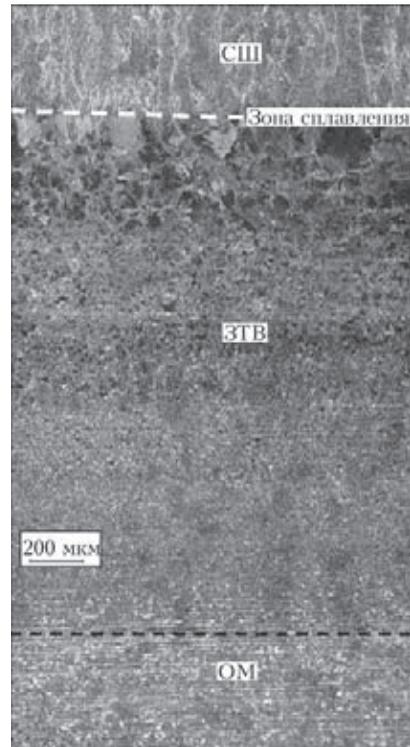


Рис. 9. Панорамное изображение фрагмента микроструктуры (темплет № 2) участка 1 на рис. 8

тацией, указывающей на направленность кристаллизации из жидкого состояния. Микротвердость столбчатых кристаллов при нагрузке 1 Н составляет в среднем $HV \sim 2350$ МПа.

Панорамное изображение фрагмента микроструктуры участка 1 (см. рис. 8), включающее структуру СШ, зоны сплавления, ЗТВ и ОМ фасонки, представлено на рис. 9. Возле зоны сплавления в ЗТВ расположен участок перегрева (участок «крупного зерна» шириной порядка 400...600 мкм), зерна которого характеризуются видманштеттовой структурой с пониженными механическими свойствами. Общая ширина ЗТВ — в пределах 900...2900 мкм.

При детальном исследовании микроструктуры сварного соединения в плоскости $S-T$ микрошли-



Рис. 10. Фрагмент микроструктуры (темплет № 2) участка 2 на рис. 8 (точечный контур — область микротрещин)

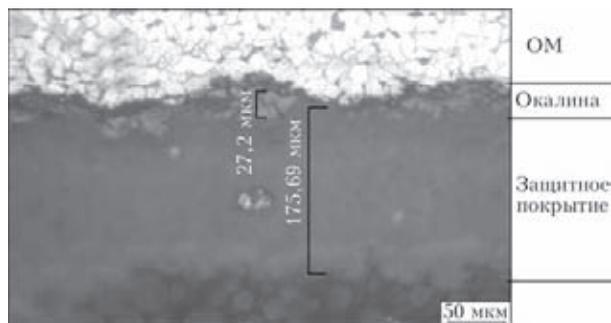


Рис. 11. Фрагмент сечения фасонки с окалиной и защитным покрытием

фа вблизи зоны сплавления обнаружены две микротрещины размером 50...60 мкм, зародившиеся на концентраторе в виде дефекта внешней поверхности темплета в области крупного зерна ЗТВ (рис. 10). Такие мелкие трещины вряд ли удалось бы обнаружить другими методами, ввиду шероховатости внешней поверхности и наличия на ней слоя окалины. Как показали исследования, толщина слоя окалины на поверхности фасонки достигает в отдельных местах 30 мкм, а толщина защитного покрытия — 180 мкм (рис. 11).

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод о том, что за образование и развитие трещин отвечают усилия в раскосах башни, поскольку именно от усилий в раскосах в прорезных фасонках возникают напряжения, характер распределения которых полностью согласуется с закономерностями развития трещин в узлах башни. Однако, если предположить, что в раскосах башни имеют место только продольные усилия, вызванные нагрузками, действовавшими за время эксплуатации сооружения, то вызываемые ими напряжения никак не могли привести к выявленным повреждениям. Образование и развитие трещин с двух сторон прорезных фасонки в узлах стоек башни и образование трещин в узлах сопряжения раскосов с распоркой свидетельствует о том, что в этих узлах имеют место изгибные напряжения, которые могут быть вызваны только соответствующими усилиями в раскосах.

Тот факт, что в фасонках стоек трещины зарождаются и развиваются по границе перехода от сварного соединения к основному металлу, а по толщине металла трещины развиваются перпендикулярно его поверхности, а также различие в размерах трещин в разных узлах, свидетельствует об их усталостном происхождении. Это убедительно подтверждается и приведенными выше фрактографическими исследованиями, в частности характерной поверхностью излома, наличием очагов зарождения трещин усталости, бороздками, характерными для остановки и страгивания трещин (см. рис. 5, 6).

Следовательно, с позиций прочности сварных конструкций нет никаких сомнений, что выявленные в узлах башни НВТ трещины носят усталостный характер и вызваны изгибными напряжениями, которые возникают при колебании раскоса из плоскости панели башни. При этом в зоне трещины должны возникать периодические усилия, вызывающие циклические напряжения, достаточные для того, чтобы привести к зарождению и развитию трещин усталости. Заметим, что для образования трещин потребовалось менее семи месяцев эксплуатации башни. Поэтому образование трещин возможно только в том случае, если раскосы при определенных, реально существующих скоростях ветра входят в резонанс, а возникающие при этом усилия и напряжения способны вызвать усталостные разрушения в узлах. Еще один довод в пользу именно этой причины возникновения повреждений состоит в том, что в трех верхних ярусах башни гибкость раскосов самая большая. Это объясняет и то, что именно в этих ярусах обнаружены трещины.

Вместе с тем нельзя обойти вниманием точку зрения по рассматриваемой проблеме специалистов фирмы «Бехтель» (США), проводивших независимое исследование дефектосодержащих конструктивных элементов НВТ [4]. К проведению исследования были привлечены два специалиста в области металлургии и один — в области технологии сварки и неразрушающего контроля. В самом начале своего исследования авторы делают вывод о том, что «проект исключается в качестве причины возникновения дефектов», мотивируя это тем, что с момента завершения строительства и до обнаружения трещин сооружение не подвергалось расчетным нагрузкам. Этим самым авторы исследования существенно ограничили область поиска причин возникновения трещин в узлах башни. Если априори исключается конструктивный фактор, то ничего другого, кроме технологического фактора, для объяснения причин разрушения просто не остается. В процессе исследования было установлено, что в фасонке толщиной 12 мм, вырезанной вместе с угловым швом из узла на отметке 100 м, использована сталь класса С345, в то время как проектом предусмотрена сталь класса С255. Само по себе это принципиального значения не имеет, но в сварном шве и околошовной зоне была установлена повышенная твердость (HV до 3985 МПа) и «небольшое количество мартенсита в околошовной зоне», что может свидетельствовать о повышенной скорости охлаждения сварного соединения. На основании сказанного делается заключение, что «наиболее вероятной причиной образования трещин является водородное растрескивание». Авторы



понимают, что повышенная твердость и наличие мартенсита в околошовной зоне сами по себе не могут вызвать холодных трещин, поэтому выдвигается предпосылка, что на заводе-изготовителе сварка выполнялась «в условиях дождя, снега, высокой влажности или сильного ветра». Конечно, с таким заключением согласиться трудно, хотя авторы и высказывают его достаточно осторожно. Во-первых, условия сварки по всей длине фасонки, надо полагать, были одинаковы, а трещины во всех случаях имеют место там, где усилие передается от раскоса, т. е. в верхней части фасонки. Во-вторых, холодные трещины расположены преимущественно в ЗТВ, т. е. по зоне сплавления СШ, а рассматриваемые трещины развиваются перпендикулярно поверхности фасонки, и наконец, ни в одних исследованиях наличия холодных трещин ни в СШ, ни в ЗТВ не обнаружено. Кроме того, трещины имеют место как в фасонках, выполненных из стали класса С345, так и в фасонках, выполненных из стали С255, хотя авторы рассматриваемого исследования убеждены, что в стали класса С255 трещин не будет.

Для определения условий возникновения резонансных колебаний раскосов, их частотных характеристик, а также уровней возникающих при этом циклических напряжений, был выполнен комплексный расчет раскосов на ветровую нагрузку, которую рассматривали как возмущающий фактор, вызывающий резонансные колебания.

Заметим, что приведенных выше данных, основанных на результатах обследования и фрактографических исследованиях поверхности излома, вполне достаточно, чтобы сделать однозначный вывод о причинах и характере возникших трещин.

Расчет, приведенный ниже, является лишь инструментом, объясняющим достаточно очевидные для специалистов факты, и рассматривать его как самостоятельный критерий для принятия ответственного решения можно только будучи абсолютно уверенным в его корректности. Авторы вынуждены обратить внимание на это, поскольку недостаточно корректно выполненный расчет приводит к ошибочным выводам.

Основные этапы и порядок выполнения расчетов. Согласно приведенным выше результатам металлографического анализа фрагментов фасонки, определено, что механизм, вызвавший образование и развитие трещин, носит усталостный характер.

Анализ исходных данных позволил исключить из рассмотрения некоторые виды нагрузок (учтенные при проектировании НВТ), а именно: смерч класса 3, землетрясение 5 и 6 баллов, снеговая нагрузка, температурное воздействие. Поскольку за время эксплуатации НВТ (с момента ее ввода в эксплуатацию и до появления трещин в фасонках) одни из указанных выше нагрузок отсутствовали вообще, другие не превышали своих расчетных значений, а повторяемость их была незначительна, они не могли послужить причиной образования трещин.

Принимая во внимание, что для высотных сооружений именно ветровая нагрузка, как динамический возмущающий фактор, является основной, рассмотрено влияние ветрового потока на напряженно-деформированное состояние НВТ и ее отдельных конструктивных элементов.

Решение задачи выполнено в несколько этапов, с использованием аэродинамических и прочностных численных моделей. Это обусловлено

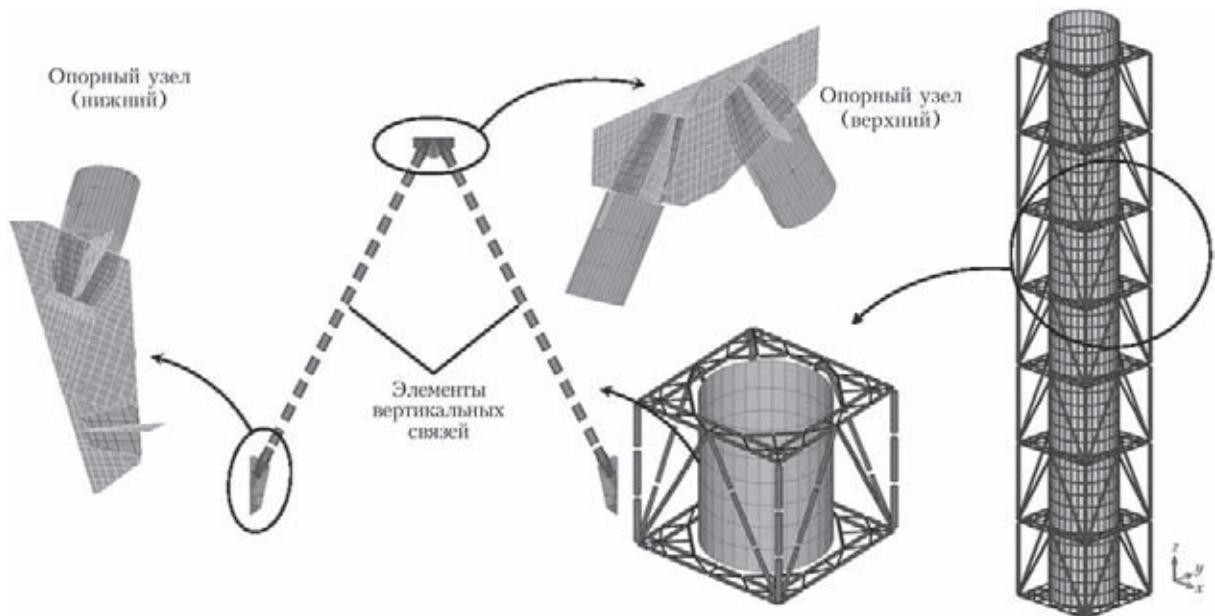


Рис. 12. Конечно-элементные модели НВТ

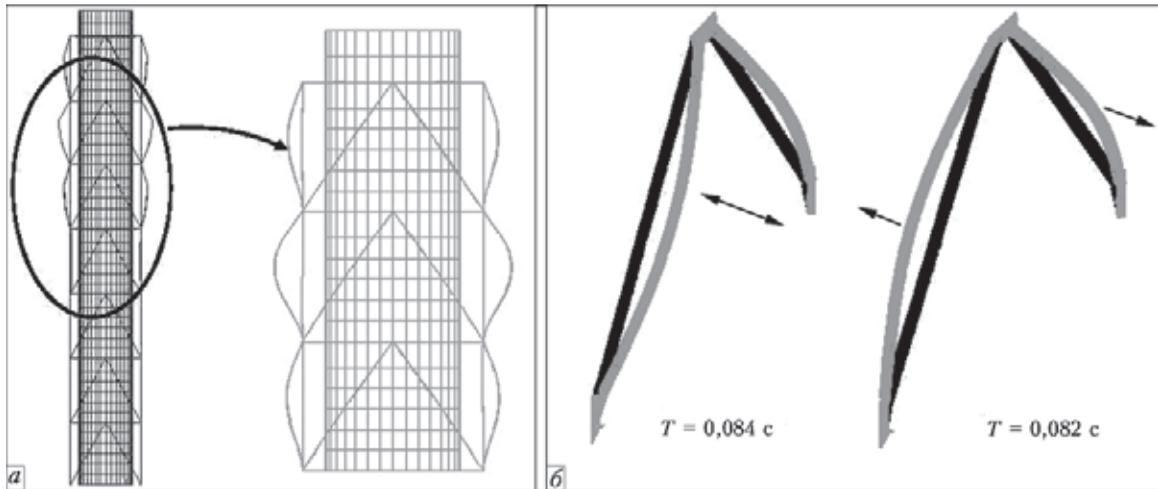


Рис. 13. Формы собственных колебаний (а, б — см. в тексте)

достаточно сложным характером взаимодействия ветрового потока и строительных конструкций – взаимным влиянием соседних, конструктивных элементов на распределение скоростей и ветровых напоров и т. д.

В результате расчета пространственных оболочечно-стержневых конечно-элементных моделей (рис. 12) определены формы и периоды собственных колебаний системы.

При детальном анализе полученных результатов выявлено, что в ряде случаев формы собственных колебаний НВТ образованы групповым деформированием раскосов трех верхних секций (рис. 13, а). Колебания раскосов характеризуются их выпучиванием из плоскости граней. Характерные формы колебания раскосов и соответствующие им величины периодов собственных колебаний приведены на (рис. 13, б).

Для определения критической скорости ветрового потока $v_{кр}$, способной вызвать ветровой резонанс в раскосе, воспользуемся формулами, приведенными в [5]. В первом приближении принимаем, что критическая скорость ветра, вызывающая резонансные колебания в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, равна:

$$v_{кр} = \frac{d}{T_i Sh} = \frac{0,194}{0,084 \cdot 0,2} = 11,6 \text{ м/с} \approx 12 \text{ м/с},$$

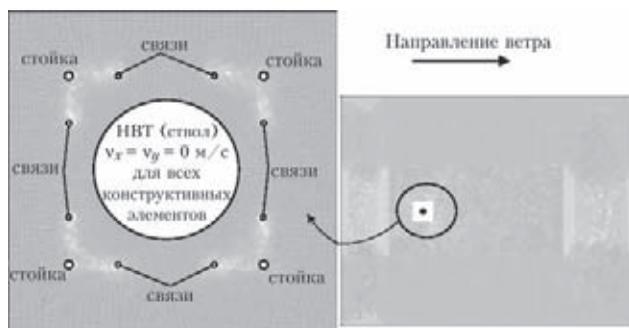


Рис. 14. Аэродинамическая модель. Общий вид, нагрузки и граничные условия ($v_x = 12$, $v_y = 0$ м/с, $P = 0$ Па)

где $T_i = 0,082$ с — период собственных колебаний раскоса по i -й форме; $Sh = 0,2$ — число Струхаля для круглого сечения; $d = 0,194$ м — диаметр элемента связи (труба 193,7×6 мм) в трех верхних уровнях башни.

Используя в качестве исходных данных значение критической скорости $v_{кр} = 12$ м/с ветрового потока, с помощью аэродинамической модели (рис. 14) определен характер распределения ветрового потока и давления по поверхностям конструктивных элементов НВТ.

Выполненный расчет показал, что конструктивные элементы башни и ствола НВТ оказывают влияние на параметры распределения ветрового потока вокруг ствола башни и элементов вертикальных связей. Увеличение скорости ветрового потока вдоль боковой поверхности ствола (рис. 15) приводит к тому, что раскосы, расположенные в этой зоне, подвергаются воздействию повышенных значений ветрового давления (рис. 16).

Кроме этого, взаимное влияние конструктивных элементов башни НВТ приводит к тому, что спутные струи, возникающие позади раскосов (вертикальных связей), попадают в кильватерные струи потоков, образованных угловыми стойками башни. В результате этого спутные струи вертикальных связей подвергаются турбулизации практически сразу после отрыва потока и между находящимися на некотором расстоянии друг от друга слоями со сдвигом образуется турбулентный след.

В работах [1, 6] отмечено, что наиболее опасны колебания неизолированного цилиндра, т. е. расположенного в кильватерной струе другого или параллельно другим цилиндрам. При этом вибрация раскосов возникает значительно легче – при меньшей скорости потока и может поддерживаться в широком диапазоне скоростей, а не в определенном интервале, поэтому она более опасна. Согласно [1], действующие на сооружение аэродинамические силы изменяются по гармониче-

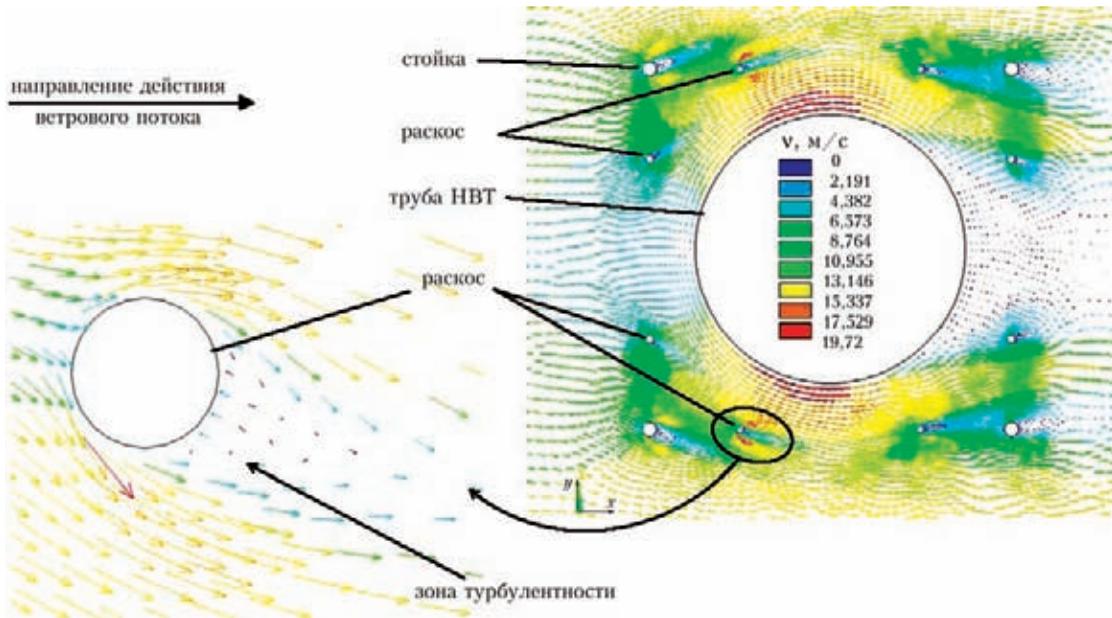


Рис. 15. Направление векторов скорости ветрового потока

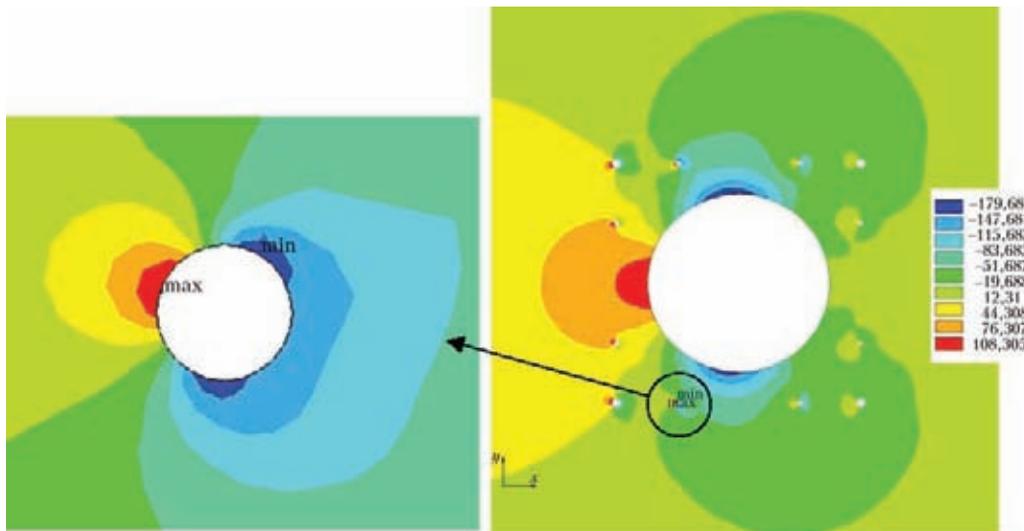


Рис. 16. Изополя ветрового давления

скому закону. В связи с этим, для определения степени влияния ветрового потока на прочностные характеристики опорных элементов вертикальных связей, выполнен гармонический анализ конструкции.

В качестве исходных данных, при определении значения возмущающей силы (амплитуды интенсивности), действующей на элементы вертикальных связей, использовали результаты, полученные при решении аэродинамической задачи.

В результате расчета уточненной модели действия гармонической силы (амплитуда интенсивности F_0), моделирующей динамическое воздействие ветровой нагрузки, в опорных фасонках и других конструктивных элементах рассматриваемого фрагмента сооружения определены значения напряжений и деформаций.

Анализ полученных результатов показал, что действующие силы вызывают отклонение опор-

ных фасонки из плоскости. Схемы деформирования опорных фасонки приведены на рис. 17.

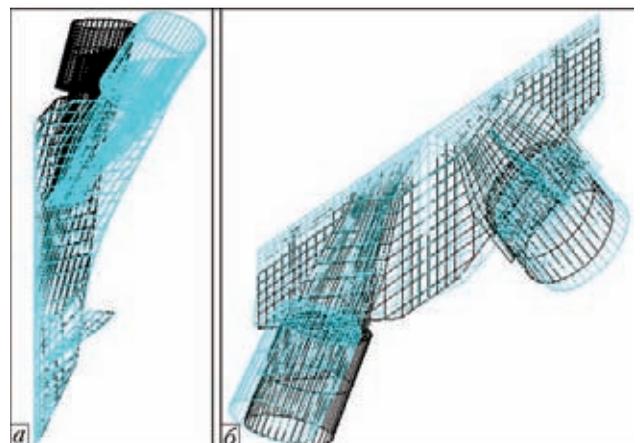


Рис. 17. Схемы деформирования опорных фасонки: а — нижняя; б — верхняя фасонки

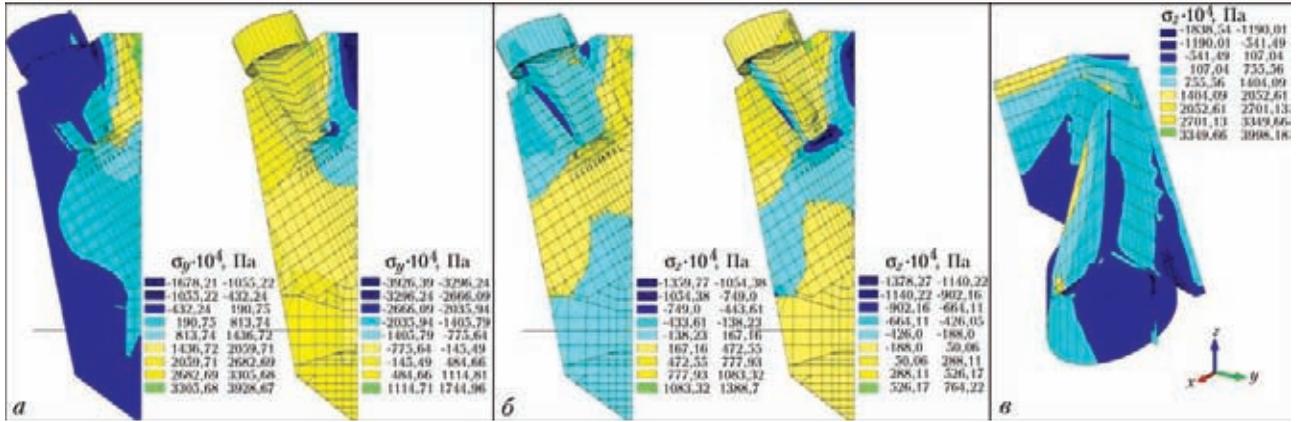


Рис. 18. Изополя напряжений на лицевых поверхностях нижнего (а, б) и верхнего (в) опорных узлов

Изгиб нижних опорных фасонки приводит к образованию на их лицевых поверхностях напряжений, достигающих значений $\sigma_y = \pm 38,56$ МПа. Области с наибольшими напряжениями расположены в верхней зоне опорных фасонки, на участке их примыкания к стойкам башни. Кроме этого, увеличение напряжений наблюдается на участках с переменными жесткостями — зонах сопряжения опорных фасонки с фасонками раскосов. Изополя напряжений σ_y и σ_z в опорных узлах приведены на рис. 18.

В верхнем узле раскоса, на участке примыкания ребра жесткости к торцевой заглушке, наблюдается зона с ярко выраженным концентратором напряжений. Схема деформирования и изополя напряжений σ_z на лицевых поверхностях в зоне верхнего опорного узла приведены на рис. 18, в. Напряжения на этих участках достигают значения $\sigma_z = 39,9$ МПа.

Дополнительные исследования и расчеты. В результате дополнительных исследований выявлены следующие факты.

1. Принимая во внимание, что коэффициент поперечной силы C_y , используемый при определении возмущающей силы, является теоретически минимально возможным и на практике достигает

больших значений, был выполнен расчет уточненной модели для $C_y = 0,3$.

Выполненные расчеты показали, что характер распределения напряжений в элементах конструкции остался аналогичным изополям, полученным ранее. При этом значения напряжений на лицевых поверхностях нижних опорных фасонки увеличились на 25 % (до 49 МПа). Увеличение значений напряжений также отмечено в верхнем опорном узле.

2. Конструктивные решения опорных узлов во всех секциях башни НВТ идентичны, поэтому проведена оценочная проверка опорных узлов нижележащих секций.

Расчеты показали, что для вертикальных связей, выполненных из круглой трубы 219×6 мм, период первой формы собственных колебаний $T = 0,07$ с, а критическая скорость $v_{кр} = 15,5...16$ м/с. Амплитуда напряжений по модулю в опорных фасонках, в зависимости от значения динамического коэффициента C_y , может изменяться от 31 до 39 МПа.

Для элементов вертикальных связей, выполненных из круглой трубы 245×8 мм, $T = 0,06$ с, $v_{кр} = 20,5...21,0$ м/с.

Полученные значения критических скоростей ветрового потока не отмечены в статистических данных скоростей ветра, полученных на метеостанции Чернобыль за прошедший период. При этом предоставленная информация о скоростях ветра выполнена в виде почасовых замеров, что вносит некоторый параметр усреднения. В работе [7] отмечено, что средняя скорость усреднения ветра зависит от времени усреднения. При уменьшении интервала усреднения максимальное значение средней скорости, соответствующее этому интервалу, увеличивается. К примеру, разница между средней почасовой скоростью и средней скоростью за период 20 с может отличаться в два раза. Таким образом, для секций третьего-четвертого уровня вероятна скорость ветрового потока $v = 15...16$ м/с.



Рис. 19. Общий вид конструкции башни НВТ



3. Учитывая, что число Струхала носит ориентировочный характер и может для различных форм поперечных сечений меняться в определенном диапазоне (для цилиндров принято $Sh = 0,2$, хотя на практике — $Sh = 0,185 \dots 0,22$), внешние нагрузки могут менять свои значения в еще большем диапазоне, что, в свою очередь, приводит к еще большему увеличению напряжений в опорных элементах каркаса башни НВТ.

Оценка напряжений в прорезной фасонке, вызванных резонансными колебаниями раскосов. Расчетные значения циклических напряжений, возникающих в прорезной фасонке у границы углового сварного шва приварки ее к трубе стойки, рассмотрены на соответствие действующим в Украине нормам [8] и рекомендациям Международного института сварки [9].

Согласно [8] предел усталости R_p для 5-й группы элементов, к которым может быть отнесено соединение прорезной фасонки со стойкой при остаточных напряжениях в зоне образования трещин более $0,5 \sigma_T$ для симметричного цикла нагружения $R_{\sigma_{-1}} = 16,83$ МПа. Заметим, что согласно норм [8] предел усталости определяется на базе 10^7 циклов нагружения.

Поскольку в фасонке циклические напряжения в условиях резонансных колебаний раскоса составляют ± 39 МПа, то ожидать появления трещин можно при долговечности $8,04 \cdot 10^5$ циклов нагружения. С учетом частоты колебания раскоса в условиях резонанса (12,2 Гц) для образования трещин усталости достаточно 20 ч эксплуатации.

Согласно методике Международного института сварки для характерных типов сварных соединений приводятся предельные значения размахов напряжений на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений. Для соединения близкого к тому, которое имеет место в башне НВТ, предельное значение размаха напряжений составляет 45 МПа.

Поскольку в фасонке значение размаха напряжений составляет 78 МПа, долговечность, при которой можно ожидать появления трещин усталости, составляет, согласно этой методике, $384 \cdot 10^3$ циклов нагружений.

Приведенные данные еще раз подтверждают усталостную природу возникновения трещин в узлах башни НВТ.

Анализируя причины образования трещин в узлах башни НВТ, нельзя уйти от оценки принятых конструктивных решений. Несущий каркас башни НВТ выполнен из цилиндрических труб (рис. 19).

Выбор этого типа сечений для конструктивных элементов башни вполне оправдан, поскольку позволяет снизить ветровые нагрузки на сооружение, увеличить расчетную длину элементов,

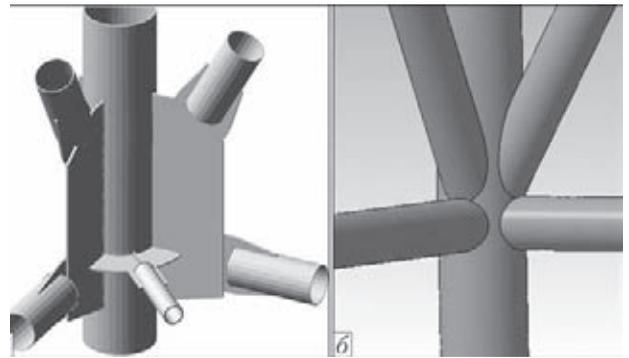


Рис. 20. Схемы узлового соединения конструктивных элементов башни НВТ со стойкой: а — с прорезными фасонками; б — с непосредственным примыканием

а, следовательно, снизить вес сооружения и его стоимость. Кроме того, трубчатые элементы обладают повышенной сопротивляемостью коррозии, благодаря хорошей обдуваемости и малой площади поверхности. Однако эти преимущества полностью могут быть реализованы только при рациональном решении узловых соединений. Известно, что в конструкциях из труб узловые соединения в ряде случаев определяют прочность и надежность всего сооружения [10].

В последние десятилетия, в связи с использованием цилиндрических труб в качестве несущих элементов морских стационарных платформ и других ответственных сооружений, выполнен большой объем исследований, направленных на разработку оптимальных конструктивных решений узлов, методов оценки их прочности при статическом и циклическом нагружении. Показано, что наиболее рациональным решением является непосредственное примыкание элементов решетки к стойке. Конструкция имеет высокую прочность, низкую концентрацию напряжений, малое количество сварных соединений, высокую сопротивляемость коррозии. Для таких узлов разработаны нормативные документы по расчету их прочности [11, 12 и др.] при статическом и циклическом нагружении. Для сравнения приведем узел башни НВТ и узел, соответствующий современным представлениям о проектировании конструкций из труб (рис. 20). Если бы проект башни НВТ был выполнен на современном уровне, удалось бы избежать многих недостатков.

Выводы

1. Трещины в узлах башни НВТ ЧАЭС носят системный характер. Они образовались в зонах сварных узловых соединений трех верхних ярусов башни с элементами решетки из труб сечением $193,7 \times 6$ мм. Трещины выявлены в 17 узлах прорезной фасонки стойки и в 17 узлах крепления раскосов к распорке.



2. Не вызывает сомнений, что появление трещин вызвано циклическими усилиями, действующими в раскосах. Это подтверждается характерными местами их образования и наличием трещин с обоих концов раскосов.

3. Трещины имеют усталостное происхождение, зарождаются в фасонках стоек на внешней поверхности с двух сторон, распространяются вдоль границы сварного шва от верхнего края фасонки и в глубину. Фрактографические исследования поверхностей излома выявили очаги зарождения, характерный рельеф усталостного разрушения и следы остановки усталостной трещины. В узлах распорок трещины также имеют характерные признаки усталостного разрушения.

4. Аэродинамический и прочностной расчеты сооружения и отдельных его элементов убедительно показали, что причиной возникновения трещин являются резонансные колебания раскосов в верхних трех секциях башни, направленные из плоскости граней и вызывающие переменные изгибные напряжения в узлах. Определены частоты колебаний и усилия, передаваемые на узлы.

5. Поля напряжений, вызванные периодическими усилиями в раскосах, подтверждают зону образования и развития усталостного разрушения, а максимальные уровни напряжений значительно превосходят пределы усталости сварных соединений.

6. Расчет показал, что опасность с точки зрения зарождения усталостных трещин представляют раскосы, выполненные из труб сечением 219×6 мм. При разработке ремонтного проекта башни НВТ на это следует обратить внимание.

7. В проекте башни использованы устаревшие конструктивные решения узлов, для которых характерны многочисленные зоны высокой концентрации напряжений, низкое сопротивление усталости и низкая сопротивляемость коррозионным воздействиям.

1. *Савицкий Г. А.* Ветровая нагрузка на сооружения. — М.: Стройиздат, 1972. — 108 с.
2. *Результаты* обследования сварных соединений каркаса новой вентиляционной трубы на объекте «Чернобыльская АЭС»: (Отчет Опыт. конструктор.-технолог. бюро) / ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. — Киев, 2012. — 83 с.
3. *Экспертиза* причин возникновения трещиноподобных дефектов в новой вентиляционной трубе: (Отчет) / ООО «УкрАтомэнерго». — Киев, 2012. — 50 с.
4. *Маклин Д., Кемпбелл Р., Колуэлл Р.* Независимое исследование конструктивных дефектов НВТ: Науч.-техн. отчет. — Киев, 2012. — 40 с.
5. *Руководство* по расчету зданий и сооружений на действии ветра. — М.: Стройиздат, 1978. — 216 с.
6. *Вилькерд Д. С., Попов С. Г., Савицкий Г. А.* Колебания тел в аэродинамическом следе // Вестн. Моск. гос. ун-та. — 1951. — № 12. — С. 23–25.
7. *Симиу Э., Скэнлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения. — М.: Стройиздат, 1984. — 343 с.
8. *ДБН В.2.6-163:2010.* Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. — Чинний з 01.12.11. — К.: Мінрегіонбуд, — 201 с.
9. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components.* — S.I., S.a. — 153 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96).
10. *Marshall P. W.* Connections for welded tubular structures // Intern. conf. on welding of tubular structures. — Massachusetts: Pergamon Press, 1984. — P. 11–17.
11. *ВСН 51.4–85.* Ведомственные строительные нормы. Бесфасоночные узлы конструкций из труб морских нефтегазопромысловых сооружений. Методика расчета прочности. — Введ. 03.06.1985. — М.: Мингазпром, 1985. — 30 с.
12. *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms.* — S.I., S.a. — 86 p. — (American Petroleum Inst.; Doc. RP2A).

Поступила в редакцию 03.09.2013

Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве / Б.Е. Патон, Г.М. Григоренко, И.В. Шейко и др. — Киев: Наук. думка, 2013. — 488 с.

В монографии приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях. Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.





СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УЧАСТКЕ ПЕРЕГРЕВА МЕТАЛЛА ЗТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ, В. В. ЖУКОВ, В. Г. ВАСИЛЬЕВ, Т. А. ЗУБЕР, А. С. ШИШКЕВИЧ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Цель работы — исследование влияния параметров термического цикла сварки (ТЦС) при дуговой наплавке, включая стадии нагрева и охлаждения, на формирование структуры и свойства металла в участке перегрева ЗТВ высокопрочной колесной стали марки 2, содержащей 0,58 % углерода. С применением комплекса «Gleeble 3800» выполнена термическая обработка модельных образцов при скорости нагрева 25 и 210 °C/с до температуры 1250 °C с последующим охлаждением по ТЦС ($w_{6/5} = 2,5 \dots 64$ °C/с), проведены металлографические исследования структуры и построены диаграммы превращения переохлажденного аустенита. При испытаниях по методу Имплант оценено влияние скорости охлаждения и структурного состояния металла в участке перегрева металла ЗТВ на показатели критических напряжений при замедленном разрушении колесной стали. Установлено, что незавершенность процессов гомогенизации аустенита металла при дуговой наплавке, вследствие быстрого его нагрева и ограниченного времени пребывания при температуре выше A_{c3} , существенно влияет на последующее γ - α -превращение в металле ЗТВ. Это приводит к понижению критической скорости охлаждения до 20 °C/с, при которой в структуре образуется не более 50 % мартенсита (w_{50M}). Показано, что высокую сопротивляемость металла ЗТВ замедленному разрушению, на уровне $\sigma_{кр} \geq 0,45 \sigma_{0,2}$, можно обеспечить при условии $w_{6/5} \leq w_{50M}$. Результаты исследований могут быть использованы при назначении технологии дуговой восстановительной наплавки изделий из высокопрочных сталей. Библиогр. 12, рис. 4, табл. 4.

Ключевые слова: дуговая наплавка, колесная сталь, термический цикл, ЗТВ, диаграмма превращения аустенита, структура, мартенсит, бейнит, замедленное разрушение

Образование трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей зависит от состояния структуры в участке перегрева металла ЗТВ, степени закалки металла в процессе термического цикла сварки (ТЦС) и его пластических свойств. Это определяет количество и плотность дислокаций, глубину протекания диффузионных и релаксационных процессов в закаленном металле, что существенно влияет на процессы зарождения и развития трещин при нагружениях и, в конечном итоге, на работоспособность сварных соединений и металлоконструкций в целом [1–5].

Проблемы при восстановлении наплавкой изделий из высокопрочных колесных сталей аналогичны возникающим при сварке легированных сталей, основной из которых является предупреждение образования трещин в металле ЗТВ. В отличие от высокопрочных легированных сталей колесные стали не содержат дополнительных легирующих элементов, таких, как хром, никель, молибден, стабилизирующих структуру в металле при воздействии термомеханического цикла сварки. Основным легирующим элементом в колесной стали является углерод, содержание которого составляет более 0,50 %. Железнодорожные колеса, изготовленные из такой стали, имеют ферритно-перлитную структуру. Уровень прочности

металла колес превышает 900 МПа при его сравнительно низкой пластичности и вязкости [6, 7].

Как известно, углерод образует с железом твердый раствор внедрения, значительно упрочняя феррит, причем намного больше, чем легирующие элементы, образующие растворы замещения. Растворимость углерода в железе различна в зависимости от того, в какой кристаллической форме существует железо. Так, растворимость углерода в α -железе (ОЦК решетка) составляет менее 0,02 %, а в γ -железе (ГЦК решетка) в сто раз больше (до 2 %) [1, 2]. При термическом воздействии, при нагреве и охлаждении, в металле будут проходить изменения кристаллической решетки. При охлаждении, в зависимости от степени переохлаждения γ - α -превращение аустенита может протекать двумя путями. При малых скоростях охлаждения превращение будет сопровождаться диффузионными процессами с образованием ферритно-перлитной смеси и верхнего бейнита. При высоких скоростях охлаждения γ - α -превращение будет протекать без диффузии с образованием закалочных структур нижнего бейнита и мартенсита.

В то же время известно, что характер γ - α -превращения в металле при охлаждении зависит также от условий нагрева и степени гомогенизации аустенита [1, 2, 8, 9]. Уменьшение времени пребы-



вания металла при нагреве выше температуры A_{c3} приводит к неравномерности по составу структуры аустенита, образующегося из ферритно-перлитной смеси. В участках, где ранее располагался перлит, образуется обогащенный углеродом аустенит, а там, где был феррит, γ - α -превращение идет при более высоких температурах, углерода в аустените значительно меньше. Это приводит к тому, что в структуре металла находится аустенит с разным содержанием углерода. Наличие такой неоднородности во многих случаях приводит к существенным изменениям кинетики превращения аустенита при охлаждении, структуры металла и его свойств. Поэтому степень гомогенизации аустенита в металле участка перегрева ЗТВ будет оказывать существенное влияние на формирование структуры и свойства восстановленных наплавкой железнодорожных колес. При этом основными параметрами ТЦС, от которых будут зависеть структура и свойства металла, является не только максимальная температура нагрева T_{\max} и скорость охлаждения в интервале температур $600 \dots 500 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($w_{6/5}$), но и скорость нагрева ($w_{\text{нагр}}$), а также время пребывания металла при температурах выше A_{c3} (t_1).

Имеется еще один фактор, существенно влияющий при сварке на структурообразование в металле ЗТВ. Это рост зерна аустенита, который приводит к уменьшению площади межзеренной границы, а это, при прочих равных условиях, уменьшает вероятность зарождения феррита и перлита, увеличивает устойчивость аустенита и способствует развитию бейнитного и мартенситного превращения [1–3, 8].

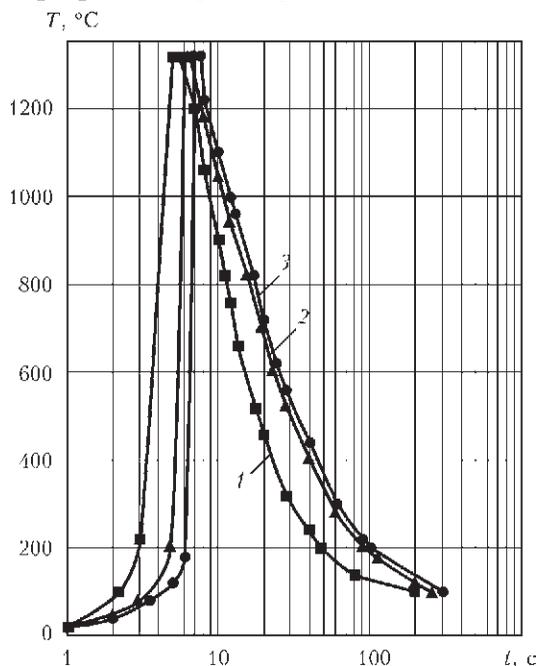


Рис. 1. Термические циклы в металле ЗТВ при дуговой наплавке колесной стали толщиной 20 мм: 1 — погонная энергия 8,6; 2 — 11,5; 3 — 15 кДж/см

Дуговую наплавку для восстановления изношенных гребней железнодорожных колес грузовых вагонов массово начали применять на ремонтных предприятиях Украины и стран СНГ сравнительно недавно. Это процессы одно- и двухдуговой наплавки под слоем флюса на режимах, которые обеспечивают погонную энергию на уровне $10 \dots 14 \text{ кДж/см}$. Обязательными элементами технологии являются применение предварительного подогрева ободьев колес до температур $150 \dots 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ в зависимости от используемого способа наплавки и замедленного охлаждения колес после наплавки в термокамерах. При выполнении требований, предъявляемых к технологии наплавки, гарантируется высокое качество наплавленного металла и надежность колес при эксплуатации. Однако до настоящего времени остается невыясненным вопрос об особенностях влияния параметров ТЦС дуговой наплавки на характер структурных изменений в участке перегрева металла ЗТВ колесной стали.

Целью настоящей работы было изучение влияния параметров ТЦС при наплавке железнодорожных колес, включая стадии нагрева и охлаждения, на формирование структуры участка перегрева металла ЗТВ и его свойства. В качестве материала для исследований использовали высокопрочную колесную сталь марки 2 (ГОСТ 10791) следующего состава, мас. %: 0,58 C; 0,44 Si; 0,77 Mn; 0,10 Ni; 0,05 Cr; 0,012 S; 0,011 P.

Характерные термические циклы в металле ЗТВ при дуговой наплавке колесной стали толщиной 20 мм в зависимости от погонной энергии показаны на рис.1, а в табл.1 приведены основные параметры ТЦС. Как видно из представленных данных, при погонной энергии дуговой наплавки в диапазоне $8,6 \dots 15 \text{ кДж/см}$ время нагрева металла в участке перегрева ЗТВ до температуры $1320 \text{ } ^\circ\text{C}$ составляет $5 \dots 7 \text{ с}$, что соответствует скорости нагрева $190 \dots 260 \text{ } ^\circ\text{C/с}$. При этом время пребывания металла выше температуры A_{c3} ($800 \text{ } ^\circ\text{C}$) составляет $t_1 = 6,5 \dots 11,5 \text{ с}$.

Структура металла ЗТВ при наплавке дуговым способом неоднородна, а размеры её отдельных участков крайне малы. Поэтому структурные изменения, которые происходят под воздействием ТЦС в металле, изучали на модельных образцах. Для этого использовали исследовательский комплекс «Gleeble 3800», оснащенный термостатом и высокоскоростным дилатометром [10], а сравнительные исследования выполняли на цилиндрических образцах диаметром 6 и длиной 80 мм. В соответствии с методикой испытаний их нагревали до температуры $1250 \text{ } ^\circ\text{C}$ со скоростью 25 и $210 \text{ } ^\circ\text{C/с}$ (время нагрева соответственно 50 и 6 с), а затем охлаждали с разными скоростями в соот-



Таблица 1. Основные параметры ТЦ в металле ЗТВ при дуговой наплавке колесной стали толщиной 20 мм

Погонная энергия наплавки $Q_{св}$, кДж/см	Параметры термического цикла ($T_{max} = 1320\text{ }^{\circ}\text{C}$)				
	$w_{нагр}$, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	t_1 , с	$w_{6/5}$, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	$t_{8/5}$, с	$t_{8/1}$, с
8,6	260	7	25...30	8	170
11,5	220	10	14...16	14	245
15,0	190	11,5	10...12	19	285

ветствии с термическими циклами наплавки. Время пребывания металла при температурах выше A_{c3} , в зависимости от скорости охлаждения, соответственно составляло 23...66 и 7...10 с. Термические циклы охлаждения подбирали таким образом, чтобы в интервале температур 600...500 $^{\circ}\text{C}$ скорость охлаждения образцов $w_{6/5}$ изменялась в диапазоне 2,5...64 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$.

Температуру начала и конца превращения переохлажденного аустенита определяли по точке отхода касательной от дилатометрической кривой, а соотношение фаз, образовавшихся в результате превращений, устанавливали методом отрезков [11]. В дальнейшем структуру термически обработанных образцов исследовали методами оптической металлографии, после чего уточнялось соотношение структурных составляющих и критическая скорость охлаждения при γ - α -превращениях. Исследования структуры осуществляли при помощи микроскопа «Neophot-32», микротвердость отдельных структурных составляющих и интегральную твердость металла измеряли на твердомере М-400 фирмы «LECO» при нагрузке соответственно 100 г ($HV_{0,1}$) и 1 кг (HV_{10}).

Обобщенные результаты данных исследований в виде диаграмм превращения переохлажденного аустенита в металле участка перегрева ЗТВ в зависимости от скорости нагрева, времени пребывания металла при температурах выше A_{c3} и скорости охлаждения в соответствии с ТЦ при дуговой наплавке представлены на рис. 2.

На рис. 3 и 4 показана характерная микроструктура металла в участке перегрева ЗТВ при различных параметрах ТЦ, а в табл. 2 и 3 приведены основные параметры структуры.

Структура колесной стали марки 2 в состоянии поставки представлена перлитно-ферритной смесью (рис. 3, а), величина зерна 16...32 мкм и микротвердость структурных составляющих $HV_{0,1} = 1990...2450$ МПа.

По границам зерен располагаются ферритные оторочки размером 5...10 мкм. Интегральная твердость металла $HV_{10} = 2200$ МПа.

При нагреве со скоростью $w_{нагр} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ превращение переохлажденного аустенита, скорость охлаждения которого составляет

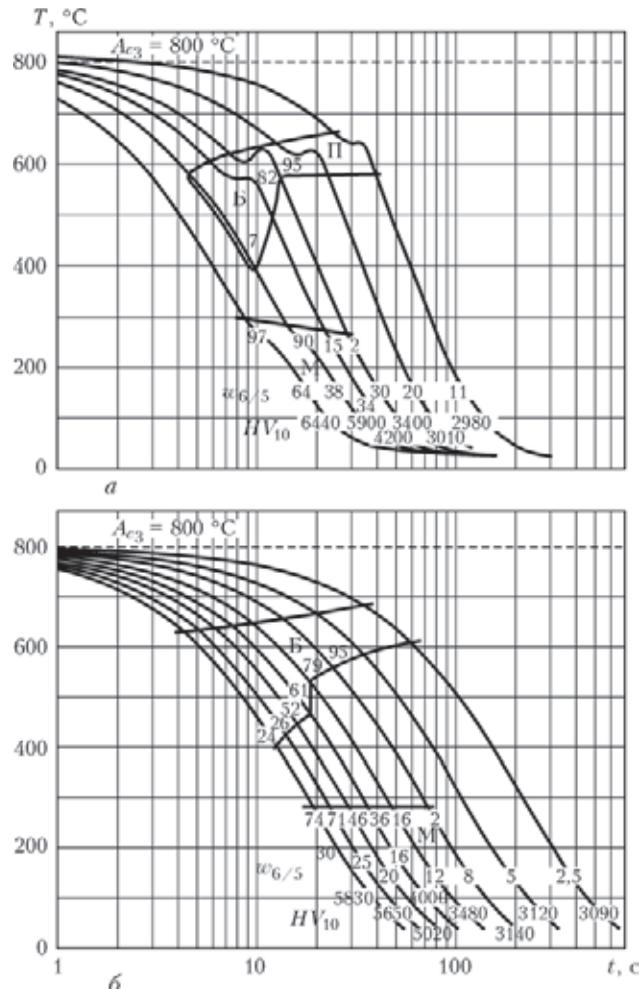


Рис. 2. Диаграмма превращения переохлажденного аустенита в металле ЗТВ колесной стали при дуговой наплавке: $w_{нагр} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ($t_1 = 23...66$ с) (а) и $w_{нагр} = 210\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$, $t_1 = 7...10$ с (б) $w_{6/5} < 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ($t_1 = 30...66$ с), протекает в перлитно-бейнитной области (рис. 2, рис. 3, б, в). Температурный интервал перлитного превращения, в зависимости от скорости охлаждения, составляет

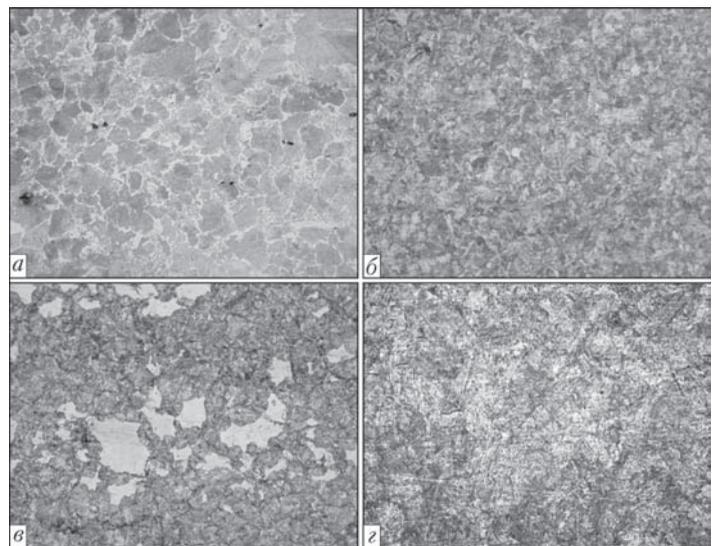


Рис. 3. Микроструктура металла ($\times 320$, при уменьш. в 2 раза) в участке перегрева ЗТВ при $w_{нагр} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ($t_1 = 23...66$ с): а — основной металл; б — $w_{6/5} = 20$; в — 30; г — 64 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$



Таблица 2. Параметры структуры в участке перегрева металла ЗТВ колесной стали (0,58 % С) при скорости нагрева $w_{нагр} = 25 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ($t_1 = 65 \text{ с}$)

$w_{6/5}$, $^\circ\text{C/c}$	Структура металла	Структурные составляющие, %				Твердость $HV_{0,1}$, МПа
		Перлит	Бейнит верхний	Бейнит-нижний	Мартенсит	
0Me	Ферритно-перлитная	86	—	—	—	1990...2450
11	Перлитно-бейнитная	30	65	—	—	2450...2970
20	Перлитно-бейнитная	16	80	—	—	2640...3220
30	Бейнитная	—	95	—	2	2970...6060
64	Мартенситная	—	—	—	97	4640...6420

Таблица 3. Параметры структуры в участке перегрева металла ЗТВ колесной стали (0,58 % С) при скорости нагрева $w_{нагр} = 210 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ($t_1 = 10 \text{ с}$)

$w_{6/5}$, $^\circ\text{C/c}$	Структура металла	Структурные составляющие, %			Твердость $HV_{0,1}$, МПа
		Бейнит верхний	Бейнит нижний	Мартенсит	
8	Бейнитная	95	—	2	2900...4420
12	«	39	43	16	2900...5660
16	Бейнитно-мартенситная	—	61	36	3220...6060
25	Мартенситно-бейнитная	—	26	71	3360...6060

примерно 660...630 $^\circ\text{C}$. Точно определить начало бейнитного превращения по дилатометрическим кривым практически невозможно, ориентировочно это примерно 630 $^\circ\text{C}$. Поэтому на диаграмме область образования перлита и бейнита показана как общая перлитно-бейнитная. Температура конца бейнитного превращения в данном диапазоне скоростей охлаждения составляет 580 $^\circ\text{C}$. При металлографических исследованиях микроструктуры образцов установлено, что микротвердость структурных составляющих перлита и бейнита с увеличением скорости охлаждения от 11 до 30 $^\circ\text{C/c}$ повышается с 2450 до 3220 МПа. По особенностям строения и показаниям микротвердости бейнит идентифицирован как структура верхнего бейнита, в литературе встречается второе его название сорбит. В данном диапазоне скоростей охлаждения содержание верхнего бейнита увеличи-

вается с 65 до 95 %, а перлита уменьшается с 30 % до нуля (табл. 2). В структуре металла также обнаружены участки феррита, который располагается по границам зерен, общее содержание которого не превышает 5 %. Величина зерна 63...94 мкм, она характерна для металла при всех скоростях охлаждения образцов. Скорость охлаждения, при которой начинается образование мартенсита, составляет $w_{6/5} = 30 \text{ }^\circ\text{C/c}$. При данной скорости охлаждения в структуре металла обнаружено примерно 2 % мартенсита, который располагается небольшими единичными участками в теле зерен. Температура начала мартенситного превращения $T_{Мн}$ примерно 265 $^\circ\text{C}$, температуру конца превращения определить не удалось. Микротвердость мартенсита 5660...6060 МПа, верхнего бейнита 2970...3220 МПа. При скорости охлаждения 38 $^\circ\text{C/c}$ количество мартенсита в структуре составляет 90 % и интегральная твердость металла повышается до 5900 МПа. Когда в структуре 97 % мартенсита ($w_{6/5} = 64 \text{ }^\circ\text{C/c}$) твердость металла повышается до 6440 МПа (рис. 3, з). При этом образование мартенсита начинается при более высоких температурах ($T_{Мн} = 295 \text{ }^\circ\text{C}$). Мартенсит по структуре менее однороден, его микротвердость изменяется в диапазоне 4640...6420 МПа. Бейнитное превращение в интервале скоростей охлаждения 30...38 $^\circ\text{C/c}$ начинается при $T_{Бн} = 630...580 \text{ }^\circ\text{C}$.

С увеличением скорости охлаждения в этом интервале температура завершения образования бейнита снижается от 580 до 390 $^\circ\text{C}$. Очевидно, что при скорости охлаждения 30 $^\circ\text{C/c}$ формируется структура верхнего бейнита (95 %), а при 34...38 $^\circ\text{C/c}$ преимущественно нижнего бейнита, которое происходит по бездиффузионному механизму при более низких температурах. При скорости охлаждения более 38 $^\circ\text{C/c}$ бейнитное превращение отсутствует. В структуре металла также обнаружен феррит по границам зерен, содержание которого не превышает 3 %.

При нагреве и охлаждении металла по циклу дуговой наплавки ($w_{нагр} = 210 \text{ }^\circ\text{C/c}$, $t_1 = 7...10 \text{ с}$) гомогенизация аустенита происходит не так полно, как в предыдущем случае. Это существенно

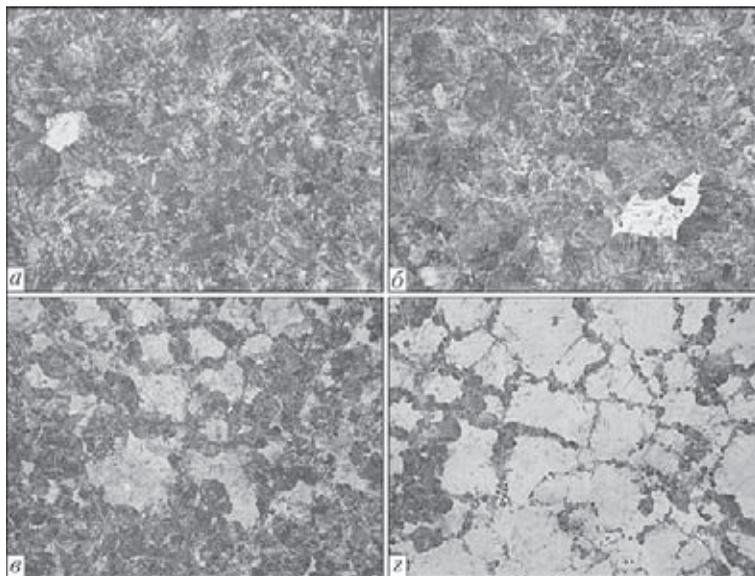


Рис. 4. Микроструктура металла ($\times 320$, при уменьш. в 2 раза) в участке перегрева ЗТВ колесной стали при $w_{нагр} = 210 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ($t_1 = 7...10 \text{ с}$): а — $w_{6/5} = 8$; б — 12; в — 16; г — 25 $^\circ\text{C/c}$



сказывается в последующем на структурных превращениях переохлажденного аустенита (рис. 2, рис. 4, табл. 3). Скорость охлаждения, при которой начинается образование мартенсита в количестве 2 %, снижается до $w_{6/5} = 8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ (рис. 4, б). Микротвердость мартенсита примерно 4420 МПа. А при скорости охлаждения $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, в отличие от более медленного нагрева, в металле участка перегрева ЗТВ формируется мартенситно-бейнитная структура с 74 % мартенсита. Интегральная твердость металла при этом повышается от 3140 до 5830 МПа. Температура начала мартенситного превращения $T_{\text{Мн}} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ и в исследуемом диапазоне скоростей охлаждения она остается постоянной. Микротвердость мартенсита при скорости охлаждения $12 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ составляет 5660...6060 МПа.

В процессе исследований также установлено, что критическая скорость охлаждения, при которой в структуре металла образуется не более 50 % мартенсита ($w_{50\text{М}}$), составляет $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$. Если вернуться к предыдущим данным, полученным при нагреве с параметрами $w_{\text{нагр}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ и $t_1 = 23 \dots 66 \text{ с}$, критическая скорость охлаждения находится в диапазоне $34 \dots 38 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, когда образуется от 15 до 90 % мартенсита. Для медленного нагрева условно примем эту величину равной $w_{50\text{М}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

При нагреве с высокой скоростью соответственно изменяется характер превращения переохлажденного аустенита в промежуточной области. Температурный интервал бейнитного превращения расширяется. При $w_{6/5} < 8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ основное γ - α -превращение в металле при охлаждении происходит в перлитно-бейнитной области в температурном интервале $680 \dots 560 \text{ }^\circ\text{C}$. По аналогии с медленным нагревом (при $w_{6/5} = 11 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) в металле ЗТВ при нагреве по ТЦС формируются структуры преимущественно верхнего бейнита (рис. 4, а). Твердость металла 3090...3140 МПа, величина зерна $47,5 \dots 94 \text{ мкм}$.

Превращение γ - α с образованием нижнего бейнита начинается при скорости охлаждения $12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ и более. Температура начала образования в бейнитной области $T_{\text{Бн}} = 650 \dots 630 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура окончания бейнитного превращения с увеличением скорости охлаждения снижается до $540 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Так, при $w_{6/5} = 12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ количество нижнего бейнита в структуре составляет 43 %, а при $16 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ уже 61 % (табл. 3). С повышением содержания мартенсита в структуре металла, которое происходит с увеличением скорости охлаждения до $w_{6/5} = 25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, количество нижнего бейнита снижается до 26 % (рис. 4, з), а микротвердость структурных составляющих повышается от 2900...5660 до 3360...6060 МПа.

Для определения влияния ТЦС на свойства металла ЗТВ применяли метод количественной оценки сопротивляемости замедленному разрушению, который широко известен как метод Имплант [4, 5]. Наплавку технологических пластин с образцами-вставками выполняли механизированным способом в среде защитных газов проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм на режиме: сварочный ток $I_{\text{св}} = 160 \dots 180 \text{ А}$, напряжение на дуге $U_{\text{д}} = 26 \dots 28 \text{ В}$, скорость наплавки $v_{\text{св}} = 14 \text{ м/ч}$. Погонная энергия составляла $Q_{\text{св}} = 8,6 \text{ кДж/см}$. Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, определенное по методу «карандашной» пробы, составило $[H]_{\text{диф}} = 1,3 \text{ мл}/100 \text{ г}$. Сварку образцов Имплант выполняли с предварительным подогревом при температурах $T_{\text{пп}} \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом скорость охлаждения $w_{6/5}$ изменялась в диапазоне $12 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, а в участке перегрева металла ЗТВ формировалась бейнитно-мартенситная структура с различным содержанием структурных составляющих. Нагружение образцов выполняли после их охлаждения до температуры $50 \text{ }^\circ\text{C}$. В процессе испытаний определяли максимальные напряжения нагружения $\sigma_{\text{кр}}$, при которых не происходит их замедленного разрушения в течение 24 ч. Обобщенные результаты испытаний образцов колесной стали марки 2 по методу Имплант приведены в табл. 4.

Из представленных данных видно, что сопротивляемость металла ЗТВ колесной стали замедленному разрушению при наплавке без предварительного подогрева ($T_{\text{пп}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) самая низкая, критические напряжения составляют всего 0,14 предела текучести металла ЗТВ ($\sigma_{0,2} \sim 715 \text{ МПа}$ [7]), разрушение происходит хрупко. При таких условиях наплавки в участке перегрева металла ЗТВ формируется мартенситно-бейнитная структура с повышенной плотностью дислокаций. Количество мартенсита в структуре превышает 71 %, нижнего бейнита не более 24 %, а уровень плотности дислокаций достигает величины $\rho = 5 \dots 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [12]. В результате металл имеет низкую способность к микропластическому течению под действием нагружения, релаксация напряжений в нем протекает путем образования микротрещин и он разрушается при достаточно низких напряжениях.

При применении предварительного подогрева происходят изменения в структуре металла участка перегрева ЗТВ и $\sigma_{\text{кр}}$ повышаются. Так, при $T_{\text{пп}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ содержание нижнего бейнита в структуре составляет примерно 26...52 % и соответственно снижается объемная доля мартенсита. При предварительном подогреве до температуры $70 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит дальнейшее изменение соотношения структурных составляющих в сторону



Таблица 4. Параметры ТЦС, структура и критические напряжения при замедленном разрушении металла ЗТВ при испытаниях по методу Имплант ($Q_{cb} = 8,6$ кДж/см)

$T_{\text{пп}}, ^\circ\text{C}$	Параметры термического цикла			Структура в участке перегрева металла ЗТВ*, %	$\sigma_{\text{кр}}, \text{МПа}$
	$w_{6/5}, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$t_{8/5}, \text{c}$	$t_{8/1}, \text{c}$		
20	25...30	8	170	Бн = 26...24, М = 71...74	100
50	20...25	10	230	Бн = 52...26, М = 46...71	220
70	15...20	11	250	Бн = 61...52, М = 36...46	320
100	12...15	12	450	Бв ≤ 39, Бн = 57...61, М = 16...36	> 460

*Бв — верхний бейнит, Бн — нижний бейнит, М — мартенсит.

увеличения нижнего бейнита до 61 %. При этом критические напряжения увеличиваются в три раза до уровня $0,45\sigma_{0,2}$. При предварительном подогреве $T_{\text{пп}} = 100$ °С, когда скорость охлаждения составляет 12...15 °С/с и содержание мартенсита в структуре не превышает 36 %, металл ЗТВ замедленно не разрушается при напряжениях величиной 450 МПа. Нагрузить образцы Имплант при испытаниях с большим значением напряжений не удалось, так как происходит течение металла наплавки. Поэтому при температуре предварительного подогрева 100 °С критические напряжения условно приняты как величина более 460 МПа.

Проведенные испытания по методу Имплант показали, что для обеспечения повышенной сопротивляемости замедленному разрушению металла ЗТВ колесной стали при 0,58 % С необходимо выполнить условие $w_{6/5} \leq w_{50M}$, которое достигается при применении предварительного подогрева металла до 100 °С.

Следует также отметить, что представленные результаты исследований состояния структуры металла в участке перегрева ЗТВ колесной стали при дуговой наплавке и испытаний по методу Имплант логически взаимосвязаны. Объяснить эти данные другим способом, не используя диаграмму превращения переохлажденного аустенита в реальных условиях действия ТЦС дуговой наплавки, приведенной на рис. 2, и исследований микроструктуры металла ЗТВ, практически невозможно. Классические диаграммы γ - α -превращения, построенные в условиях изотермической выдержки, или при постоянном медленном нагреве (рис. 2), не отражают реальных изменений структуры в металле ЗТВ сварных соединений высокопрочных углеродистых сталей.

Выводы

1. Установлено, что незавершенность процессов гомогенизации аустенита металла при дуговой наплавке, вследствие быстрого его нагрева и ограниченного времени пребывания при температуре выше A_{c3} , существенно влияет на последующее γ - α -превращение в металле ЗТВ высокопрочной

колесной стали. Это приводит к тому, что в металле участка перегрева ЗТВ колесной стали, содержание углерода в которой составляет 0,58 %, критическая скорость охлаждения в интервале температур 600...500 °С, при которой в структуре образуется не более 50 % мартенсита, понижается в 1,5 раза и составляет $w_{50M} = 20$ °С/с. При этом минимальная скорость охлаждения, при которой начинается формирование мартенситной составляющей структуры, составляет $w_{6/5} = 8$ °С/с.

2. При нагреве и охлаждении по термическому циклу дуговой наплавки изменяется характер превращения переохлажденного аустенита в промежуточной области. Температурный интервал бейнитного превращения расширяется, в металле ЗТВ формируются структуры верхнего и нижнего бейнита. Превращение γ - α с образованием нижнего бейнита начинается при скорости охлаждения $w_{6/5} \geq 12$ °С/с. Максимальное его количество соответствует скорости охлаждения 16 °С/с и составляет 61 %. С увеличением скорости охлаждения до 25 °С/с объемная доля нижнего бейнита снижается до 26 %, а мартенсита увеличивается до 71 %. При этом микротвердость $HV_{0,1}$ структурных составляющих повышается от 2900...5660 до 3360...6060 МПа, а твердость металла HV_{10} в участке перегрева ЗТВ — от 3480 до 5650 МПа.

3. Высокую сопротивляемость замедленному разрушению металла ЗТВ колесной стали, содержание углерода в которой составляет 0,58 %, на уровне $\sigma_{\text{кр}} \geq 0,45\sigma_{0,2}$, можно обеспечить при $w_{6/5} \leq w_{50M}$. Такие условия охлаждения при наплавке на погонной энергии 8,6 кДж/см соответствуют применению предварительного подогрева до температуры 100 °С.

1. Шориоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
2. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1978. — 647 с.
3. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 1978. — 272 с.
4. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
5. Гайворонский А. А. Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных



- соединений высокоуглеродистой стали // Автомат. сварка. – 2013. – № 5. – С. 15–21.
6. Влияние технологических факторов на структуру и свойства металла ЗТВ при ремонтно-восстановительной наплавке гребней цельнокатаных вагонных колес / В. А. Саржевский, А. А. Гайворонский, В. Г. Гордонный, В. Ф. Горб // Там же. – 1996. – № 3. – С. 22–27, 33.
 7. Влияние термомеханического цикла наплавки на структуру и свойства железнодорожных колёс повышенной прочности при их восстановлении / А. А. Гайворонский, В. Д. Позняков, В. А. Саржевский и др. // Там же. – 2010. – № 5. – С. 22–26.
 8. Астафьев А. С., Гуляев А. П. О росте зерна стали в околошовной зоне // Свароч. пр-во. – 1972. – № 7. – С. 45–47.
 9. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 95 с.
 10. Григоренко Г. М., Костин В. А., Орловский В. Ю. Современные возможности моделирования превращения аустенита в сварных швах низколегированных сталей // Автомат. сварка. – 2008. – № 3. – С. 31–34.
 11. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. – Киев: Техніка, 1968. – 280 с.
 12. Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства восстановленных наплавкой железнодорожных колес / А. А. Гайворонский, В. Д. Позняков, Л. И. Маркашова и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 8. – С. 18–24.

Поступила в редакцию 20.08.2013

НОВЫЕ ПРОЕКТЫ «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

Новый сталеплавильный комплекс

На ПАО «Энергомашспецсталь» (ЭМСС, г. Краматорск, Донецкая обл.) запланирован пуск нового сталеплавильного комплекса. Это должно стать финальным этапом модернизации ЭМСС. Новая печь с современной мощной газоочисткой сможет производить до 76 т стали в час, а время плавки снизится с трех с половиной до менее одного часа. Комплекс оборудован установкой внепечной обработки стали и позволит предприятию производить крупнотоннажные слитки массой до 500 т. В 2013 г. предприятие планирует освоить заготовки для корпуса реактора ВВЭР-ТОИ.



Заготовки для Boeing и Airbus



ЭМСС завершает производство деталей штамповой оснастки по заказу ОАО «Корпорация ВСМПО-Ависма». Данные детали впервые проходят механическую обработку на предприятии для российского партнера. Оснастка предназначена для штамповки деталей самолетов Boeing и Airbus. Восемь плит штамповой оснастки для вырезки деталей общим весом 253 т уже отправлены заказчику. На завершающем этапе находятся два верхних и два нижних штампа, которые проходят механическую обработку.



КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ-НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЕЧНОЙ НАПЛАВКИ

Е. В. СУХОВАЯ

Днепропетр. нац. ун-т им. О.Гончара. 49010. Днепропетровск, просп. Гагарина, 72. E-mail: sukhovaya@ukr.net

Исследованы структура и свойства макроготерогенных композиционных слоев, полученных методом печной наплавки. В качестве наполнителей использованы квазикристаллические сплавы Al-Cu-Fe, Al-Co-Cu, Al-Co-Ni. Связками служили сплавы на основе алюминия и меди. Показано, что метод печной наплавки позволяет получить содержание квазикристаллической икосаэдрической ψ -фазы не менее 30 об. % в структуре композиционных слоев, упрочненных сплавом-наполнителем Al-Cu-Fe, и содержание квазикристаллической декагональной D-фазы до 55 об. % в структуре композиционных слоев со сплавами-наполнителями Al-Co-Cu и Al-Co-Ni. Закономерности формирования границ раздела между наполнителем и связкой при наплавке объяснены реализацией растворно-диффузионного механизма процессов контактного взаимодействия. Установлено преимущественное растворение кристаллических фаз сплавов-наполнителей, что приводит к проникновению расплавленных связок вглубь наполнителя вдоль границ кристаллов квазикристаллической фазы. Следствием увеличения интенсивности процессов растворения кристаллических фаз наполнителя при использовании для наплавки связок на основе меди является полная их перекристаллизация в процессе охлаждения при сохранении в структуре композиционных слоев не растворившихся включений квазикристаллической фазы. Для создания наплавленных слоев, эксплуатирующихся в условиях сухого трения, рекомендован композиционный материал на основе оловянистой бронзы Бр.Оц10-2, армированный сплавом-наполнителем Al-Co-Ni. Максимальную стойкость в кислых средах имеет композиционный материал со связкой из латуни Л62 и сплавом-наполнителем Al-Co-Cu. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: композиционный слой, печная наплавка, квазикристаллические фазы, межфазное взаимодействие, растворение, коррозионная стойкость в кислых средах, триботехнические свойства

Эффективным методом повышения долговечности деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного и газоабразивного изнашивания, является метод печной наплавки, который разработан сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона [1]. Он заключается в пропитке легкоплавкой связкой предварительно заформованных порошков тугоплавких сплавов-наполнителей в процессе нагрева в печи. Метод позволяет регулировать скорость охлаждения при кристаллизации и при условии смачивания обеспечивает высокое качество наплавленных композиционных слоев и биметаллических соединений. Кроме того, при использовании этого метода повышается стойкость в 3...15 раз таких ответственных деталей металлургического оборудования, как клапаны, малые и большие конусы засыпных аппаратов доменных печей [2]. Для осуществления процесса не требуется специальное дорогостоящее оборудование, а за счет так называемого автовакуумного эффекта обеспечивается ограниченный доступ кислорода к поверхностям контактирующих фаз при наплавке.

Наилучшие эксплуатационные характеристики наблюдаются у наплавленных композиционных слоев, в которых в качестве сплавов-наполнителей

используют карбиды вольфрама [3] в литом (ре-лит), спеченном виде, а также в виде металлокерамических сплавов с кобальтовой связкой (типа ВК). Для изготовления композиционных слоев, не содержащих дефицитных и дорогостоящих карбидов вольфрама, применяют карбиды хрома Cr_3C_2 и карбиды хрома с никелевой связкой КХН 5, КХН 10, КХН 15 [4]. В составе композиционных слоев наряду с карбидами используют бориды тугоплавких металлов, которые имеют высокую жаропрочность, твердость и абразивную износостойкость, что определяет их достаточно широкое применение в промышленности.

В работах [5, 6] изучена возможность замены вольфрамсодержащих твердых сплавов, используемых при изготовлении композиционных слоев, следующими боридами металлов IVa-VIa подгрупп: TiB_2 , ZrB_2 , HfB_2 , FeB_2 , TaB_2 , CrB_2 , Mo_2B_5 , W_2B_5 . Однако из всех изученных материалов наиболее перспективны, по мнению авторов работы [7], наплавленные композиционные слои, содержащие наполнители из двойных боридов титана-хрома $(Ti,Cr)B_2$. Этот борид наряду с высокими прочностными свойствами имеет меньшую хрупкость по сравнению с чистыми боридами, а по износостойкости приближается к твердым сплавам.

Область применения метода печной наплавки



для получения композиционных слоев можно существенно расширить благодаря использованию в их составе квазикристаллических сплавов-наполнителей, имеющих высокую твердость, низкий коэффициент трения, повышенную коррозионную стойкость [8]. При сочетании квазикристаллов с пластичной металлической матрицей удастся преодолеть такой их основной недостаток, как хрупкость, который ограничивает применение квазикристаллов в изделиях современной техники.

Поскольку сведения об использовании метода печной наплавки для получения наплавленных композиционных слоев, упрочненных квазикристаллическими сплавами-наполнителями, отсутствуют, то в настоящей работе представлены результаты исследования структуры и свойств данного класса наплавочных материалов, предназначенных для упрочнения и восстановления деталей, которые работают в условиях сухого трения и воздействия кислых сред.

Методика эксперимента. Сплавы-наполнители Al–Cu–Fe, Al–Co–Cu, Al–Co–Ni выплавляли в печи Таммана из химически чистых элементов. Скорость охлаждения сплавов составляла 50 К/с. Состав сплавов-наполнителей выбирали из условия получения содержания квазикристаллической фазы в структуре не менее 50 % объема. Содержание элементов контролировали методами химического и спектрального рентгенофлуоресцентного анализов. Полученные сплавы измельчали в молотковой дробилке до фракций 0,2...2,0 мм. Пропитку осуществляли сплавами-связками на основе алюминия или меди при температуре, которая на 50...100 К превышала температуру плавления сплава-связки. Продолжительность изотермической выдержки при наплавке варьировали в пределах 30...60 мин. Структуру наплавленных композиционных слоев исследовали методами количественной металлографии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и рентгеноспектрального микроанализа. Скорость коррозии композиционных слоев в кислых средах определяли гравиметрическим методом. Измерения проводили ежечасно при комнатной температуре в течение четырех часов. Триботехнические испытания осуществляли по схеме вал–втулка в условиях трения без смазки по стали 45 при скорости скольжения 20 м/с и нагрузке 4 МПа на установке, созданной на основе конструкций [9].

Результаты эксперимента. Сплав-наполнитель Al–Cu–Fe имеет двухфазную структуру, состоящую из квазикристаллической икосаэдрической ψ -фазы состава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ и кристаллической кубической фазы FeAl (β -фаза) (рис. 1, а, 2, а). Морфологию ψ -фазы определяет наличие оси

симметрии пятого порядка и квазипериодического дальнего порядка в трех направлениях [8]. Объемное содержание этой фазы в структуре наполнителя достигает 50 %.

После пропитки сплавами-связками на основе алюминия наблюдается равномерное распределение частиц наполнителя вдоль сечения композиционного материала (рис. 2, б–г). Содержание сплава-наполнителя составляет 60...65 %, а квазикристаллической фазы – около 35 % объема материала. На границах раздела между наполнителем и расплавленными связками при наплавке протекают процессы контактного взаимодействия, сопровождающиеся преимущественным растворением β -фазы наполнителя. Квазикристаллическая ψ -фаза сохраняется в структуре практически без изменений. При последующем охлаждении вследствие перекристаллизации растворенных участков наполнителя на границах раздела образуются зоны контактного взаимодействия растворно-диффузионного типа. Со стороны наполнителя появляется слой, состав которого отличается от исходного состава повышенным содержанием алюминия и пониженным содержанием меди и железа. Со стороны затвердевших сплавов-связок на основе алюминия вблизи границы раздела присутствуют медь и железо. Измерение ширины зон контактного взаимодействия показывает, что интенсивность процессов растворения кристаллических фаз сплава-наполнителя в расплавленном сплаве-связке уменьшается в зависимости от его состава в следующем ряду Al→(Al–Mg)→(Al–Cu)→(Al–Si). В такой же последовательности увеличивается пористость наплавленных композиционных слоев, которая достигает максимального значения примерно 40 об. % при использовании сплава-связки Al–Si.

С учетом полученных результатов для последующих испытаний были выбраны образцы, наплавленные композиционным материалом (Al–Cu–Fe)/Al, в структуре которого содержание пор не превышает 3 об. %. Скорость коррозии этого материала имеет наименьшие значения в растворах 5н·H₃PO₄ и 1н·HCl (таблица). Коэффициент трения находится в пределах 0,17...0,19.

До наплавки в структуре сплава-наполнителя Al–Co–Cu присутствуют три фазы: одна квазикристаллическая и две кристаллические (рис. 1, б, 3, а). Первыми из жидкости (Ж) выделяются кристаллы кристаллической кубической фазы AlCo (β -фаза). Затем по перитектической реакции Ж + β →D образуется квазикристаллическая декагональная D-фаза, имеющая стехиометрический состав $Al_{63}Co_{24}Cu_{13}$. Ее призматические кристаллы растут преимущественно в направлении, параллельном оси симметрии десятого порядка, вдоль



Свойства композиционных материалов, упрочненных квазикристаллическими сплавами-наполнителями

Сплав-наполнитель	Сплав-связка	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, мкм/км	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)			
				0,5 н·H ₂ SO ₄	5 н·H ₃ PO ₄	0,8 н·HNO ₃	1 н·HCl
Al-Cu-Fe	Al (техн.)	0,18	15,3	2,67±0,03	0,88±0,05	15,43±0,05	0,98±0,02
Al-Co-Cu	Л62	0,09	7,9	1,95±0,06	0,43±0,04	9,92±0,03	0,79±0,01
	Бр.Оц 10-2	0,06	4,3	2,14±0,05	0,60±0,07	13,28±0,04	0,84±0,03
Al-Co-Ni	Л62	0,08	7,3	2,42±0,01	0,52±0,04	13,11±0,08	0,89±0,03
	Бр.Оц10-2	0,04	3,0	2,55±0,03	0,73±0,05	13,90±0,05	0,93±0,02

которой D-фаза имеет периодическое расположение атомов [10]. Квазипериодический дальний порядок наблюдается в перпендикулярной плоскости. Объемное содержание квазикристаллической фазы в структуре наполнителя составляет около 80 %. По границам квазикристаллической фазы образуются кристаллы гексагональной фазы Al₃(Cu,Co)₂ (H-фаза).

С учетом стабильности D-фазы вплоть до температуры 1250 К для пропитки частиц сплава-наполнителя Al-Co-Cu использовали следующие сплавы-связки на основе меди: латунь Л62 и оловянистую бронзу Бр.Оц10-2. Особенности структуры полученных композиционных слоев определяют процессы преимущественного растворения кристаллической H-фазы наполнителя. Поэтому при пропитке расплавленные сплавы-связки проникают вглубь наполнителя по границам ква-

зикристаллической фазы вдоль всего сечения упрочняющих частиц (рис. 3, б, в). Это приводит к частичному растворению D-фазы, о чем свидетельствует изменение ее морфологии с ограниченной на округлую. В результате в структуре наблюдаются отдельные включения D-фазы в матрице на медной основе.

Вследствие растворения кристаллических фаз сплава-наполнителя в расплавленной латуни после затвердевания ее состав вблизи границы раздела с наполнителем отличается от исходного состава присутствием алюминия и снижением содержания меди и цинка (рис. 3, б). В прослойках матрицы между кристаллами D-фазы обнаружены алюминий, кобальт, цинк и медь. Возрастающая интенсивность процессов растворения наполнителя в случае пропитки бронзовой связкой по сравнению с латунью приводит к нарушению

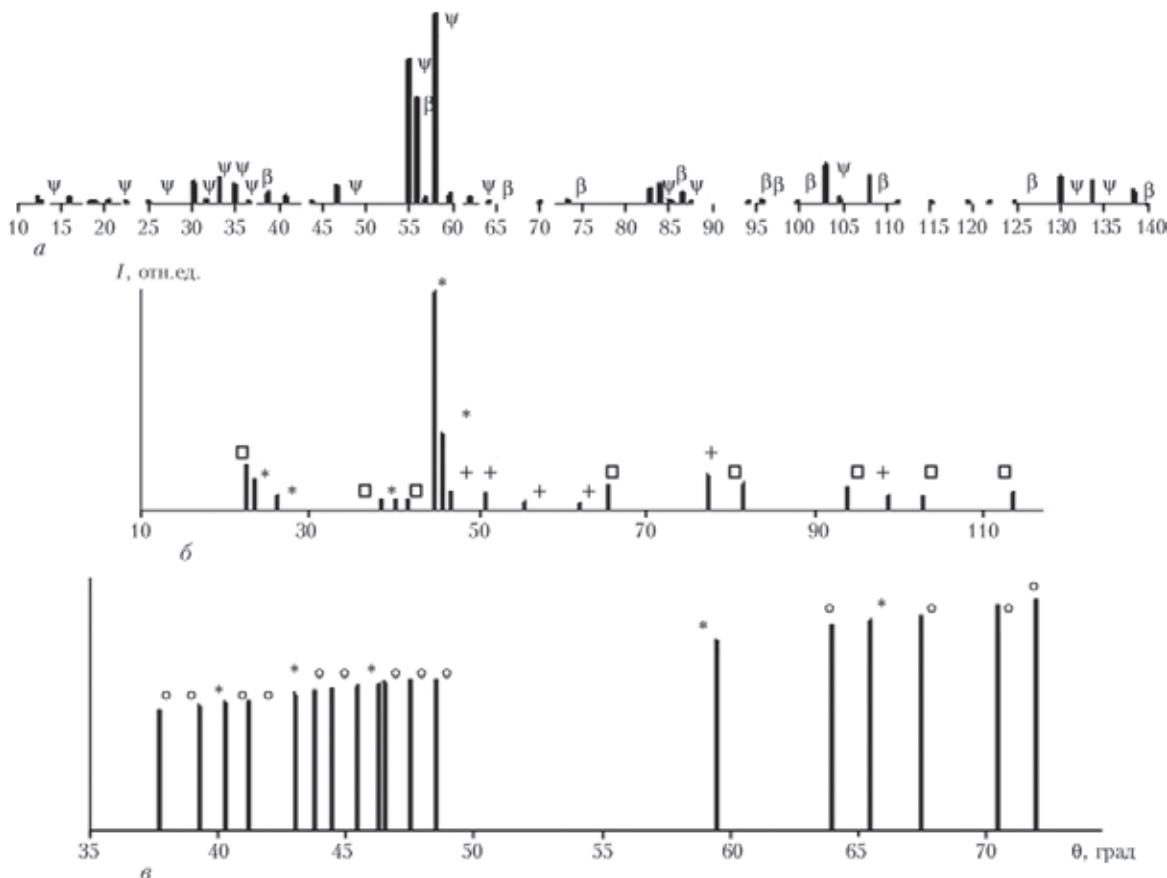


Рис. 1. Штрихрентгенограммы (Fe-K_α-излучение) сплавов: а — Al-Cu-Fe; б — Al-Co-Cu; в — Al-Co-Ni; * — D-фаза; □ — Al₄(Co, Cu)₃; + — Al₃(Co, Cu)₂; ○ — Al₉(Co, Ni)₂

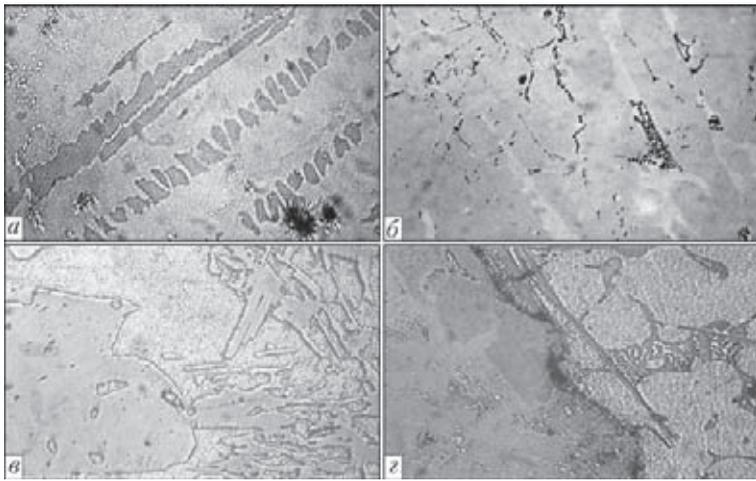


Рис. 2. Микроструктура композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, упрочненных сплавом-наполнителем Al–Cu–Fe: *a* — исходный сплав-наполнитель; *б* — сплав-связка (Al–6 % Mg); *в* — сплав-связка (Al–5 % Cu); *г* — сплав-связка Al (техн.); *a, б, г* — $\times 800$; *в* — $\times 1000$

макрогетерогенного строения наплавленного композиционного слоя. Как следствие, нерастворившиеся участки квазикристаллической D-фазы практически равномерно распределены в объеме затвердевшей связки (рис. 3, *в*). В ней, помимо исходных компонентов, обнаружены алюминий и следы кобальта. На периферии включений D-фазы содержание кобальта и меди повышено, что обу-

словлено перекристаллизацией на поверхности этой фазы нерастворившихся в связке компонентов при охлаждении.

Результаты испытаний показывают, что скорость коррозии в кислых средах уменьшается при использовании для пропитки сплава-наполнителя Al–Co–Cu латунной связки (см. таблицу), а в случае использования бронзовой связки обеспечивается снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Сплав-наполнитель Al–Co–Ni до наплавки имеет двухфазную структуру (рис. 1, *в*, 4, *а*), которая в основном образована квазикристаллической декагональной D-фазой, занимающей более 85 % объема сплава. D-фаза кристаллизуется непосредственно из жидкости и имеет стехиометрический состав $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$. Кроме того, в структуре присутствует фаза $Al_9(Co, Ni)_2$, образующаяся по перитектической реакции $Ж+D \rightarrow Al_9(Co, Ni)_2$ [11], которая имеет переменный состав, что может быть связано с различной степенью завершенности перитектической реакции.

При печной наплавке пропитка частиц сплава-наполнителя Al–Co–Ni медными связками

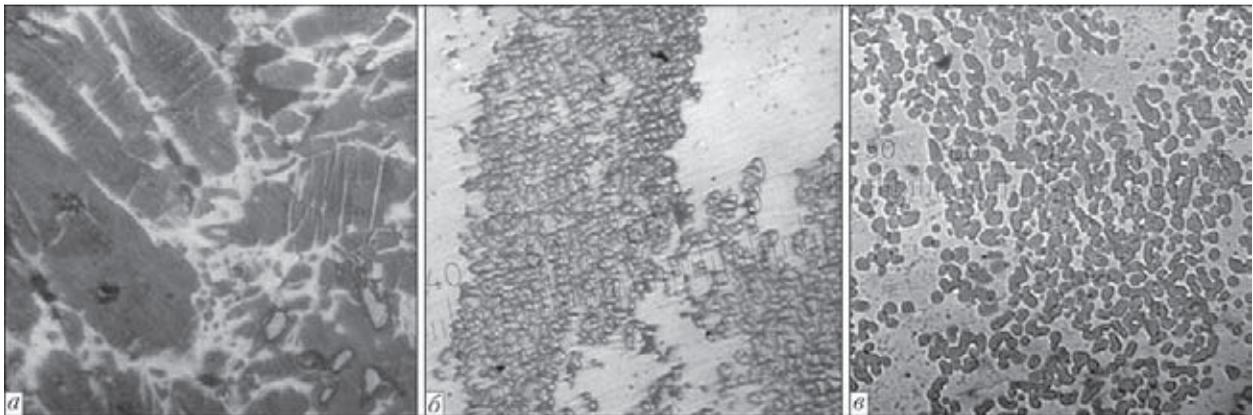


Рис. 3. Микроструктура композиционных материалов на основе медных сплавов, упрочненных сплавом-наполнителем Al–Co–Ni ($\times 800$): *a* — исходный сплав-наполнитель; *б* — сплав-связка Л62; *в* — сплав-связка Бр.Оц10-2

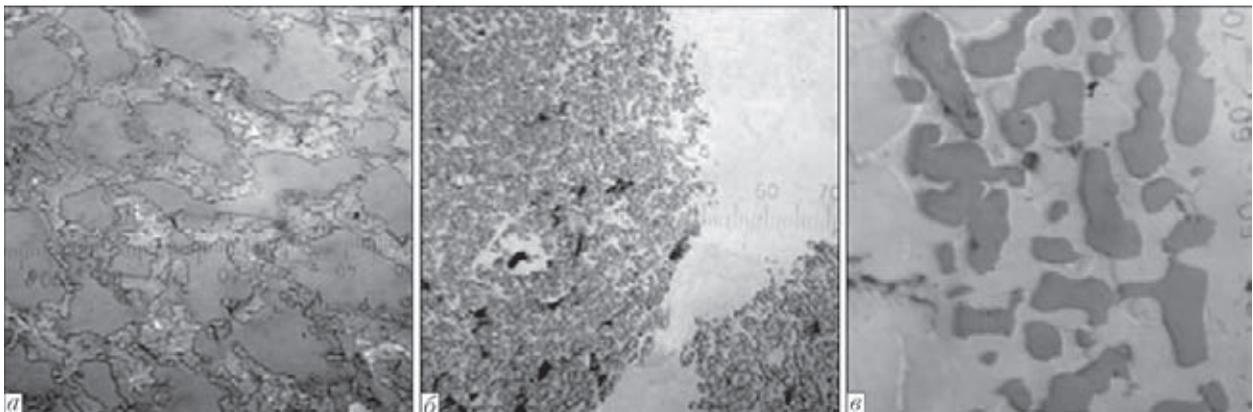


Рис. 4. Микроструктура композиционных материалов на основе медных сплавов, упрочненных сплавом-наполнителем Al–Co–Ni: *a* — исходный сплав-наполнитель; *б* — сплав-связка Л62; *в* — сплав-связка Бр.Оц10-2; *a, б* — $\times 800$; *в* — $\times 2000$



указанного выше состава сопровождается их проникновением по границам зерен квазикристаллической D-фазы вследствие более интенсивного растворения кристаллической фазы $Al_9(Co, Ni)_2$. В результате в структуре наплавленных композиционных слоев присутствуют отдельные округлые включения D-фазы, находящиеся после пропитки латунной связкой в местах расположения исходных частиц наполнителя, а после пропитки бронзовой связкой равномерно распределенные в матрице (см. рис. 4, б, в). Это свидетельствует о большей интенсивности процессов контактного взаимодействия между наполнителем и расплавленной связкой при наплавке во втором случае.

По сравнению с наплавленными композиционными слоями, упрочненными сплавом-наполнителем Al-Co-Cu, содержание квазикристаллической фазы в композиционных слоях со сплавом-наполнителем Al-Co-Ni в среднем на 15 % больше и достигает 55 %. Полученный результат можно объяснить большей устойчивостью к воздействию расплавленной связки первичной D-фазы состава $Al_{69}Co_{21}Ni_{10}$ по сравнению с D-фазой состава $Al_{63}Co_{24}Cu_{13}$, образующейся по перитектической реакции. Как следствие, содержание компонентов сплава-наполнителя Al-Co-Ni в затвердевших связках на основе меди ниже, чем в наплавленных композиционных слоях, упрочненных сплавом-наполнителем Al-Co-Cu. За счет увеличения содержания квазикристаллической фазы достигаются минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания композиционных слоев со сплавом-наполнителем Al-Co-Ni (см. таблицу).

Заключение. Использование метода печной наплавки позволяет получать наплавленные композиционные слои на основе алюминия и меди, упрочненные квазикристаллическими сплавами-наполнителями Al-Cu-Fe, Al-Co-Cu, Al-Co-Ni. При наплавке в расплавленных связках преимущественно растворяются кристаллические фазы сплавов-наполнителей. Несмотря на частичное растворение квазикристаллической фазы ее

содержание в структуре композиционных слоев достигает 30...55 от их объема в зависимости от состава наполнителя.

Наплавленные композиционные слои, упрочненные квазикристаллическими сплавами-наполнителями, отличаются коррозионной стойкостью в растворах кислот и высокими триботехническими свойствами. Эти характеристики коррелируют с содержанием квазикристаллических фаз, достигая максимальных значений в случае композиционных слоев составов (Л62)/(Al-Co-Cu) и (Бр. Оц10-2)/(Al-Co-Ni) соответственно.

1. А. с. 562393 СССР, МПК В 23 К 9/04, В 22 D 19/08. Способ износостойкой наплавки / И. В. Нетеса, Д. А. Дудко, Б. И. Максимович и др. – Заявл. 18.07.1975; Опубл. 08.06.1977, Бюл. № 23.
2. Данилов Л. И., Ровенских Ф. М. Наплавка деталей засыпных устройств доменных печей композиционным сплавом // *Металлург.* – 1979. – №1. – С. 12–15.
3. Смачиваемость износостойких составляющих композиционных сплавов связками на медьникельмарганцевой основе / Д. А. Дудко, Б. И. Максимович, В. И. Зеленин и др. // *Автомат. сварка.* – 1975. – № 5. – С. 5–6.
4. Новые износостойкие наплавочные композиционные сплавы / Д. А. Дудко, В. И. Зеленин, И. В. Нетеса и др. // *Износостойкие наплавочные материалы на основе тугоплавких соединений.* – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 3–5.
5. Исследование свойств композиционных сплавов на основе карбида титана / В. А. Быстров, А. В. Быстров, Г. Т. Дзодзиев и др. // *Свойства и испытания наплавленного металла.* – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. – С. 131–135.
6. Боровикова М. С. Основные закономерности контактно-го взаимодействия тугоплавких боридов с некоторыми переходными металлами // *Границы раздела фаз и их свойства.* – Киев: ИПМ АН УССР, 1980. – С. 72–79.
7. Самсонов Г. В., Панасюк А. Д., Боровикова М. С. Взаимодействие тугоплавких боридов с жидкими металлами семейства железа // *Порошк. металлургия.* – 1973. – № 6. – С. 51–57.
8. Huttunen-Saarivirta E. Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al-Cu-Fe alloys: a review // *J. Alloys Comp.* – 2004. – № 363. – P. 150–174.
9. Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжения / Э. Т. Мамыкин, М. К. Ковпак, А. И. Юга и др. // *Порошк. металлургия.* – 1973. – № 1. – С. 67–72.
10. Tsai A.-P., Inoue A., Masumoto T. A stable decagonal quasicrystal in the Al-Cu-Co system // *Mater. Trans. JIM.* – 1989. – 30, № 4. – P. 300–304.
11. Godecke T., Ellner M. Phase equilibria in the aluminum-rich portion of the binary system Co-Al and in the cobalt/aluminum-rich portion of the ternary system Co-Ni-Al // *Z. Metallk.* – 1996. – 87. – P. 854–864.

Поступила в редакцию 30.09.2013

ГЕРМАНИЯ НАУЧНАЯ: ПОЛЕЗНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ

Воспользовавшись ссылками, можно получить информацию о научном «ландшафте» Германии, найти научного партнера, организовать пребывание в Германии для проведения исследований, найти стипендии и гранты.

По вопросам кооперации в области научных исследований просьба обращаться:

ул. Пушкинская, 34, 01004, Киев, тел. (044) 234-72-24, E-mail: erich.bistriker@ukrde.com.ua

82 института Общества им. Макса Планка проводят исследования в области естественных и других наук.
www.mpg.de/mpresearch

Общество им. Гельмгольца объединило 18 естественно-технических центров.
www.helmholz.de/no_cache/en/mediathek/publications/

Фонд Александра фон Гумбольдта предоставляет финансовую возможность высококвалифицированным зарубежным ученым для проведения длительных исследований в Германии.
www.humboldt-foundation.de/web/publications.html



УДК 621.791.763.1.037:621.311.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ЗА СЧЕТ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.А. ПИСЬМЕННЫЙ

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

Рассмотрена работа системы питания однофазной машины для контактной точечной сварки с введением в первичный контур сварочного трансформатора схемы продольной компенсации реактивной мощности. Машины для контактной точечной сварки характеризуются высокой потребляемой мощностью, значительная часть которой – реактивная составляющая. Это приводит к увеличению общей установленной мощности рабочих участков и асимметрии загрузки фаз питающей распределительной трехфазной сети. В работе показано, что система с продольным компенсатором хорошо взаимодействует со стандартным тиристорным регулятором мощности машины для контактной точечной сварки и позволяет поддерживать высокое значение коэффициента мощности в диапазоне фазового регулирования до 60 град. Применение продольной компенсации дает технологические преимущества точечной сварке, так как коэффициент мощности машины с компенсатором мало зависит от сопротивления сварочного контакта. Поэтому возможна сварка металлов в расширенном диапазоне удельных сопротивлений: от малоуглеродистых сталей до некоторых легких сплавов и металлов с защитными покрытиями. Невысокая стоимость доработки существующих машин продольным компенсатором с одновременным улучшением их технологических свойств делает способ продольной компенсации перспективным для промышленного применения. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, система питания, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности

Сварочное оборудование для контактной точечной сварки (КТС), особенно для сварки переменным током промышленной частоты, характеризуется высокой потребляемой мощностью. В настоящее время для промышленности актуален вопрос оптимизации энергопотребления источников питания сварочного оборудования. Существующий парк оборудования для КТС в основном состоит из машин устаревшего исполнения, с однофазным питанием. Это связано с тем, что такие машины долговечны, а закупка новых, с более совершенными системами питания требует существенных капитальных затрат.

В работах [1, 2] проанализированы пути повышения энергоэффективности систем питания устаревших машин КТС. Известен способ продольной компенсации реактивной составляющей мощности в однофазных сварочных машинах переменного тока промышленной частоты [3]. Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых особенностей данного способа, применительно к машинам КТС.

Известно, что любая машина для контактной сварки на токе промышленной частоты, в том числе и для точечной, обладает значительным реактивным сопротивлением. Реактивная мощность, частично расходуемая на нагрев сварочного трансформатора и токоведущих частей сварочно-

го контура, соизмерима с активной, расходуемой на нагрев места сварки. Из-за этого полная электрическая мощность, потребляемая такой сварочной машиной, увеличивается и возрастает общая установленная мощность рабочего участка.

Продольная компенсация реактивной составляющей мощности применительно к машине КТС — это включение батареи конденсаторов C последовательно с первичной обмоткой сварочного трансформатора T (рис. 1). Общий принцип состоит в достижении, по возможности, идеальной компенсации реактивного сопротивления контура, что означает равенство по абсолютной величине реактивного (индуктивного) сопротивления вторичного контура и приведенного к вторичной стороне реактивного (емкостного) сопротивления батареи конденсаторов: $X_L + X'_C = 0$, где $X_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление вторичной цепи, ω — круговая частота, L — индуктивность, X'_C — емкостное сопротивление конденсаторной ба-

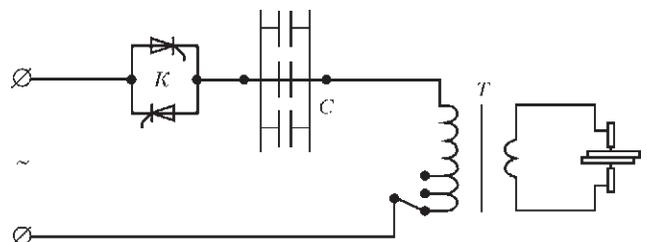


Рис. 1. Схема системы питания машин КТС с продольной компенсацией реактивной составляющей мощности



тарей, приведенное к вторичной обмотке сварочного трансформатора. При отсутствии компенсации сопротивление короткого замыкания машины $Z_M = \sqrt{X_L^2 + (R_k + R_{св.к})^2}$. При компенсации, в идеальном случае, выполняется условие, при котором Z_M достигает минимального значения, т. е. практически становится равным полному активному сопротивлению контура R_k ($R_{св.к}$ – активное сопротивление сварочного контакта).

Таким образом, значение Z_M стремится к сумме значений активных сопротивлений и

$$\cos \varphi = \frac{R_k + R_{св.к}}{Z_M} \rightarrow 1.$$

При этом условии питающая распределительная сеть «воспринимает» сварочную машину как активную нагрузку и потребляемая из сети полная мощность существенно снижается. Учитывая, что у машин КТС индуктивное сопротивление X_L значительно превышает активное R_k [4], значение потребляемой полной мощности может быть снижено в два и более раз.

Рассмотрим пример. Пусть сварочный ток машины без компенсатора составляет

$$I_2 = \sqrt{\frac{S'}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}},$$

где S' — полная потребляемая мощность, приведенная к вторичной цепи, R — полное активное сопротивление вторичной цепи, включая сопротивление сварочного контакта.

Предположим, что такие же значения тока должна обеспечивать и машина с компенсатором:

$$I_2 = \sqrt{\frac{S'_k}{R}},$$

где S'_k — полная потребляемая мощность, приведенная к вторичной цепи машины с компенсирующим устройством.

Следовательно, при одном и том же вторичном токе потребляемая мощность машины с компенсатором:

$$S'_k = \frac{S' R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{S'}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}}.$$

Реактивное сопротивление (для большей части машин КТС средней мощности), приведенное к вторичной цепи, составляет не менее 150 мкОм [4], активное сопротивление (в зависимости от конструктивного исполнения) находится в пределах 50...100 мкОм, сопротивление сварочного контакта сталей углеродистой группы – 50...100 мкОм. Значит, в машине без компенсатора:

$$\text{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{150}{50...100 + 50...100} = 1,5...0,75.$$

При этом отношение мощностей составляет

$$\frac{S'}{S'_k} = \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi} = 1,8...1,25.$$

При сварке алюминиевых и магниевых сплавов это отношение еще больше, так как сопротивление сварочного контакта снижается до 10...20 мкОм:

$$\frac{S'}{S'_k} = 2,69...1,6.$$

Как видно уже в первом приближении, использование продольной компенсации позволяет получить одну и ту же активную мощность в нагрузке при меньшем вторичном напряжении сварочного трансформатора. Поэтому в данном случае можно увеличить коэффициент трансформации, что соответственно снизит вторичное напряжение, первичный ток и потребляемую мощность.

Применение продольной компенсации реактивной мощности снижает нагрузку на трансформаторы распределительных подстанций, что особенно важно при повторно-кратковременном режиме работы машин КТС, а также позволяет использовать для подключения машины токоведущие проводники с гораздо меньшим сечением.

При очевидных преимуществах способа продольной компенсации есть вопросы прикладного характера, требующие специальных исследований и расчетов.

Первая задача — настройка машины с компенсатором на требуемый режим сварки. На обычных машинах это осуществляется путем переключения ступеней трансформатора. В данном случае это приводит к нарушению компенсации, поскольку изменяется индуктивность. Можно регулировать первичное напряжение с помощью автотрансформатора, включенного между сетью и машиной с компенсатором, но такое решение потребует дополнительных немалых затрат. Эффективнее применить фазовое управление, особенности которого при использовании в сварочной машине с продольной компенсацией приведены ниже.

Вторая задача (цель работы) состоит в возможности достижения полной компенсации в реальных условиях и сохранении настройки в течение всего рабочего цикла. Известно, что влияние вносимых в сварочный контур ферромагнитных масс, таких как габаритные и массивные свариваемые изделия, повышает реактивное сопротивление сварочного контура машины [4]. Кроме того, и при постоянной настройке режима для сварки одного и того же изделия, и от изделия к изделию изменяется активное сопротивление сварочного контакта. Если оно сопоставимо с активным сопротивлением контура, то могут существенно измениться параметры режима сварки.

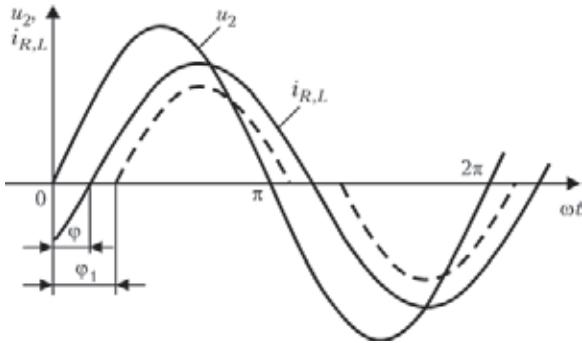


Рис. 2. Зависимости мгновенных значений напряжения u_2 и тока $i_{R,L}$ от угла ωt за период

Фазовое управление на обычных машинах точечной сварки осуществляется тиристорным контактором K (см. рис. 1). Фаза включения определяет ток, необходимый для получения сварного соединения (рис. 2).

Для того, чтобы не было постоянной составляющей в токе и трансформатор не насыщался, угол управления тиристором φ_1 должен находиться в пределах $\varphi < \varphi_1 < (\pi - \varphi)$. Чем больше φ_1 , тем меньше ток, который изменяется по синусоидальному закону без прерывания только в случае, если $\varphi_1 = \varphi$. При других значениях этого угла в установившемся режиме между импульсами тока возникают паузы, причем общая продолжительность импульса и следующей за ним паузы составляет π , а продолжительность импульса тока полупериода $\theta_1 = \pi + \varphi_1 - \varphi$.

Даже если тиристорный контактор не используется, а режим сварки определяет выбранная ступень сварочного трансформатора, на практике φ не является постоянной величиной. Введение в сварочный контур габаритных ферромагнитных материалов, а также увеличение вылета электродов приводит к росту индуктивности сварочного контура L и угла φ . Если режим сварки определяется углом управления тиристором φ_1 , то нужно выяснить, в какой мере при таком регулировании происходит «раскомпенсация» системы.

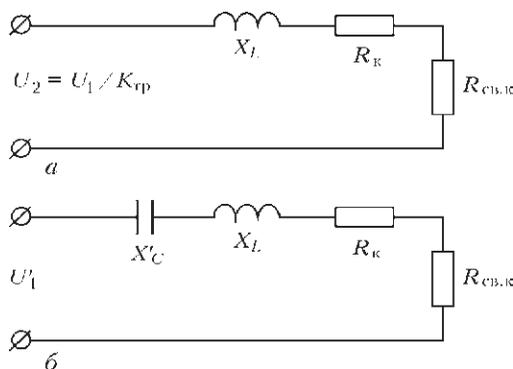


Рис. 3. Схемы замещения сварочной машины без компенсатора (а) и с компенсатором (б), приведенные к вторичной стороне трансформатора (коэффициент трансформации $K_{тп} = 1$, U'_1 — первичное напряжение, приведенное к вторичной цепи)

Схема замещения электрической части машины КТС без компенсатора, приведенная к вторичному контуру и, для упрощения расчетов, не учитывающая ток холостого хода трансформатора [5], изображена на рис. 3, а и описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$U_m \sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = iR + X_L \frac{di}{d\theta},$$

где $\theta = \omega t$, i — мгновенный ток.

В качестве базовых величин принимаем: U_m — амплитудное значение вторичного напряжения; X_L — индуктивное сопротивление машины; φ_1 — угол управления тиристором; φ — фазовый угол.

Перейдем к относительным единицам:

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = i \frac{X_L R}{U_m X_L} + \frac{X_L}{U_m} \frac{di}{d\theta}$$

или

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = \frac{i_e^*}{tL} + \frac{di_e^*}{d\theta}, \quad (1)$$

где

$$i_e^* = i \frac{X_L}{U_m}, \quad tL = \frac{X_L}{R} = \text{tg } \varphi \quad \text{и} \quad R = R_k + R_{св.к}.$$

Используя эти выражения, определим для дальнейших расчетов важный показатель сварочной машины χ — коэффициент мощности. В этом случае для установившегося режима активная мощность

$$P = \left(\frac{i_e^* U_m}{X_L} \right)^2 R,$$

полная мощность

$$S = \frac{i_e^* U_m}{X_L} \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

т. е.

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{i_e^{*2} U_m^2 R \sqrt{2} X_L}{X_L^2 i_e^{*2} U_m^2} = \frac{1,41 i_e^*}{tL}.$$

Упрощенная схема замещения электрической части машины с компенсатором изображена на рис. 3, б, где используется Г-образная схема замещения трансформатора (без учета цепи протекающего тока холостого хода). Поэтому учитываем, что уравнение (1) трансформируется в уравнение для цепи $R - L - C$ (в относительных единицах):

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = \frac{i_e^*}{tL} + \frac{di_e^*}{d\theta} + \frac{X_L}{X_C} U_{C_0}^*, \quad (2)$$

где $U_{C_0}' = U_C' / U_m$ — относительное значение напряжения на конденсаторе (U_C' — напряжение на



Сравнительные характеристики серийных машин КТС

Тип машины	R , мкОм	X_L , мкОм	tL	χ
МТ-1818	93	307	3,3	0,29
МТ-1618	121	359	2,97	0,31
МТ-2102	95	400	4,21	0,24
МТ-2002	102	479	4,7	0,21
МТ-4019	79	220	2,78	0,34

конденсаторе, приведенное к вторичной стороне сварочного трансформатора).

Теперь определим, как изменяется эффект от продольной компенсации при изменении угла управления тиристором ϕ_1 посредством стандартно применяемого силового тиристорного контактора. Для этого будем брать в расчет данные таблицы серийных машин КТС, взятые из источника [4] (значения коэффициентов мощности χ машин даны при $\phi_1 = \phi$, в режиме короткого замыкания).

Для стационарной машины с самым низким коэффициентом мощности (МТ-2002) при различных активных сопротивлениях $R_{св.к}$ — от 20 мкОм (при сварке деталей из легких сплавов) до 180 мкОм (типично при сварке деталей из малоуглеродистых сталей) с учетом выражений (1) и (2) рассчитаны данные для трех вариантов включения: без компенсации ($X_C = 0$), с недокомпенсацией ($X'_C/X_L = 0,75$) и полной компенсацией ($X'_C/X_L = 1$). Построены сравнительные графики (рис. 4), иллюстрирующие зависимость $\chi = f(R_k)$ при различных отношениях X'_C/X_L . Данные для их построения, а также программа для расчета приведены в [6]. Были рассчитаны: относительное значение напряжения на конденсаторе U'_{c0} (приведенного к вторичной стороне, по модулю), относительное значение тока i_c , коэффициент мощности χ .

Графики иллюстрируют рассчитанные значения коэффициентов мощности в зависимости от активного сопротивления нагрузки (функция угла включения тиристорного контактора) для машин с компенсатором и без него. Существенное от-

клонение X_L может быть вызвано переключением ступеней сварочного трансформатора, которых, в зависимости от мощности, бывает от 4 до 12 и отношение наибольшего напряжения к наименьшему обычно не превышает 2,6 [5]. Поэтому в многвитковых трансформаторах переход на соседние ступени будет не столь ощутимым. Из графиков видно, что даже при неполной компенсации коэффициент мощности машин существенно повышается. В частности, у машины МТ-2002 при $R_k = 20$ мкОм и $\phi_1 = 0,8$ (около 60 град) коэффициент мощности равен 0,71, у машины, не оборудованной компенсатором, — 0,39.

Графики иллюстрируют незначительное влияние на коэффициент мощности колебаний $R_{св.к}$, изменяющегося в широких пределах. Это означает, что возможные изменения переходных сопротивлений и удельного сопротивления металла при нагреве в зоне контакта будут мало сказываться на стабильности качества сварки. Следовательно, даже на обычной однофазной, но оборудованной компенсатором машине промышленной частоты средней мощности (до 100 кВА), возможны сварка металлов в расширенном диапазоне удельных сопротивлений — от углеродистых сталей до некоторых марок легких сплавов, а также соединение деталей с предварительно нанесенным защитным покрытием с высоким значением электросопротивления. Указанные возможности ограничиваются только техническими особенностями оборудования — максимальной мощностью сварочного трансформатора, исполнением вторичного сварочного контура, максимальным усилием сжатия электродов и их конфигурацией [7].

Компенсация реактивной мощности позволяет проводить сварку с существенной экономией электроэнергии. Принимая во внимание, что дооборудование серийной сварочной машины компенсирующим устройством, в зависимости от ее мощности, добавляет не более 15 % к стоимости, срок окупаемости компенсатора будет относитель-

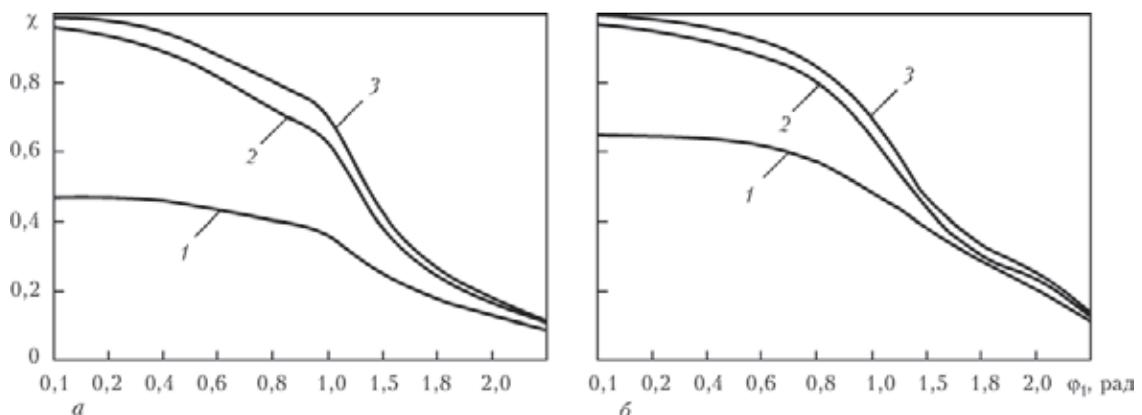


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности χ машины КТС с продольной компенсацией от угла включения тиристорного контактора ϕ_1 при $R_{св.к} = 20 \cdot 10^{-6}$ (а) и $180 \cdot 10^{-6}$ (б): 1 — без компенсации; 2 — с недокомпенсацией; 3 — с полной компенсацией



но невелик и тем короче, чем больше машина находится в рабочем режиме.

Преимущества продольной компенсации реактивного сопротивления в машинах КТС, работающих на промышленной частоте, очевидны, и таким системам следует уделять внимание при разработке нового оборудования.

Продолжением работ в данной области может стать разработка методики систематизированного расчета конкретных параметров компенсаторов реактивной мощности по реальным данным, полученным при эксплуатации современных машин КТС мощностью до 100 кВА, с учетом возможного дооборудования тиристорным контактором тех моделей, где его применение технологически целесообразно.

Выводы

1. Применение продольной компенсации реактивной мощности в машинах КТС позволяет поддерживать высокое значение коэффициента мощности в диапазоне фазового регулирования до 60 град (соответствует 5...6 ступеням многовиткового сварочного трансформатора), при неявной зависимости от сопротивления нагрузки, что соответствует практическим условиям эксплуатации сварочной машины.

2. Определено, что в указанном диапазоне изменений угла регулирования лежит область эффективного применения продольной компенсации. При дальнейшем увеличении угла включения

значения коэффициентов мощности для машин, оборудованных компенсирующими устройствами, сопоставимы со значениями режимов машин без применения компенсации.

3. Установлено: в рассмотренном диапазоне фазового регулирования значение коэффициента мощности машины с компенсатором почти не зависит от сопротивления нагрузки, что позволяет выполнять сварку деталей в широком диапазоне удельных сопротивлений.

4. Рекомендуется практическое применение систем с продольной компенсацией реактивной мощности в однофазных машинах КТС установленной мощностью до 100 кВА, с расчетом на недокомпенсацию в пределах 10...25 %.

1. Лебедев В. К., Письменный А. А. Системы питания машин для контактной сварки // Автомат. сварка. – 2001. – № 11. – С. 32–36.
2. Лебедев В. К., Письменный А. А. Система питания машин для контактной сварки с транзисторным инвертором // Там же. – 2003. – № 2. – С. 11–13.
3. Зорин В. В. Компенсация реактивной мощности контактных машин последовательными конденсаторами // Там же. – 1960. – № 6. – С. 28–36.
4. Глебов Л. В., Филиппов Ю. И., Чулошников П. Л. Устройство и эксплуатация контактных машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 308 с.
5. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 59, 302, 342.
6. Письменный А. А. Повышение эффективности систем питания машин для контактной точечной сварки: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2008. – С. 149.
7. Koubek P. Energeticke aspekty pouzivania zvaracich strojov s trojfazovym napajanim // Zvaranie-Svarovanie. – 2006. – № 10. – S. 288–292.

Поступила в редакцию 27.03.2013

XIV «УРАЛЬСКАЯ ПРОМЫШЛЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ НЕДЕЛЯ»

15-18 апреля 2014 г. в Челябинске состоится XIV «Уральская промышленно-экономическая неделя» — специализированные выставки XVII «Металлургия. Метмаш», XVIII «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент», «Промэнерго. Энергосбережение и энергоэффективность», XIV «Экология. Промышленная безопасность».

Одновременно пройдет Шестой международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий — прорывные технологии в металлургии и машиностроении». Это наиболее авторитетный на территории УрФО международный форум, организуемый Центром международной торговли (Челябинск) при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ и Министерства промышленности и природных ресурсов Челябинской области. С основными докладами и презентациями выступят руководители предприятий и компаний РФ, Италии, Германии, Японии, Австрии, Чехии, Финляндии, Китая, Республики Казахстан, Украины, Республики Беларусь.

Контакты: тел./факс: +7 (351) 239-46-37.
E-mail: vkuznetsova@wtc-chel.ru; http:// www.promforum74.ru



АНАЛИЗ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДУГИ

Н. М. МАХЛИН¹, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ²

¹ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены вопросы анализа формирования высоковольтных импульсов, инжектируемых в межэлектродный промежуток для первоначального поджига дуги и ее повторных зажиганий, в электронных устройствах с независимым питанием и последовательным включением в цепь основной или вспомогательной («дежурной») дуги, в которых все элементы формирующего контура также включены последовательно. Анализ колебательных процессов в формирующем контуре выполнен с использованием решений известных линейных дифференциальных уравнений второго порядка с ненулевыми начальными условиями. Предложены основанная на этих решениях инженерная методика расчета всех компонентов формирующего контура электронных устройств с независимым питанием для возбуждения дуги, а также вытекающие из экспериментальных данных и опыта проектирования, промышленного изготовления и эксплуатации таких устройств рекомендации по выбору их элементной базы. Описаны варианты схемотехнических решений генераторной части электронных возбудителей дуги с независимым питанием и устройств управления коммутирующим ключом формирующего контура. Библиогр. 34, рис. 6.

Ключевые слова: дуговая и плазменная сварка, первоначальное возбуждение дуги, повторные зажигания дуги, электронные возбудители дуги, искровой разряд, последовательное включение, импульсно-фазовое управление

Первоначальный поджиг дуги является важной стадией циклов дуговой и плазменной сварки, существенно влияющей на эффективность и производительность этих процессов и качество сварных соединений. Из различных методов бесконтактного возбуждения наибольшее распространение получил метод инициирования дуги путем электрического пробоя межэлектродного промежутка с помощью вольдобавочных устройств, вырабатывающих импульсы высокого напряжения [1–4].

В течение многих десятилетий в качестве вольдобавочных устройств для поджига дуги (возбудителей дуги) применяли искровые генераторы высокочастотных импульсов (осцилляторы). Их исследованиям, теории, методике расчета и конструированию посвящено значительное количество работ, обобщенные результаты которых приведены в [2–6]. К достоинствам осцилляторов следует отнести простоту конструкции и относительно невысокую стоимость, а к недостаткам – сложность управления моментом начала генерации высоковольтных импульсов, быстрое затухание высокочастотных колебаний из-за потерь в искровом разряднике, требующем периодической регулировки и ухода за ним в процессе эксплуатации, низкие значения параметров электромагнитной совместимости с электронными и электротехническими узлами и устройствами сварочного оборудования из-за высоких уровней ради-

опомех, создаваемых осцилляторами в широком диапазоне частот [3, 5–9].

С началом промышленного производства мощных полупроводниковых приборов (тиристоров, симисторов) с высокими коммутационными и динамическими характеристиками появились предпосылки для создания безыскровых возбудителей и стабилизаторов сварочной дуги, свободных от присущих осцилляторам недостатков [3, 6, 10–13]. В последние годы ряд производителей сварочного оборудования (например, фирма «КЕМРПИ») в качестве коммутаторов колебательных контуров возбудителей дуги используют мощные высоковольтные IGBT-транзисторы. Начиная с 1970-х годов полупроводниковые возбудители и стабилизаторы дуги стали доминировать и на сегодня практически полностью вытеснили осцилляторы.

Наибольшее применение получили полупроводниковые возбудители и стабилизаторы дуги с последовательным включением в цепь дуги, выгодно отличающимся от параллельного включения более высоким КПД, простотой защиты сварочных источников питания и других узлов и устройств сварочного оборудования от воздействия высоковольтных импульсов, лучшей электромагнитной совместимостью [3, 6, 9]. Схемы последовательного включения возбудителей дуги в цепи основной и вспомогательной («дежурной») дуги установок для дуговой, плазменной и микроплазменной сварки, плазменной и воздушно-плазмен-

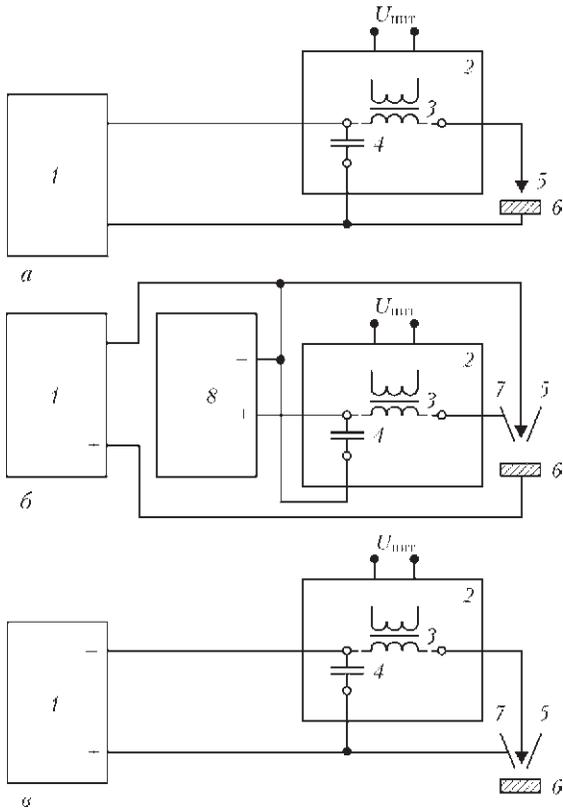


Рис. 1. Схемы последовательного включения возбуждителей и стабилизаторов дуги: а — в цепь основной дуги в установках для дуговой сварки; б — в цепь вспомогательной («дежурной») дуги в установках для плазменной (микроплазменной) сварки и наплавки, плазменной и воздушно-плазменной резки металлов; в — в цепь основной дуги в установках для плазменной сварки, наплавки и напыления с помощью плазмотронов без межэлектродной вставки; 1 — источник питания основной дуги; 2 — возбуждатель дуги; 3 — выходной импульсный трансформатор возбуждителя дуги; 4 — защитный (блокировочный) конденсатор; 5 — электрод; 6 — свариваемое изделие; 7 — сопло плазмотрона; 8 — источник питания вспомогательной («дежурной») дуги

ной резки металлов, а также сварки, наплавки и напыления с помощью плазмотронов без межэлектродной вставки приведены на рис. 1.

По построению генераторной части электронные (полупроводниковые) возбуждители и стабилизаторы дуги можно разделить на две группы.

Первая из них включает устройства, в которых формирование высокого напряжения на накопителе энергии (преимущественно емкостном) осуществляется либо с помощью умножителя напряжения, либо путем резонансной накачки.

Коммутирующий полупроводниковый ключ в устройствах первой группы в большинстве случаев подключен параллельно последовательному соединению индуктивности L и емкости C формирующего контура генераторной части. Устройствам этой группы свойственна универсальность по роду напряжения питания.

Они могут питаться и непосредственно от напряжения дуги, что позволяет осуществлять авто-

матическое включение устройств при подаче на дуговой промежуток напряжения холостого хода и автоматического прекращения генерации высоковольтных импульсов или переход из режима первоначального поджига в режим стабилизации после возбуждения дуги [3, 6].

Однако на практике, несмотря на отмеченные преимущества устройств первой группы, более распространены электронные возбуждители и стабилизаторы второй группы, представляющие собой устройства с независимым питанием (обычно от сети переменного тока промышленной частоты), в которых коммутирующий полупроводниковый ключ и реактивные элементы L и C соединены последовательно [3, 11, 12].

Формирование инжектируемых в цепь дуги высоковольтных выходных импульсов в устройстве, схема которого приведена на рис. 2, а, осуществляется за счет переходного процесса, имеющего место при периодических включениях (с удвоенной частотой напряжения питания) полупроводникового ключа K с двухсторонней проводимостью, выполненного на симисторе или двух встречно-параллельно соединенных тиристорах.

Поскольку переходные процессы в магнитопроводе импульсного трансформатора $TV1$ (рис. 2, а) нелинейны, а $L = f(i)$, строгий анализ переходного процесса в эквивалентной схеме (рис. 2, б) затруднителен ввиду сложности выкладок, требующих решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, и малой наглядности результатов. Поэтому для анализа этой эквивалентной схемы с небольшой погрешностью целесообразно принять такие допущения:

1) $R = R_{K \text{ дин}} + ESR_{C1} + ESR_{C2} + R_L + R_{с.п.}$, где $R_{K \text{ дин}}$ — динамическое сопротивление включенного ключа K ; ESR_{C1} , ESR_{C2} — эквивалентные последовательные активные сопротивления конденсаторов $C1$ и $C2$ соответственно; R_L — активное сопротивление первичной обмотки импульсного трансформатора $TV1$; $R_{с.п.}$ — активное сопротивление соединительных проводов;

2) индуктивность L первичной обмотки импульсного трансформатора $TV1$ линейна, равна начальной и не зависит от протекающего по ней тока;

3) $C1 > C2$, откуда $C \approx C2$;

4) $\tau_{пер} \ll T/2$, где $\tau_{пер}$ — длительность переходного процесса; $T/2$ — длительность полупериода входного напряжения переменного тока (напряжения питания);

5) $R/2L < 1/\sqrt{LC}$;

6) $e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi) = E_m \sin[\omega t + (\pi/2 - \varphi)]$, где E_m — амплитуда входного напряжения переменного тока, ω — его угловая частота и начальная фаза этого напряжения (угол включения полупроводникового ключа K);

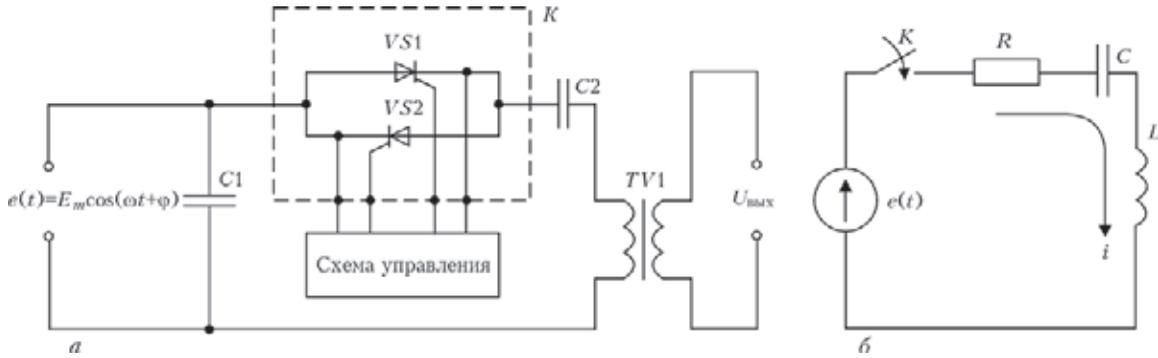


Рис. 2. Базовый вариант построения возбуждителей и стабилизаторов дуги с независимым питанием и последовательным соединением коммутирующего ключа и элементов формирующего контура: *a* — упрощенная электрическая схема генераторной части; *б* — эквивалентная (расчетная) схема генераторной части

7) $U_{\text{вых}} = U_L W_2 / W_1$, где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение устройства; U_L — напряжение на индуктивности L ; W_1, W_2 — количество витков первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора $TV1$ соответственно.

С учетом принятых допущений для расчетной схемы (рис. 2, б) переходной процесс при ненулевых начальных условиях в RCL -цепи с заряженной емкостью описывается известным дифференциальным уравнением второго порядка для напряжения U_C на емкости C [14, 15]:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = E_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Напряжение U_C представляет собой сумму двух составляющих: напряжения $U_{C,y}$ установившегося на емкости C после затухания переходного процесса, и напряжения $U_{C,св}$, являющегося свободной затухающей составляющей. Установившееся напряжение $U_{C,y}$ определяется частным решением уравнения (1) при $t \rightarrow \infty$, т. е. когда $dU_C/dt = 0$, а установившийся ток $i(t) = 0$, согласно которому

$$U_{C,y} = U_{C_0} = E_m \frac{X_C}{Z} \cos(\omega t + \varphi - \gamma),$$

где

$$X_C = 1/\omega C; \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2};$$

$$\text{tg } \gamma = \frac{R}{\omega L - 1/\omega C}.$$

Свободная составляющая затухающих колебаний $U_{C,св}$ описывается общим решением однородного уравнения

$$\frac{d^2 U_{C,св}}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_{C,св}}{dt} + \frac{1}{LC} U_{C,св} = 0. \quad (2)$$

При введении обозначений $R/2L = \delta$, $1/LC = \beta_0^2$, $\beta = \sqrt{\beta_0^2 - \delta^2}$ и с учетом принятого допущения $\beta_0^2 > \delta^2$ решения уравнений (1) и (2) могут быть представлены в виде

$$U_C = U_{C,y} + U_{C,св} = E_m \frac{X_C}{Z} \cos(\omega t + \varphi + \gamma) + e^{-\delta t} \left\{ E_m \frac{X_C}{Z} [\cos(\omega t + \varphi + \gamma) - \cos(\varphi + \gamma)] \times \right. \\ \left. \times \frac{\beta_0}{\beta} \sin(\beta t + \gamma) + E_m \frac{X_C}{Z} \sin \frac{\omega}{\beta} \sin \beta t \right\}, \quad (3)$$

$$i = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi - \gamma) + \frac{E_m}{Z} e^{-\delta t} \left[\frac{\beta_0^2}{\omega \beta} \cos(\varphi - \gamma) + \frac{\delta}{\beta} \sin(\varphi - \gamma) - \sin(\varphi - \gamma) \cos \beta t \right]. \quad (4)$$

Из (3) следует, что предельное значение пере-напряжения на емкости C в 3,2 раза превышающее значение E_m , будет при включении коммутирующего ключа K в момент, когда $e(t)$ достигнет максимума, находящегося в противофазе с напряжением на заряженной емкости C , т. е. при $e(t) = E_m$, $\varphi = -\gamma$, $U_{C_0} = -E_m$.

С учетом соотношения $U_L = L \frac{di}{dt}$ напряжение на индуктивности L определяется по выражению

$$U_L = E_m \frac{X_L}{Z} \left\{ \cos(\omega t + \varphi - \gamma) - \frac{\delta}{\omega} e^{-\delta t} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{\beta_0^2}{\beta} \cos(\varphi - \gamma) + \frac{\delta}{\beta} \sin(\varphi - \gamma) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(\varphi - \gamma) \cos(\beta t + \beta) \sin(\varphi - \gamma) \sin \beta t \right] \right\}, \quad (5)$$

где $X_L = \omega L$.

В (3)–(5) β представляет собой угловую частоту колебаний при переходном процессе в RCL -контуре; δ — коэффициент их затухания.

Так как при пробое и искровом разряде, относящихся к самостоятельным неустановившимся разрядам в газах, сопротивление межэлектродного промежутка достаточно высоко (от нескольких десятков до сотен килоом), то имеются все основания полагать, что выражения (3)–(5) справедливы для режима как холостого хода возбуждителя дуги, так и искрового разряда (вплоть до момента перехода искрового разряда в межэлектродном промежутке в стационарный дуговой разряд), при этом



влияние сварочного контура, в том числе вторичных цепей вольтдобавочного устройства, на параметры элементов генераторной части возбудителя дуги пренебрежительно мало.

Выражения (3)–(5) и результаты экспериментальных исследований и многолетнего опыта разработки, серийного изготовления и эксплуатации возбудителей и стабилизаторов дуги последовательного включения могут быть использованы для расчета параметров и выбора компонентов базового варианта подобных устройств.

Конденсатор C_1 (см. рис. 2, а) выбирают из условия $C_1 > (2...4)C_2$; частотных свойств, которые должны соответствовать показателю β в выражениях (3)–(5); значения ESR (не более 10 мОм); допустимого значения переменной составляющей $I_{R.M.S}$ тока через конденсатор и допустимого действующего значения напряжения $U_{VAC\ доп}$ переменного тока на этом конденсаторе в зависимости от наибольшего значения входного напряжения (напряжения питания) $U_{пит}$.

Обычно $C_1 = (4...6)$ мкФ при $U_{пит. ном} = 380$ В и $(6...15)$ мкФ при $U_{пит. ном} = 220$ В и, следовательно, значения $I_{R.M.S}$, определяемые из соотношения $I_{R.M.S} = E_m / X_{C1}$, где $X_{C1} = 1/\omega_{C1}$, составляют $(0,74...1,11)$ и $(0,68...1,08)$ А, а значения $U_{VAC\ доп}$ — 600 и 250 В соответственно (при $U_{пит} = 1,1U_{пит. ном}$).

По совокупности характеристик (включая частотные) и параметров для использования в качестве конденсатора C_1 наиболее подходят металлопленочные конденсаторы с полипропиленовым или поликарбонатным диэлектриком, в частности, конденсаторы серий К75-15, К75-24 или серий РНС, РWM или РМВ фирмы ICEL или аналогичные других фирм-производителей. У таких конденсаторов в указанном диапазоне их емкостей и напряжений $U_{VAC\ доп}$ значения ESR не превышают 3,5 мОм, а допустимые значения $I_{R.M.S}$ составляют не менее 9,0 А [16]. С точки зрения оптимального теплового режима и показателей надежности хорошие результаты могут быть достигнуты при диссипативном (параллельном) включении двух-трех таких конденсаторов соответствующей емкости.

Емкость конденсатора C_2 (см. рис. 2, а) можно определить исходя из необходимого значения энергии инжектируемых в цепь дуги импульсов, используя соотношение $W_i = CU_{C2}^2 / 2$, где W_i — энергия импульса; U_{C2} — напряжение на конденсаторе C_2 в момент включения коммутирующего ключа, т. е. при $t(0)$. Поскольку такое включение ключа осуществляется симметрично в каждом полупериоде входного напряжения (напряжения питания), то напряжение на конденсаторе C_2 определяется как $U_{C2} = k_{min} 2E_m \sin \varphi$, где k_{min} — коэффициент, учитывающий наименьшее значение

E_m при колебаниях входного напряжения, как правило, $k_{min} \geq 0,85$. Отсюда выражение для емкости конденсатора C_2 может быть представлено в виде

$$C = \frac{2W_i}{U_{C2}^2} = \frac{W_i}{2(k_{min} E_m \sin \varphi)^2}. \quad (6)$$

В соответствии с ранее проведенными исследованиями и экспериментальными данными в установках постоянного тока с однофазным выпрямлением для обеспечения эффективного возбуждения дуги угол включения коммутирующего ключа (угол φ) должен быть (90 ± 5) эл. град, для установок с трехфазным выпрямлением — (90 ± 10) эл. град, в установках переменного тока угол φ — (75 ± 5) эл. град [3, 6, 11, 12], из чего вытекает, что $\sin \varphi = (0,94...1,00)$. Как видно из рис. 3, при пониженном ($U_{пит} = 0,85U_{пит. ном}$) и номинальном ($U_{пит. ном} = 220$ В) значениях напряжения питания и энергии импульсов от 0,3 до 0,8 Дж емкость конденсатора C_2 должна быть от 2,0 до 6,0 мкФ, а при $U_{пит} = 0,85 \cdot 380$ В согласно (6) — от 0,5 до 2,0 мкФ. Ввиду того, что переходной процесс в RCL-контуре (см. рис. 2, б) сопровождается определяемым (3) перепадом напряжения на конденсаторе C_2 (см. рис. 2, а), допустимое амплитудное значение напряжения постоянного тока этого конденсатора выбирают из условия

$$U_{VDC\ max} \geq 3,2E_m. \quad (7)$$

Требования к частотным свойствам и ESR конденсатора C_2 аналогичны таким же требованиям к конденсатору C_1 . Для C_2 также целесообразна диссипативная (параллельная) схема соединения двух-четырех частотных металлопленочных конденсаторов, например, серии К75-24 или серий РРА, РWM или РМВ фирмы ICEL [16, 17].

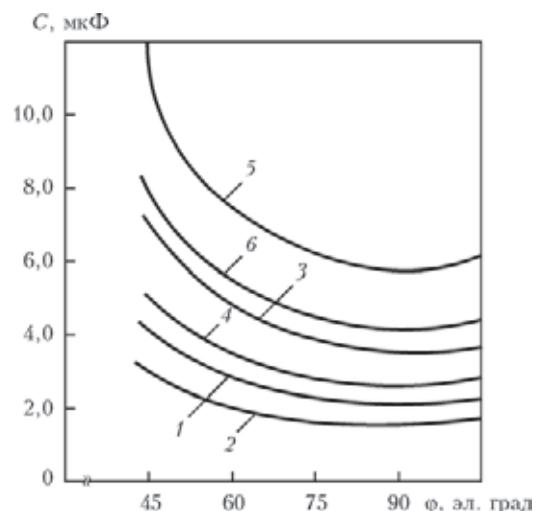


Рис. 3. Зависимость емкости C от угла включения ключа формирующего RCL-контур при энергии импульса 0,3, 0,5 и 0,8 Дж соответственно и эффективном значении напряжения питания 187 (1, 3, 5) и 220 В (2, 4, 6)



Для определения значений составляющих активного сопротивления R (см. рис. 2, б) формирующего RCL -контура используют справочные данные, приведенные, например, в [16–18]. В большинстве случаев ESR одного металлопленочного конденсатора с полипропиленовым диэлектриком и $U_{VDC\max} = (1000 \dots 2000)$ В не превышает 4,0 мОм, а значения $R_{K\text{дин}}$ для большинства тиристоров отечественного и зарубежного производства, в том числе низкочастотных тиристоров унифицированных серий Т122-25...Т141-40, находятся в диапазоне (3,3...11,0) мОм. Сумма активных сопротивлений $R_{с.п}$ проводов, соединяющих компоненты генераторной части возбудителя дуги, и сопротивления R_L первичной обмотки импульсного трансформатора не превышает 12 мОм. Следовательно, значение активного сопротивления формирующего RCL -контура составляет не более 40 мОм.

Индуктивность L формирующего RCL -контура (см. рис. 2, б) должна удовлетворять ряду требований. Наиболее существенные из них заключаются в том, что для обеспечения колебательного характера переходного процесса при включении ключа K должно выполняться необходимое условие $2\sqrt{L/C} > R$ (в полупроводниковых возбудителях и стабилизаторах дуги это условие выполняется практически всегда), а для обеспечения безотказной работы полупроводникового ключа K значение L должно быть таким, чтобы $I_m < I_{oc.п}$ и $(di/dt)_K < (di_{oc}/dt)_{кр}$, где I_m — наибольшее амплитудное значение тока в формирующем RCL -контуре; $I_{oc.п}$ — максимально допустимый повторяющийся ток в открытом состоянии ключа K ; $(di/dt)_K$ — наибольшее значение скорости нарастания тока в формирующем RCL -контуре; $(di_{oc}/dt)_{кр}$ — значение критической скорости нарастания тока в открытом состоянии ключа K .

Исходя из того, что период синусоидального напряжения питания (напряжения питающей сети) значительно (не менее, чем на порядок) превышает длительность переходного процесса в формирующем RCL -контуре, и проведя некоторые упрощения выражения (4) с пренебрежением его составляющими, незначительно влияющими на конечный результат, выражение для протекающего в RCL -контуре переходного тока может быть представлено в виде

$$i = \frac{E_m}{\beta L} e^{-\delta t} \sin \beta t. \quad (8)$$

В соответствии с (8) наибольшее амплитудное значение тока в формирующем RCL -контуре может быть определено по соотношению

$$I_m = \frac{E_m}{\beta_0 L} = E_m \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (9)$$

а наибольшее значение скорости нарастания тока в этом контуре — по выражению

$$(di/dt)_K = 4I_m \beta_0 = \frac{4I_m}{\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

Расчеты и опыт разработки и проектирования возбудителей дуги, в которых коммутирующий ключ и элементы формирующего контура соединены последовательно, показывают, что при ограничениях, обусловленных электромагнитными и конструктивными параметрами ферритовых сердечников реальных импульсных трансформаторов, индуктивность L обычно составляет около 20 мГн. Такое (или близкое к такому) значение индуктивности L обеспечивает выполнение условия колебательного характера переходного процесса в формирующем RCL -контуре, а также значения $I_m \leq 180$ А и $(di/dt)_K \leq 80$ А/мкс при напряжении питающей сети 220_{-33}^{+22} В, что подтверждается соответствующими осциллографическими измерениями. При типовых значениях R , C и L , рассчитанных в соответствии с (6)–(10), частота $\beta_0/2\pi$ собственных (свободных) затухающих колебаний в формирующем RCL -контуре составляет (15...20) кГц, а отношение частот β_0/β близко к единице.

Высоковольтный импульсный трансформатор $TV1$ (см. рис. 2, а) является ответственным и технологически наиболее сложным узлом возбудителей дуги. Требования, предъявляемые к этому трансформатору, весьма противоречивы [3, 6, 10–12]. Во-первых, такой трансформатор с повышенным рассеянием должен соответствовать нормам и правилам высоковольтного трансформаторостроения, во-вторых, его массогабаритные показатели и стоимость должны быть ощутимо малы в сравнении с аналогичными показателями всей технологической установки. Кроме того, при расчете и проектировании трансформатора должны учитываться поверхностный эффект, обусловленный высокой частотой обтекающих обмотки трансформатора импульсных токов, наибольшее значение протекающего через вторичную обмотку трансформатора тока дуги, а также электромагнитные и конструктивные параметры серийно изготавливаемых промышленностью ферритовых сердечников, обеспечивающих получение расчетного (заданного) значения L .

Теоретическим основам, анализу процессов и методикам расчета индуктивных элементов с ферромагнитными сердечниками, в том числе импульсных трансформаторов ультразвуковых и высоких частот, посвящено множество работ, например [19–25], поэтому в настоящей работе рас-



смотрены только некоторые аспекты упрощенного расчета и проектирования высоковольтного импульсного трансформатора (ИТ) возбудителей дуги последовательного включения.

Предъявляемые к ИТ возбудителей дуги требования обуславливают стремление к выполнению их обмоток с возможно минимальным количеством витков, исходя из чего количество витков первичной обмотки W_1 таких ИТ обычно составляет 1-2. В соответствии с (5) при $e(t) = -E_m$ и $\varphi = -\gamma$ максимальное значение напряжения U_{Lmax} на первичной обмотке ИТ в 2,1 раза превышает значение E_m и при пониженном напряжении $U_{пит}$ составляет

$$U_{Lmax} = 2,1k_{min} \sqrt{2}U_{пит} \quad (11)$$

Например, при $U_{пит} = 220$ В и $k_{min} = 0,85$, $U_{Lmax} = 555$ В.

Амплитудное значение напряжения холостого хода вторичной обмотки ИТ (напряжения $U_{вых}$) должно соответствовать уровням, при которых гарантировано обеспечивается пробой межэлектродного промежутка технологически обоснованной длины и возникающий вслед за этим искровой разряд, т. е. должно выполняться условие $U_{вых} \geq U_{пр}$, где $U_{пр}$ – напряжение статического пробоя межэлектродного промежутка. Так как до настоящего времени теория искрового разряда, объясняющая всю совокупность явлений, которые сопровождают процессы пробоя межэлектродного промежутка и искрового разряда в нем, отсутствует, то вывод аналитического выражения для $U_{пр}$ в форме, приемлемой для инженерных расчетов, сильно осложнен. Поэтому при определении необходимого значения $U_{вых}$ целесообразно руководствоваться экспериментальными данными, подтвержденными накопленным опытом применения возбудителей дуги [3–7, 10–12]. Согласно этим данным в возбудителях дуги установок для дуговой сварки и большинства установок для плазменной сварки, наплавки и напыления $U_{вых} = (3...6)$ кВ, в возбудителях дуги установок для воздушно-плазменной резки $U_{вых} = (10...12)$ кВ, а в некоторых случаях составляет (16...20) кВ. Исходя из этого и с учетом известного соотношения $W_2 = W_1 U_{вых} / U_{Lmax}$ при $W_1 = (1...2)$ витка количество витков W_2 вторичной обмотки ИТ обычно составляет 9...18 в возбудителях дуги установок для дуговой и плазменной сварки, наплавки и напыления в среде инертных газов, 18...36 в возбудителях вспомогательной («дежурной») дуги установок для воздушно-плазменной резки и 32...48 в возбудителях дуги установок для плазменной сварки в среде углекислого газа.

Влияние поверхностного эффекта на размеры проводников обмоток ИТ характеризуется глубиной проникновения высокочастотного тока D_{PEN} ,

которая в миллиметрах для проводников из меди с достаточной для практики степенью точности может быть определена по выражению [25]

$$D_{PEN} = \frac{75}{\sqrt{\beta_0/2\pi}} \quad (12)$$

В соответствии с (12) для рационального использования сечения проводников обмоток ИТ при типичных значениях β_0 площадь сечения проводника первичной обмотки должна быть не более 1,15 мм², а толщина проводника прямоугольного сечения вторичной обмотки — не более 1,2 мм.

В качестве проводника вторичной обмотки ИТ наиболее целесообразно применять ленты прямоугольного сечения из мягкой меди (например, медные ленты с термостойким пленочным покрытием марок ПМЛБН по ТУ 16.К50-088–2006 или ПМГЛБН по ТУ 16.К50-009–2007 или неизолированные ленты типа ЛММ по ГОСТ 434–78), при этом геометрические размеры таких лент должны выбираться с учетом количества витков вторичной обмотки, значений D_{PEN} и необходимой площади поперечного сечения $S_{п}$.

В качестве материала сердечника ИТ наиболее пригодны магнитомягкие марганцово-цинковые ферриты марок 2500НМС1 и 3000НМС1 или ферриты из материала 3С8, предназначенные для работы в сильных магнитных полях. С целью упрощения процедуры выбора и определения основных параметров и размеров сердечника ИТ принимают допущения, согласно которым значение магнитной индукции B изменяется симметрично относительно нуля характеристики намагничивания, распределения B и напряженности магнитного поля H однородны, значение относительной магнитной проницаемости μ_R постоянно, т. е. характеристика сердечника B/H линейна. В возбудителях и стабилизаторах дуги наибольшее применение получили ИТ броневые типа, значительно реже используются ИТ стержневого типа. Как правило, сердечники таких ИТ имеют П-образную или Ш-образную конфигурацию с прямоугольной или круглой формой сечения стержней и ярм.

Для минимизации массогабаритных параметров ИТ в возбудителях вспомогательной («дежурной») дуги и в возбудителях основной дуги, ток которой не превышает 160 А, наиболее рациональным является применение сердечников Ш-образной конфигурации, например, Е 55/28/21 для ИТ возбудителей вспомогательной дуги или Е 80/38/20 для ИТ возбудителей основной дуги. В возбудителях основной дуги, номинальный ток которой от 160 до 315 А, приемлемо использование П-образных сердечников, например, ПК 40×18 из феррита 2500НМС1 или 3000НМС1 или сердечников УУ



93/152/16 из феррита 3С8, а в ИТ возбудителей дуги, номинальный ток которой от 315 до 500 А, и в ИТ возбудителей дуги установок для плазменной сварки в среде CO₂ — П-образных сердечников, имеющих развитую площадь окна A_W, например, УУ 101/152/30 или УР 114/78/38.

При выборе сердечника ИТ для определения суммарного эффективного поперечного сечения его стержня A_E по заданному значению индуктивности L первичной обмотки ИТ можно воспользоваться соотношением

$$L = A_L W_1^2, \quad (13)$$

где A_L — интегральный параметр, приводимый в технических данных сердечника и определяющий значение индуктивности размещенной на этом сердечнике обмотки в зависимости от квадрата числа ее витков (для ИТ — в зависимости от квадрата числа витков первичной обмотки). При этом возможны два подхода. Первый предполагает использование единичного сердечника, что требует выполнения условия $W_1 \geq \sqrt{L/A_L}$, в силу чего в реальных ИТ количество W₁ должно быть не менее 2 и, следовательно, W₂ ≥ 20. Такой подход вполне оправдан при проектировании ИТ возбудителей вспомогательной дуги и ограниченно приемлем для ИТ возбудителей основной дуги, номинальный ток которой не превышает 250 А. Согласно второму подходу при заданных значениях L и W₁ требуемого значения A_L достигают путем использования в ИТ сердечника, состоящего из нескольких единичных сердечников, количество которых определяют по выражению

$$n_C = \frac{L}{W_1^2 A_{LS}}, \quad (14)$$

где n_C — округленное в большую сторону количество единичных сердечников; A_{LS} — параметр A_L единичного сердечника. Именно второй подход характерен для ИТ возбудителей основной дуги, номинальный ток которой составляет более 250 А.

Необходимая площадь окна сердечника A_W определяется по стандартным методикам, приведенным, например, в [20, 23, 25], путем расчета общей площади окна, занимаемой проводниками обмоток ИТ с учетом толщины межвитковой и межобмоточной изоляции и повышенной температуры ИТ при его охлаждении за счет естественной конвекции.

Полученные значения A_E и A_W с помощью справочных данных позволяют произвести предварительный выбор стандартного типоразмера сердечника ИТ, после чего необходимо удостовериться в соответствии электромагнитного режима выбранного сердечника условию $B_{\max} < B_S$, где B_{max} — значение магнитной индукции при пиковом значении H_{max} напряженности магнитного

поля в сердечнике, а B_S — значение магнитной индукции насыщения сердечника.

Если, согласно приведенным в литературе данным [25–27], принять, что максимально допустимое значение B_{max} = 0,2 Тл, а значения относительной μ₀ и эффективной μ_E магнитной проницаемости сердечника равны между собой, то для участка кривой B = f(H) ветвей петли гистерезиса ферритов 2500НМС1, 3000НМС1 или 3С8, на котором B/H = const, максимально допустимое значение H_{max} при температуре сердечника не более 120 °С рассчитывают по выражению

$$H_{\max} = \frac{1,592 \cdot 10^5}{\mu_E}. \quad (15)$$

Так как обычно μ_E = (1,70...1,99)10³, то значения H_{max} находятся в пределах (94,0...80,0) А/м.

Кроме того, следует определить значение H_{max} в зависимости от амплитудного значения I_m, обтекающего первичную обмотку ИТ тока, количества витков этой обмотки и геометрических размеров выбранного сердечника, используя выражение

$$H_{\max} = \frac{I_m W_1}{l_e n_C}, \quad (16)$$

где l_e — справочное значение эффективной длины пути магнитной линии. В случае, если значение H_{max}, рассчитанное по (16), превышает значения, полученные по выражению (15), необходимо либо выбрать типоразмер сердечника с большей l_e, либо увеличить количество n_C единичных сердечников, образующих сердечник ИТ, после чего вновь произвести проверочные расчеты.

Низкая частота следования импульсов выходного напряжения U_{вых}, значительные уровни переходного тока и напряжений на элементах формирующего эти импульсы контура и высокая их скважность (не менее 10) обуславливают целесообразность применения в возбудителях дуги с независимым питанием в качестве ключа K (см. рис. 2, а) низкочастотных тиристоров, которым наряду с высокими коммутационными возможностями присущи сравнительно низкие значения R_{K дин} в открытом состоянии, незначительная по сравнению с коммутируемой мощностью управления, высокая эксплуатационная надежность, массовость изготовления и применения, относительно невысокая стоимость. Среди таких тиристоров наиболее предпочтительны отечественные тиристоры унифицированных серий Т122-25 или Т131-40 при номинальном напряжении питания (напряжении питающей сети) 220 В и Т132-25 или Т141-40 при номинальном напряжении питания 380 В, или их зарубежные аналоги.

Класс тиристоров по повторяющемуся импульсному обратному напряжению U_{обр.и} выбирают из соотношения

$$U_{\text{обр.и}} = 100 + 3,2E_m. \quad (17)$$



С учетом (17) при напряжении питающей сети 220 В могут быть рекомендованы тиристоры 12-го класса, при напряжении 380 В — 20-го класса.

Максимальные среднее и действующее значения тока, протекающего через тиристор в его открытом состоянии, могут быть определены путем аппроксимации экспоненциального двухполярного радиоимпульса тока i , протекающего в формирующем RCL -контуре, униполярным видеоимпульсом треугольной формы. В соответствии с этим максимальное среднее значение тока $I_{oc,cp}$, протекающего через тиристор в его открытом состоянии, рассчитывается по выражению

$$I_{oc,cp} = 0,5 I_m \frac{\tau_{и}}{T_{и}}, \quad (18)$$

где $\tau_{и}$ — длительность экспоненциального двухполярного радиоимпульса тока i (или соответствующего ему униполярного видеоимпульса), определяемая как $\tau_{и} = 1/\delta = 2L/R$; $T_{и}$ — период частоты следования импульсов, равный периоду удвоенной частоты напряжения питания возбудителя дуги. Максимальное действующее значение $I_{oc,д}$ протекающего через тиристор тока может быть определено из соотношения

$$I_{oc,д} = 0,5 \frac{I_m}{\sqrt{T_{и}/\tau_{и}}}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что, например, при приведенных типовых значениях R , C , L и I_m максимальное среднее и действующее значения протекающего через тиристор тока в его открытом состоянии составляют $I_{oc,cp} = 9$ и $28,5$ А соответственно, и, следовательно, в этом случае есть основания применить тиристоры серии Т122-25, у которых предельно допустимый средний ток 25 А, а предельно допустимое действующее значение тока — 31,4 А [18].

Критическая скорость нарастания тока di_{oc}/dt в открытом состоянии для низкочастотных тиристоров унифицированных серий составляет не менее 100 А/мкс и поэтому требование $(di/dt)_K < di_{oc}/dt$ в возбудителях дуги с независимым питанием (см. рис. 2, а) выполняется практически всегда.

Выходной импеданс возбудителей с последовательным включением в цепь дуги, главным образом зависящий от индуктивности и активного сопротивления вторичной обмотки ИТ, составляет от 1,2 до 9,0 кОм, что предопределяет наличие у возбудителей дуги падающих внешних вольтамперных характеристик.

Управление включением тиристорного коммутирующего ключа K (см. рис. 2, а), а следовательно, и моментами начала генерации выходных импульсов $U_{вых}$, осуществляют путем получившего широкое распространение синхронного импульсно-фазового управления, отличающегося отче-

том угла подачи импульса управления от определенной фазы напряжения питания — чаще всего от фазы, соответствующей моментам нулевых значений напряжения питающей сети. Для реализации импульсно-фазового управления существует множество схемотехнических решений фазосдвигающих устройств (ФСУ), построенных либо на таких полупроводниковых приборах, как диоды, динисторы, транзисторы, тиристоры, либо на аналоговых или цифровых микросхемах, либо на комбинациях и тех и других [10, 22, 24, 28]. В возбудителях дуги с независимым питанием наибольшее применение получили ФСУ, выполненные на базе однопереходных транзисторов (двухбазовых диодов). Анализ, методика расчета и рекомендации по выбору элементов ФСУ на двухбазовых диодах приведены в [28], а типовое схемное решение ФСУ, применяемых в возбудителях дуги с независимым питанием, показано на рис. 4. Напряжение синхронизации в таком ФСУ формируется с помощью стабилитрона $VD2$, а регулирование момента генерации импульса включения тиристор коммутирующего ключа возбудителя дуги осуществляется с помощью переменного резистора $R4$. Более подробное описание данного ФСУ и эпюры напряжений в различных точках его схемы приведены в работе [12].

Во избежание опасности выхода из строя тиристор коммутирующего ключа K из-за превышения допустимого значения перегрузки по току, неизбежно возникающей в случае насыщения сердечника ИТ, вторичная обмотка которого включена последовательно в цепь дуги постоянного тока, при установлении в межэлектродном промежутке стационарно-

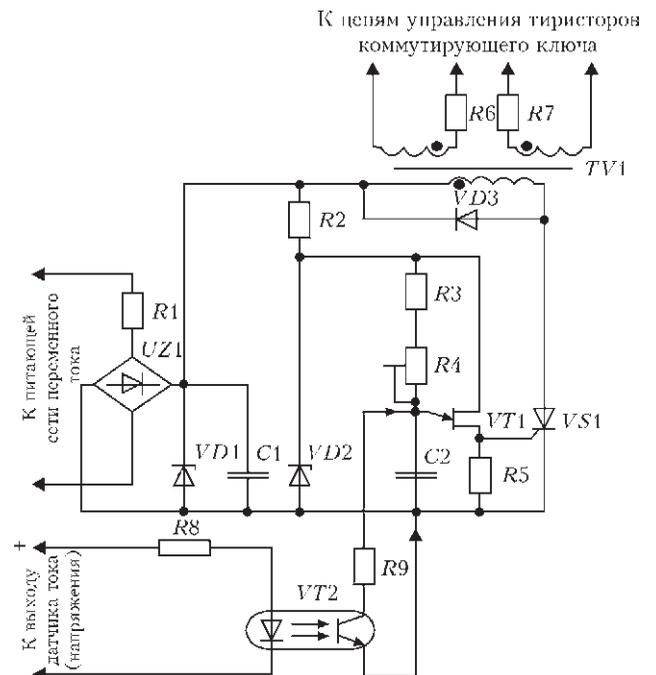


Рис. 4. Типовая электрическая схема ФСУ возбудителей дуги с независимым питанием

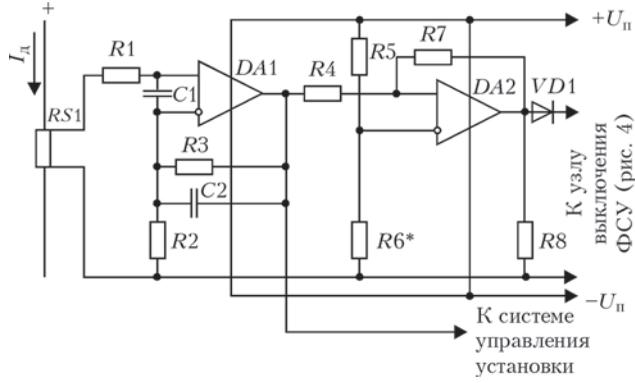


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема варианта построения датчика тока дуги

го дугового разряда генераторная часть возбуждителя дуги должна автоматически отключаться. В ФСУ, схема которого приведена на рис. 4, такое отключение осуществляется с помощью узла, состоящего из быстродействующей транзисторной оптопары *VT2* и токоограничивающих резисторов *R8* и *R9*. При поступлении на вход этого узла сигнала с выхода датчика тока (напряжения) дуги обеспечивается шунтирование конденсатора *C2*. В качестве датчиков тока дуги в современных установках и сварочных источниках питания часто применяют датчики, функционирующие на основе эффекта Холла. В случае, если такой датчик тока в системе управления установки отсутствует, то как сенсор тока дуги может быть использован устанавливаемый в цепь дуги токовый шунт. Вариант построения датчика тока, включающего шунт *RS1*, линейный неинвертирующий шунтовой усилитель на микросхеме *DA1* и компаратор на микросхеме *DA2*, приведен на рис. 5.

При появлении тока в цепи дуги на выходе микросхемы *DA1* формируется сигнал, уровень которого пропорционален току дуги. Этот сигнал подается в систему управления установки и на вход компаратора на микросхеме *DA2*, порог срабатывания которого задается с помощью резистора *R6*. С выхода компаратора напряжение подается на

вход узла отключения ФСУ (см. рис. 4). Если же для определения момента установления в межэлектродном промежутке стационарного дугового разряда используется датчик напряжения дуги, то пропорциональный этому напряжению сигнал может подаваться непосредственно во входную цепь компаратора на микросхеме *DA2* (рис. 5), т. е. через резистор *R4*.

К недостаткам возбуждителей дуги с независимым питанием, построенных по базовому варианту (см. рис. 2, а), следует отнести зависимость амплитуды и энергии выходных импульсов от угла включения тиристоры коммутирующего ключа *K* и колебаний напряжения питания (напряжения питающей сети), а также необходимость предварительной регулировки (с помощью ФСУ) моментов начала генерации выходных импульсов, особенно при возбуждении и стабилизации дуги переменного тока.

Влияние колебаний напряжения питания на параметры выходных импульсов может быть минимизировано до приемлемого уровня путем применения в формирующем *RCL*-контуре реактивных элементов и ИТ, рассчитанных в соответствии с приведенной в настоящей работе методикой на минимально допустимое напряжение питания, составляющее, как правило, (85...90) % номинального значения.

Устранения зависимости параметров выходных импульсов возбуждителей дуги с независимым питанием от угла включения тиристоры коммутирующего ключа *K* можно достичь за счет питания формирующего *RCL*-контура от накопителей энергии (преимущественно емкостных). Примеры схемотехнических решений таких устройств приведены на рис. 6.

В возбуждителях дуги, построенном по схеме рис. 6, а [29], накопителями энергии являются конденсаторы *C1* и *C2*, заряд которых до амплитудного значения $\pm E_m$ напряжения питания (на-

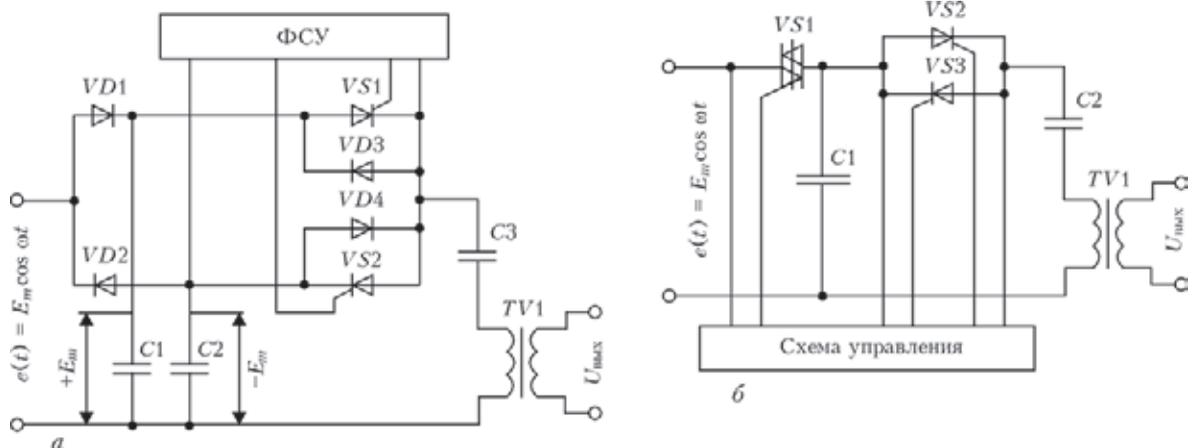


Рис. 6. Электрические принципиальные схемы вариантов построения генераторной части возбуждителей дуги с питанием формирующего *RCL*-контура от накопителей энергии: а — схема возбуждителя дуги с двухканальным накоплением энергии; б — схема устройства для возбуждения дуги с одноканальным накоплением энергии



пряжения питающей сети) осуществляется через разделительные диоды $VD1$ и $VD2$.

Возбудители дуги, выполненные по схеме, представленной на рис. 6, а, обеспечивают возможность начала генерации стабилизированного по амплитуде и энергии выходного импульса практически в любой момент каждого полупериода напряжения питания, при этом разряд каждого из накопительных конденсаторов происходит в те полупериоды напряжения питания, когда подключенные к этим конденсаторам разделительные диоды находятся в непроводящем состоянии. Это обусловило возможность применения возбудителей дуги, построенных по схеме, приведенной на рис. 6, а, в качестве универсальных устройств для первоначального возбуждения дуги постоянного и переменного тока, а также для стабилизации (повторных зажиганий) дуги переменного тока [6, 12].

В одноканальном устройстве, схема которого приведена на рис. 6, б [30], заряд накопительного конденсатора $C1$ начинается в начале каждого полупериода напряжения питания с включением тиристорного ключа с двухсторонней проводимостью (симистора) $VS1$. Включенное состояние симистора $VS1$ и заряд конденсатора $C1$ длятся до достижения напряжением на конденсаторе $C1$ амплитудного значения напряжения питания. Генерация стабилизированного по амплитуде и энергии выходного импульса начинается с включения с помощью схемы управления тиристоры $VS2$, $VS3$ в любой из моментов второй половины полупериода напряжения питания, но не ранее, чем через (500...700) мкс после выключения симистора $VS1$. С учетом этого область применения одноканальных устройств (рис. 6, б) — первоначальное возбуждение постоянного тока. На практике такие устройства используются в основном для возбуждения вспомогательной («дежурной») дуги в плазмотронах для сварки и резки металлов.

Следует отметить, что, несмотря на некоторые преимущества, устройства, схемы которых приведены на рис. 6, широкого распространения не получили, так как по сравнению с базовым вариантом построения возбудителей дуги (см. рис. 2, а) устройства с накопителями энергии (рис. 6, а, б) для своей реализации требуют большего количества полупроводниковых приборов и пассивных элементов, поэтому характеризуются более высокими статическими и динамическими потерями, усложнением конструкции и большей стоимостью.

Необходимость предварительной регулировки или подстройки угла включения тиристоры коммутирующего ключа для обеспечения эффективного первоначального поджига дуги постоянного тока с помощью возбудителей дуги, выполненных по схеме, представленной на рис. 2, а, может быть исключена применением ФСУ, построенного по

принципу детектирования амплитуды напряжения питания. Один из примеров схмотехнического решения такого ФСУ приведен в [31].

В универсальных по роду тока возбудителях и стабилизаторах дуги необходимость предварительной регулировки или подстройки моментов начала генерации выходных импульсов может быть устранена с помощью ФСУ, в которых используется дифференциальный метод формирования импульсов управления тиристорами коммутирующего ключа, основанный на генерации этих импульсов при резких изменениях напряжения дуги. Примером построения таких ФСУ может служить схема управления возбудителя-стабилизатора дуги ВСД-01 УЗ, приведенная в работе [3].

Промышленное крупносерийное производство возбудителей дуги с независимым питанием и последовательным включением в цепь дуги, выполненных в виде отдельных устройств моноблочного исполнения, впервые было освоено предприятиями Украины в 1975 г. В течение 1976–1993 годов было изготовлено более 25 тыс. единиц возбудителей дуги серий УПД-1, УПД-2 и УПД-3 и их различных модификаций, которые нашли широкое применение и как устройства для бесконтактного первоначального поджига дуги, так и в качестве стабилизаторов горения дуги переменного тока, в том числе при аргодуговой сварке алюминия и его сплавов [3, 9, 11, 12, 32–34]. Такие возбудители дуги используются в установках и устройствах для дуговой и аргодуговой (TIG) сварки (в частности, в установках и устройствах типа И-118, И-190, УДГ-301М УХЛ4), в установках для плазменной и микроплазменной сварки, наплавки и напыления (например, типа УПС-301 УХЛ4, УПС-501 УХЛ4, УН-150, «Киев-7», Н-155, УМПДС-0605 УХЛ4), в установках для плазменной и воздушно-плазменной резки таких, как «Киев-4», в газорезательных машинах с программным управлением типа «Кристалл», в сборных постах дуговой и сварки TIG постоянным и переменным током, в другом сварочном оборудовании отечественного и зарубежного производства.

В связи с изменившимися после 1991 г. экономическими условиями объем отечественного производства электронных возбудителей дуги существенно сократился, однако и в настоящее время их изготовление осуществляется в ряде зарубежных стран (в основном в составе технологических установок), а также небольшими партиями в Украине и России, и одновременно с этим продолжают работы по совершенствованию таких устройств.

Выводы

1. С использованием решений известных линейных дифференциальных уравнений второго порядка вы-



полнен анализ электромагнитных процессов в схеме базового варианта построения электронных возбуждателей дуги с независимым питанием и последовательным включением в цепь дуги, получивших наибольшее распространение среди вольтдобавочных устройств для бесконтактного первоначального поджига и стабилизации горения дуги.

2. На основе выполненного анализа и с учетом опыта разработки, проектирования, изготовления и эксплуатации возбуждателей дуги с независимым питанием и последовательным включением в цепь дуги разработана инженерная методика расчета таких устройств и выработаны рекомендации по выбору их элементной базы.

3. В последние десятилетия все большее применение получают электронные возбуждители дуги, в генераторной части которых формирование повышенного напряжения осуществляется с помощью умножения напряжения или резонансной накачки, при этом полупроводниковый коммутирующий ключ подключен параллельно последовательному соединению емкостного накопителя и первичной обмотки выходного импульсного трансформатора. Анализ и методика расчета таких устройств требуют отдельного рассмотрения, что, однако, выходит за рамки настоящей работы.

В заключение авторы выражают свою признательность инженерам В. Ю. Буряку, А. Г. Скирте и Д. С. Оляненко за ценную помощь при подготовке данной работы.

1. Патон Б. Е., Завадский В. А. Импульсное зажигание дуги при газозлектрической и ручной дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1956. — № 3. — С.26–35.
2. Голощубов В. И. Зварювальні джерела живлення. — К.: Арістей, 2005. — 448 с.
3. Оборудование для дуговой сварки: Справ.пособие / Под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
4. Пентегов И. В., Дыменко В. В., Склифос В. В. Сварочные источники питания с импульсным поджигом дуги // Автомат. сварка. — 1994. — № 7. — С.36–39.
5. Гуфан Р. М. Исследование сварочных осцилляторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 1967. — 17 с.
6. Темкин Б. Я. Теория и расчет возбуждателей сварочной дуги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1981. — 16 с.
7. Универсальный сварочный осциллятор ИСО / Р. М. Гуфан, В. Г. Золотых, Н. М. Будник и др. // Автомат. сварка. — 1966. — № 8. — С.50–53.
8. Лесков Г. И., Лугин В. П., Светлов А. Т. Подавление радиопомех, создаваемых возбудителями и стабилизаторами дугового разряда // Там же. — 1976. — № 10. — С. 56–59.
9. Подавление радиопомех, создаваемых возбудителем дуги типа УПД-1 / Н. М. Махлин, В. Г. Федотенков, Д. М. Лившиц и др. // Там же. — 1979. — № 12. — С. 55–57.
10. Ланкин Ю. Н., Лапчинский В. Ф., Масалов Ю. А. Генератор импульсов для зажигания сварочной дуги // Там же. — 1969. — № 10. — С. 61–63.
11. Дудко Д. А., Федотенков В. Г., Махлин Н. М. Тиристорные генераторы импульсов типа УПД-1 // Там же. — 1980. — № 6. — С. 61–63.

12. Федотенков В. Г., Махлин Н. М., Темкин Б. Я. Генератор импульсов для возбуждения и стабилизации дуги переменного тока // Свароч. пр-во. — 1981. — № 8. — С. 33–34.
13. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дыменко, А. Ф. Шатан. — Киев: ЭкоТехнология, 2007. — 248 с.
14. Теоретические основы электротехники: Справочник по теории электрических цепей / Под ред. Ю. А. Бычкова, В. М. Золотницкого, Э. П. Чернышова. — СПб.: Питер, 2008. — 349 с.
15. Левинштейн М. Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. — Л.: Энергия, 1972. — 360 с.
16. <http://www.dacpol.com.pl>
17. <http://www.elcod.spb.ru>
18. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В. Я. Замятин, В. Кондратьев, В. М. Петухов. — М.: Радио и связь, 1988. — 576 с.
19. Ермолин Н. П. Расчет трансформаторов малой мощности. — Л.: Энергия, 1969. — 192 с.
20. Баев Е. Ф., Фоменко Л. А., Цымбалюк В. С. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками. — М.: Сов. радио, 1976. — 143 с.
21. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1977. — 656 с.
22. Писарев А. Л., Деткин Л. П. Управление тиристорными преобразователями. — М.: Энергия, 1975. — 264 с.
23. Земан С., Осипов А., Сандырев О. Особенности работы высокочастотного трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора // Силовая электроника. — 2007. — № 1. — С. 67–72.
24. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2001. — 608 с.
25. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — 3-е изд., перераб. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — Т. 3. — 728 с.
26. <http://www.epcos.com>
27. Тиристоры (Технический справочник) / Пер. с англ. под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова. — 2-е изд., доп. — М.: Энергия, 1971. — 560 с.
28. Готтлиб И. М. Источники питания. Инверторы, конвертеры, линейные и импульсные стабилизаторы / Пер. с англ. под ред. С. А. Лужанского. — М.: Постмаркет, 2002. — 544 с.
29. А. с. СССР 567563. Устройство для возбуждения и стабилизации процесса горения дуги / Э. И. Шмаков, В. Г. Федотенков, Г. Ф. Колесник и др. — Оpubл. БИ № 29, 1977.
30. А. с. СССР 1202768. Устройство для возбуждения дуги / В. Г. Федотенков, Н. М. Махлин, П. С. Турчин. — Оpubл. БИ № 1, 1986.
31. А. с. СССР 1115174 МКИ H 02 M 1/08. Устройство для включения тиристоров / Ю. Е. Иванов, В. В. Козак, В. П. Лиходед и др. — Оpubл. БИ № 35, 1984.
32. Применение переменного тока для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей, алюминия и его сплавов / Э. И. Шмаков, Н. М. Махлин, В. Г. Федотенков и др. // Монтажные и специальные работы в стр-ве. — 1978. — № 4. — С. 20–22.
33. Применение ручной дуговой сварки модулированным током при изготовлении и монтаже трубопроводов малого диаметра / П. Н. Бугаев, В. С. Сидорук, Н. М. Махлин и др. // Монтажные и специальные строительные работы. Сер. 19. Монтаж и наладка средств автоматизации и связи. — 1986. — № 11. — С. 26–28.
34. Мощный возбудитель — стабилизатор сварочной дуги / В. В. Чигарев, Н. А. Грановский, К. А. Кондрашов, Н. А. Макаренко // Свароч. пр-во. — 2007. — № 7. — С. 14–16.

Поступила в редакцию 15.07.2013

УДК 621.791:658.011.54

40 ЛЕТ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ БАШНИ КИЕВСКОГО ТЕЛЕЦЕНТРА

Л. М. ЛОБАНОВ, Э. Ф. ГАРФ, Л. Н. КОПЫЛОВ, А. Г. СИНЕОК

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

Изложены основные моменты, связанные с выполнением сборочно-сварочных работ при строительстве башни Киевского телецентра. Особое внимание уделено применению автоматической сварки при наращивании стоек башни, поскольку такое решение впервые использовано в практике строительства высотных сооружений.

Ключевые слова: башня, сварка, автоматическая сварка, ручная дуговая сварка, трубы, узлы

Исполнилось 40 лет со дня ввода в эксплуатацию башни Киевского телецентра. При строительстве башни использованы новые конструктивные и технологические решения, призванные показать успехи и достижения киевской школы проектирования в области металлостроительства и возможности современных сварочных технологий. Несмотря на жесткое сопротивление предложенному проекту телебашни со стороны Всесоюзного объединения по проектированию строительных металлических конструкций, а также благодаря активной поддержке президента АН Украины Б. Е. Патона и правительства УССР, его удалось отстоять и реализовать.

К основным достоинствам проекта телебашни, которые могут служить примером для подражания и сегодня, о которых нельзя не упомянуть, следует, прежде всего, отнести:

- использование для элементов башни трубчатых сечений, изготовленных из высокопрочной стали;
- применение узловых соединений с непосредственным примыканием элементов друг к другу;
- изготовление цельносварного сооружения с высоким процентом использования автоматической сварки;
- применение монтажа башни способом «подращивания» впервые в отечественной практике для подобных сооружений.

Важным компонентом для успешной реализации этих прогрессивных новшеств являлась сварка. Заметим, что объем сварки при сооружении башни был достаточно высок, поскольку трубы изготавливали из листа и укрупняли с помощью кольцевых стыков. При монтаже все соединения также выполняли с помощью сварки.

При сооружении башни использовали автоматическую сварку в среде углекислого газа и ручную электродугую сварку плавящимся электродом.

Изготовление труб. Трубы изготавливали из листа на Ждановском заводе тяжелого машиностроения (ЖЗТМ). Технологический процесс изготовления труб предусматривал такую последовательность операций.

Обработка кромок и снятие фасок под два продольных стыковых шва;

Холодная штамповка заготовок (полутруб) длиной 4000 мм.

Сборка и сварка труб на специально изготовленном стенде. Сварку наружных и внутренних продольных стыковых швов выполняли в соответствии с разработанной ИЭС им. Е. О. Патона и лабораторией ЦНИИТС технологией. При этом использовали специально разработанный малогабаритный трактор ТС-42 для сварки под флюсом внутренних продольных швов. Для автоматической сварки под флюсом применяли сварочную проволоку марки Св-08Н2М в сочетании с флюсом марки 138КФ-1.

Контроль качества сварных соединений.

Термическая обработка труб для снятия внутренних напряжений в трубе, образовавшихся в процессе формовки корыт и сварки продольных швов.

Калибровка концов труб в холодном состоянии, позволяющая без особых затруднений осуществлять их стыковку.

Завершающая операция – снятие фасок под сварку на концах труб.

Автоматическая сварка кольцевых стыков поясов при монтаже башни. Принятый при разработке проекта башни способ монтажа «подращиванием» позволил все основные сборочно-сварочные работы по сварке колонн ствола башни выполнять со стационарных монтажных площадок, расположенных на высоте 18 м от поверхности земли, закрепленных на направляющем кондукторе, находящемся внутри ствола башни (рис. 1).



Рис. 1. Откидная монтажная площадка для выполнения автоматической сварки

Это позволило применить автоматическую сварку при наращивании наиболее ответственных элементов башни (8 вертикальных колонн поясных труб диаметром 550 мм с толщиной стенки 18 и 22 мм) и таким образом реализовать все преимущества автоматической сварки как с точки зрения обеспечения качества, так и с позиций трудоемкости.

На начальном этапе выполняли работы по разработке техники и технологии сварки. Основные задачи, решаемые на этом этапе: обеспечение высокого качества сварного шва и прочности сварного соединения не ниже прочности основного металла; получение максимальной производительности сварочного процесса.

Экспериментальные работы по разработке техпроцесса автоматической сварки были выполнены группой сотрудников (руководитель В. С. Кривошея, ведущие инж. Л. Н. Копылов, В. М. Зиль) под руководством лауреата Ленинской премии Б. Я. Дубовецкого и д-ра техн. наук В. Ф. Лебедева. К работе привлекались также научно-исследовательские лаборатории института. Для экспериментальных исследований по разработке техники и технологии сварки горизонтальных швов на вертикальной плоскости была смонтирована лабораторная установка, на которой сваривали натурные образцы труб.

После сварки обечаек контролировали качество сварного шва (ультразвуковая дефектоскопия, гаммаграфирование), затем из сварного соединения вырезали заготовки, изготавливали



Рис. 2. Макрошлиф сварного соединения трубы, выполненного автоматической сваркой в среде углекислого газа

образцы для механических и металлографических исследований. По результатам испытаний проводили корректировку параметров сварочного процесса, которая учитывалась при выполнении последующих экспериментов.

Поясные трубы ствола башни были изготовлены из стали марки ИЗ-138 с повышенными прочностными характеристиками. Эта сталь, выплавленная на Ижорском металлургическом заводе, впервые использовалась в практике строительства объектов башенного типа, поэтому необходимо было выполнить большой объем исследований по ее свариваемости. При проведении экспериментов столкнулись с рядом трудностей. В частности, на начальном этапе исследований, при проведении механических испытаний сварных соединений не удавалось получить положительные результаты при испытании образцов на загиб (требование — 180°). Необходимых результатов удалось достичь после применения простого технологического приема — наплавки четырех-пяти отжигающих валиков на нижней и верхней кромках стыка (рис. 2).

В результате выполненных экспериментальных работ была установлена оптимальная V-образная разделка кромок стыкового соединения трубы с минимальной площадью поперечного сечения сварного шва. Скос нижней кромки равен 11, верхней — 27°. Были определены основные параметры технологического процесса, разработана техника автоматической сварки горизонтальных кольцевых швов на вертикальной плоскости, обеспечивающая получение бездефектных сварных соединений.

Разработанный технологический процесс обеспечивал равнопрочность сварного соединения и основного металла труб.

На основании данных, полученных при разработке техники и технологии сварки, были разработаны Технологическая инструкция по сварке монтажных стыков ствола башни и Техническое задание на проектирование оборудования для автоматической сварки горизонтальных кольцевых стыков.

Разработка конструкции аппарата для сварки монтажных стыков поясных труб ствола башни выполнялась под руководством канд. техн. наук В. Е. Патона. Основными исполнителями проектной документации были Ю. И. Сапрыкин и В. Н. Котов. При разработке конструкции допущено, что при монтаже ствола башни снимались нагрузки одновременно с двух диаметрально расположенных вертикальных колонн. Таким образом, можно было выполнять сварку одновременно двух стыков. Поэтому, с целью сокращения затрат на переустановку сварочного оборудования и обеспечения максимальной производительности сварочных работ, было принято решение при монтаже башни одновременно использовать два комплекта сварочных автоматов, а для удобства транспортировки аппаратуры при сварке последующих стыков расположить автоматы на транспортной тележке.

Коллективом конструкторов ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона была разработана конструкция специализированного сварочного автомата А-1311, состоящего из сварочной головки с направляющим рельсом (рис. 3).

На Опытном заводе сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона были изготовлены два комплекта сварочных автоматов А-1311. Оборудование прошло технологические испытания и было передано СМУ-21 Минмонтажспецстроя УССР.

Специалистами ИЭС им. Е. О. Патона было проведено обучение бригады сварщиков монтажной организации, которые за короткий период успешно освоили технику автоматической сварки и приемы работы на сварочных автоматах, были аттестованы и получили допуск на выполнение работ по автоматической сварке монтажных стыков поясных труб башни. Для качественного выполнения автоматической сварки был выполнен ряд организационно-технических мероприятий:

- на строительной площадке оборудован стенд для предварительной контрольной сборки свариваемых труб;

- в зоне монтажных площадок смонтированы дорожки, обеспечивающие возможность транспортировки сварочных автоматов от стыка к стыку;

- оборудованы откидные площадки, которые устанавливались на время сварки монтажного стыка и опускались во время подъема башни;

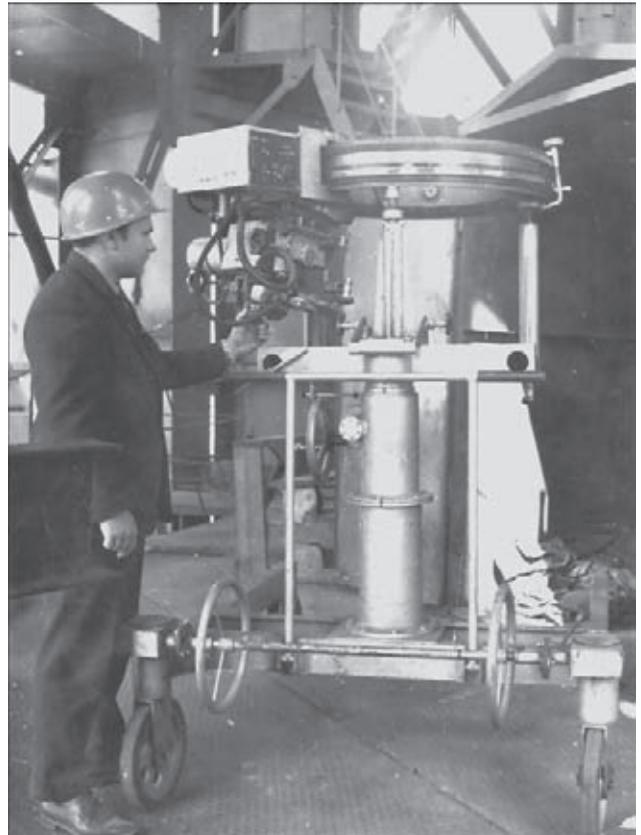


Рис. 3. Сварочный аппарат А-1311 на технологической транспортной тележке

- изготовлены быстросъемные палатки, которые защищали от ветра монтажную площадку во время сварки;

- обеспечены освещением монтажные площадки для сварки.

Работы по монтажу башни, а также автоматическая сварка монтажных стыков поясных труб велись в две смены. Был отработан техпроцесс их сборки и сварки.

На стенд для контрольной сборки труб укладывали две трубы, которые должны были стыковаться друг с другом, подбирали наиболее благоприятное расположение стыкуемых торцов. На торец той трубы, которая будет нижней при сборке монтажного стыка, устанавливали бочкообразное металлическое подкладное кольцо толщиной 4 мм. Затем, со стороны наружной поверхности трубы, кольцо приваривали к корневому участку трубы сплошным швом по всему периметру кольца. На наружной поверхности труб краской нанесли метку, позволяющую при сборке повторить данное положение труб. После разгрузки двух диаметрально расположенных домкратов, обеспечивающих подъем башни, на толкатели домкратов устанавливали нижнюю трубу, при помощи домкратов трубу подводили к нижнему торцу верхней трубы и выставляли технологический зазор в корне.

Для сварки автомат на тележке подвозили к месту сварки, закрепляли на свариваемом стыке, тележку убирали с монтажной площадки и устанавливали защитную палатку.

Монтажный стык собирали с технологическим зазором в корне 3,0...4,0 мм. Многопроходную сварку монтажного стыка выполняли с предварительным подогревом кромок до температуры 180...200 °С. Для подогрева использовали многопламенную газовую бескислородную горелку, которую закрепляли на сварочном аппарате впереди сварочного мундштука. После нагрева начального участка стыка до необходимой температуры включался сварочный процесс. Для сварки применяли электродную проволоку марки Св-10ГСМТ диаметром 1,2 мм. Сварку внутренних проходов шва выполняли на токе 230...250 А при напряжении дуги 23...24 В. Режим облицовочных проходов: ток – 50...180 А, напряжение – 19...21 В. В зависимости от толщины стенки трубы (18, 22 мм) для заполнения разделки необходимо было наплавить 16...20 проходов. Линейная скорость сварки отдельных проходов – 13...15 м/ч. При сварке выполняли периодическую зачистку поверхности шва абразивным инструментом от шлака. После окончания сварки стыка абразивным инструментом выполняли зачистку поверхности сварного соединения – шву придавали бочкообразную форму. Такая обработка повышает эксплуатационные характеристики сварного соединения и дает возможность качественно выполнять ультразвуковой контроль шва. Затем проводили 100%-ный ультразвуковой контроль сварного соединения. При



Рис. 4. Контроль качества сборки кольцевого стыка

необходимости для уточнения результатов применяли гаммаграфирование. За весь период строительства не было ни одного случая исправления дефектов шва. Общее время сварки одного стыка с наладкой оборудования, установкой и демонтажем защитной палатки не превышало 2,5 ч, из которого сварка занимало не более 1,5 ч.

На протяжении всего периода строительства башни Киевского телецентра специалисты ИЭС им. Е. О. Патона обеспечивали авторский контроль на всех этапах сборочно-сварочных работ металлоконструкций ствола башни (рис. 4), что способствовало повышению качества сварных соединений.

Ручная электродуговая сварка. Значительный объем работ при строительстве башни выполнен ручной электродуговой сваркой плавящимся электродом. Контроль за всеми операциями, связанными с ручной сваркой, осуществляла группа сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона, возглавляемая В. А. Ковтуненко.

Способ монтажа «подрачиванием» позволил сварку элементов решетки (сталь 20) со стойками башни выполнять на небольшой высоте – в пределах двух ярусов. Поскольку соединение элементов решетки со стойками осуществлено путем непосредственного примыкания по пространственной кривой, большое внимание уделяли прирезке концов труб элементов решетки (завод им. И. В. Бабушкина). Для этого заводом совместно с ВНИИ «Автомат» и Одесским заводом «Автогенмаш» была изготовлена установка, обеспечившая прирезку концов необходимого качества. Лишь в отдельных случаях при монтаже требовалась подгонка для обеспечения нужных зазоров.

Собранные соединения элементов допускались к сварке после их приемки представителем ИЭС им. Е. О. Патона и инспектором по сварке СМУ-21, с регистрацией в журнале сборочных работ. На соединении наносили маркировку, разрешающую выполнять сварку.

Сварку выполняли низководородными электродами марки 48Н-1, обеспечивающими механические свойства сварного соединения на уровне стали класса С-60. Сварку вели при температуре не ниже –15 °С. Независимо от температуры окружающей среды, при сварке узловых соединений применялся предварительный подогрев до температуры +50...60 °С с целью удаления конденсата. Сварку выполняли ниточными многослойными швами (рис. 5).

Западание между валиками регламентировалось в пределах 1,0...1,2 мм, с плавным переходом от металла шва к основному металлу.

Соединения на участках полного провара контролировали ультразвуковым способом. В от-

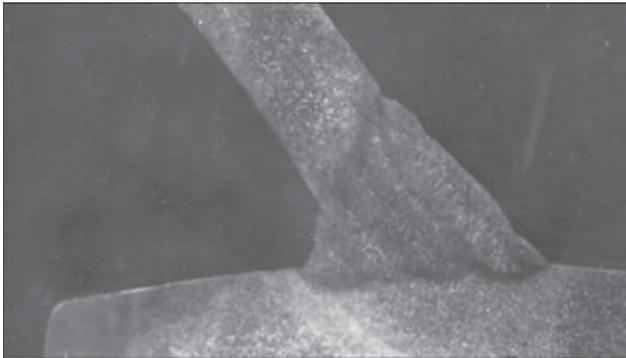


Рис. 5. Макрошлиф соединения, выполненного ручной электродуговой сваркой

дельных местах, требующих углубленной расшифровки результатов контроля, применяли гаммаграфирование. Разработку методик и осуществление контроля выполняли сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона.

Ручной электродуговой сваркой выполнено значительное количество стыковых соединений труб в опорной части, стойке решетчатой части антенны «Алтай» и стволе антенны.

Стыковые соединения выполнялись на подкладном кольце с использованием тех же сварочных материалов. В ИЭС им. Е. О. Патона отработывалась технология и техника сварки, оптимальные режимы, обеспечивающие стабильное качество сварных соединений. Все сварщики проходили квалификационный отбор с обязательной

сваркой контрольных образцов. При сварке стыков из стали марки 14ХГН2МД (ИЗ-138) обязательным был предварительный подогрев до температуры 160...200 °. В остальном требования к сварным соединениям были аналогичны принятым для узловых соединений.

Ручной электродуговой сваркой выполняли и другие соединения (каркас здания, связи, площадки).

В заключение хотелось бы отметить, что и по прошествии 40 лет башня Киевского телецентра – образец совершенства инженерной мысли, а также высокого уровня проектирования и технологий, использованных при строительстве.

В создании башни принимало участие большое количество инженеров-проектировщиков, ученых, монтажников, инженеров и рабочих строительных специальностей. Каждый внес свою важную часть в создание уникального сооружения, украшающего Киев и сегодня. По случаю юбилейной даты со дня создания башни хотелось бы особо отметить вклад О. И. Шумицкого и В. И. Новикова, которые приложили огромные усилия для реализации проекта в том виде, в котором он осуществлен, решившихся на новые для того времени и неординарные инженерные решения. И необходимо отметить поддержку новых идей со стороны Б. Е. Патона, без которой реализация проекта в тех условиях была бы нереальна.

Поступила в редакцию 16.07.2013

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

16-18 июня 2014 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона состоится Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы».

ОРГАНИЗАТОРЫ:

- ◆ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- ◆ Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ, Международная ассоциация «Сварка»
- ◆ Общество сварщиков Украины
- ◆ Российское научно-техническое сварочное общество

На конференции предполагается обсудить актуальные вопросы разработки, производства и промышленного применения сварочных и наплавочных материалов, включая покрытые электроды, проволоки порошковые и сплошного сечения, ленты, флюсы, порошки. Планируется издание сборника по итогам работы конференции.

Для участия в работе конференции необходимо до 1 марта 2014 г. прислать заявку на адрес: office@association-electrode.com или journal@paton.kiev.ua.

Контакты: 03680, г. Киев, ул. Горького, 54, Дирекция Ассоциации «Электрод».

Тел.: +38 (044) 200-63-02, +38 (044) 200-82-77, +38 (044) 200-80-62.

Факсы: +38 (044) 287-72-35, +38 (044) 200-82-77.

E-mail: association-electrode.com; journal@paton.kiev.ua. <http://www.association-electrode.com>



РАСЧЕТ УСИЛИЯ ОСАДКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ИЗДЕЛИЙ ЗАМКНУТОЙ ФОРМЫ

П. Н. ЧВЕРТКО, А. В. МОЛТАСОВ, С. М. САМОТРСОВ

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

В элементах конструкций летательных аппаратов широко применяются кольцевые изделия из высоколегированных сталей и сплавов. Для производства таких конструктивных элементов применяются различные способы сварки плавлением, в том числе контактная стыковая сварка оплавлением. Технология контактной стыковой сварки таких изделий требует высоких скоростей осадки ≥ 50 мм/с с удельным усилием не менее 120...200 МПа. При контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы важно определить величину необходимого усилия осадки. При неограниченном или недостаточном усилии осадки не будут соблюдены необходимые условия формирования соединения в твердой фазе, а при перегреве укорочение детали будет слишком велико. И то, и другое приводит к нарушению формы кольцевых изделий, в частности, его периметра. В процессе сварки в свариваемом изделии возникают упругие усилия, препятствующие формированию соединения, которые необходимо определить при разработке технологии и оборудования для сварки. Кроме того, при сварке кольцевых заготовок большого сечения, отличающихся значительной упругостью, следует учитывать возможность разрыва сваренного стыка за счет упругости кольцевой заготовки при недостаточном времени осадки без протекания электрического тока. Расчет упомянутых выше усилий проводили по теории тонких стержней в условиях, когда напряженно-деформированное состояние считалось линейным. Также провели расчет данных усилий методами теории упругости, в результате была решена плоская задача теории упругости. Сравнение результатов расчета восьми колец с различными характерными размерами показало, что максимальное различие величин усилия осадки, рассчитанных по теории тонких стержней и формулам плоской задачи, составило около 2 %, а величины усилий, разрывающих стык после сварки, — менее 1 %. Причем, при уменьшении отношения внешнего радиуса кольца ко внутреннему его радиусу точность расчета по теории тонких стержней возрастает. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, кольца, высоколегированные стали, напряженно-деформированное состояние, усилие осадки, теория тонких стержней, плоская задача

В промышленности для производства деталей и конструкций замкнутой формы различного назначения (элементов двигателей, различных бандажей, поворотных кругов, подшипников, фланцев и пр.) применяют различные способы сварки (дуговую, электронно-лучевую, контактную и др.), от которых существенно зависят эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Одним из наиболее экономичных и технически простых процессов изготовления кольцевых заготовок является контактная стыковая сварка (КСС) [1]. Этот способ обеспечивает высокое стабильное качество сварных соединений, объединяет в едином цикле сварочные и сборочные операции и не требует применения вспомогательных расходных материалов (электродов, флюсов, сварочных проволок, защитных газов и т.д.).

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и оборудование [2] для контактной стыковой сварки кольцевых изделий в промышленных условиях (рис. 1). В основу технологии положен способ контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением [3], который обеспечивает высококонцентрированный нагрев, вследствие чего уменьшается зона термического влияния (ЗТВ).

Расчетная схема нагружения кольца, на которое

действует усилие осадки P и реактивный момент от подвижного зажимного устройства установки M , соответствующая рис. 1, изображена на рис. 2. В качестве первого приближения можно предположить, что размеры поперечного сечения кольца малы по сравнению с его средним радиусом, тогда задача может быть решена по теории тонких стержней.

Для определения силы P целесообразно связать ее с величиной упругого перемещения δ_y от начального зазора до конечного положения с учетом укорочения детали вследствие оплавления и

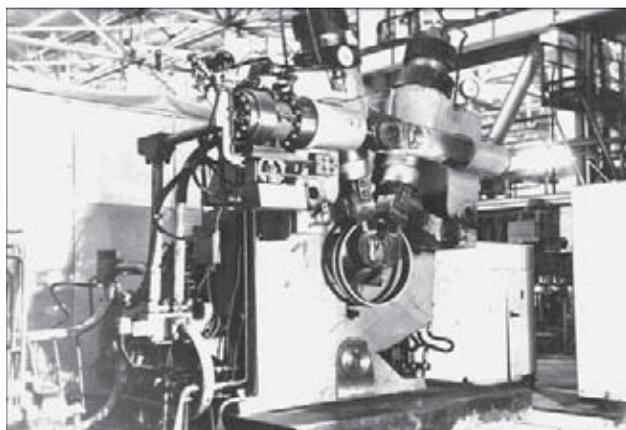


Рис. 1. Кольцевая заготовка в зажимных устройствах стыкосварочной машины K607

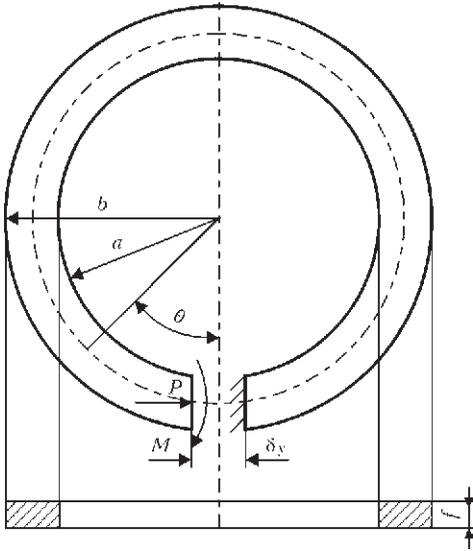


Рис. 2. Схема нагружения кольца при контактной стыковой сварке

осадки. Величину упругого перемещения в криволинейном контуре следует определять при помощи интегралов Мора:

$$\delta_y = \int_s \frac{\bar{M} \cdot M_p ds}{EI_z}, \quad (1)$$

где \bar{M} — выражение для момента от единичной силы, приложенной в направлении силы P ; M_p — выражение для момента от активных и реактивных сил; I_z — момент инерции сечения; E — модуль упругости первого рода.

Используя канонические уравнения метода сил [4] нашли величину реактивного момента $M = P(a + b)/2$. С учетом этого выражение для изгибающего момента в сечениях кольца имеет вид

$$M_p = \frac{1}{2} P(a + b) \cos \theta. \quad (2)$$

Выражение для определения момента от действия единичной силы $\bar{P} = 1$ записываем в виде

$$\bar{M} = \frac{1}{2} (a + b) (1 - \cos \theta). \quad (3)$$

Подставив выражения (2) и (3) в (1), определили величину упругого перемещения

$$\delta_y = \frac{1}{EI_z} \left[2 \int_0^\pi \frac{1}{2} P(a + b) \cos \theta \frac{1}{2} (a + b) \times \right. \\ \left. \times (1 - \cos \theta) \frac{1}{2} (a + b) d\theta \right] = \frac{\pi P(a + b)^3}{8EI_z},$$

откуда можно получить усилие осадки

$$P = \frac{8EI_z}{\pi(a + b)^3} \delta_y. \quad (4)$$

Более точное решение этой задачи получаем, решая плоскую задачу теории упругости. Это решение принадлежит Х. С. Головину и подробно описано в работе [5], поэтому приводим только

выражения для напряжений

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\partial \varphi}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{r^2 \partial \theta^2} = \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \cos \theta, \\ \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \left(6Ar + \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \cos \theta, \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \varphi}{r \partial \theta} \right) = \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \sin \theta, \end{cases} \quad (5)$$

где A , B и D — постоянные, определяемые из граничных условий. В нашем случае они равны

$$A = -\frac{P}{2R}; \quad B = \frac{Pa^2b^2}{2R}; \quad D = \frac{P}{R}(a^2 + b^2), \quad (6)$$

причем

$$R = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}.$$

В отличие от работы [5], где при рассмотрении перемещений использовали функции комплексного переменного, мы использовали методику, которая применялась в [6] при решении задачи о действии касательной силы, приложенной на конце криволинейного стержня.

Компоненты деформации в полярных координатах имеют вид

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta}; \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}. \quad (7)$$

Через компоненты напряжения (5) компоненты деформации при плоском напряженном состоянии выражаются следующим образом:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta); \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu \sigma_r); \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G}, \quad (8)$$

где

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Сопоставив выражения для ϵ_r из (7) и (8) с учетом (5), после интегрирования получили

$$u = \frac{\cos \theta}{E} \left[Ar^2(1 - 3\mu) + \frac{B}{r^2}(1 + \mu) + \right. \\ \left. + D(1 - \mu) \ln r \right] + f(\theta), \quad (9)$$

где $f(\theta)$ — функция, зависящая только от аргумента θ , которая будет определена ниже. Полученное выражение (9) подставим в выражение для ϵ_θ из (7) с учетом (8), проинтегрировав, получаем

$$v = \frac{\sin \theta}{E} \left[Ar^2(5 + \mu) + \frac{B}{r^2}(1 + \mu) + \right. \\ \left. + D(1 - \mu)(1 - \ln r) \right] - \int f(\theta) d\theta + F(r), \quad (10)$$

где $F(r)$ — функция, зависящая только от аргумента r , которая также будет определена ниже. Подставив полученное выражение (10) вместе с выраже-



нием (9) в выражение для $\gamma_{r\theta}$ из (7) с учетом (8) получаем уравнение

$$\frac{4D \sin \theta}{E} = r \frac{dF}{dr} + \int f(\theta) d\theta - F(r) + \frac{df(\theta)}{d\theta},$$

которое должны удовлетворять функции $f(\theta)$ и $F(r)$. Эти функции были определены авторами в следующем виде:

$$f(\theta) = \frac{2D}{E} \theta \sin \theta + K \sin \theta + L \cos \theta; \quad F(r) = Hr, \quad (11)$$

где K, L, H – произвольные постоянные, определяемые из условий закрепления.

С учетом (11) выражения для компонент перемещения имеют вид

$$\begin{cases} u = \frac{2D}{E} \theta \sin \theta + \frac{\cos \theta}{E} \left[Ar^2(1-3\mu) + \frac{B}{r^2}(1+\mu) + D(1-\mu) \ln r \right] + K \sin \theta + L \cos \theta; \\ v = \frac{2D}{E} \theta \cos \theta + \frac{\sin \theta}{E} \left[Ar^2(5+\mu) + \frac{B}{r^2}(1+\mu) + D[(1-\mu)(1-\ln r) - 2] \right] + K \cos \theta - L \sin \theta + Hr. \end{cases} \quad (12)$$

Тангенциальное перемещение свободного конца можно получить, подставив в выражение для v значение $\theta = 0$, тогда

$$v(\theta = 0) = K + Hr. \quad (13)$$

Постоянные K, H определяются из условий на неподвижно закрепленном конце $\theta = 2\pi$, где имеем $v = 0, \partial v / \partial r = 0$. Подставив это в выражение для v из (12) определили неизвестные постоянные

$$K = -\frac{4\pi D}{E}; \quad H = 0. \quad (14)$$

Таким образом, используя формулы (6), найдем при $\theta = 0$

$$v = \delta_y = -\frac{4\pi P(a^2 + b^2)}{E \left[a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right]}. \quad (15)$$

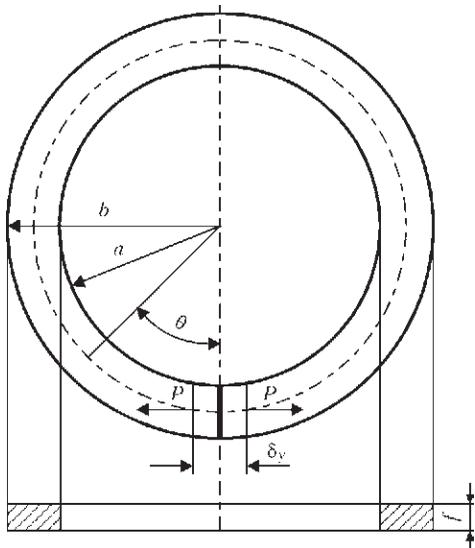


Рис. 3. Схема нагружения кольца после сварки

Из формулы (15) определяем усилие осадки

$$P = -\frac{E\delta_y t}{4\pi(a^2 + b^2)} \left[a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right]. \quad (16)$$

Знак «-» свидетельствует о том, что направление перемещения v не совпадает с направлением возрастания θ . Следует отметить, что в формулу (16) введена толщина t , так как при решении плоской задачи мы получили бы силу на единицу толщины. Брак и дефекты при сварке в основном выявляются после операции калибровки или в процессе последующей механической обработки. Дефектными можно считать те кольца, в которых при снятии усилия осадки в стыке образуются трещины или происходит разрушение вдоль сварного стыка.

При определении усилия, стремящегося разорвать стык после сварки, необходимо учитывать, что при снятии усилия осадки реактивный момент перестает действовать, так как зажимное устройство, создающее данную реакцию, открыто. Таким образом, когда сварное изделие пытается вернуться к прежней геометрической форме, напряженное состояние обусловлено только действием силы P , направленной в противоположном направлении к усилию осадки (рис. 3).

Для решения этой задачи по теории тонких стержней достаточно в выражение (1) вместо (2) подставить

$$M_p = \frac{1}{2} P(a+b)(1 - \cos \theta), \quad (17)$$

тогда получим

$$\begin{aligned} \delta_y = \frac{1}{EI_z} \left[2 \int_0^{\pi} \frac{1}{2} P(a+b)(1 - \cos \theta) \frac{1}{2}(a+b) \times \right. \\ \left. \times (1 - \cos \theta) \frac{1}{2}(a+b) d\theta \right] = \frac{3\pi P(a+b)^3}{8EI_z}, \end{aligned}$$

откуда можно получить усилие, стремящееся разорвать стык после сварки

$$P = \frac{8EI_z}{3\pi(a+b)^3} \delta_y. \quad (18)$$

Как видно из выражения (18) в рамках теории тонких стержней усилие P , стремящееся разорвать стык после сварки, всегда в 3 раза меньше усилия осадки, определяемого по формуле (4).

Необходимо отметить, что формула (18) совпадает с формулой, полученной в работе [7] иным способом. Для решения задачи методами теории упругости необходимо вычесть из выражений (5) напряжения, возникающие под действием момента (рис. 4). Решение этой задачи также принадлежит Х. С. Головину и имеется в литературе [5, 6].

Результаты расчета усилий осадки и усилий, разрывающих стык после сварки

a , мм	b , мм	t , мм	δ_y , мм	$P_{св}$ (4), кН	$P_{св}$ (16), кН	$\Delta P_{св}$, %	$P_{разр}$ (18), кН	$P_{разр}$ (20), кН	$\Delta P_{разр}$, %
160	210	10	13	13,62	13,48	1,08	4,54	4,52	0,52
180	230	12	14	12,94	12,83	0,88	4,31	4,29	0,43
255	347	14	20	42,44	41,86	1,37	14,15	14,05	0,67
243	323	16	19	36,45	36,03	1,18	12,15	12,08	0,57
241	351	16	22	95,89	94,00	2,01	31,96	31,65	0,98
175	215	22	16	16,13	16,03	0,63	5,38	5,36	0,31
181	216	25	16	11,64	11,58	0,46	3,88	3,87	0,26
356	421	25	21	13,05	13,00	0,42	4,35	4,34	0,23

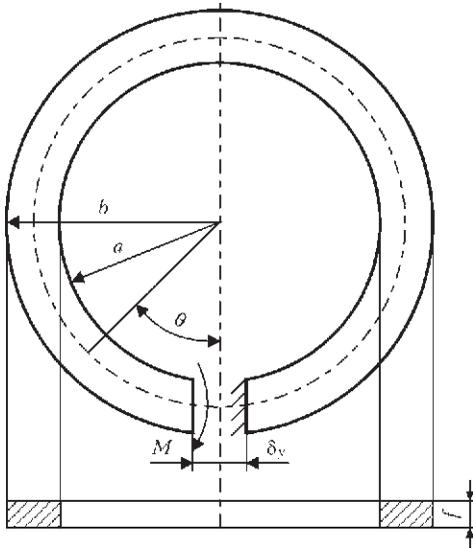


Рис. 4. Расчетная схема кольца, изгибаемого моментом в плоскости кривизны

$$v = \frac{8\pi M(a+b)(b^2 - a^2)}{E \left[(b^2 - a^2)^2 - 4a^2b^2 \left(\ln \frac{b}{a} \right)^2 \right]} \text{ при } \theta = 2\pi. \quad (19)$$

Величина упругой деформации δ_y состоит из перемещения, даваемого формулой (15), взятого с противоположным знаком, и перемещения, даваемого формулой (19). Имея в виду, что $M = P(a + b)/2$ и умножая на толщину t , получим выражение для силы, действующей на стык после сварки

$$P = \frac{E\delta_y t}{4\pi N}, \quad (20)$$

где

$$N = \frac{(a^2 + b^2)}{a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}} + \frac{(a+b)^2(b^2 - a^2)}{(b^2 - a^2)^2 - 4a^2b^2 \left(\ln \frac{b}{a} \right)^2}.$$

Результаты расчетов для восьми типовых колец из стали 12Х18Н10Т ($E = 200000$ МПа), которые используются в элементах конструкций летательных аппаратов, производимых на ГП «ПО ЮМЗ им. А. М. Макарова», приведены в таблице.

В таблице приведены результаты расчета усилий осадки, рассчитанных по теории тонких

стержней (4) и с использованием методов теории упругости (16), максимальное отклонение $\Delta P_{св}$ составляет около 2 %. Аналогично при помощи формул (18) и (20) были рассчитаны усилия, стремящиеся разорвать стык после сварки, при этом максимальное отклонение $\Delta P_{разр}$ составило менее 1 %. Это свидетельствует о том, что в данном случае теория тонких стержней дает очень точные результаты. Кроме того, можно заметить, что ошибка уменьшается при уменьшении соотношения b/a (действительно, если b стремится к a , мы получим тонкий стержень и ошибка устремится к нулю).

Выводы

1. С использованием двух аналитических методов расчета получены выражения для определения усилия осадки, необходимого при контактной стыковой сварке кольцевых заготовок, и усилия, стремящегося разорвать стык после сварки.

2. Приведены результаты расчетов по формулам, полученным на основании разных расчетных методов, для восьми типовых колец. Максимальное отклонение значения усилия осадки составило около 2 %, для разрывающего усилия — менее 1 %.

3. Разработана технология и оборудование для промышленного изготовления колец из жаропрочных сплавов и сталей типа 12Х18Н10Т, ЭИ711 и ЭИ712 с диаметром срединной поверхности от 370 до 777 мм и площадью поперечного сечения от 500 до 1760 мм².

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. — 2013. — № 7. — С. 3–7.
3. Пат. 46820 Украина. Способ контактной стыковой сварки / С. И. Кучук-Яценко, В. А. Дидковский, М. В. Богорский и др. — Опубл. 17.06.2002.
4. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.: Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 704 с.
5. Лурье А. И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
7. Кочергин К. А. Выбор технологии контактной сварки. — Л.: Судпромгиз, 1952. — 110 с.

Поступила в редакцию 25.08.2013



СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Т110, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ

С. В. АХОНИН¹, В. Ю. БЕЛОУС¹, С. Л. АНТОНЮК², И. К. ПЕТРИЧЕНКО¹, Р. В. СЕЛИН¹

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

² ГП «Антонов». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: lavrenko@antonov.com

Сварку высокопрочных титановых сплавов в настоящее время возможно выполнять дуговым способом, электронным лучом в вакууме (ЭЛС), лазерным лучом. Известны успешные примеры применения совмещенного лазерно-дугового процесса для выполнения сварных соединений титановых сплавов. В ряде случаев отмечается отрицательное влияние термического цикла ЭЛС и лазерной сварки на свойства ряда легированных титановых сплавов. Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных способов сварки и присадочного металла на механические свойства и структуру сварных соединений на примере высокопрочного титанового сплава Т110. Показано, что высокопрочный титановый сплав Т110 отличается хорошей свариваемостью при выполнении сварных соединений ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом сквозным проплавлением, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой. В качестве присадочной проволоки для аргонодуговой сварки сплава Т110 целесообразно применять проволоку марки СП15, в случае сварки без применения присадочного материала наибольшие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ обеспечивает аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: титановые сплавы, Т110, аргонодуговая сварка, свойства, лазерная сварка, флюс

Титановые сплавы характеризуются высокой прочностью, жаропрочностью при умеренных температурах и коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред. Благодаря таким качествам они находят применение для изготовления ответственных конструкций в самолетостроении, двигателестроении, химической и других областях промышленности. В настоящее время все большее внимание уделяется расширению использования сварных конструкций и узлов из сплавов титана высокой прочности ($\sigma_b \geq 1100$ МПа). Сварка — один из наиболее распространенных технологических процессов при создании сложных деталей и узлов, поэтому свариваемость титанового сплава — это важный фактор, определяющий целесообразность его применения. Однако свариваемость существующих высокопрочных сплавов титана, применение которых может дать наибольшее снижение массы конструкции, значительно хуже, чем сплавов низколегированных, и по этому показателю они уступают даже некоторым высокопрочным сталям. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с ГП «Антонов» разработан новый высокопрочный титановый сплав Т110 системы Ti–Al–Mo–V–Nb–Fe–Zr, содержащий легирующие элементы в количестве (мас. %): (5,0...6,0) алюминия, (3,5...4,8) ниобия, (0,8...1,8) молибдена, (0,8...2,0) ванадия, (1,5...2,5) железа, (0,3...0,8) циркония [1, 2]. Раз-

работанный сплав по своим служебным характеристикам превосходит сплавы ВТ22 и ВТ23.

Сварку высокопрочных титановых сплавов в настоящее время возможно выполнять дуговым способом, электронным лучом в вакууме (ЭЛС), лазерным лучом. Дуговая сварка позволяет изменять химический состав металла шва и имеет такие преимущества как дешевизна и простота оборудования. ЭЛС и сварка лазерным лучом отличаются высокой концентрацией энергии в пятне нагрева и соответственно высокой проплавляющей способностью и производительностью, однако введение присадочного металла при этом затруднительно. В ряде случаев отмечается отрицательное влияние термического цикла ЭЛС и лазерной сварки на свойства ряда легированных титановых сплавов ВТ23, ВТ22 [3], что связано с более высокими скоростями нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Известны успешные примеры применения совмещенного лазерно-дугового процесса для выполнения сварных соединений титановых сплавов [4]. Поэтому представляется целесообразным изучить влияние различных способов сварки на механические свойства и структуру сварных соединений высокопрочного титанового сплава Т110.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных способов сварки и присадочного металла на механические свойства и структуру-

ру сварных соединений на примере высокопрочного титанового сплава Т110.

В ходе работ исследовали свойства сварных соединений титанового сплава Т110 толщиной 7 и 13 мм, выполненных различными способами. Механические свойства основного металла приведены в табл. 1.

Пластины титанового сплава Т110 толщиной 7 мм сваривали ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом (ТИГ) со сквозным проплавлением; аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса (А-ТИГ) [5] и аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом в разделку. В последнем случае в качестве присадочной проволоки использовали легированную проволоку марки СП-15 (Ti-4,5Al-2,5Mo-2,5V-3,5Nb-1,5Zr) [6], которая может применяться для сварки высокопрочных титановых сплавов BT23 и BT22 [7]. Дуговую сварку пластин толщиной 7 мм вольфрамовым электродом в аргоне выполняли в автоматическом режиме лабораторной сварочной головкой с применением источника питания ARISTO-500 фирмы ESAB. ЭЛС проводили в установке УЛ-144, укомплектованной источником питания ЭЛА 60/60. Сварку металла методом А-ТИГ выполняли с применением флюса марки АНТ-25 А [8]. Пластины титанового сплава Т110 толщиной 13 мм сваривали лазерно-дуговой сваркой. Лазерной сваркой выполняли наплавку на пластины толщиной 13 мм сплава Т110. Лазерную и лазерно-дуговую сварку осуществляли с применением лазерной установки DY 044 (Nd:YAG-лазер, длина волны 1,06 мкм) по схеме, согласно которой вольфрамовый электрод расположен перед лазерным лучом, а сам лазерный луч попадает в хвостовую часть сварочной ванны [4]. При этом в качестве источника питания сварочной дуги применен сварочный выпрямитель ВДУ-601.

Примеры выполненных сварных соединений приведены на рис. 1 и 2.

Металл швов, выполненных ЭЛС, состоит из превращенных равноосных β -зерен, внутри которых наблюдается равномерный распад твердого раствора с выделением дисперсных колоний частиц вторичной α -фазы, в околошовном участке зерно бывшей β -фазы более мелкое, что свидетельствует о меньшем тепловложении в собирательную рекристаллизацию. По мере удаления от

Таблица 1. Механические свойства титанового сплава Т110

Толщина металла	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	KCV, Дж/см ²
7	1190	1150	31
13	1130	999	38

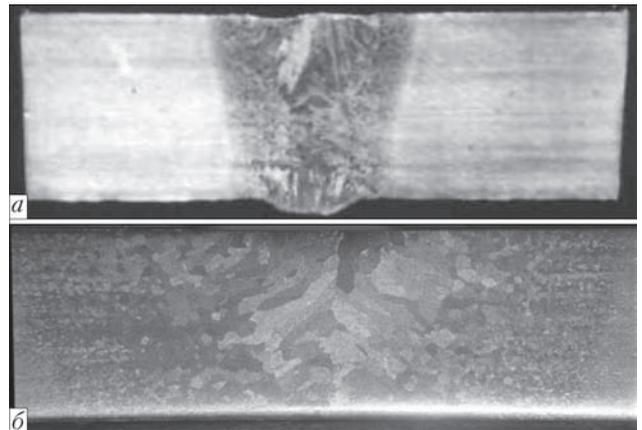


Рис. 1. Поперечные макрошлифы сварного соединения титанового сплава Т110 толщиной 7 мм, выполненные ЭЛС (а) и АДСВ (б)

зоны сплавления в основной металл размер полиэдрических равноосных зерен уменьшается. Сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС, как и сварные соединения промышленных сплавов титана подобного типа имеют высокую прочность, недостаточную пластичность и ударную вязкость, поэтому для повышения этих характеристик сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС, целесообразно подвергать отжигу.

В сварном шве сплава Т110, выполненном лазерной сваркой, четко прослеживается дендритная структура (рис. 3, а), на фоне которой наблюдаются первичные β -зерна, вытянутые в направлении теплоотвода. В металле шва, выполненного лазерной сваркой, фиксируются метастабильные β - и α'/α'' -

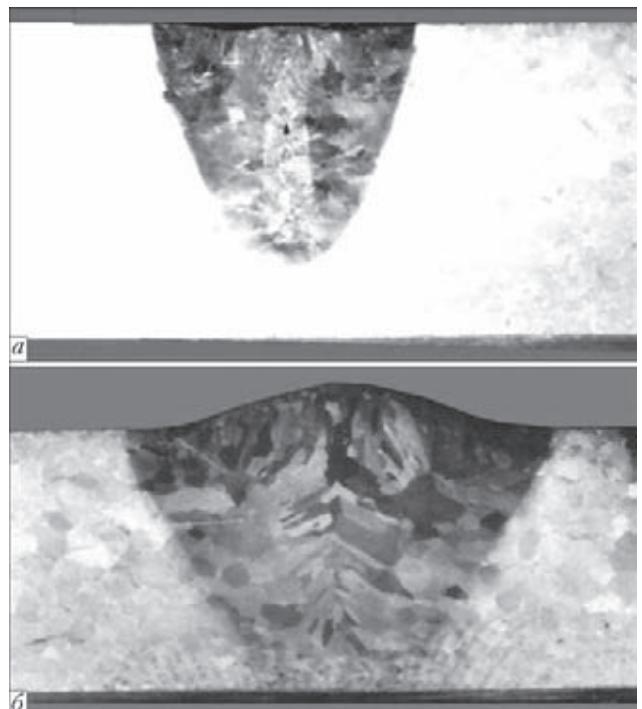


Рис. 2. Поперечные макрошлифы швов титанового сплава Т110 толщиной 13 мм, выполненные лазерной (а) и лазерно-дуговой сваркой (б) при одинаковой мощности лазерного луча

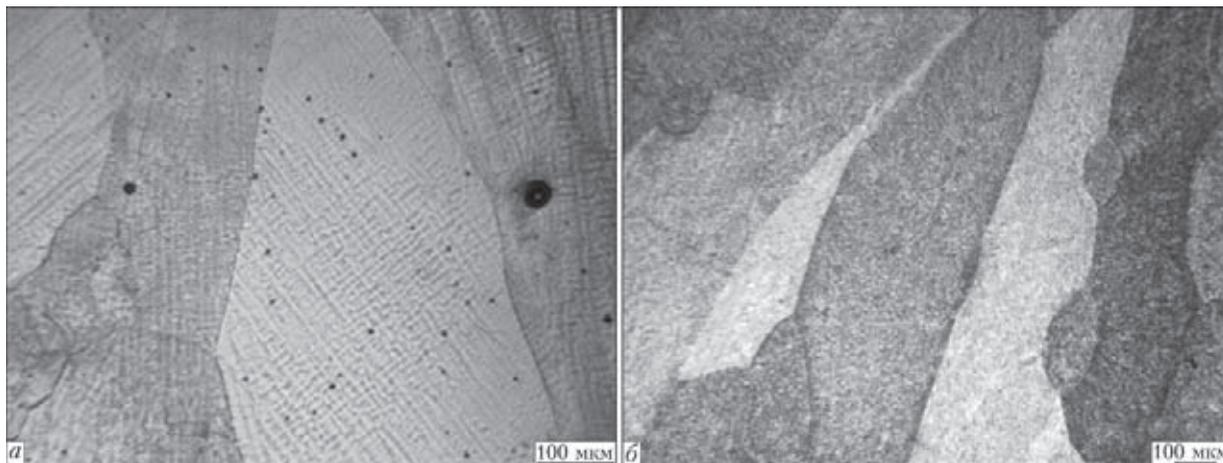


Рис. 3. Микроструктура металла сварного шва сплава Т110, выполненного лазерной (а) и лазерно-дуговой сваркой (б)

фазы, в зернах шва присутствует субструктура. Исследование микроструктуры сварных соединений титановых сплавов позволили сделать вывод, что металл шва, полученный одной лишь лазерной сваркой, имеет более высокие внутренние напряжения, о чем опосредственно свидетельствует наличие многочисленных ямок травления на поперечных микрошлифах вдоль зоны сплавления, которые вытравливаются в местах выхода на поверхность сосредоточений дислокаций. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, отсутствует участок крупного зерна. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, участок крупного зерна присутствует. В отличие от сварного соединения сплава Т110, выполненного лазерной сваркой, ни в шве, ни в металле ЗТВ сварного соединения, выполненного лазерно-дуговой сваркой, не наблюдалось субструктуры, микроструктура была более однородной и равномерной (рис. 3, б). При травлении шлифа сварного соединения, выполненного лазерно-дуговой сваркой, в таком же реактиве и в течение такого же времени, что и шлиф сварного соединения, выполненного лазерной сваркой, ямки травления не появлялись. Вероятно, это может быть связано с более низким уровнем сварочных напряжений при лазерно-дуговой сварке сплава Т110, чем при лазерной сварке.

Микроструктура сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, принципиально не отличается от микроструктуры соединений, выполненных ЭЛС. Так, металл однопроходных швов и околовшовных участков соединений, полученных сквозным проплавлением методом ТИГ, имеет характерную пластинчатую структуру β -превращенного зерна, где между более грубыми пластинами α -фазы заметны более мелкие выделения третичной α -фазы. Как и в швах, выполненных ЭЛС, в отдельных зернах наблюдаются участки с частично превращенной β -фазой и α -оторочка по границам β -зерен. В участках металла ЗТВ, прилега-

ющих к основному металлу, помимо указанных структурных элементов внутри зерен наблюдается первичная глобулярная α -фаза. Общим отличием микроструктуры соединений, выполненных дуговой сваркой, является величина структурных элементов. Они, как правило, более крупные, чем, вероятно, и объясняется относительно низкий уровень прочности дуговых швов (табл. 2). Соединения, выполненные ЭЛС и лазерной сваркой, имеют значительно меньшую структурно измененную зону (сплавления и термического влияния) по сравнению с соединениями, выполненными вольфрамовым электродом. Такое структурное отличие должно оказывать положительное влияние на условия пластической деформации в процессе нагружения. Об этом свидетельствует анализ мест разрушения сварных образцов после механических испытаний. Для соединений ЭЛС типичным местом разрушения является основной металл, для ТИГ — сварной шов. Для соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, типичным местом разрушения является сварной шов, для лазерной — основной металл. Сравнение глубины проплавления при лазерно-дуговой и лазерной сварке, выполненного на режиме с аналогичными параметрами лазерного луча, показало двукратное повышение по глубине провара (см. рис. 2) при неизменной мощности лазерного луча. Сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС и лазерной сваркой, имеют высокую прочность и недостаточную ударную вязкость (табл. 2).

Следует отметить высокую ударную вязкость металла ЗТВ сварных соединений, выполненных А-ТИГ по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой. Наибольшую ударную вязкость металла шва имеют соединения, выполненные многопроходной дуговой сваркой с разделкой кромок с применением присадочной проволоки СП15, имеющей меньшее содержание легирующих элементов по сравнению с основным металлом. Наименьшую ударную вязкость имеет металл шва, выполненного лазерной

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений титанового сплава Т110, выполненных различными способами сварки (состояние соединений — после сварки)

Способ сварки	Толщина металла, мм	σ_b , МПа	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²	
			металл шва	ЗТВ
ЭЛС	7	1140	10	10
ТИГ со сквозным проплавлением	7	1118	11	10
ТИГ с разделкой кромок	7	1030	20	12
А-ТИГ по слою флюса	7	1120	18	20
Лазерная	13	1131	6	13
Лазерно-дуговая	13	1180	15	23

сваркой. Прочность сварных соединений титанового сплава Т110, выполненных лазерной и лазерно-дуговой сваркой, больше прочности основного металла на 2...4 %, что объясняется наличием в металле шва дендритной структуры, характерной для литого металла шва.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о хорошей свариваемости сплава Т110 независимо от способа сварки.

Выводы

1. Высокопрочный титановый сплав Т110 отличается хорошей свариваемостью при выполнении сварных соединений ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом сквозным проплавлением, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой.

2. После сварки сварные соединения, выполненные ЭЛС, имеют прочность, равную основному металлу, а прочность сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, составляет не менее 90 % прочности самого сплава. Для повышения уровня механических свойств сварных соединений сплава Т110 возможно применение термической обработки.

3. В качестве присадочной проволоки для аргонодуговой сварки сплава Т110 целесообразно применять проволоку марки СП15.

4. Лазерно-дуговая сварка позволяет получать сварные соединения высокопрочного титанового сплава Т110 с более широким комплексом механических характеристик и меньшими внутренними напряжениями по сравнению с лазерной сваркой. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных одной лишь лазерной сваркой, отсутствует участок крупного зерна, что может приводить к снижению ударной вязкости металла в ЗТВ. В ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, участок крупного зерна присутствует.

5. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса обеспечивает наибольшие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ сплава Т110 без применения присадочного материала.

1. Пат. 40087 Україна. Високоміцний титановий сплав / В. М. Замков, В. П. Топольський, М. П. Тригуб та ін. – Оpubл. 16.06.2003; Бюл. № 6.
2. Исследование механических свойств кованных полуфабрикатов опытного титанового сплава Т110 / С. Л. Антоноук, В. Н. Замков, В. Ф. Топольский и др. // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 3. – С. 30–33.
3. Laser welding of titanium alloys / В. Е. Paton, V. D. Shelyagin, S. V. Akhonin / The Paton Welding J. – 2009. – № 7. – Р. 30–34.
4. Особенности лазерно-дуговой сварки титановых сплавов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, С. В. Ахонин и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 12. – С. 36–40.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 240 с.
6. Изыскание присадочного материала для сварки ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Н. А. Кушниренко и др.: Сб. науч. тр. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 314–320.
7. Влияние термической обработки на работоспособность сварных соединений сплава ВТ23 / В. Н. Замков, В. Ф. Топольский, И. К. Тяпко и др. // Автомат. сварка. – 1993. – № 4. – С. 25–27.
8. А. с. 439363 СССР. Сварочный флюс / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий и др. – Бюл. № 30.

Поступила в редакцию 28.10.2013



ЭЛЕКТРОДНЫЕ И ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ И СВАРКИ ЛИТЕЙНЫХ ОЛОВЯННЫХ БРОНЗ (ОБЗОР)

Т. Б. МАЙДАНЧУК

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

В машиностроении, металлургии и других отраслях промышленности широкое применение находят оловянные бронзы, из которых изготавливают методом литья детали, работающие в условиях повышенного износа. Для изготовления, а также устранения литейного брака и ремонта деталей из оловянных бронз находят применение сварочные и наплавочные процессы. В данном обзоре проведен анализ существующих разработок как в области современных технологических процессов сварки и наплавки оловянных бронз, так и новых электродных и присадочных материалов для этих целей. Рассмотрены основные трудности, возникающие при использовании сварочных процессов: высокая склонность к пористости (наиболее склонны медные сплавы), образование кристаллизационных трещин в сварных швах и зоне термического влияния, ликвация олова, что приводит к неоднородности структуры, а также повышенная склонность к образованию горячих трещин при наплавке бронзы на сталь как в наплавленном металле бронзы, так и в стали. Описаны способы сварки и наплавки литейных оловянных бронз, среди которых наиболее распространены: аргодуговая сварка, сварка под флюсом и ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Показано, что применяемые в качестве электродных и присадочных материалов проволоки и ленты из деформируемых сплавов зачастую не обеспечивают требуемый химический состав наплавленного металла. Предпочтительно создание специальных порошковых проволок и покрытых электродов, обеспечивающих оптимизацию легирования металла и достижения требуемых свойств. К примеру, для сварки и наплавки литейных оловянных бронз (BrO10Ф1, BrO5Ц5С5) необходимы сварочные материалы, химический состав и свойства которых соответствовали бы основному металлу. На основе проведенного анализа сделан вывод о необходимости создания новых сварочных материалов (покрытых электродов, порошковых проволок) для сварки и наплавки бронз ответственного назначения. Библиогр. 40, табл. 4, рис. 1.

Ключевые слова: бронзы оловянные, электродные материалы, способы сварки и наплавки, металлургические особенности

В настоящее время сплавы на основе меди, такие как оловянные бронзы, находят широкое применение в узлах и парах трения машин и механизмов, работающих в условиях повышенного износа на различных режимах эксплуатации. Этому в значительной степени способствует благоприятное сочетание их физических и технологических свойств.

С каждым годом увеличивается выплавка изделий из оловянных бронз с использованием новых методов литья [1], при этом, однако, не удается полностью исключить брак (1...10 % в зависимости от культуры производства и технического уровня литейных цехов, а при изготовлении сложных отливок — 50...70 %) [2]. Поскольку оловянные бронзы относятся к дефицитным и дорогим сплавам на которые постоянно растут спрос и цена [3, 4], актуальна задача бережного использования данных металлов.

Частично устранение литейного брака решается путем применения различных сварочных процессов (наплавка, сварка, заварка). Также эти процессы используют:

- для восстановления изношенных бронзовых деталей, увеличивая таким образом срок их службы;
- при изготовлении биметаллических деталей взамен цельнолитых для экономии дорогого металла, а также уменьшения общего веса изделия;
- для изготовления лито-сварных изделий сложной конфигурации вместо литых.

Целью настоящего обзора является анализ свойств существующих марок оловянных бронз, определение основных трудностей, возникающих при сварке и наплавке данных сплавов, а также обобщение данных о сварочных процессах и присадочных материалах, используемых для сварки и наплавки оловянных бронз.

Марки литейных оловянных бронз, выпускаемых промышленностью. В промышленности, как правило, применяют оловянные бронзы, содержащие наряду с оловом такие легирующие элементы как цинк, свинец, фосфор, никель [5-7] (табл. 1).

Цинк добавляют для увеличения коррозионной стойкости бронзы в морской воде, а также для равномерного распределения тяжелого свинца в сплаве. К тому же цинк дешевле олова и меди.

Таблица 1. Марки литейных оловянных бронз [5]

Сплав	СНГ	США	Германия	Япония
	ГОСТ 613-79	ASTM B30;B427; B0505;B584	DIN 17656	JIS H5111; H5113;H115
Медно-оловянный	—	C91000	SnBz14(2.1057)	—
Оловянно-никелевый	— — —	C96000 C91700 C96800	— — —	— — —
Оловянно-фосфористый	БрО10Ф1 — — — —	— C90700 C90800 C91100 C91300	— — — — —	— H5113/class2 H5113/class2b — —
Оловянно-цинковый	БрО8Ц4 БрО10Ц2 —	C90300 C90500 —	— — Rg10(2.1087)	— — —
Оловянно-цинково-никелевый	—	C94700	—	—
Оловянно-свинцовый	— — — — БрО10С10 — — — — — БрО5С25 —	C92700 C92800 C93400 C93600 C93700 — C93800 C93900 C94000 C94100 C94300 C94500	— — — — — SnPbBz10(2.1177) SnPbBz10(2.1183) — — SnPbBz10(2.1189) — —	— — — — H5115/class3.3c — H5115/class4.4c — — — — H5115/class5
Оловянно-свинцово-никелевый	— —	C92500 C92900	— —	— —
Оловянно-свинцово-цинковый	БрО6Ц6С3 БрО5Ц5С5 — БрО4Ц7С5 — БрО3Ц12С5 БрО4Ц4С17 — — — — —	— C83800 — C83900 C84200 C84800 — C92200 C92300 C92600 C93200 C93500	— — Rg 5(2.1097) — — — — — — — Rg 7(2.1091) —	— P5111/class6.6c — — — H5111/class1.1c — H5111/class7.7c H5111/class2.2c H5111/class3.3c — —
Оловянно-цинково-никелевый	БрО3Ц7С5Н1 — — — — —	— C83450 C94800 C94900 C97300 C97600	— — — — — —	— — — — — —

Свинец практически нерастворим в оловянных бронзах в твердом состоянии. Он повышает антифрикционные свойства, плотность отливок, а также улучшает обрабатываемость резанием, но при этом понижаются их механические свойства.

Для повышения механических свойств и жидкотекучести оловянные бронзы легируют фосфором, который также является раскислителем.

Никель (до 0,25 %) положительно влияет на оловянно-фосфористые бронзы, несколько повышая механические свойства и измельчая зерно. В оловянно-свинцовых бронзах никель также заметно измельчает зерно, что способствует более равномерному распределению свинца в отливках. На оловянно-цинковые бронзы никель (0,5...1,0 %) не оказывает заметного влияния.



Небольшие добавки к оловянным бронзам циркония, бора, титана, ниобия улучшают их механические свойства и обрабатываемость давлением в холодном и горячем состоянии.

Как видно из табл. 1, в СНГ выпускаются бронзы, аналогов которым нет в других странах (БрО10Ф1, БрО6Ц6С3, БрО4Ц4С17, БрО3Ц7С5Н1).

Основные трудности при сварке и наплавке оловянных бронз. Сварка и наплавка оловянных бронз сопряжена с определенными трудностями: высокая склонность к пористости (наиболее склонны из всех медных сплавов), образование кристаллизационных трещин в сварных швах и зоне термического влияния, ликвация олова и, соответственно, неоднородность структуры, а также проникновение оловянной бронзы в сталь при наплавке.

Пористость сварных швов вызывается выделением водорода и паров воды из металла сварочной ванны в процессе кристаллизации [8, 9]. Для предупреждения пористости используют сварочные материалы, которые обеспечивают разбавление газовой фазы и снижение тем самым парциального давления водорода в атмосфере дуги (за счет введения в состав покрытий электродов газообразующих составляющих), а также использование активных раскислителей металла сварочной ванны (электродные стержни и проволоки, легированные фосфором, кремнием, марганцем и алюминием) [10].

Большой проблемой при сварке и наплавке литейных оловянных бронз является возникновение кристаллизационных трещин [11, 12]. Межкристаллитные трещины берут свое начало на границе сплавления и могут иметь вид отдельных



Микроструктура (x100) зоны сплавления оловянной бронзы со сталью (трещина заполнена бронзой)

проникновений между зернами или сетки по границам зерен. Основная причина образования трещин – жидкие прослойки между кристаллитами в момент воздействия растягивающих напряжений. Наличие жидких прослоек зависит от содержания в металле примесей, образующих легкоплавкие эвтектики. Для большинства оловянных бронз такими являются висмут, сера и фосфор. Также возникновение трещин связывают с образованием большого количества хрупкой δ -фазы, богатой оловом. Для бронзы БрО10Ц2 склонность к образованию трещин в сварных соединениях растет с увеличением олова в сплаве и при наличии в нем более 0,004 % свинца [13]. При наплавке на сталь на возникновение трещин влияют также различие физико-химических свойств оловянных бронз и сталей и режимы наплавки. Размеры трещин различны – от нескольких микрон до нескольких (и даже десятков) миллиметров (рисунок). При наплавке оловянных бронз на сталь необходимо

Таблица 2. Марки оловянных бронз, обрабатываемых давлением [5]

Сплав	СНГ	США	Германия	Япония
	ГОСТ 5017-74	ASTM B103; B122; B139; B740	DIN 17662; 17664	JIS H3110; H3130
Оловянно-фосфористый	БрОФ2-0.25	—	—	—
	БрОФ4-0.25	C51100	CuSn4(2.1016)	C5111
	—	C53400	—	—
	БрОФ6.5-0.15	—	CuSn6(2.1020)	C5191
	—	C51000	—	—
	—	C53200	—	—
	БрОФ6.5-0.4	—	—	—
БрОФ7-0.2	—	—	CuSn6(2.1020); CuSn8(2.1030)	C5210
—	—	—	—	—
БрОФ8-0.3	—	C52100	CuSn8(2.1030)	C5212
—	—	C52400	—	—
Оловянно-цинковый	БрОЦ4-3	—	—	—
	—	—	CuSn6Zn6(2.1080)	—
Оловянно-никелевый	—	C72500	CuNi9Sn2(2.0875)	—
	—	C72650	—	—
	—	C72700	—	—
	—	C72900	—	—
Оловянно-цинково-свинцовый	БрОЦС 4-4-2.5	—	—	—
	—	C54400	—	—
	БрОЦС 4-4-4	—	—	—

принимать меры, направленные на предупреждение образования в стали трещин (наплавку вести без расплавления стали при минимальной температуре нагрева ее поверхности, применять промежуточную наплавку кремниевой бронзой или латунию, использовать технологические процессы, при которых в стали будут развиваться минимальные напряжения растяжения) [14–16].

Следует отметить, что процесс образования трещин при сварке и наплавке оловянных бронз изучен недостаточно.

При сварке и наплавке оловянных бронз возможна ликвация олова в связи с большим температурным интервалом кристаллизации, из-за чего в металле возникает химическая неоднородность по сечению и, следовательно, неоднородность механических свойств. Для уменьшения ликвации необходимо выполнять сварку на минимальной погонной энергии и с перерывами для выравнивания температуры, применять промежуточный и окончательный отжиг и, как правило, использовать сварочные материалы с пониженным по сравнению со свариваемой бронзой содержанием олова [17, 18].

Сварочные процессы и материалы для наплавки и сварки оловянных бронз. Несмотря на все трудности при сварке и наплавке оловянных бронз в промышленности нашли применение многие сварочные процессы: сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродами, автоматическая под слоем флюса, ручная дуговая покрытыми электродами. Реже используется плазменно-дуговая, газопламенная, электрошлаковая, вибродуговая и другие способы сварки и наплавки.

Наибольшее распространение получила сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродами, отличающаяся универсальностью и простотой защиты металла сварочной ванны от воздействия окружающей атмосферы. В качестве защитной среды в основном применяются инертные газы – аргон, гелий, а также их смесь (70 Ar + 30 He)%, реже используется азот.

В зависимости от марки свариваемой бронзы и среды эксплуатации изделия применяют проволоки из деформируемых бронз, которые выпускаются в странах СНГ и за рубежом (табл. 2).

Для минимизации проплавления основного металла и попадания в плакирующий слой железа, существенно ухудшающего эксплуатационные свойства наплавленного металла, целесообразно применение аргонодуговой наплавки плавящимся и неплавящимся электродами при малых плотностях тока. Наиболее плотный металл получается при наплавке плавящимся электродом с использованием проволок сплошного сечения.

Широкому применению электродуговой сварки и наплавки оловянных бронз в защитных газах препятствуют низкие деформационные свойства литейных оловянных сплавов, поскольку изготовление из них сварочных проволок затруднено. Особенно велика потребность в проволоках малого диаметра. Эта проблема может быть решена использованием в качестве присадочного материала порошковых и композитных проволок, которые позволяют относительно несложно получать металл требуемого состава и удовлетворительного качества.

К числу прогрессивных способов электродуговой наплавки, позволяющих в широких пределах регулировать проплавление стали и обеспечивающих высокую производительность, следует отнести наплавку расщепленным и ленточным электродами [19–21]. Изучение особенностей горения дуги и проплавления основного металла такими электродами позволило установить, что минимальное проплавление стали при этом достигается благодаря интенсивному «блужданию» дуги и вызванному этим более благоприятному распределению тепловложения по ширине ванны. При наплавке ленточным электродом на проплавление основного металла и содержание железа в наплавленном слое существенно влияет скорость наплавки и плотность тока. Регулирование проплавления основного металла при наплавке ленточным электродом можно осуществлять и поворотом ленты по отношению к направлению наплавки (оси валика) на угол от 60 до 45°.

При автоматической сварке и наплавке под флюсом для большей производительности процесса можно использовать флюсы марок ОСЦ-45, АН-20, АН-26, АН-348-А, АН-М2, которые обеспечивают необходимый уровень сварочно-технологических свойств и металлургическую обработку сварочной ванны. При наплавке и сварке оловянных бронз желательно применять сварочную проволоку того же состава, что и наплавляемый металл. Одним из наиболее простых и экономичных способов получения наплавленного металла заданного химического состава при отсутствии нужных сварочных проволок является изготовление порошковых проволок. Разработаны порошковые проволоки для наплавки бронзы БрО6Ц6С3 [11], БрО8С21 [20, 22], а также для сварки БрО10Ц2 [23].

Наряду с автоматическими способами сварки и наплавки литейных оловянных бронз в промышленности широко применяется ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Этот процесс постоянно совершенствуется с целью повышения качества наплавленного металла и обеспечения возросших эксплуатационных требований.



Таблица 3. Химический состав сварочной проволоки и прутков для ручной дуговой сварки и наплавки оловянных бронз

Марка проволоки и прутка	ГОСТ на прокат проволока/пруток	ГОСТ на химический состав	Основные элементы, мас. %			
			Sn	P	Zn	Cu
БрОФ6.5-0.15	16130-90/10025-78	5017-74	6,0...7,0	0,1...0,25	—	Остальное
БрОЦ4-3	16130-90/6511-60	5017-74	3.5...4.0	—	2,7...3,3	

При дуговой наплавке и сварке оловянных бронз применяются электроды с различными составами покрытий [24]. В основном это покрытия, состоящие из галогенидов, а также раскисляющих, стабилизирующих и шлакообразующих материалов. Подавляющее большинство замесов покрытий изготавливается с применением в качестве связующего компонента сухой шихты водного раствора силиката натрия, обеспечивающего хорошую технологичность в изготовлении и применении таких электродов [17].

В качестве стержней для изготовления покрытых электродов для сварки и наплавки оловянных бронз используют тянутую проволоку (ГОСТ 16130-90) и литые прутки диаметром не менее 6...8 мм. Указанный стандарт предусматривает всего две марки сварочной проволоки: БрОФ 6.5-0.15 и БрОЦ4-3 (табл. 3). Кроме того, из оловянно-фосфористой бронзы марки БрОФ6.5-0.15 изготавливают холоднокатанные прутки по ГОСТ

10025-78, а из оловянно-цинковой бронзы – тянутые по ГОСТ 6511-60. Прутки по этим стандартам выпускаются диаметром от 5 до 10 мм [24].

Литые прутки обеспечивают более низкое качество наплавленного металла, чем деформированные, поэтому используются лишь в крайних случаях.

В табл. 4 приведены данные покрытых электродов, наиболее часто использующихся для сварки и наплавки оловянных бронз, а также заварки дефектов бронзового литья. Видно, что при использовании выше перечисленных электродов содержание олова находится на уровне 5,0...7,5 % (за исключением UTP-320), а значения механических свойств отличаются в несколько раз. Например: относительное удлинение наплавленного металла ОЗБ-2М равно 10 %, а Phosphor Bronze C Electrode – 45...50 %; предел прочности AS Bronz равен 260 МПа, а Phosphor Bronze C Electrode – 450 МПа. К тому же не всегда данные электро-

Таблица 4. Электроды для сварки (заварки), наплавки оловянных бронз

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, мас. %							Твердость <i>HV</i>	δ , %	σ_B , МПа	Источник
	Sn	P	Mn	Ni	Fe	Si	Cu				
ОЗБ-2М	6,0	0,35	1,0	0,8	0,5	—	Остальное	115	10	340	[24]
ОК 94.25	7,0	0,15	0,5	—	<0,2	—	92,0	95	25...35	330...390	[33]
UTP-32	7,0	—	—	—	—	—	93,0	100	34	295...345	[32]
UTP-320	13,0	—	—	—	—	—	87,0	150	34	245...295	[32]
AS Bronz	7,0	0,1	0,5	—	—	—	Остальное	90	20	260	[35]
CP-33	5,3	0,09	—	—	—	—	-II-	—	27	400	[34]
CB 082	8,0	0,1	0,01	0,05	0,1	0,05	-II-	105	18	340	[31]
Capilla 48	6,0...8,0	—	—	—	—	—	-II-	100...110	—	280	[30]
E-CuSn-C	7,0...9,0	< 0,3	Si+Mn+Fe+Al+Ni+Zn \leq 0,5				-II-	—	—	—	[27]
Phosphor Bronze C Electrode	7,0...9,0	<0,35	—	—	0,25	—	-II-	85...100	45...50	450	[28]
Nihonweld N-CuSn-C	7,8	0,11	—	—	0,17	—	-II-	90...100	30	390	[29]
Nihonweld N-CuSn-A	5,15	0,18	—	—	0,52	—	-II-	65...75	24	424	[29]

ды имеют хорошие сварочно-технологические характеристики.

Для наплавки оловянных бронз широкое распространение получил плазменный способ [25]. При этом в качестве присадочного материала могут использоваться: проволока, прутки, неподвижная присадка (уложенная или каким-либо другим способом зафиксированная на поверхности), порошок. Наиболее часто используют наплавку с присадкой проволоки сплошного сечения. Марки этих проволок приведены выше. Особой разновидностью наплавки оловянных бронз является плазменно-порошковый способ, позволяющий существенно расширить перечень сплавов для наплавки механизированным способом. При плазменной наплавке обеспечивается минимальное проплавление основного металла при хорошем формировании валиков [25, 26]. К недостаткам способа следует отнести дороговизну оборудования и невысокую производительность процесса.

При ремонте цилиндрических деталей небольших диаметров и для наплавки тонких слоёв находит применение вибродуговая наплавка медных сплавов [36], которая позволяет наплавлять детали малых диаметров. Наплавка ведется в струе охлаждающей жидкости или пены, выполняющей также функции защитной среды.

Для наплавки за один проход слоя металла большой толщины (≥ 20 мм) может быть использована электрошлаковая наплавка оловянной бронзы на сталь [37]. Обычно в качестве наплавочного материала применяют пластины или стружку из бронзы, которые предварительно укладывают на черный металл. Достоинством электрошлаковой наплавки является возможность применения литых электродов. Недостаток — трудоемкость подготовительных операций, а также необходимость использования больших токов при наплавке больших поверхностей. Электрошлаковый процесс целесообразно применять в тех случаях, когда требуется наплавлять большое количество металла.

Для сварки и наплавки оловянной бронзы используют и другие способы: газовая наплавка и сварка [38], импульсно-дуговая сварка в среде защитного газа и под флюсом [39], электроискровая наплавка [40], но они не нашли широкого применения. В случае использования данных способов применяют те же сварочные материалы, которые рассмотрены выше.

Выводы

1. Для экономии дорогостоящих оловянных бронз с успехом используются такие сварочные процессы: заварка дефектов литья, наплавка с целью восстановления изношенных бронзовых деталей,

сварка при изготовлении сварно-литых изделий, а также наплавка на сталь для изготовления биметаллических деталей. При этом необходимо учитывать металлургические особенности сварки и наплавки этих сплавов: повышенную склонность к пористости, образованию кристаллизационных трещин в сварных швах и зоне термического влияния; ликвации олова и соответственно неоднородности структуры, образование трещин в стали, заполненных бронзой (при наплавке на сталь).

2. Из-за низкой пластичности оловянных бронз не всегда можно изготовить сварочную проволоку, которая может использоваться для автоматической сварки и наплавки, а также для изготовления стержней покрытых электродов.

3. Для сварки, наплавки, заварки дефектов литья бронз с содержанием олова больше 8,0 % практически отсутствуют отечественные сварочные электродные материалы, в том числе и покрытые электроды.

4. Для применения в промышленности механизированных процессов сварки и наплавки оловянных бронз перспективным является создание и освоение выпуска специальных порошковых проволок, обеспечивающих получение швов и наплавленного металла требуемых составов и свойств.

1. Пономаренко О. И., Шинский И. О., Моргунов Н. Н. Литые по газифицируемым моделям бронзовых сплавов // Литейн. пр-во. — 2004. — № 11. — С. 30.
2. Управление литейными системами и процессами: Монография / О. И. Пономаренко, Т. В. Лысенко, А. Л. Становский, О. И. Шинский. — Харьков: Изд-во Харьк. политех. ин-та, 2012. — 368 с.
3. www.non-ferrous@metalresearch.ru.
4. Макаревич О. П., Федоров Г. Е., Платонов С. О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. — К.: Вид-во Київ. політехн. ін-ту, 2005. — 712 с.
5. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. — М.: Машиностроение, 2004. — 336 с.
6. Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. — М.: Металлургия, 1974. — 488 с.
7. Литейные бронзы / К. П. Лебедев, Л. С. Райнес, Г. С. Шемтов и др. — Л.: Машиностроение, 1973. — 312 с.
8. Джевага И. И. Электродуговая сварка цветных металлов и сплавов. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 139 с.
9. Наплавка изношенных бронзовых деталей металлургического оборудования / Г. П. Хмель, Е. Г. Красненко, В. М. Илюшенко и др. // Автомат. сварка. — 1966. — № 3. — С. 68–71.
10. Редчиц В. В. Предупреждение пор при сварке цветных металлов плавлением // Там же. — 1991. — № 6. — С. 31–34.
11. Механизированная заварка дефектов литья оловянистой бронзы / В. М. Илюшенко, С. И. Опанасенко, М. М. Фишкис и др. // Там же. — 1966. — № 2. — С. 64–66.
12. Джевага И. И., Журавлев Ю. А. Связь между структурой и стойкостью швов на бронзе против кристаллизационных трещин // Там же. — 1965. — № 11. — С. 14–19.
13. Симаненков Л. Н. Исследование и разработка технологии электродуговой сварки оловянной бронзы марки Бр. ОЦ10-2: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1981. — 16 с.



14. *Вайнерман А. Е., Осеткин А. А.* К вопросу образования трещин при наплавке медных сплавов на сталь. // Автомат. сварка. — 1968 — № 6. — С. 23–25.
15. *Тимофеев В. Н., Исаев Н. И.* Наплавка сплавов меди на стальные поверхности // Там же. — 1965. — № 4. — С. 34–37.
16. *А. с. 548391 СССР, МКл.² В 23к 9/04*. Способ наплавки / В. В. Ардентов, А. Е. Вайнерман, П. И. Гайдай и др. — № 2051592; Заявл. 05.08.1974; Опубл. 28.02.1977, Бюл. № 8.
17. *Абрамович В. Р., Демянцевич В. П., Ефимов Л. А.* Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. — Л.: Машиностроение, 1988. — 215 с.
18. *Hanke H., Retzlaff O., Schultz H.-W.* Schweissen von Gusszinbronze // Schweissttechnik. — 1968. — № 2. — S. 1–12.
19. *Тимофеев А. И., Потахин В. П.* Автоматическая наплавка бронзы Бр.АМц9-2 ленточным электродом по облицовке. // Свароч. пр-во. — 1967. — № 10. — С. 14–16.
20. *Илюшенко В. М., Седов В. Е.* Наплавка оловянно-свинцовой бронзы на сталь расщепленным электродом // Автомат. сварка. — 1969. — № 6. — С. 52–54.
21. *Илюшенко В. М.* Прогрессивные методы электродуговой наплавки медных сплавов на сталь. // Сварка и наплавка тяжёлых цветных металлов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1978. — С. 30–32.
22. *А. с. 202391 СССР, МПК В 23к*. Порошковая проволока для наплавки / В. М. Илюшенко, В. Е. Седов, С. И. Опанасенко, В. В. Подгаецкий. — № 1046324; Заявл. 03.01.1966; Опубл. 14.09.1967, Бюл. № 19.
23. *А. с. 593868 СССР, МКл.² В 23к 35/30*. Состав сварочной проволоки / И. И. Джевага, Л. Н. Симаненков. — № 2429560; Заявл. 18.10.1976; Опубл. 25.02.1978, Бюл. № 7.
24. *Закс И. А.* Электроды для дуговой сварки цветных металлов и сплавов: Справочное пособие. — С.-Пб.: Стройиздат, 1999. — 192 с.
25. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Экотехнология, 2007. — 292 с.
26. *Илюшенко В. М.* Сварка и наплавка тяжёлых цветных металлов. — Киев: Знание, 1977. — 24 с.
27. www.hzdayang.com/aws-ecusn-c.html.
28. www.brazing.com/MSDS_PhosBronze_E.pdf.
29. www.nihonweld.com/products.do?item_id=15402.
30. www.rs-nt.ru/capilla-gmbh-germany/376/2687.
31. www.stlg-sd.ru/sb_082.
32. *UTP Schweissmaterial GmbH.* — Bad Krozingen, 2004.
33. *ESAB welding handbook.* Filler materials for manual and automatic welding. — Fourth ed. Goeteborg, 2005.
34. *Kobe steel welding consumables: Catalog.* — Tokyo, 2006.
35. *ASKANYAK:* Сварочные электроды и проволока // Каталог выпускаемой продукции. — Стамбул, 2005.
36. *Пацкевич И. Р., Баутина В. А.* Вибродуговая наплавка бронзы на сталь // Свароч. пр-во. — 1962. — № 11. — С. 43–35.
37. *Дудко Д. А., Щербина Н. Я., Подсацкий В. В.* Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь с использованием кипящих флюсов // Автомат. сварка. — 1979. — № 2. — С. 34–37.
38. *Гвоздем М. С.* Заварка дефектов в отливках из цветных металлов // Литейн. пр-во. — 1963. — № 9. — С. 42.
39. *Потапьевский А. Г., Агарков Л. А., Осадченко А. Е.* Механизированная импульсно-дуговая наплавка бронзы на стальные изделия // Судостроение. — 1967. — № 8. — С. 46–50.
40. *Пушкин И. А.* Некоторые особенности восстановления изношенных бронзовых втулок электродуговой наплавкой // Сварка Урала-2001: Тез. докл. — Нижний Тагил: Нижне-Тагил. технол. ин-т, 2001. — С. 127–129.

Поступила в редакцию 16.10.2013

ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И РЕМОНТА

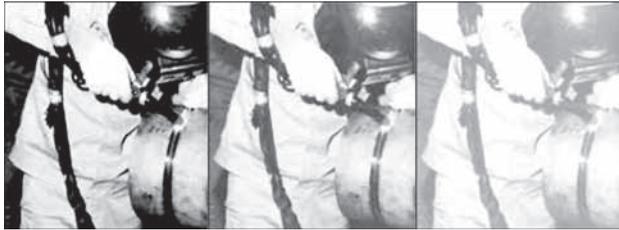
В Санкт-Петербурге с 15 до 18 апреля 2014 г. состоится 16-я Международная ежегодная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика».

Приглашаем принять участие в конференции, подробно ознакомить слушателей и коллег со своими новыми разработками, посвященными методам повышения долговечности и надежности изделий; технологиям наплавки, напыления, осаждения, сварки; технологиям ремонта – диагностике дефектации, мойке, очистке, восстановлению размеров, обработке покрытий, окраске, консервации.

Информацию об условиях участия и требованиях к оформлению докладов Вы найдете на сайте конференции – www.technoconf.ru.

Контакты: (812) 444-93-37, 444-93-36, (921) 973-46-74.
E-mail: info@plasmacentre.ru; <http://plasmacentre.ru>; <http://technoconf.ru>

ПРИСАДОЧНЫЕ ПРУТКИ «SOBELCO WELDING» ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОРНЕВЫХ ПРОХОДОВ В СОЕДИНЕНИЯХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ БЕЗ ЗАЩИТЫ ОБРАТНОЙ СТОРОНЫ ШВА*



PREMIARC™ TG-X308L AWS A5.22 R308LT1-5

PREMIARC™ TG-X309L AWS A5.22 R309LT1-5

PREMIARC™ TG-X316L AWS A5.22 R316LT1-5

PREMIARC™ TG-X347 AWS A5.22 R347T1-5

Порошковые присадочные прутки серии TG-X из нержавеющей стали позволяют исключить продувку газом для защиты обратной стороны корневого шва при односторонней сварке труб способом ТИГ, что обеспечивает сокращение расходов на защитные газы и время простоя на обдув газом, включая время установки оборудования для продувки. Типичным примером применения прутков TG-X308L, TG-X316L, TG-X347 и TG-X309L является выполнение корневых проходов в соединениях технологических трубопроводов из сталей типа 304, 316 и 347, а также из разнородных металлов.

Исключение защиты обратной стороны корня шва

В случае использования обычных присадочных прутков сплошного сечения при сварке труб из нержавеющей стали необходима защита обратной стороны шва, иначе выполнение корневого прохода не обеспечит соответствующее проплавление с обратной стороны соединения. Это объясняется значительным окислением металла корневого прохода вследствие высокого содержания в нем хрома. Таким образом, защита обратной стороны шва инертным газом является обязательной операцией.

В отличие от обычных проволок сплошного сечения в трубчатой оболочке из нержавеющей стали присадочных прутков TG-X содержится особый флюсовый наполнитель (рис. 1). Под воздействием тепла дуги флюс плавится и превращается в жидкий шлак, который свободно течет к обратной стороне корня шва и равномерно покрывает проплавливающий валик, который формируется внутри трубы. Жидкий шлак защищает расплавленный металл шва и горячий металл валика от вредного воздействия азота и кислорода, содержащихся в атмосфере.

При охлаждении металла шва шлак затвердевает и превращается в тонкую и хрупкую шлаковую корку, которую можно легко удалить, если слегка постучать по лицевой поверхности соединения пнев-

матическим молотком.

При этом обеспечивается качественное формирование валика без окисления с гладкой и равномерной волнистостью на лицевой и обратной поверхностях корневого прохода шва (рис. 2). Присадочные прутки TG-X обеспечивают равномерное проплавление по всему параметру кольцевого

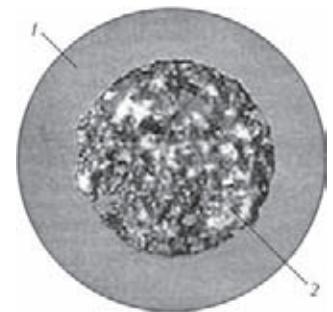


Рис. 1. Порошковый присадочный пруток TG-X в разрезе: 1 — оболочка из нержавеющей стали; 2 — флюс

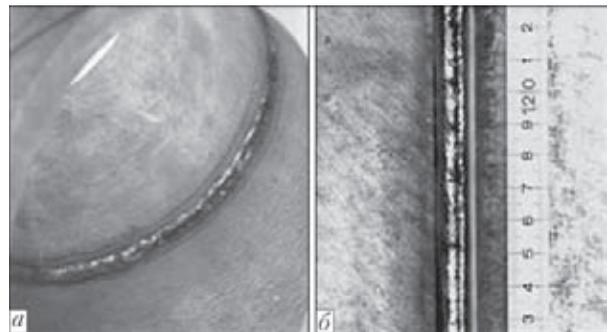


Рис. 2. Блестящий гладкий валик на обратной (а) и лицевой (б) поверхности корневого шва (сталь 304, пруток TG-X308L)

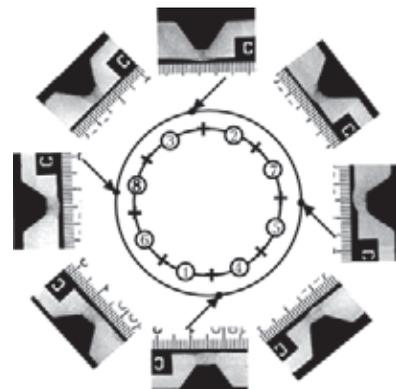


Рис. 3. Макрошлифы корневых проходов швов (положение 5G, сталь 304, труба Ду150×12, пруток TG-X308L; стрелками показаны прихватки)

* Статья на правах рекламы.



шва трубы во всех положениях сварки (рис. 3).

Сокращение расходов на продувку газом и защиту обратной стороны шва

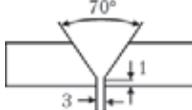
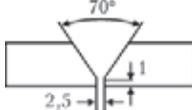
При использовании обычных присадочных прутков сплошного сечения необходима защита обратной стороны шва инертным газом: обычно для этого используют аргон. Хотя длительность продувки внутренней полости трубы и количество необходимого для этого инертного газа изменяются в зависимости от внутреннего диаметра и длины продуваемой трубы, они существенно воздействуют на общую стоимость сварочных работ. В табл. 1 приведено сравнение традиционных присадочных прутков сплошного сечения и присадочных прутков TG-X в отношении факторов, влияющих на стоимость сварочных операций при выполнении корневого шва на трубе внутренним диаметром 305 мм. Очевидно, что применение присадочного прутка TG-X позволяет сократить трудоемкость (в человеко-часах) на 23...74 % и общий расход аргона на 55...91 % по сравнению с обычными присадочными прутками сплошного сечения. В то же время при использовании присадочных прутков TG-X их расход несколько больше; потребляемая мощность несколько выше вследствие немного более низкой производительности наплавки (приблизительно 90 %) по сравнению с применением прутков сплошного сечения.

Кроме того, единичная цена присадочных прутков TG-X выше, чем цена прутков сплошного сечения. Однако расчеты с учетом единичной цены для каждого фактора показывают, что прутки серии TG-X обеспечивают значительную экономию с точки зрения общей стоимости сварочных работ.

Химические и микроскопические свойства корневых швов

Химический состав металла корневых швов при использовании отдельных присадочных прутков TG-X приведен в табл. 2. Как видно из таблицы, все прутки TG-X обеспечивают низкое содержание азота в металле корневого шва. Электронно-зондовый микроанализ зоны вблизи обратной поверхности шва подтвердил отсутствие микроскопической конденсации азота. Более того, анализ микроструктуры показал, что выделения феррита равномерно распределены в аустенитной

Таблица 1. Сравнение видов присадочных прутков в отношении трудоемкости (в человеко-часах), расхода аргона, прутков и потребляемой мощности при заварке корневого шва на трубе

Присадочные прутки	TG-X	Прутки сплошного сечения	
Разделка кромок			
Длина трубы при защите обратной стороны шва	Без защиты обратной стороны шва	300 мм для локальной защиты	6000 мм для полной защиты
Время предварительной продувки ¹ , мин	Не требуется	5,2	104
Время установки защитных устройств, мин	Не требуется	10	Не требуется
Время сварки ² , мин	35	30	30
Относительное время горения дуги, %	50	50	50
Общее количество человеко-часов, мин	35	45	134
Общий расход присадочных прутков, г	120	100	100
Расход газа на предварительную продувку ¹ , л	Не требуется	122,2	2444
сварку ²	263	255	225
защиту обратной стороны шва ³	Не требуется	240	240
Общий расход аргона, л	263	587	2909
Общая потребляемая мощность, кВт/ч	0,405	0,358	0,358

¹ Параметры предварительного продува даны согласно AWS D10.11-7X (руководство по заварке корня шва и продувке газом).
² Расход защитного газа для сварки составляет 15 л/мин при $I_{св} = 100$ А, $U_d = 13$ В.
³ Расход защитного газа для защиты обратной стороны шва составляет 8 л/мин.

матрице по всему металлу корневого шва. Низкое содержание азота вместе с указанной выше гладкой и блестящей поверхностью валика шва свидетельствует об эффективности защитного действия шлака, образующегося при использовании присадочных прутков TG-X.

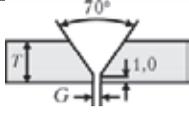
Таблица 2. Типичный химический состав (мас. %) металла корневого шва в соединении, полученном в нижнем положении односторонней сваркой с V-образной подготовкой кромок и с применением присадочных прутков TG-X Ø 2,2 мм ($I_{св} = 105$ А, прямая полярность)

Присадочный пруток для шва ¹ , мин	TG-X308L	TG-X316L	TG-X309L	TG-X347
Тип/толщина основного металла, мм	304/9	316L/9	316/19	321/20
C	0,040	0,018	0,047	0,028
Si	0,55	0,64	0,56	0,65
Mn	1,11	1,48	1,36	1,78
Ni	9,72	12,34	9,99	10,35
Cr	18,89	18,93	19,47	18,67
Mo	—	2,17	0,35	—
Nb	—	—	—	0,44
Ti	—	—	—	0,07
N	0,044	0,041	0,038	0,044
FS, FN ²	4,6...5,7	7,1...7,6	6,9...8,5	4,4...6,2
SD, F%	7	7,5	7	6
DD, FN	5,5	8	8	5

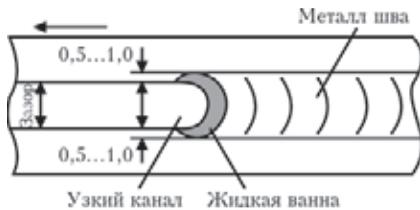
¹ Защитный газ горелки – аргон (без защиты обратной стороны шва).
² FS – содержание феррита; SD – диаграмма Шеффлера; DD – диаграмма Делонга.

Особенности применения присадочных прутков TG-X

1. *Обеспечение рекомендуемой разделки* в корне шва для формирования качественного проплавляющего валика.

Разделка кромок			
Толщина пластины T , мм	4	6	10
Притупление G , мм	2,0	2,5	3,0

2. *Применение соответствующей техники* выполнения узкого канала для обеспечения затекания жидкого шлака к обратной стороне корня шва.



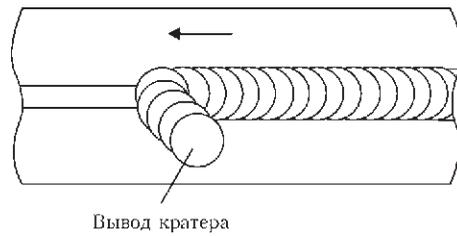
3. *Повышенная скорость и контроль* подачи проволоки по сравнению с применением присадочных прутков сплошного сечения для обеспечения необходимого расплавления прутка и формирования качественного проплавляющего валика, а также для компенсации несколько более низкой производительности наплавки при использовании присадочных прутков TG-X.

4. *Выбор соответствующего тока* сварки для обеспечения равномерного расплавления и проплавления. Для разных толщин пластины 3...5, 6...9 и 10 мм сила тока составляет соответственно 80...90, 90...105 и 90...110 А.

5. *Применение короткой дуги* для формирования стабильного кратера и обеспечения равномерного течения шлака путем поддержания контакта между горелкой и поверхностями кромки в разделке, а также соответствующего вылета вольфрамового электрода.

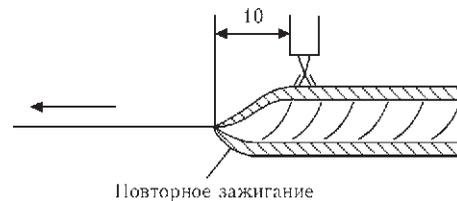


6. *Соответствующая обработка кратера* с обеспечением его поворота на поверхность раз-

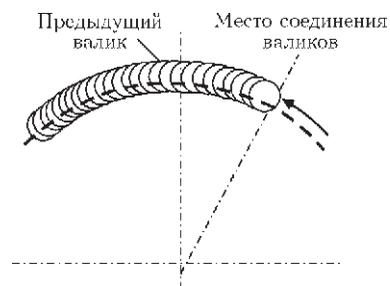


делки для предотвращения образования трещин и усадочных раковин в кратере, включающая изменение режима сварки.

7. *Обеспечение соответствующего соединения* валиков для формирования равномерного проплавляющего валика и предотвращения его окисления путем удержания твердого шлака на кратере и с обратной стороны валика при повторном за-



жигании дуги для обеспечения соединения с предыдущим валиком. Точка повторного зажигания дуги должна быть расположена за краем кратера на расстоянии приблизительно 10 мм от него. При сварке в положении 5G завершение следующего валика на кратере предыдущего должно выполняться в положении снизу вверх для контроля жидкого шлака и, следовательно, обеспечения формирования узкого канала проплавления.



8. *Присадочные прутки TG-X* подходят только для заварки корня шва. Они обеспечивают образование достаточного количества шлака для покрытия обеих поверхностей валика в корневом проходе как с лицевой, так и с обратной стороны. Если присадочные прутки TG-X используют для заполняющих проходов, весь шлак может быть израсходован на покрытие лицевой поверхности валика, что вызовет образование шлаковых включений в металле шва и несплавления.

ООО Торговый Дом «НИСА»
 тел. 38044-242-21-83, 38067-548-76-00
 www.nisa.net.ua
<http://линкольнэлектрик.net/>

СЕМИНАР «ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ СВАРОЧНЫХ РАБОТ В УКРАИНЕ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СВАРКИ»

21 ноября 2013 г. в Киеве в гостиничном комплексе «Верховина» прошло совещание ведущих специалистов сварочного производства Украины. Его инициатором выступило Общество сварщиков Украины (ОСУ), а организационную и финансовую поддержку оказало предприятие ПИИ ООО «Бинцель Украина ГмбХ».

В совещании приняли участие руководители, главные сварщики многих предприятий Украины, преподаватели ряда технических университетов, учебных центров — всего около 50 человек.

Президент ОСУ В. Г. Фартушный, председательствующий на семинаре, вначале предоставил возможность вице-президенту А. А. Кайдалову коротко осветить деятельность общества по организации конкурсов сварщиков.

А. А. Кайдалов, активно занимающийся организацией конкурсов, проинформировал участников совещания о неудовлетворительных результатах последнего конкурса мастеров профтехучилищ Киева и Киевской обл., проведенного на выставке «Укрсварка» в рамках «Промышленного форума-2013» (г. Киев). По его мнению, вопросу повышения квалификации рабочих-сварщиков следует уделять постоянное внимание со стороны главных сварщиков предприятий. Он также кратко рассказал о трехлетнем опыте организации конкурсов сварщиков в Украине, поблагодарил за спонсорскую помощь предприятия ПАО «Плазма-Тек», ООО «Фрониус Украина», Интерхим БТВ, НПФ «Сваркаконтакт», ООО «Фрунзе-Электрод» и др. Отметил, что в 2014 г. пройдет международный конкурс молодых сварщиков в Китае. В нем приглашены участвовать и сварщики из Украины, в частности, призеры конкурса в Одессе (2013 г.). Уже сегодня следует начать подготовку национальной команды сварщиков. Здесь же на совещании В. Г. Фартушный вручил почетные знаки ОСУ А. А. Кайдалову и главному сварщику Одесского припортового завода А. Н. Воробьеву за активную работу по организации конкурсов сварщиков в Украине.

В. Г. Фартушный, открывая совещание, отметил, что оно посвящено важнейшей теме, включающей рассмотрение особенностей организации сварочных работ, в том числе на предприятиях с акционерной формой собственности, и роли руководителя сварочных работ в общем



производственном процессе. Какова роль общественной организации — ОСУ — в достижении оптимальных решений, позволяющих в итоге достигать высоких показателей качества сварных конструкций.

Первым на совещании выступил главный сварщик ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» Ю. В. Бутенко, ранее уже поднимавший вопросы, касающиеся организации сварочных работ.

По его мнению, для обеспечения должного качества сварных соединений на предприятиях, изготавливающих сварные конструкции, либо выполняющих сварочные работы, должны быть грамотно организованы подготовка и выполнение как основных, так и вспомогательных процессов. Назрела необходимость создания Государственного стандарта по организации сварочных работ на промышленных предприятиях Украины любой формы собственности. Он должен быть обязательным к исполнению, а надзор за его исполнением следует возложить на территориальные органы Госпромнадзора. В стандарте необходимо предусмотреть задачи и функциональные обязанности должностного лица, отвечающего на предприятии за выполнение сварочных работ, обозначить его права и обязанности, включить требования к уровню образования, стажа его работы в сварочном производстве и др.

Главный сварщик Одесского припортового завода А. Н. Воробьев высказался также за необходимость появления регламентирующего документа для руководителя или координатора сварочных работ на предприятии. Как правило, руководители



предприятия часто не заинтересованы в выполнении требований стандартов. Вместе с тем важным является соблюдение даже несколько устаревших стандартов (например, ГОСТа на механические испытания, 1969 г.), который предписывает входной контроль для сварочных материалов и основного металла. Эти меры позволят отказаться от нерадивых поставщиков материалов. Важно также придерживаться стандартов на подготовку кадров. Очевидно, что крайне важно иметь на предприятии руководителя сварочных работ.

Следует обратить внимание и на такие обстоятельства. Один раз в три года по требованиям УАКС проводится аттестация (переаттестация) специалистов сварочных работ, специалистов по контролю, а другие специалисты (например, слесари) не аттестуются. Это негативно отражается на конечном результате.

Относительно сварочного оборудования. На Одесском припортовом заводе эксплуатируется сварочное оборудование пяти зарубежных фирм. Периодически есть нарекания на отказ оборудования. Желательно, чтобы ОСУ организовало проведение оценки импортного оборудования, поступающего на рынок Украины, с публичным обсуждением результатов. Это же относится и к сварочным материалам.

Г. В. Павленко (ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона) сделал реплику относительно ориентации предприятий на применение только зарубежного оборудования. Есть и другие примеры. Так, российская компания в Северодвинске, например, закупила большую партию оборудования «СЭЛМЫ» (г. Симферополь) и использует его при производстве ответственных изделий.

Далее на совещании выступил главный сварщик Кременчугского вагоностроительного завода Н. В. Высоколян. Он рассказал о почти 150-летней истории завода. Сегодня на предприятии работает около 700 сварщиков (650 из них на производстве), переаттестованы из них более 400. Создан свой учебно-аттестационный центр, оснащенный

новым сварочным оборудованием, имеются лаборатории сварки и неразрушающего контроля. Взята на вооружение новая система обучения с обновленной программой по теории и практике. На предприятии применяется оборудование «Линкольн Электрик», Харьковского предприятия «Коммунар» (около 150 единиц) и др. За месяц расходуется около 120 т сварочной проволоки. Есть претензии к ее качеству (по состоянию поверхности проволоки, разбрызгиванию при сварке). Широко используются электроды «ВИ-СТЕКа», вместе с тем есть также претензии к стабильности качества.

Подготовка кадров — наиболее уязвимая область. Система образования в училищах Украины крайне слабая. Отсев учащихся не приветствуется, так как они на бюджетном финансировании. Проведение конкурсов среди молодых сварщиков полезно, поскольку помогает в подготовке квалифицированных кадров и повышает престиж профессии.

Н. В. Высоколян также поддержал идею разработки стандарта относительно руководителя сварочных работ.

С опытом организации сварочных работ на Житомирском заводе металлоконструкций выступил директор завода Н. И. Дуда, который отметил, что на предприятии налажен систематический входной контроль на основные и сварочные материалы. Имеют место случаи обнаружения несоответствия их сертификатам. На предприятиях, по его мнению, следует ориентироваться на стандарт предприятия, на его основе готовить должностные инструкции для инженерно-технических специалистов по сварке, в которые и надо вкладывать все необходимые обязанности должностных лиц в области сварки, включающие и входной контроль материалов и оборудования (с учетом требований к ним), и порядок соблюдения технологий подготовки к сварке, и собственно технологии сварки, и многое другое. В этой работе большую роль играет квалификация главного сварщика предприятия.

Строгое соблюдение должностных инструкций позволит решить основную задачу — получение качественных неразъемных соединений.

Директор Межотраслевого учебно-аттестационного центра ИЭС им. Е. О. Патона П. П. Проценко остановился на роли персонала в системе обеспечения качества сварки. Он рассказал о мировом опыте решения вопроса обеспечения качества продукции на производстве. Международная система управления качеством включает требования к квалификации сварочного персонала (требования к руководителю сварочных работ, к процессу выполнения сварки, к контролирующим специалистам). Существующие ДСТУ описывают требования ко всем уровням квалифика-



ции сварщиков. Именно базирясь на них и надо составлять должностные инструкции. Руководитель сварочных работ — это не специальность, а должность. Сегодня лишь три училища в Украине готовы и способны готовить сварщиков в соответствии с международными требованиями. ОСУ должно взять под контроль ситуацию по качеству подготовки рабочих-сварщиков. Недопустимо положение, когда из 462 профучилищ в Украине, выпускающих рабочих, лишь из трех выпускники, как правило, все идут работать по специальности. На ветер тратятся бюджетные средства, а Министерство образования и науки не интересуется дальнейшим трудоустройством выпускников.

В Украине есть закон о профессиональном росте рабочих (2012), есть Постановление Кабмина о порядке подтверждения результатов внебюджетного обучения рабочих. Опираясь на них, в Украине должна получить развитие система коммерческой подготовки рабочих, включающая обучение и аттестацию рабочих. Требования к преподавателям должны предусматривать наличие у них высшего профильного образования и стажа не менее трех лет по специальности.

Аудитор ГП НТЦ «Сепроз» Н. А. Проценко рассказала о разработке и гармонизации национальных стандартов в области сварочного производства. В январе 2008 г. было принято положительное решение о вступлении Украины во Всемирную торговую организацию (ВТО). Членство в ВТО позволяет закрепить торговые отношения Украины, статус взаимных отношений со странами-торговыми партнерами, а также уменьшить тарифные и нетарифные ограничения для украинских товаров практически на всех мировых рынках, улучшить структуру украинского экспорта, обеспечить справедливое решение споров, защитить интересы национальных товаропроизводителей на мировых рынках. Существование в Украине большого количества межгосударственных стандартов (ГОСТ), разработанных до 1992 г., которые являются обязательными для применения, были восприняты членами рабочей группы по вступлению в ВТО как технические барьеры в торговле. По состоянию на 1 января 2012 г. фонд

действующих в Украине межгосударственных стандартов, разработанных до 1992 г., составлял 16765 стандартов. Эти стандарты по годам ввода их в действие и процентном отношении к общей численности разделены следующим образом: 1947–1959 гг. — 84 стандарта (0,5 %), 1960–1969 гг. — 973 стандарта (5,8 %), 1970–1979 гг. — 6672 стандарта (39,8 %), 1980–1991 гг. — 9036 стандартов (53,9 %). Такой подход не соответствует международным нормам и правилам, принципам ВТО, Соглашению о технических барьерах в торговле, не способствует внедрению новых технологий и инноваций и является объектом постоянной критики со стороны торговых партнеров Украины. В соответствии с обязательствами Украины в сфере ТБТ до 30 декабря 2011 г. все действующие национальные стандарты должны были быть гармонизированы с соответствующими международными стандартами и соответственно быть добровольными при применении (статья 2.4 Соглашения ТБТ). Затем срок гармонизации был продлен до конца 2013 г. Одним из условий вступления в ЕС является гармонизация 80 % действующих в Украине стандартов с Европейскими нормами (EN). ТК 44 «Сварка и родственные процессы» проводит гармонизацию стандартов, касающихся сварочного производства. Процесс гармонизации стандартов затруднен из-за отсутствия бюджетного финансирования. Серия гармонизированных стандартов определяет требования к качеству сварочного производства, сварных конструкций, сварочных материалов, квалификации персонала, аттестации технологий сварки, испытаниям сварных соединений на уровне международных и европейских стандартов. Согласно условиям вступления или сотрудничества с Таможенным союзом необходимо выполнять требования Технических регламентов Таможенного союза, которые учитывают уровень европейских директив. Расширение рынков сбыта сварных конструкций возможно только при условии изучения и выполнения требований нормативных документов, директив, технических регламентов Европейского и Таможенного союзов.

В июне 2013 г. зарегистрирована ассоциация





«Украинский центр стального строительства» (УЦСС). Ее учредителями стали «Группа Метинвест», ведущие дистрибьюторы металлопроката, производители несущих и ограждающих стальных конструкций, проектные организации. Создание УЦСС будет способствовать развитию внутреннего рынка металлопроката. На первом этапе ассоциация объединила 12 предприятий, в том числе заводы по производству кровельных и фасадных систем, отраслевые, проектные и научные институты, монтажные и строительные компании. Центр имеет статус всеукраинской общественной организации с офисом в Киеве. Цель ассоциации — сделать металлоконструкции предпочтительным товаром для строительства и способствовать широкому их применению.

Кроме того, на совещании были заслушаны доклады-презентации на темы, отражающие современные достижения компаний:

- ♦ использование комплектующих для плазменной и лазерной резки Thermacut на предприятиях Украины (В. А. Черненко);

- ♦ управление качеством сварки с использованием системы Kemppi Arc System 2.0 — Arc Quality (Ю. Н. Резник);

- ♦ о повышении качества сварных швов и производительности процесса при проведении сварочных работ в Украине (В. Л. Бондаренко, ООО «Фрониус Украина»);

- ♦ инновационные решения от «Abicor Binzel» (Ю. А. Дидус, А. С. Новиков);

- ♦ роботизация сварочного производства (К. В. Красносельский, «Триада Сварка»);

- ♦ оборудование для сварки и резки Jackle (А. С. Новиков, А. В. Колумбет);

- ♦ сварочные материалы ПАО «ПлазмаТек» (Е. И. Глубокая).

По общей оценке присутствующих на совещании были заслушаны интересные доклады, высказаны полезные предложения, позволившие выработать следующие решения:

- 1) разработать в ОСУ Положение о руководителе сварочных работ как отдельный нормативный документ и типовые должностные инструкции;

- 2) признать целесообразным со стороны ОСУ оказывать методическую поддержку системе профтехобразования Украины в области сварки;

- 3) главным сварщикам и руководителям сварочных работ периодически проводить испытания сварочного оборудования и сварочных материалов для различных моделей и марок и их результаты в виде письменных протоколов передавать руководству ОСУ для обобщения и принятия соответствующих решений;

- 4) организовать взаимодействие ОСУ с центрами занятости в сфере подготовки сварщиков.

В. Н. Липодаев

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»

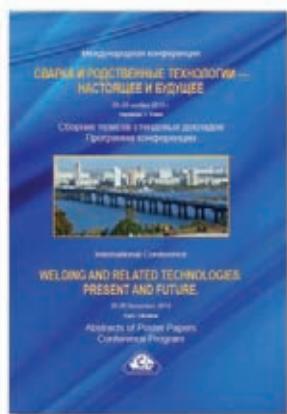
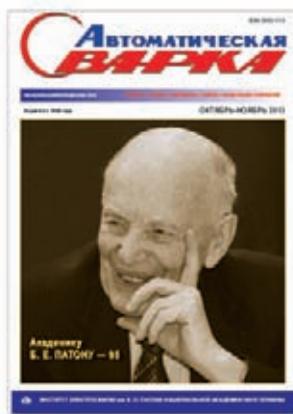
25–26 ноября 2013 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины прошла представительная международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее», организованная Национальной академией наук Украины и Институтом электросварки им. Е. О. Патона. В ней приняли участие свыше 200 представителей академических институтов, отраслевых НИИ, научных, проектно-конструкторских и инженерных центров, промышленных предприятий и учебных университетов, руководителей и менеджеров бизнесструктур и др. В числе участников конференции было около 70 представителей из Австрии, Болгарии, Великобритании, Германии, Индии, Канады, КНР, Польши, Словакии, США, Франции, Японии, Беларуси, Грузии, Казахстана, России и др.

Среди почетных гостей конференции были президент АН Республики Саха (Якутия), чл.-кор. РАН М. П. Лебедев, президент Российского науч-

но-технического сварочного общества проф. О. И. Стеклов, президент Общества сварщиков Украины В. Г. Фартушный, президент Общества сварщиков Беларуси проф. Л. С. Денисов.

На конференции 25-го и первой половине 26 ноября были заслушаны и обсуждены на пленарных заседаниях 22 заказных доклада ученых из





многих стран мира о наиболее важных научных достижениях, полученных в последнее время в области сварки, наплавки, пайки, прочности, новых материалов, неразрушающего контроля и технической диагностики, оценки остаточного ресурса сварных конструкций, инженерии поверхности, специальной электрометаллургии, а также перспективах развития этих направлений.

Докладчиками были известные ученые И. В. Горынин, Гуань Цяо, Я. Пилярчик, У. Райсенг, Ю. Плескачевский, Я. Окамото, С. Кайтель, В. Лысак, М. Белоев, Б. Ломберг, А. Дуб, П. Мудж, А. Де, Т. Мочизуки, Ю. Сараев, К. Алалусс. Доклады вызвали большой интерес у участников конференции и сопровождалась вопросами к докладчикам.

Во второй половине дня 26 ноября в читальном зале Института электросварки им. Е. О. Патона

для ознакомления были представлены 195 стендовых докладов. Экспозиция включала следующие разделы:

- ♦ технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных технологий (76 докладов);
- ♦ прочность сварных соединений и конструкций, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированных состояний и их регулирования (44 доклада);
- ♦ неразрушающий контроль и техническая диагностика (16 докладов);
- ♦ инженерия поверхности (36 докладов);
- ♦ специальная электрометаллургия (13 докладов);
- ♦ проблемы сварки в медицине, экология, аттестация и стандартизация сварочного производства (10 докладов).

Активный обмен научной информацией о результатах исследований был взаимно полезным.

В период работы конференции состоялся ряд двухсторонних переговоров, направленных на кооперацию и укрепление сотрудничества, подписано Соглашение о сотрудничестве между Обществом сварщиков Украины и Российским научно-техническим сварочным обществом.

К началу работы конференции были изданы пленарные доклады в виде отдельных номеров журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal» (№ 10-11, 2013 г.), а также тезисы стендовых докладов.

В заключение конференции состоялся дружеский прием для ее участников.

В. Н. Липодаев, А. Т. Зельниченко



20 ЛЕТ В МИРЕ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

Распад СССР, рождение на постсоветском пространстве в начале 1990-х годов независимых республик сопровождался сбоем в работе промышленности, разрывом и потерей производственных связей, массовой остановкой производств. В 1993 г. в Киеве по инициативе сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона было создано совместное российско-украинское предприятие ООО «СП «ТМ ВелдТек». Оно успешно развивалось в направлении производства порошковых проволок. Этому способствовала поддержка «Днепропетровского метизного производственного объединения», руководство которого с пониманием отнеслось к идее восстановления производства порошковых проволок в Украине.

В 2001 г. производство порошковых проволок было выделено в отдельное подразделение – ООО «ТМ.ВЕЛТЕК».

За 20 лет работы на предприятии реализован ряд важных технических мероприятий по ремонту и модернизации основного оборудования, в частности линий производства порошковых проволок, совершенствованию шихтового отделения, освоены современные виды поставки продукции, отработаны технологии изготовления проволок диаметрами от 1,0 до 6,0 мм. К настоящему времени разработаны и выпускаются серии современных сварочных и наплавочных порошковых проволок. Достигнутые результаты стали возможны благодаря самоотверженному труду высококвалифицированных инженерно-технических работников и рабочих.

Положительный результат сотрудничества с предприятиями достигается благодаря комплексному подходу при выполнении заказа, включающему при необходимости консультационную помощь по выбору материала, оптимальной технологии и оборудования для его применения, инженерное сопровождение.

Высокий научный и технический потенциал предприятия независимо от номенклатуры и объемов партий позволяет выполнять заказы в кратчайшие сроки с учетом требований заказчика. Такой подход позволил освоить достаточно большой сектор рынка в Украине, обеспечить стабильные зарубежные контракты и стать постоянным партнером для многих предприятий. В ее активе опыт взаимодействия сотрудничества с научно-исследовательскими институтами и университетами Украины и России.

По назначению и техническим характеристикам порошковые проволоки марки ВЕЛТЕК сегодня не уступают продукции ведущих зарубежных компаний, что подтверждается их высокой оценкой на отечественных и зарубежных выставках и независимыми рейтингами, признанием в качестве надежного поставщика ведущими предприятиями Украины и СНГ, непрерывным расширением областей потребления и ростом объемов продаж.

Для восстановительной наплавки деталей металлургического оборудования в ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» разработан ряд новых порошковых проволок.

Для восстановительной наплавки роликов МНЛЗ выпускается порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н470 диаметром 2,0–4,0 мм в сочетании с флюсами АН-20 и АН-26 и самозащитная ВЕЛТЕК-Н470С диаметром 2,0–2,4 мм. Эти порошковые проволоки обеспечивают самопроизвольное отделение шлаковой корки, отсутствие пор и трещин в наплавленном металле при соблюдении технологических рекомендаций. Сопоставительные испытания порошковых проволок ВЕЛТЕК-Н470 и ВЕЛТЕК-Н470С показали, что они находятся на уровне проволок ведущих зарубежных компаний. Наплавленные ролики имеют ресурс не менее 1,5 млн т.





ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» совместно с металлургическими заводами КГМК «Криворожсталь», ДМК им. Дзержинского и МК «Запорожсталь» выполнен комплекс работ, направленных на совершенствование наплавочных материалов, технологии и оборудования для наплавки прокатных валков. На базе стандартных порошковых проволок марок ПП-Нп-35В9Х3СФ и ПП-Нп-25Х5ФМС были отработаны системы легирования и разработаны новые порошковые проволоки с учетом условий эксплуатации прокатных валков: ВЕЛТЕК-Н370-РМ, ВЕЛТЕК-Н460, ВЕЛТЕК-Н500-РМ, ВЕЛТЕК-Н500-РМ, ВЕЛТЕК-Н505-РМ, ВЕЛТЕК-Н550-РМ. Наплавка этими проволоками выполняется под флюсами АН-20, АН-26, АН-348А. Использование предлагаемых проволок повысило эффективность работы прокатных валков.

Совместно с Никопольским заводом бесшовных труб ЗАО «Нико Тьюб» выполнены работы по внедрению в процесс упрочняющей наплавки валков непрерывного стана порошковой проволоки ВЕЛТЕК-Н480НТ с системой легирования С-Si-Mn-Cr-V-Mo-W. Проволока

обеспечивает устойчивый процесс наплавки под флюсами АН-20С, АН-26П на постоянном токе обратной полярности, легкую отделимость шлаковой корки, отсутствие трещин и пор в наплавленном металле. Твердость наплавленного металла HRC 50–56.

Самозащитная порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н250РМ диаметром 1,6–3,0 мм успешно применяется при восстановлении подушек прокатных клетей и ножиц, шпинделей и муфт приводов прокатных валков, звездочек, втулок, валов, ступиц и др.

Реализована наплавка кернов клещевых кранов и губок стрипперного крана, которые

в процессе эксплуатации испытывают ударные и сжимающие нагрузки в условиях высоких температур. Для этой цели применена самозащитная порошковая проволока марки ВЕЛТЕК-Н480С диаметром 2 мм с системой легирования (С-Cr-W-Mo-V-Ti), которая обеспечивает твердость наплавленного металла после наплавки HRC 50-54, горячую твердость HRC 40–44 при 600 °С. Применение механизированной наплавки проволокой ВЕЛТЕК-Н480С взамен электродов Т-590, Т-620 позволило повысить срок службы кернов в 4–5 раз. Задача восстановления кернов решена в комплексе (оборудование–материал–технология).

Для наплавки крановых колес предлагаются порошковые проволоки марок ВЕЛТЕК-Н300-РМ, ВЕЛТЕК-Н350-РМ диаметром 1,6–4,0 мм. Наплавка осуществляется под флюсами АН-348, АН-60 или в углекислом газе. В последние годы успешно применяется ВЕЛТЕК-Н300-РМ взамен сплошной проволоки Нп-30ХГСА. Для наплавки колес тяжело нагруженных кранов разработана технология наплавки под флюсом АН-348 порошковой проволокой марки ВЕЛТЕК-Н285 диаметром 3,6 мм. Хромомарганцовистый наплавленный металл со структурой метастабильного аустенита обеспечивает высокую износостойкость колес вследствие развития процесса самоупрочнения под воздействием наклепа.

Компания занимает активную общественную позицию, оказывая финансовую поддержку отечественному спорту, медицине и науке.

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ В 2014 Г. (СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)

Дата	Место проведения	Мероприятие
28 января–01 февраля	Красноярск/Россия	Выставка металлообработки и сварки-2014
18–20 февраля	Москва/Россия	Международная выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»
24–28 февраля	Свалява, Карпаты/ Украина	Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте»
09–13 марта	Сан Антонио/США	Международная конференция и выставка «Corrosion-2014»
12–14 марта	С.-Петербург/ Россия	Петербургская техническая ярмарка
25–28 марта	Новосибирск/ Россия	Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия 2014»
01–03 апреля	Киев/Украина	Международная специализированная выставка «Киевская техническая ярмарка»
01–03 апреля	Киев/Украина	Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Металлообработка. Сварка»
08–11 апреля	Минск/Беларусь	Международная специализированная выставка «Сварка и резка»
Апрель	Фридек-Мистек/ Чехия	Международный конкурс молодых сварщиков (до 20 лет) «Золотой кубок Линде»
15–18 апреля	С.-Петербург/ Россия	Международная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика»
15–18 апреля	Челябинск/Россия	Международный форум «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении»
22–25 апреля	Нижний Новгород/ Россия	Международная выставка «Машиностроение. Станки. Инструменты. Сварка»
Май	Киев/Украина	Сессия Научного совета по новым материалам МААН
06–07 мая	Галле/Германия	Европейская конференция «Соединение и производство железнодорожных колес»
13–15 мая	Киев/Украина	Международная конференция-выставка «Неразрушающий контроль 2014»
21–22 мая	Фастов, Киев. обл./ Украина	Конкурс молодых сварщиков (ученики системы профтехобразования)
21–24 мая	Запорожье/Украина	Международная выставка «Машиностроение. Металлургия. Сварка»
25–28 мая	Нижний Новгород/ Россия	Международная конференция «Ti-2014 в СНГ»
02–06 июня	Ялта/Украина	Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» с семинаром «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии»
03–06 июня	Москва/Россия	Международная выставка «Металлургия-Литмаш-2014»
11–13 июня	Львов/Украина	Международная конференция «Коррозия-2014»
16–18 июня	Киев/Украина	Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы»
24–26 июня	С.-Петербург/ Россия	Международная конференция «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства»
24–27 июня	С.-Петербург/ Россия	Международная специализированная выставка «Сварка/Welding-2014»
Июнь	Пекин/Китай	Международный конкурс сварщиков (до 35 лет) «ARC CUP»
13–18 июля	Сеул/Южная Корея	67-я ассамблея Международного института сварки
Август	Одесса/Украина	Открытый конкурс сварщиков-профессионалов Украины
Сентябрь	Донецк/Украина	Международная специализированная выставка «Металлургия. Обработка. Сварка»

Сентябрь	Одесса/Украина	Международная научно-практическая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении»
Октябрь	Киев/Украина	Научная конференция «80 лет ИЭС им. Е. О. Патона»
29 сентября–03 октября	Ялта/Украина	Международная научно-практическая конференция «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»
22–26 сентября	Ялта/Украина	Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях»
29 сентября–03 октября	Брно/Чехия	Международная машиностроительная выставка MSV-2014
07–09 октября	Дюссельдорф/Германия	Международная специализированная выставка и конференция «Алюминий-2014»
07–10 октября	Москва/Россия	Международная специализированная выставка «Weldex/Россварка»
14–16 октября	Сосновицы/Польша	Международная конференция «Сварочные технологии — can be more»
15–17 октября	Киев/Украина	Специализированная выставка «Сварка и родственные технологии»
21 октября	Дуйсбург/Германия	Конференция «Обучение сварке»
21–25 октября	Ганновер/Германия	Международная выставка оборудования и технологий по производству и обработке листового проката («EuroBLECH»)
30 октября–01 ноября	Москва/Россия	Московский международный форум инновационного развития (нанотехнологии, новые технологии)
Ноябрь	Киев/Украина	Международный промышленный форум-2014» с разделом «Укрсварка»
25–27 ноября	Екатеринбург/РФ	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»
Декабрь	Киев/Украина	Международная научно-практическая конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»

ГЕРМАНИЯ НАУЧНАЯ: ПОЛЕЗНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ

Воспользовавшись ссылками, можно получить информацию о научном «ландшафте» Германии, найти научного партнера, организовать пребывание в Германии для проведения исследований, найти стипендии и гранты.

По вопросам кооперации в области научных исследований просьба обращаться:
ул. Пушкинская, 34, 01004, Киев, тел. (044) 234-72-24, E-mail: erich.bistriker@ukrde.com.ua

Портал «Исследования в Германии» создан по инициативе Федерального министерства образования и науки.
www.research-in-germany.de

Общество им. Фраунгофера — самая крупная в Европе организация, которая занимается прикладными исследованиями. В общество входит 66 научных организаций.
www.fraunhofer.de/de/

86 научных организаций Общества им. Лейбница проводят исследования в области естественных, инженерных и других наук.
www.leibniz-gemeinschaft.de/en/media/publications/

Федеральное консультативное бюро «Исследования и инновации» — организация, которая предоставляет информацию о программах финансовой поддержки Федерального правительства.
www.foerdeinfo.bund.de/en/index.php

Немецкая служба академических обменов.
www.daad.de/publikationsbestellung

Фонд Александра фон Гумбольдта предоставляет финансовую возможность высококвалифицированным зарубежным ученым для проведения длительных исследований в Германии.
www.humboldt-foundation.de/web/publications.html

Немецкое исследовательское общество является центральной организацией по финансовой поддержке исследований в высших учебных заведениях и исследовательских центрах Германии.
www.dfg.de/en/dfg_profile/publications/index.html

Подписано к печати 17.12.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 18,02. Усл.-отт. 19,0. Уч.-изд. л. 20,10 + 2 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.