Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 7 (604)
Июль 2003

Издается с 1948 года

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

Издатель: *Международная ассоциация «Сварка»*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай, В. Ф. Грабин, В. Н. Замков, А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко, С. И. Кучук-Яценко, Ю. Н. Ланкин, В. К. Лебедев (зам. гл. ред.), В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.), Л. М. Лобанов, А. А. Мазур, В. И. Махненко, В. Ф. Мошкин, О. К. Назаренко, И. К. Походня, И. А. Рябцев, Ю. А. Стеренбоген, Б. В. Хитровская (отв. секр.), В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Н. П. Алешин (Россия)
Б. Брейтвейт (Великобритания)
Д. фон Хофе (Германия)
К. Буше (Франция)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
Т. Игар (США)
К. Иноуэ (Япония)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Чжан Янмин (Китай)
В. К. Шелег (Беларусь)

Адрес редакции:
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj
Редакторы:
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, Т. В. Юштина.
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко, И. Р. Наумова, И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева.

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечень утвержденных ВАК Украины изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.
За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет.
Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Цыбулькин Г. А., Махненко О. В., Переверзев Ю. Н. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций 3

Шонин В. А., Машин В. С., Войтенко О. В., Новожилов В. В. Повышение сопротивления усталости тавровых сварных соединений тонколистового алюминиевого сплава АМг6 9

Дмитрик В. В., Пащенко А. Н. Уменьшение структурной неоднородности участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений перлитных сталей 14

Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Зволинский И. В. Структура паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с использованием дугового нагрева 19

Пентегов И. В., Петриенко О. И. Расчет распределения температуры по длине вылета электрода с учетом тепла, поступающего от капли 23

Петушков В. Г., Волгин Л. А., Добрушин Л. Д. Резка взрывом и ее применение 29

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Мазур А. А., Заяц С. В. Экономические факторы выбора способов сварки и вентиляции 36

Назарчук А. Т. Оптимизация параметров режима дуговой сварки в узкий зазор закаливающихся сталей без подогрева 40

Басов Г. Г., Ткаченко А. Н., Ефимова Н. П. Опыт изготовления воздушных резервуаров локомотивов в ХК «Луганскстепловоз» 44

Притула С. И., Лебедев В. А., Ткаченко В. А. Блочно-модульная система управления оборудованием для дуговой механизированной и автоматизированной сварки 47

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Мурашов А. П., Астахов Е. А., Демьянов И. А., Капула А. Д. Износостойкость газотермических покрытий, полученных из композиционных порошков «ферросплав — B_4C, SiC» 51

Лебедев В. А. Схема питания систем управления полуавтомата от напряжения источника сварочного тока 52

Разработано в ИЭС: Асинхронный сварочный генератор 54

Диссертации на соискание ученой степени 54

Патенты в области сварочного производства 55

По зарубежным журналам 56

Новая книга 58

ХРОНИКА

Открытие Совместного центра сварки и родственных технологий «Харбин-Патон» 59

Ученые ИЭС им.Е.О.Патона — лауреаты Всеукраинского конкурса «Изобретение-2002» 60

Сессия Научного совета по новым материалам Международной ассоциации академий наук 61

РЕКЛАМА 62

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

КЭЭСО *Каховский завод электросварочного оборудования*

Опытный завод сварочных материалов ИЭС им.Е.О.Патона

NKMZ *Ново-Краматорский машиностроительный завод*

СП «ТМ ВЕЛДТЕК»

Технопарк «ИЭС им.Е.О.Патона»

Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им.Е.О.Патона

© НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2003

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 7 (604)
July 2003

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

Published since 1948

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

Yu. S. Borisov, N. M. Voropai,
V. F. Grabin, V. N. Zamkov,
A. T. Zelnichenko, A. Ya. Ishchenko,
S. I. Kuchuk-Yatsenko, Yu. N. Lankin,
V. K. Lebedev (vice-chief ed.),
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko, V. F. Moshkin,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
I. A. Ryabtsev, Yu. A. Sterenbogen,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
B. Braithwaite (UK)
C. Boucher (France)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Diltey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
Zhang Yanmin (China)

Address:
The E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj
Editors:
E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
T. V. Yushtina.
Electron galley:
I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegiryova.

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Paton B. E., Lobanov L. M., Tsybulkin G. A., Makhnenko O. V., Pereverzev Yu. N. Automated thermal straightening of welded thin-sheet structures 3
Shonin V. A., Mashin V. S., Voitenko O. V., Novozhilov V. V. Increase in fatigue resistance of welded T-joints of thin-sheet aluminium alloy AMg6 9
Dmitrik V. V., Pashchenko A. N. Decrease in structural heterogeneity of HAZ partial recrystallization area of pearlitic steel welded joints 14
Khorunov V. F., Maksimova S. V., Zvolinsky I. V. Structure of high-alloy nickel alloy brazed joints produced by using arc heating 19
Pentegov I. V., Petrienko O. I. Calculation of temperature distribution in electrode stickout length with allowance for heat entered from drop 23
Petushkov V. G., Volgin L. A., Dobrushin L. D. Explosion cutting and its application 29

INDUSTRIAL

Mazur A. A., Zayats S. V. Economical factors of selection of welding and ventilation methods 36
Nazarchuk A. T. Optimizing of condition parameters of narrow-gap arc welding quenching steels without preheating 40
Basov G. G., Tkachenko A. N., Efimova N. P. Experience in manufacture of air tanks of locomotives in KhK «Luganskteplovoz» 44
Pritula S. I., Lebedev V. A., Tkachenko A. A. Block-modular system of control of equipment for mechanized and automatic welding 47

BRIEF INFORMATION

Murashov A. P., Astakhov E. A., Demyanov I. A., Kapula A. D. Wear resistance of thermal coatings produced from composite powders of «ferroalloy – B_4C, SiC» 51
Lebedev V. A. Circuit for supply of semi-automatic machine control systems from welding current source voltage 52
Developed at PWI: asynchronous welding generator 54
Thesis for scientific degree 54
Patents in the field of welding 55
Review of foreign journals 56
New book 58

NEWS

Opening of Joint Center of Welding of Related Technologies «Harbin-Paton» 59
Scientists of the Paton Institute are the laureates of All-Ukrainian competition «Invention-2002» 60
Session of Scientific Council on new materials of International Association of Academies of Sciences 61

ADVERTISING 62

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title ***«The Paton Welding Journal»****.*
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board.

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2003

УДК 621.791.052:539.3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПРАВКА СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Г. А. ЦЫБУЛЬКИН**, д-р техн. наук, **О. В. МАХНЕНКО**, канд. техн. наук, **Ю. Н. ПЕРЕВЕРЗЕВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости. Создан автоматизированный комплекс для термической правки сварных тонколистовых конструкций на основе математического моделирования, манипуляционного робота, системы измерения деформаций и микроплазменного источника нагрева. Автоматизированная термическая правка позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, улучшает экологические показатели.

Ключевые слова: сварные тонколистовые конструкции, сварочные деформации, термическая правка, автоматизация процесса, математическое моделирование

Опыт изготовления сварных тонколистовых конструкций показывает, что часто встречаемый вид местных деформаций — коробление (бухтиноватость) металла листа образуется вследствие потери устойчивости от напряжений сжатия, вызванных продольной усадкой сварных швов от приварки ребер жесткости. Если эти деформации превышают допустимый уровень, обычно используют термическую правку, в результате которой в металле листа возникают пластические деформации укорочения, позволяющие убрать «лишний» металл.

Термическую правку сварных тонколистовых конструкций можно рассматривать как непродуктивные затраты. Так, на судостроительных заводах ее объемы по затратам квалифицированной рабочей силы составляют 10...15 % суммарного объема затрат на сборку и сварку корпусных конструкций, а в некоторых случаях при правке тонкостенных конструкций могут достигать 40...45 % и более [1–3]. При производстве корпусов вагонов деформации бухтиноватости составляют приблизительно 50 % всех видов сварочных деформаций формоизменения, а затраты на термическую правку могут достигать 20 % стоимости изготовления корпуса вагона [4]. При этом до настоящего времени нет данных относительно разработки и применения автоматизированной термической правки сварных тонкостенных конструкций.

Величина остаточных пластических деформаций при термической правке зависит от максимального значения и распределения температуры нагрева, мощности источника, количества и расположения мест нагрева, остаточных напряжений и жесткости конструкции, жесткости внешнего закрепления и пр. Таким образом, эффективность термической правки зависит от большого количества параметров, что является основной проблемой при автоматизации такой технологической операции. Одним из путей решения этой проблемы является выбор оптимальных параметров нагрева, количества и расположения пятен нагрева на основе математического моделирования процесса термической правки для каждой конкретной конструкции. Современный уровень компьютерной техники и расчетных методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния в тонколистовых конструкциях позволяет проводить такое моделирование и определять оптимальные параметры процесса термической правки оперативно, в режиме реального времени.

При автоматизации процесса термической правки тонколистовых сварных конструкций важен правильный выбор источника нагрева. Традиционно используется нагрев газовым пламенем, однако этот источник нагрева имеет ряд недостатков с точки зрения автоматизации процесса. Целесообразно рассмотреть возможность применения альтернативных источников нагрева, например, электросопротивлением, индукционным, плазменным и другими источниками. Для того чтобы автоматизировать контроль формы сварной конструкции и позицирование нагревающего устройства, необходимо использовать либо промышленный робот либо специальный манипулятор.

Математическое моделирование. Оно может помочь решить две задачи. Во-первых, определить оптимальные параметры нагрева, при которых возможно получение максимальных остаточных пластических деформаций усадки при отсутствии местной потери устойчивости листа металла. Во-вторых, определить необходимое количество местных нагревов и их расположение для того, чтобы устранить или уменьшить деформации коробления конструкции в допустимых пределах. Математическое моделирование процесса термической правки должно выполняться оперативно, в режиме реа-

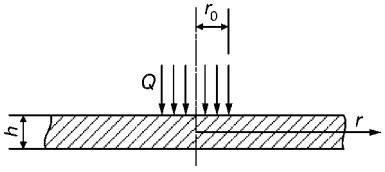


Рис. 1. Схема нагрева круглого пятна в листе металла (h — толщина листа; r_0 — радиус пятна нагрева; Q — мощность источника нагрева)

© Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Г. А. Цыбулькин, О. В. Махненко, Ю. Н. Переверзев, 2003

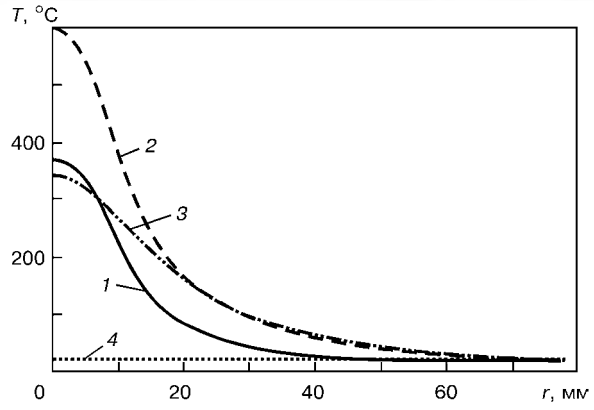


Рис. 2. Расчетные распределения температуры в стальном листе в разные моменты времени от начала нагрева: *1* — *t* = 10; *2* — 30; *3* — 35; *4* — 300 с

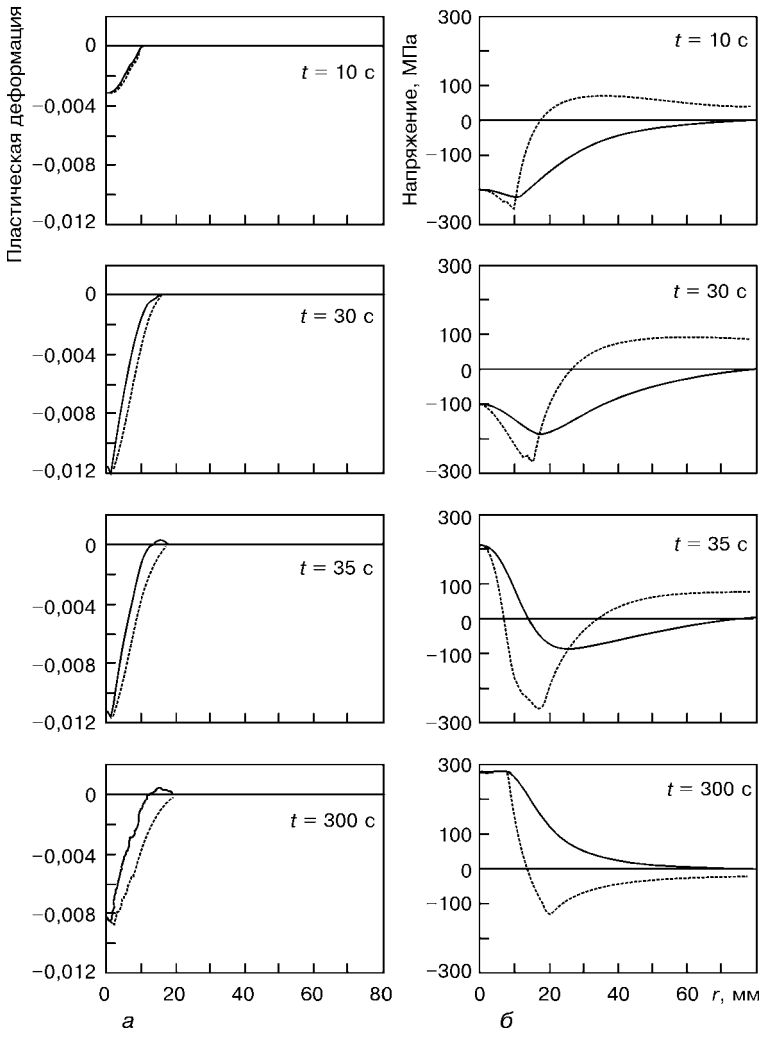


Рис. 3. Расчетные распределения пластических деформаций (*а*) и напряжений (*б*) в стальном листе в разные моменты времени от начала нагрева: сплошная кривая — радиальные деформации, точечная — тангенциальные

льного времени, т. е. математическая модель должна быть максимально упрощена. С этой целью форма пятна нагрева была выбрана круглой (рис. 1). Это позволило разработать для решения первой основной задачи одномерную модель нагрева круглого пятна в листе металла бесконечных размеров. Были приняты следующие допущения: плоское напряженное состояние и отсутствие перемещений из плоскости; симметрия в плоскости листа; неограниченные размеры листа, что соответствует реальным условиям нагрева концентрированным источником на некотором удалении от края листа. При решении использовали методы решения задач термопластичности [5]. В результате последовательного прослеживания образования и развития пластических деформаций во время нагрева и остывания определяли остаточные пластические деформации усадки от такого нагрева в листе металла. Модель дополнена также возможностью учета процесса местной потери устойчивости. В результате путем последовательного уточнения определяли оптимальные параметры нагрева, при которых возможно получение максимальных остаточных пластических деформаций усадки при отсутствии местной потери устойчивости листа металла.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены расчетные данные распределений температуры, пластических деформаций и напряжений в стальном (Ст 3) листе толщиной 2 мм в разные моменты времени от начала нагрева. Радиус пятна нагрева 10 мм, эффективная мощность источника нагрева 245 Дж/с, время нагрева 30 с. На рис. 4 приведены данные из работы [6] относительно рекомендуемых диаметров нагрева до температуры 600 °С, а также полученные расчетные данные относительно максимальных диаметров пятна, при которых еще не возникает местной потери устойчивости при различном времени нагрева до температуры 600 °С. Чем меньше время нагрева, тем больше максимальный радиус пятна нагрева. Для получения этих данных использовали разработанный подход, в котором потеря устойчивости происходит в достаточно большой области, где возникают температурные напряжения сжатия. Для оценки критического состояния, при котором происходит потеря устойчивости, использовали метод Бубнова–Галеркина для жесткой круглой пластины, шарнирно опирающейся по контуру и свободной в радиальном направлении [7].

После того, как вычислены оптимальные параметры круглого пятна нагрева для данного материала и толщины листа металла, необходимо определить количество таких пятен нагрева и их расположение для данной конструкции с учетом ширины и длины зоны бухтиноватости, количества волн бухтиноватости и их максимальных прогибов (рис. 5). Для оценки «лишней» площади F листа, которую необходимо убрать при термической правке в рамках зоны бухтиноватости $0 < x < a$, $0 < y < b$, в общем виде используется формула

$$F = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b\left[\left(\frac{dU_z}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dU_z}{dy}\right)^2\right]dxdy, \qquad (1)$$

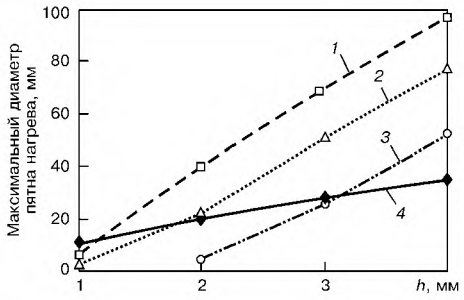


Рис. 4. Зависимость максимального диаметра пятна нагрева от толщины листа: *1* — t = 10 с; *2* — 30 с; *3* — 60 с; *4* — расчетные данные Кузьминова

где U_z — перемещение точек листа в нормальном к поверхности направлении.

Величину F можно также приблизительно определить, если известно только значение максимального прогиба f_0 в центре зоны бухтиноватости $0 < x < a$, $0 < y < b$:

$$F = \frac{f_0^2 \pi^2}{8}\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right). \qquad (2)$$

В результате нагрева круглого пятна в листе металла образуются остаточные пластические деформации усадки $\varepsilon_{rr}^p(r)$, $\varepsilon_{\beta\beta}^p(r)$ (где r — текущий радиус), которые приводят к уменьшению площади листа металла

$$F_1 = 2\pi \int_0^\infty r\,(\varepsilon_{rr}^p + \varepsilon_{\beta\beta}^p)\,dr. \qquad (3)$$

Таким образом, если определены величины «лишней» площади листа металла F и уменьшения площади листа металла от одного пятна нагрева F_1, то необходимое количество пятен нагрева приблизительно равно

$$N = \frac{F}{F_1}. \qquad (4)$$

При определении оптимального размещения пятен нагрева по площади листа металла с бухтиноватостью используются следующие основные правила [6, 8]:

пятна нагрева не могут быть расположены возле приваренных ребер жесткости ближе, чем на 75... 100 мм, иначе созданные нагревом пластические деформации усадки увеличат прогиб бухтиноватости аналогично действию усадки от сварных швов;

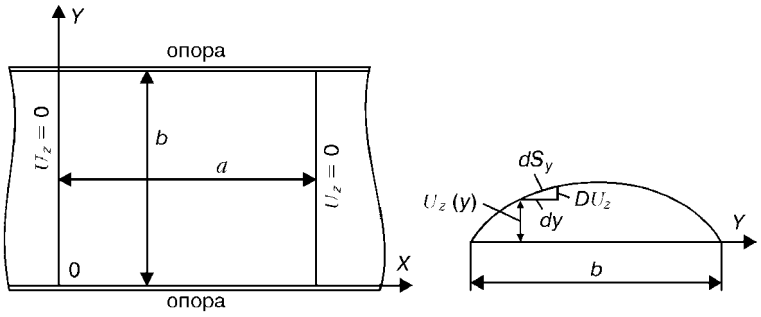


Рис. 5. Схема участка сварной конструкции размером $a \times b$ с деформацией бухтиноватости

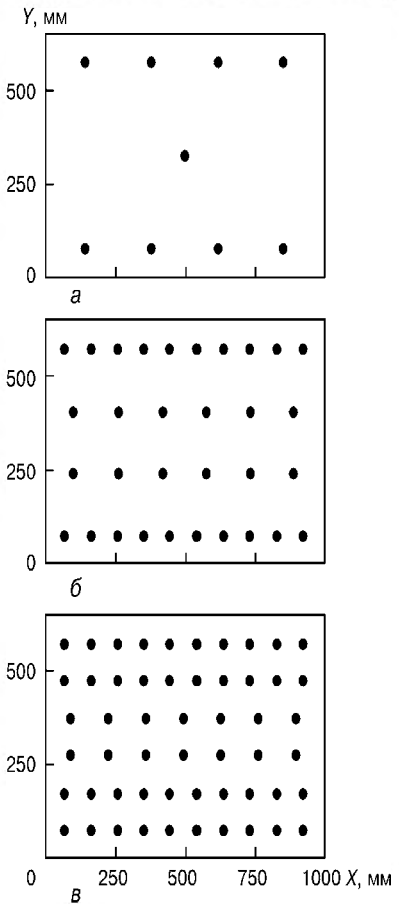


Рис. 6. Размещение пятен нагрева для различных максимальных прогибов бухтиноватости 5 (*а*), 10 (*б*) и 13 мм (*в*)

пятна нагрева в первую очередь размещаются вдоль приваренных ребер жесткости в зоне остаточных напряжений сжатия, что в некоторой степени способствует образованию и развитию пластических деформаций усадки;

расстояние между соседними пятнами нагрева определяется таким образом, чтобы температурные поля от пятен нагрева не влияли друг на друга, что позволяет проводить термическую правку без перерывов на охлаждение листа металла;

если при выполнении указанных выше правил невозможно расположить все необходимое количество пятен нагрева по площади листа, то процесс термической правки следует разбить на два, три или больше серий нагрева, которые выполняются после остывания листа метала.

На рис. 6 приведен пример размещения круглых пятен нагрева (радиус пятна нагрева 10 мм, мощность источника нагрева 245 Дж/с, время нагрева 30 с) по площади листа размером 1000×650×2 мм для различных максимальных прогибов бухтиноватости (5, 10 и 13 мм). Параметры пятна нагрева найдены как оптимальные с точки зрения максимальных остаточных пластических деформаций усадки для листа металла из стали марки Ст3 толщиной 2 мм при максимальной температуре нагрева 600 °С, времени нагрева 30 с и отсутствии местной потери устойчивости листа во время нагрева.

Рис. 7. Источник индукционного нагрева токами высокой частоты с нагревающим устройством

Выбор источника нагрева. Традиционно, как уже отмечалось, для термической правки используется нагрев газовым пламенем. Однако этот источник нагрева имеет ряд недостатков с точки зрения автоматизации процесса и обеспечения стабильных характеристик нагрева. К тому же газопламенный нагрев имеет низкие экологические показатели.

Испытания источника нагрева электросопротивлением выявили такой существенный недостаток, как повышенные требования к чистоте поверхности листа металла, а также повреждения поверхности листа, что при термической правке недопустимо.

Источник индукционного нагрева токами высокой частоты на основе генератора мощностью 15 кВт и специально разработанного индукционного нагревающего устройства (рис. 7) показал эффективность для толщины листа металла от 6 мм и выше. Для меньшей толщины используемый источник индукционного нагрева не обеспечивал малых размеров пятна нагрева, что приводило к местной потере устойчивости листа металла.

Малые размеры зоны концентрированного нагрева удалось обеспечить с помощью микроплазменного источника нагрева МПИ-4 мощностью 2 кВт с плазмотроном косвенного действия (рис. 8). При этом микроплазменный нагрев не зависит от чистоты поверхности, не повреждает поверхность листа металла при правильно выбранном режиме, легко управляется, имеет низкое потребление энергии и высокие экологические показатели. К недостаткам следует отнести сложность обеспечения стабильных характеристик при продолжительных режимах работы. Учитывая доступность источника нагрева МПИ-4 и возможность создания горелки косвенного действия, был выбран микроплазменный источник нагрева.

Лазерный источник нагрева расфокусированным лучом удовлетворяет практически всем требованиям, предъявляемым к источнику нагрева для термической правки тонколистовых конструкций:

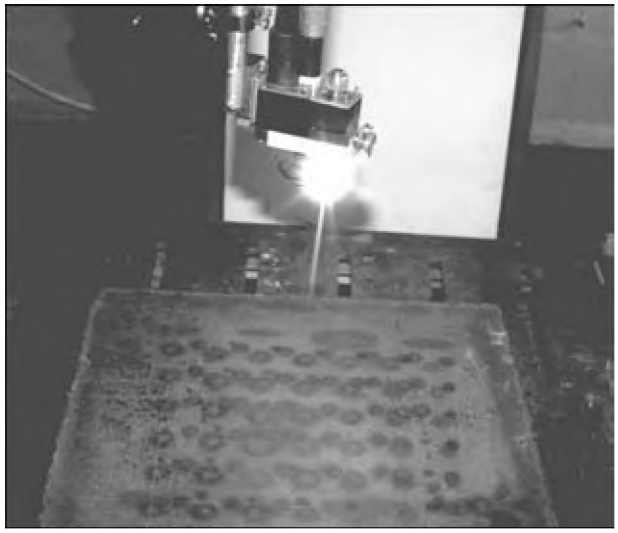


Рис. 8. Микроплазменный источник нагрева МПИ-4 с горелкой косвенного действия

высококонцентрированный нагрев, простота регулировки и управления, стабильность характеристик, экологичность. Основной недостаток — высокая стоимость. Однако, учитывая современную тенденцию к резкому снижению цены на лазерные источники, можно отнести их к наиболее перспективным источникам нагрева для автоматизации процесса термической правки.

Система контроля деформаций конструкции. Автоматизация процесса термической правки тонколистовых конструкций потребовала создания системы оценки величины деформаций. Разработанная система обеспечивает измерение деформаций в программно задаваемых точках, равномерно расположенных с определенным шагом по всей площади листа конструкции. При этом по разработанному алгоритму [9] осуществляется локализация точек максимальных деформаций, измеряются и фиксируются в памяти робота координаты этих точек и значения самих деформаций. На основе данной информации управляющая программа определяет количество и расположение пятен нагрева, необходимых для термической правки бухтиноватости, либо прекращает процесс, если деформации конструкции находятся в допуске. В

Рис. 9. Автоматизированный комплекс для термической правки тонколистовых сварных конструкций

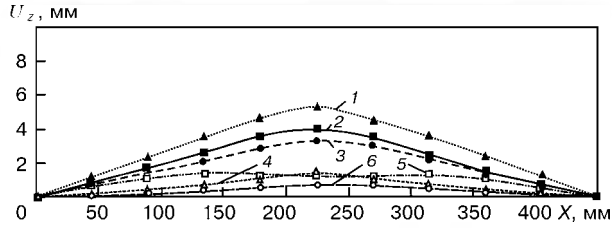


Рис. 10. Результаты измерения прогибов U_z сварных образцов в центральном поперечном сечении до (*1–3*) и после (*4–6*) автоматизированной термической правки; *1–6* — номера образцов

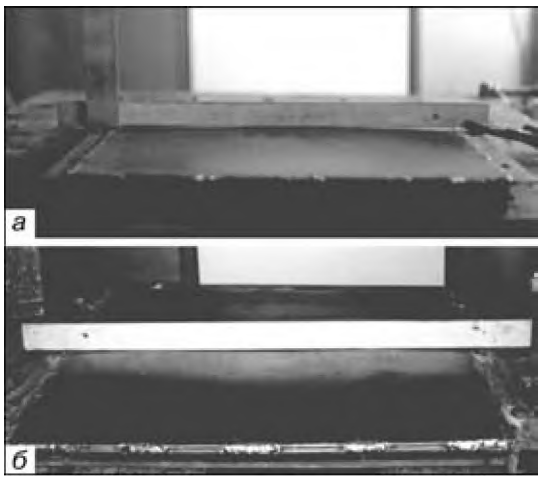


Рис. 11. Сварной образец № 1 (450×450×2 мм) до (*а*) и после (*б*) автоматизированной термической правки

качестве измерительного элемента системы контроля использовали потенциометрический датчик линейных перемещений, обладающий удовлетворительной точностью (± 0,2 мм) и простотой обработки сигнала.

Автоматизированный комплекс. На основе разработанных математических моделей создан автоматизированный комплекс для термической правки тонколистовых сварных конструкций (рис. 9), включающий манипуляционный робот РМ-01 (PUMA 560), оснащенный системами контроля деформаций и управления процессом правки, и микроплазменный источник нагрева. Датчик деформаций и плазмотрон, выполняющий роль нагревающего устройства, размещены на рабочей головке робота таким образом, чтобы переход от операции измерения к операции нагрева и, наоборот, происходил в результате простого поворота головки, выполняемого по команде робота. Управляющая программа может находиться в управляющем блоке робота либо в компьютере, который имеет прямую связь с системой управления роботом. Процесс автоматизированной правки происходит следующим образом. Оператор вводит в компьютер данные о материале и толщине листа металла, энергетические параметры источника нагрева и размеры пятна нагрева. Компьютер определяет оптимальную продолжительность нагрева (при необходимости могут быть рассчитаны оптимальные мощность нагрева и радиус пятна). Затем оператор в режиме «обучения» фиксирует в памяти робота координаты трех угловых точек поверхности листа, для того чтобы задать границы области бухтиноватости и так называемую нулевую плоскость, относительно которой и будут производиться измерения деформаций. Далее процесс правки происходит полностью в автоматическом режиме: сначала измеряются деформация листа, затем данные измерений обрабатываются, после чего происходит нагрев необходимого количества пятен в определенных программой местах. Некоторое заданное время робот ждет остывания конструкции, после чего повторяет измерения деформаций. Данные измерений обрабатываются и процесс правки заканчивается (если деформации конструкции в допуске), либо повторяется с учетом последних измерений.

Результаты испытаний. С помощью созданного комплекса в лабораторных условиях были проведены эксперименты по автоматизированной термической правке тонколистовых конструкций на малых образцах размером 450×450 мм. Образец получали приваркой листа (Ст 3) толщиной 2 мм к рамке из уголка 50×50 мм. Величину деформаций бухтиноватости регулировали погонной энергией или длиной сварных швов. На рис. 10 приведены результаты измерений прогибов трех сварных образцов 450×450×2 мм в центральном поперечном сечении до и после автоматизированной термической правки. На рис. 11 показан сварной образец № 1 с деформацией бухтиноватости до правки и после. Величина прогиба была уменьшена с 4 до 1,4 мм. Учитывая малые общие размеры образца, это хороший результат. Серия экспериментов подтвердила принципиальную возможность применения автоматизированной термической правки тонколистовых конструкций. Преимущества автоматизированной правки очевидны — процесс безударный, исключает квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности сварной конструкции, повышает производительность в результате оптимизации процесса и возможности управления одним оператором нескольких комплексов, улучшает экологические показатели.

Выводы

1. Впервые показана возможность создания технологии автоматизированной термической правки сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости.

2. Создан автоматизированный комплекс для термической правки сварных тонколистовых конструкций на основе математического моделирования, манипуляционного робота, системы измерения деформаций и микроплазменного источника нагрева.

3. Процесс автоматизированной термической правки позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, улучшает экологические показатели.

4. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций может найти применение в отраслях промышленности, которые производят различные корпусные сварные конструкции: судо-, вагоно-, резервуаростроении и пр.

1. *Сварные* строительные конструкции: Справочник / Под ред. Л. М. Лобанова. — Т. 1: Основы проектирования конструкций. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.
2. *Лопатин Н. И.* Расчет общих и местных сварочных деформаций при сварке тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов // Вопр. материаловедения. — 1998. — № 4. — С. 47–52.
3. *Заикин В. М.* Расчет режимов тепловой безударной правки сварных конструкций из алюминиево-магниевых сплавов // Автомат. сварка. — 1984. — № 6. — С. 62–66.
4. *Matsui S.* Prevention of welding deformations in thin-skin welded structures // J. of the Light Metal Welding and Construction. — 1982. — **20**, № 1. — P. 3–11.
5. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
6. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
7. *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
8. *Михайлов В. С.* Правка судовых сварных корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1972. — 253 с.
9. *Цыбулькин Г. А.* Алгоритм поиска максимальных деформаций листовых конструкций с помощью манипуляционного робота // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 55–57.

Automated thermal strightening of welded sheet structures with buckling deformations has been developed. An automated system has been designed for thermal sraightening of welded sheet structures, based on application of mathematical simulation, manipulation robot, deformation measurement system and microplasma heat source. Automated thermal strightening allows elimination of skilled manual labour, provides a high quality of the surface of a welded structure sheet, improves process efficiency and ecological characteristics.

Поступила в редакцию 31.10.2002

GWA

ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛУРГИИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

VIII Международная научно-техническая конференция

октябрь 2003 г. г. Тбилиси

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Ассоциация сварщиков Грузии
Институт металлургии и материаловедения им. Ф. Н. Тавадзе АН Грузии
Межгосударственный научный совет по сварке и родственным технологиям
Грузинский технический университет
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международная Ассоциация «Сварка»
Департамент Грузии по науке и технологиям
Союз научных и инженерных обществ Грузии
Международная нефтяная корпорация Грузии
Инженерная академия Грузии
Государственный военный научно-технический центр «Дельта»
Балканский союз металлургов

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

Сварка
Металлургия
Материаловедение
Коррозия и защита металлов
Экология, безопасность человека и природы
Родственные технологии

***Справки по тел.**: +(955 32) 227511,*
факс: +(995 32) 221965 Якобашвили С. Б.
тел.: +(995 32) 370267 Бараташвили И. Б.

УДК 621.791.052:539.43

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

В. А. ШОНИН, **В. С. МАШИН**, кандидаты техн. наук, **О. В. ВОЙТЕНКО**, **В. В. НОВОЖИЛОВ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что сглаживание поверхности металла на границах шва тавровых тонколистовых соединений алюминия и устранение угловой деформации высокочастотной проковкой обеспечивают уменьшение значений коэффициента концентрации напряжений в 1,6 раза. Проковка соединений повышает предел ограниченной выносливости на 40 % при отнулевом и на 10 % при знакопостоянном циклах напряжений.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварные тавровые соединения, профиль соединения, угловая остаточная деформация, концентрация напряжений, высокочастотная проковка, долговечность, сопротивление усталости

При односторонней электродуговой приварке ребер жесткости к обшивке оболочечной конструкции (тавровые сварные соединения) из алюминиевых сплавов создается значительная остаточная угловая деформация. Она образуется вследствие неравномерной усадки металла шва и обусловливает неплоскостность поверхности основного металла с лицевой стороны конструкции в зоне приварки ребра [1–3]. Под действием поперечных сил при эксплуатации угловая остаточная деформация вызывает дополнительный изгибающий момент в основном металле на границах швов, что приводит к увеличению уровня концентрации напряжений [4] и, как следствие, — к снижению сопротивления усталости сварных соединений [5, 6].

Для исправления послесварочной угловой деформации известны различные способы тепловой и холодной правки всей конструкции и отдельных ее узлов [2, 3, 5, 7]. Они основаны на применении неравномерного линейного или объемного пластического деформирования металла в плоскости изгиба. После правки образуются различные по знаку и уровню остаточные напряжения, неравномерно распределенные по толщине элемента конструкции.

Воздействие известных способов [2] концентрированного нагрева, используемого для правки толстостенных элементов конструкций путем пластического укорочения поверхностного слоя металла с выпуклой стороны, подобно неравномерному нагреву при сварке. Оно приводит к образованию растягивающих остаточных напряжений на поверхности и сжимающих напряжений в центральных слоях металла. Такая обработка способствует существенному снижению сопротивления усталости сварных соединений.

Холодные способы правки обусловливают пластическое удлинение слоя металла на вогнутой поверхности элемента конструкции с образованием сжимающих остаточных напряжений [5]. Это молотковая проковка и прокатка роликами сварного шва, приложение усилия вдоль или поперек соединения и механическое вибрирование конструктивного элемента [7]. К холодной правке можно отнести и дробеструйную обработку. Основным недостатком указанных способов холодной правки является образование высоких растягивающих остаточных напряжений в центральных слоях металла при увеличении интенсивности обработки. Кроме того, холодная правка не всегда улучшает геометрию профиля в зоне перехода от шва к основному металлу [2, 5].

В авиастроении для правки вмятин в тонкостенных элементах изделий из алюминиевых сплавов широко используют одностороннюю обработку поверхности струей стальной дроби [8, 9]. Расклепываемый поверхностный слой металла в зоне обработки действует на пластически недеформированные слои металла, расположенные ниже этого слоя, как внецентренная сила растяжения и вызывает упругую обратную деформацию — отгиб. При этом образуется система уравновешенных по толщине остаточных напряжений: сжимающие напряжения в активном наклепанном слое, напряжения растяжения в нижележащих и центральных слоях металла, а также сжимающие напряжения на поверхности элемента с его обратной стороны. Дробеструйная обработка малой интенсивности создает низкие уровни растягивающих остаточных напряжений в центральных слоях металла и способствует значительному повышению сопротивления усталости элемента в зоне исправления вмятин.

Указанных недостатков лишена высокочастотная механическая проковка тонкого поверхностного слоя металла в зоне концентратора вдоль границы шва. Она выполняется однорядной группой игольчатых бойков [10]. Благодаря проковке увеличивается радиус сопряжения поверхности шва с основным металлом, наводятся высокие сжимающие остаточные напряжения в наклепанном слое и обеспечивается существенное повышение сопротивления усталости сварных соединений при поперечном действии переменных напряжений. В случае односторонней высокочастотной проковки сварных соединений наряду с улучшением соп-

© В. А. Шонин, В. С. Машин, О. В. Войтенко, В. В. Новожилов, 2003

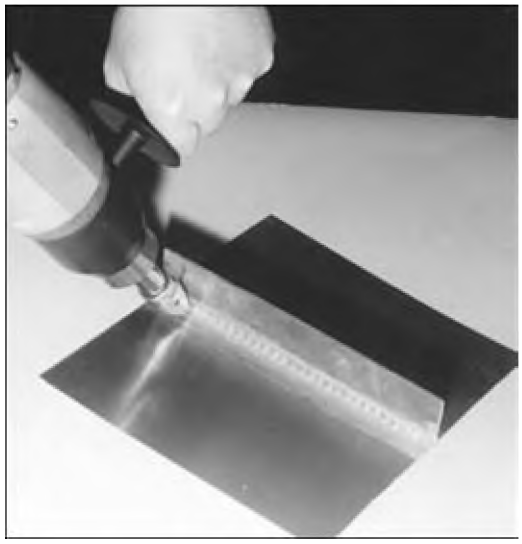


Рис. 1. Высокочастотная проковка фрагмента сварного соединения, выполняемая ручным инструментом

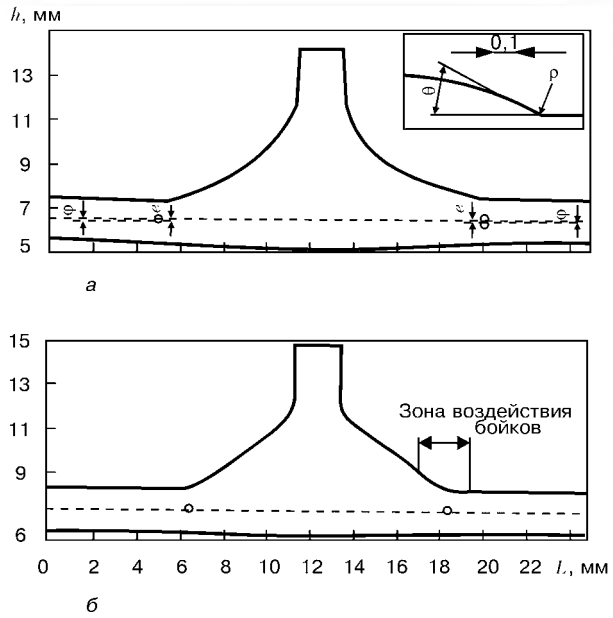


Рис. 2. Профили сварных соединений в исходном состоянии (*а*) и после высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах швов (*б*); *h*, *L* — координаты измерений; точки — проекции оси, относительно которой происходит угловая деформация

ряжения на границе шва может проявиться эффект отгиба плоскости сварного элемента, подобный тому, который получают при дробеструйной обработке основного металла. Это может способствовать устранению угловой остаточной деформации в тонколистовых сварных соединениях.

Цель настоящей работы — установить возможность устранения остаточной угловой деформации отгиба и повысить сопротивление усталости таврового соединения тонколистового алюминиевого сплава АМг6, сваренного плавящимся электродом в инертных газах, за счет локальной высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах шва, улучшающей геометрию сопряжения поверхностей шва и основного металла.

Для исследований применяли пластины размером 250×500×1,85 мм из сплава АМг6, в центральной части которых двумя угловыми швами приваривали ребро жесткости (500×40×1,85 мм) из этого же сплава. Импульсно-дуговую сварку сварного соединения выполняли плавящимся электродом СвАМг6 диаметром 1,6 мм в гелиево-аргоновой смеси газов на следующем режиме: сварочный ток $I_{св}$ = = 80...85 А; напряжение на дуге $U_д$ = 18,0...18,5 В; скорости сварки $v_{св}$ = 43...45 м/ч; скорости подачи проволоки $v_{п.п}$ = 5,9...6,0 м/мин. Базовое значение тока $I_б$ и значение частоты прохождения импульсов $F_{имп}$ определяли, как

$$I_б = I_{св}/(1.5...2.0),$$
$$F_{имп} = KI_б,$$

где K = 0,9...1,1. Содержание гелия в смеси составляло 55 об. %. Сварку заготовок таврового соединения производили в зажатом состоянии в жестком приспособлении.

Высокочастотную проковку однорядной группой бойков поверхности металла на границах швов в сварных заготовках (рис. 1) осуществляли ультразвуковым преобразователем типа «Ультрамет» мощностью 300 Вт [10]. Зависимость угла отгиба от режима и условий проковки исследовали на небольших (50×50 мм) пластинах основного металла. При этом устанавливали влияние различных факторов на угол отгиба относительно линии односторонней проковки в середине пластины по всей ее длине. Применяли бойки диаметром 2, 3 и 5 мм. Среднюю скорость перемещения инструмента изменяли в пределах 1...5 мм/с.

Геометрию профиля соединений в сварных заготовках после сварки и высокочастотной проковки поверхности на границах швов, а также угол отгиба φ′ в малогабаритных пластинах основного металла после проковки, определяли методом профилометрирования с использованием инструментального микроскопа БМИ-1. В сварных соединениях измеряли остаточную угловую (после сварки) деформацию φ, эксцентриситет *e* для базового расстояния 5 мм от зоны сплавления, а также угол θ и радиус сопряжения поверхности шва ρ с основным металлом (рис. 2, 3).

Влияние высокочастотной проковки на сопротивление усталости сварных соединений оценивали на образцах размером 50×230 мм с шириной рабочей зоны 25 мм, которые вырезали из сварной заготовки в состоянии непосредственно после сварки и высокочастотной проковки. Значения коэффициента концентрации напряжений в сварных образцах определяли с помощью известных расчетных методик [4], при этом исходили из данных измерений параметров профиля соединений. Испытания на усталость сварных образцов проводили под действием осевой циклической нагрузки при коэффициентах асимметрии цикла напряжений $R_σ$ = 0 и 0,4 и частоте 4...5 Гц с применением электрогидравлической машины УЕ-10. Долговечность при испытаниях ограничивали значением N = = $1 \cdot 10^6$ циклов нагружений.

Измерения остаточной угловой деформации с обратной стороны исходных соединений показали, что максимальный (до 3°) угол остаточной деформации наблюдается непосредственно под свар-

ным швом в зоне наибольшей толщины наплавленного металла. На границах швов с основным металлом остаточная угловая деформация φ (рис. 2, *а*) превышала 2°. За пределами сварного соединения угловая деформация незначительна.

В случае сварки плавящимся электродом при расположении швов в центральной зоне поперечного сечения крупногабаритных заготовок таврового соединения обеспечивался минимальный продольный остаточный прогиб основного металла под ребром жесткости. В зонах действия сжимающих сварочных остаточных напряжений по краям основной пластины вследствие потери упругой устойчивости стрела прогиба на длине 500 мм составляла 11...15 мм.

Результаты исследований влияния режимов односторонней высокочастотной проковки на изменение остаточной угловой деформации путем отгибания пластин основного металла относительно осевой линии зоны проковки показали, что угол отгиба φ′ существенно зависит от средней скорости перемещения инструмента при проковке и толщины обрабатываемого металла (рис. 3). Максимальный (до 5°) угол отгиба при толщине пластины 1,85 мм образуется при минимальной (1 мм/с) скорости проковки, с увеличением последней угол отгиба уменьшается. Диаметр бойков не оказал значительного влияния на зависимость угла отгиба пластины от средней скорости проковки (рис. 3, *а*).

Как видно из рис. 3, *б*, приведенные данные свидетельствуют о том, что при толщине обрабатываемого металла 1,0...1,2 мм обеспечивается максимальный угол отгиба. Увеличение толщины пластины до 2,5 мм и более приводит к уменьшению этого угла. В пластинах толщиной менее 1,0 мм образуется отрицательный угол отгиба, что свидетельствует о нецелесообразности применения использованных режимов проковки для исправления угловой деформации в соединениях такой толщины. Это обусловлено тем, что площадь поверхности металла, в которой происходит пластическое удлинение, с обратной стороны проковки оказывается большей, чем непосредственно в зоне ударного действия бойков.

В сварных заготовках поперечная остаточная угловая деформация устранялась только в зоне проковки на границах швов (см. рис. 2, *б*). Проковка проводилась бойками диаметром 2 мм при средней скорости перемещения инструмента 4...5 мм/с. Дополнительная проковка всей поверхности шва и в местах максимальной его толщины не привела к

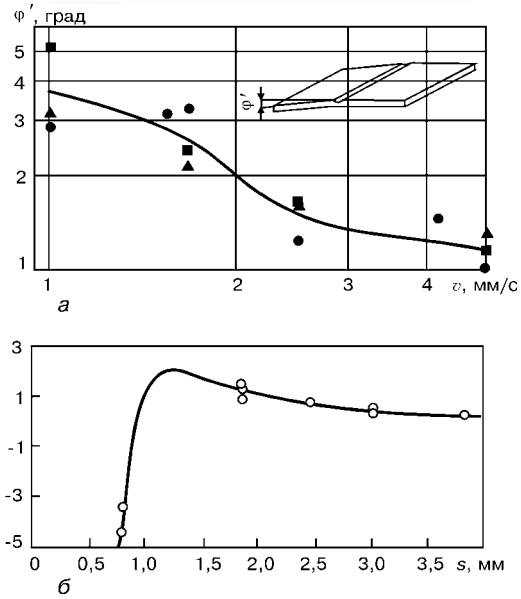


Рис. 3. Зависимость угла отгиба φ′ пластины толщиной 1,85 мм от скорости v перемещения ручного инструмента при односторонней высокочастотной проковке бойками диаметром 2 (●), 3 (▲) и 5 (■) мм (*а*) и от толщины пластин s при обработке бойками диаметром 2 мм со скоростью проковки 5 мм/с (*б*)

заметному изменению угловой остаточной деформации поверхности с обратной стороны соединения.

От воздействия высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах шва стрела прогиба по краям основной пластины уменьшилась не более чем на 25 %. Вероятно, в результате высокочастотной проковки продольная остаточная деформация сварной заготовки изменяется мало и не обеспечивает полной разгрузки продольных растягивающих остаточных напряжений, вызванных процессом сварки. При этом в прокованных соединениях в 2,6 раза увеличилось значение ρ и в 2,3 раза уменьшился угол сопряжения θ поверхностей шва с основным металлом, а также значительно понизилась остаточная угловая деформация, что обеспечило уменьшение значения коэффициента концентрации напряжения в 1,6 раза (таблица).

Испытания на однократное статическое растяжение образцов исходных соединений и с прокованными границами швов показали, что проковка мало изменяет характер разрушения. Образцы разрушались по основному металлу за пределами сварных швов. Они имели практически одинаковые значения условного временного сопротивления — $\sigma_в$ = 335...342 МПа. Однако исползование проковки привело к более раннему наступлению плас-

Изменения параметров геометрии профиля и концентрации напряжений в сварном тавровом соединении сплава АМг6, вызванные односторонней высокочастотной проковкой поверхностного слоя металла на границах швов

Состояние соединения	θ, град		ρ, мм		σ_α		e, мм		K_e		$\alpha_\sigma K_e$	
	θ	S_θ	$\bar{\rho}$	S_ρ	$\bar{\alpha}_\sigma$	S_α	$\bar{e}$	S_e	$\bar{K}_e$	S_K	$\bar{\alpha}_\sigma\bar{K}_e$	$S_{\alpha K}$
Исходное	17,8	8,3	0,75	0,6	1,39	0,36	0,078	0,048	1,25	0,16	1,75	0,52
После проковки	7,9	2,4	1,97	0,6	1,07	0,02	—	—	—	—	—	—

Примечание. S — стандартные отклонения рассматриваемых параметров; α_σ — коэффициент концентраций напряжений, обусловленный формой переходной поверхности шва к основному металлу; K_e — коэффициент концентрации напряжений, обусловленный эксцентриситетом e; черта над символом — среднее статистическое значение параметра.

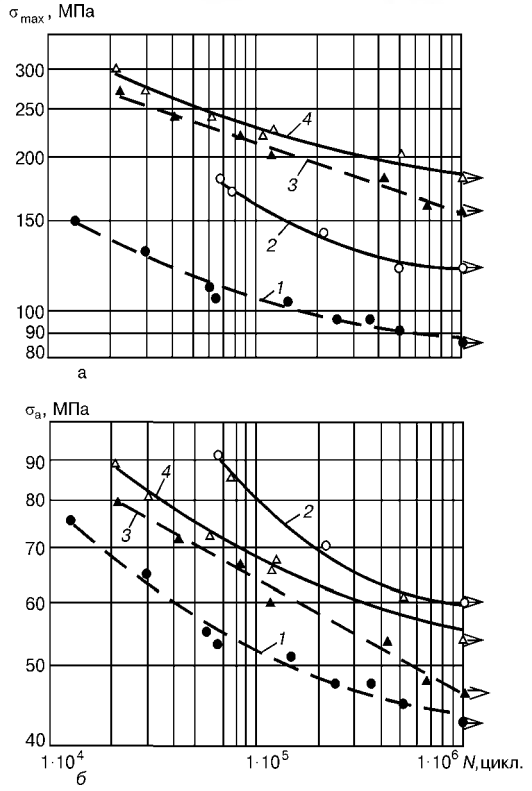


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний образцов тавровых соединений сплава АМг6 толщиной 1,85 мм, полученные при номинальном максимальном σ_{max} (*а*) и амплитудном σ_a (*б*) напряжениях: *1*, *3* — после сварки; *2*, *4* — после сварки и высокочастотной проковки; *1*, *2* — $R_\sigma = 0$; *3*, *4* — $R_\sigma = 0{,}4$ (точки — экспериментальные данные; точки со стрелками — разрушения образцов не происходило)

тических деформаций в соединениях, что сказалось на уменьшении условного предела упругости $\sigma_{0,01}$ на 29 % (от 129,1 до 92,5 МПа), а условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ — на 11 % (174,4...155,1 МПа) по сравнению с соответствующими характеристиками исходных образцов.

При циклических испытаниях усталостная трещина в исходных сварных образцах зарождалась в поверхностном слое металла на границе шва и распространялась под углом 90° по направлению к прикладываемой нагрузке. Такой же характер усталостного разрушения наблюдался и в образцах, имеющих прокованную поверхность. Причем усталостная трещина в них зарождалась под наклепанным слоем металла в зоне концентрации напряжений.

Односторонняя высокочастотная механическая проковка поверхности металла на границах швов существенно увеличила характеристики сопротивления усталости таврового соединения сплава АМг6 (рис. 4, *а*). Определено, что эффективность проковки как меры повышения сопротивления усталости соединений зависит от асимметрии внешнего напряжения. Наибольшее повышение сопротивления усталости тавровых соединений σ_{max} наблюдается при отнулевом цикле напряжений $R_\sigma = 0$. При этом долговечность соединения в результате проковки увеличивается более чем в 10 раз, а предел ограниченной выносливости при $N = 1 \cdot 10^6$ циклах напряжения возрастает на 30 %. При коэффициенте асимметрии цикла напряжений $R_\sigma = 0{,}4$ наблюдается меньшее (почти в 1,5 раза) увеличение долговечности и повышение предела ограниченной выносливости приблизительно на 9 %.

Уменьшение различий между долговечностью соединений в исходном состоянии и с прокованными границами швов при $R_\sigma = 0{,}4$ связано с проявлением пластических деформаций, поскольку уровень действующих максимальных напряжений в соединениях превышал условный предел текучести $\sigma_{max} > \sigma_{0,2}$. Вероятно, это вызывает у прокованных соединений релаксацию растягивающих напряжений, уравновешивающих сжимающие остаточные напряжения поверхностного наклепанного слоя металла. Вследствие этого значения вызванных проковкой сжимающих остаточных напряжений уменьшились, что стало причиной снижения долговечности образцов. В исходных же соединениях пластическое деформирование приводило к уменьшению угловой остаточной деформации и снижению концентрации напряжений на границах шва, что способствовало увеличению долговечности образцов.

Сравнение кривых усталости, представленных амплитудами напряжений (рис. 4, *б*), показывает, что при $R_\sigma = 0{,}4$ имеет место более высокая долговечность исходных образцов и более низкая — прокованных образцов, чем в случае $R_\sigma = 0$. Пределы ограниченной выносливости σ_a при $R_\sigma = 0{,}4$ снижаются до значений σ_a при $R_\sigma = 0$ только в случае увеличения базовой долговечности. Прокованные соединения имеют более низкие сопротивления усталости при $R_\sigma = 0{,}4$, чем при $R_\sigma = 0$. При уменьшении базовой долговечности значения σ_a при $R_\sigma = 0{,}4$ становятся существенно ниже, чем при $R_\sigma = 0$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при перегрузке ($\sigma_{max} > \sigma_{0,2}$) образцов тавровых сварных соединений с остаточной угловой деформацией в условиях циклических напряжений, превышающих предел текучести металла, обеспечивается меньшее повышение долговечности образца, чем в случае применения односторонней высокочастотной проковки в таких же условиях циклических напряжений.

Выводы

1. Для улучшения формы профиля соединения на границах шва и устранения остаточной угловой деформации тавровых сварных соединений алюминиевых сплавов одностороннюю высокочастотную проковку целесообразно применять при толщине основного металла 1,5...3,0 мм.

2. Установленные режимы односторонней высокочастотной проковки тавровых соединений сплава АМг6 толщиной 1,85 мм, сваренных плавящимся электродом в инертных газах, обеспечивают снижение коэффициента концентрации напряжений в 1,6 раза и повышение предела ограниченной выносливости на 40 % при отнулевом цикле напряжений.

3. Положительный эффект высокочастотной проковки соединений снижается при воздействии внешней нагрузки, в условиях которой номиналь-

ные максимальные напряжения в сварном соединении превышают условный предел текучести.

1. *Киселев С. Н.* Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 176 с.
2. *Трочун И. П.* Внутренние усилия и деформации при сварке. — М.: Машгиз, 1964. — 247 с.
3. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
4. *Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–19.
5. *Степанов В. Г., Клестов М. И.* Поверхностное упрочнение корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1977. — 197 с.
6. *Sanders W. W., Day R. H.* Fatigue of aluminum alloy weldments // WRC Bulletin. — 1983. — August. — P. 21.
7. *Сагалевич В. М.* Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1974. — 248 с.
8. *Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В.* Усталость легких конструкционных сплавов. — М.: Машиностроение, 1973. — 317 с.
9. *Hertel H.* Ermudungsfestigkeit der Konstruktion. — Berlin: Berlin Springer Verl., 1969. — 659 S.
10. *Применение* высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 7–11.

It is shown that smoothing of weld surface of thin-sheet aluminium *T*-joints and elimination of angular deformation by the high-frequency forging provides 1.6 times decrease in values of stress concentration coefficient. Forging of joints increases the ultimate fatigue strength by 40 % at from-zero and by 10 % at sign-constant cycles of stresses.

Поступила в редакцию 23.09.2002,
в окончательном варианте 14.11.2002

ВЫСТАВКА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, СТАНКО- И ПРИБОСТРОЕНИЯ **СТАНКОМАШЭКСПО**

4–6 сентября 2003 г. Одесса, Украина
Выставочный комплекс морского вокзала

Разделы выставки:

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ

- ✓ Тяжелое машиностроение
- ✓ Подъемно-транспортные машины и механизмы
- ✓ Транспортное машиностроение и оборудование
- ✓ Дорожно-строительные машины, спецавтотехника
- ✓ Сварочное оборудование и материалы
- ✓ Электротехнические машины и оборудование
- ✓ Металлообработка
- ✓ Металлообрабатывающее оборудование
- ✓ Инструмент и оснастка для ремонта машин и механизмов
- ✓ Технический менеджмент и материально-техническое снабжение
- ✓ Программное обеспечение в машиностроении
- ✓ Гидропневматические машины, насосы и арматура
- ✓ Смазочные материалы и технические жидкости для машин
- ✓ Антикоррозионные технологии
- ✓ Робототехника, промышленная автоматика
- ✓ Холодильные машины, компрессоры
- ✓ Подшипники, шарниры для машин и механизмов

СТАНКОСТРОЕНИЕ

- ✓ Станки, инструменты и технологии для обработки металла, дерева, камня и др. материалов
- ✓ Машины и станки для швейного и текстильного производства
- ✓ Системы ЧПУ
- ✓ Кузнечно-прессовые машины, термопластавтоматы
- ✓ Спецодежда
- ✓ Станкопринадлежности

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ✓ Приборы и датчики измерения и контроля
- ✓ Диагностическая аппаратура
- ✓ Координатно-измерительные машины

Организатор: Центр Выставочных Технологий
Украина, 65014, г. Одесса, пер. Сабанский, 1/10,
Тел.+38(0482) 37-27-916 37-28-69, факс: +38(0482) 210591
E-mail: stas@expo-odessa.com, http:\\www.expo-odessa.com

УДК 621.791.75

УМЕНЬШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ УЧАСТКА НЕПОЛНОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

В. В. ДМИТРИК, канд. техн. наук, **А. Н. ПАЩЕНКО**, инж. (Укр. инж.-пед. академия, г. Харьков)

Показано, что интенсивность зарождения и развития повреждаемости при ползучести сварных соединений теплоустойчивых сталей обусловлена видом исходной структуры металла участка неполной перекристаллизации. При помощи управления температурным режимом последнего возможно повышение эксплуатационной надежности сварных соединений.

Ключевые слова: автоматическая сварка, перлитные стали, сварные соединения, микроповреждаемость, исходная структура, структурная неоднородность, паропроводы

Из теплоустойчивых перлитных сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ изготовляют паропроводы энергетических установок, например теплоэлектростанций. Увеличение ресурса эксплуатации паропроводов свыше 200 тыс. ч представляется весьма актуальным из экономических соображений. Разрушение сварных соединений паропроводов, эксплуатирующихся в условиях низкотемпературной ползучести $T_э < 0{,}5T_{пл}$ (ресурс > 150 тыс. ч), происходит преимущественно по участку неполной перекристаллизации зоны термического влияния (ЗТВ) [1–4]. Статистика разрушаемости по данному участку включает существенный разброс времени, т. е. от 5000 до 250 тыс. ч эксплуатации [3, 5–9]. Изучение разрушений сварных соединений показало, что использование нормативной документации, например «Приложения 2 к ТУ 14-3-460–75. Шкала микроструктур металла котельных труб из сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и 12Х2МФСР», регламентирующей сдаточную структуру, к сожалению, не способствует предотвращению разрушаемости сварных соединений по данному участку.

Целью работы является изучение возможности уменьшения исходной структурной неоднородности металла участка неполной перекристаллизации для повышения его сопротивляемости микроповреждаемости в условиях эксплуатационной ползучести.

Сопротивляемость микроповреждаемости сварных соединений в условиях рабочих напряжений и температур зависит от их исходной структуры, в том числе структурной неоднородности, физических условий эксплуатации и других факторов [1, 2, 5, 6, 9–16].

Металл участка неполной перекристаллизации претерпевает сварочный нагрев в области температур, ограниченной $A_{c_1}...A_{c_3}$. Значения микротвердости металла данного участка могут быть ниже, чем у основного металла (не претерпевающего соответствующий сварочный нагрев) [4, 11, 17], хотя их снижение отмечается не всегда [4, 5, 10, 18, 19].

Методика экспериментов. Экспериментальная программа включала расчетно-экспериментальное моделирование температурного режима [8, 20, 21], что позволило получать гладкую аппроксимацию изотерм, характеризующих температурные поля участка неполной перекристаллизации, а также скоростей охлаждения. На основе установленных значений температуры выявляли координаты фрагментов изучаемого участка, где формируются взаимно отличающиеся структуры. Установили, что их формирование и размеры фрагментов зависят от тепловложения в основной металл, геометрии сварных соединений и контролируются скоростью охлаждения после сварочного нагрева. На основе данных, характеризующих определенный температурный режим, подбирали соответствующие параметры режима автоматической сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов (80...85 % CO_2 + + 15...20 % Ar) образцов из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, что позволило получить оптимальную исходную структуру участка неполной перекристаллизации, т. е. такую структуру, которая как можно меньше отличается от структуры основного металла (новые продукты распада аустенита, например, должны представлять здесь бейнит или сорбит). Структура основного металла следующая: 30 % феррита и остальное бейнит.

Для экспериментов использовали образцы одной плавки, одинакового химического состава и одинаково термообработанные. При экспериментах применяли режимы сварки, указанные в таблице. Предварительный подогрев во всех случаях составлял 300 °С.

Для исследований применяли микроструктурный, электронно-микроскопический, микрорентгеноспектральный («Neofot-2», «ЭВМ-1200А», Camebax), а также рентгенографический методы. Ползучесть определяли на стандартных образцах (рис. 1) при помощи установок типа АИМА-5-2 и ИП-4М, а также на образцах, разрушившихся в процессе эксплуатации сварных соединений. По-

Режим сварки	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В
Штатный	30...50	400	34...36
Предлагаемый	20...25	330...370	32

© В. В. Дмитрик, А. Н. Пащенко, 2003

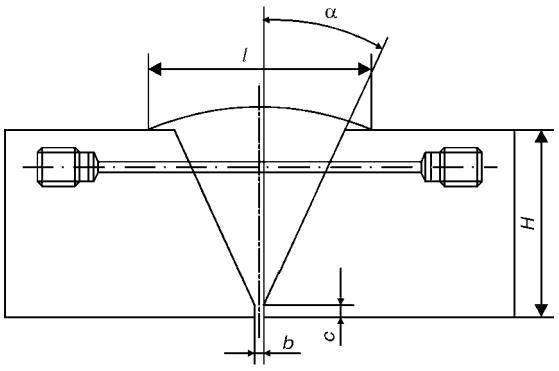


Рис. 1. Схема вырезки образцов для испытаний на ползучесть; H = 50 мм; $c = b$ = 2 мм; l = 65 мм; $\alpha = (27 \pm 3)°$

ры изучали с применением просвечивающей электронной микроскопии на угольных репликах и методами световой металлографии. Количество и состав карбидных фаз определяли с помощью анализа полученных осадков методами фотометрии. Выделение карбидов M_3C и $M_{23}C_6$ производили посредством анодного растворения в растворах солей, а карбидов VC и Mo_2C — в кислотах. По рентгенограммам, полученным на дифрактометре «Дрон-3М», определяли структуру карбидов. Тип карбидов устанавливали также по фотографиям реплик соответствующих сталей при определенном увеличении, т.е. путем сопоставления с фотографиями изучаемых карбидов [22]. Микротвердость (прибор ПМТ-3) замеряли по поперечному сечению сварных соединений.

Результаты экспериментов. Установили, что от сварочного нагрева основного металла зависит не только ширина участков неполной перекристаллизации ЗТВ, но и его локальное увеличение (рис. 2, 3), а от продолжительности нагрева металла в область температур $A_{c_1} \ldots A_{c_3}$ и от скорости охлаждения — структура участка. Исследования показали, что размеры зерен структуры рассматриваемого участка (сварные соединения из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ) относительно структуры основного металла вследствие сварочного нагрева менялись незначительно и составляли в изучаемых образцах 6-9 номеров (ГОСТ 5639–82). Бейнит на участке неполной перекристаллизации после сварочного нагрева сохраняет ориентировку, со-

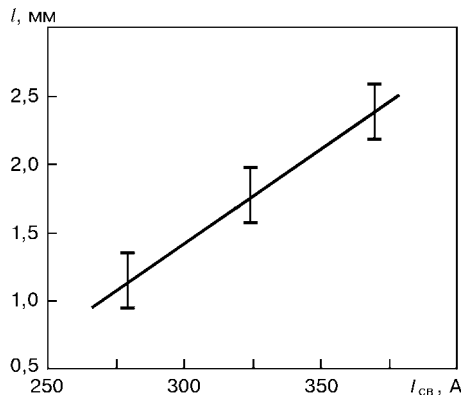


Рис. 2. Зависимость ширины l участка неполной перекристаллизации от сварочного тока $I_{св}$; автоматичсская сварка; $v_{св}$ = = 20 м/ч; образцы изготовлены из стали 15Х1М1Ф (см. рис. 1)

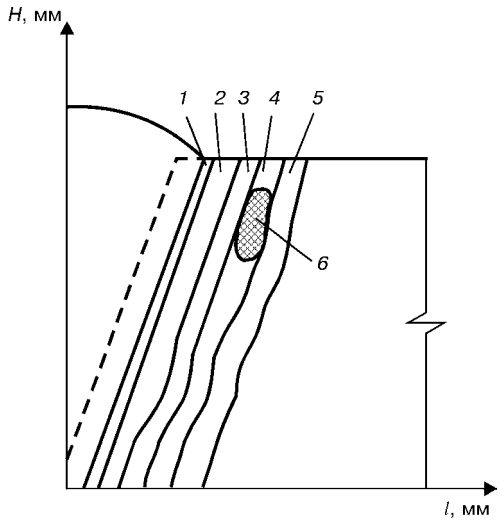


Рис. 3. Схема участков сварного соединения (сварка на штатном режиме, геометрия, см. рис. 1): *1* — сплавления; *2* — перегрева; *3* — нормализации; *4* — неполной перекристаллизации; *5* — рекристаллизации; *6* — фрагмент участка неполной перекристаллизации, где выявлено образование мартенситной структуры (сеточная штриховка)

ответствующую бейниту основного металла. Размеры и структура локальных темнотравящихся оторочек в структуре данного участка (рис. 4) зависят от продолжительности его нагрева в области температур $A_{c_1} \ldots A_{c_3}$ и от скорости охлаждения. Такие оторочки являются новыми продуктами распада аустенита и представляют собой грубопластинчатый или сфероидизированный перлит, что согласуется с данными работы [6], а также бейнит, отличающийся по строению от бейнита основного металла, или эвтектоид сорбитного типа, что подтверждается результатами работы [17]. Новые продукты распада аустенита могут включать и фрагменты мартенсита с дисперсными карбидными частицами внутри мартенситных игл, что согласуется с публикацией [6]. Полностью предотвратить образование подобных структур при дуговой сварке не представляется возможным. Однако моделирование температурного режима показывает, что путем соответствующего тепловложения в основной металл можно оптимизировать количественный и качественный состав образующихся на изучаемом участке новых продуктов распада аустенита, а также предотвратить образование фрагментов мартенсита (рис. 4, *а*) или же получить, например бейнит, близкий по строению к бейниту основного металла.

Моделирование показало, что формирование фрагментов мартенсита, возможно, зависит от тепловложения, обеспечивающего соответствующую продолжительность сварочного нагрева в область $A_{c_1} \ldots A_{c_3}$, а также (в большей степени) от скорости охлаждения, примерно от 35 °С/с и выше в области температур 450... 250 °С (сталь 15Х1М1Ф). Однако сама природа формирования фрагментов мартенсита еще неясна и требует дальнейших исследований.

Учитывая определенную сложность анализа микроструктуры данного участка и опыт ее изучения, следует отметить, что при помощи опти-

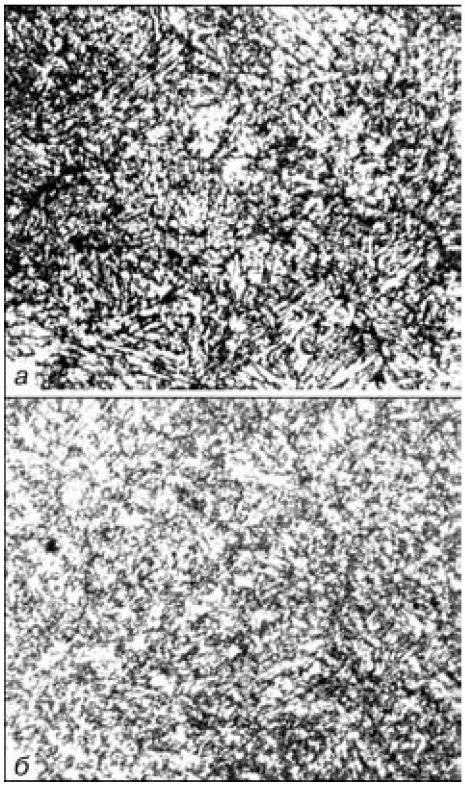


Рис. 4. Микроструктура участка неполной перекристаллизации (см. рис. 1), ×400: *а* — сварка на штатном режиме; *б* — сварка на предлагаемом режиме

ческого микроскопа невозможно в полной мере выявить фрагменты мартенситной структуры. Для этого необходимо применять также рентгеноструктурный метод, позволяющий определить содержание углерода в α-фазе по фотометрическим кривым. С целью подтверждения полученных данных следует изучать и соответствующие реплики.

Мартенсит вытравливается в виде светлых, копьевидных игл или их двойников (рис. 4, *а*), что согласуется с работой [22]. Наличие мартенситных фрагментов подтверждается и замерами микротвердости (рис. 5). Значения микротвердости следует уточнять посредством рентгеноструктурного метода.

Изучение разрушившихся образцов показало, что на бывших фрагментах мартенсита (образцы после термообработки) происходит более интенсивно (в условиях низкотемпературной ползучести) карбидная реакция $M_3C \rightarrow M_{23}C_6$ и коагуляция последних, в том числе по границам зерен, способствующая образованию пор. Однако кинетика такой реакции, как считают авторы статьи, требует дальнейшего изучения.

Моделирование и последующий экспериментальный процесс автоматической сварки данных сталей в смеси защитных газов CO_2 + Ar позволили установить целесообразность ограничения сварочного тока (350...380 А) и скорости сварки (25...30 м/ч) по верхнему пределу (рис. 6). В работах [6, 17] показано, что мартенсит может и не образовываться на участках неполной перекристаллизации, однако не объясняется, как этого достичь.

Моделирование температурного режима дуговой сварки [8, 20] стали 15Х1М1Ф позволило установить возможность полного исключения формирования фрагментов мартенсита на участке неполной перекристаллизации в сварных соединениях любых толщин, например при автоматической сварке образцов толщиной 50 мм из стали 15Х1М1Ф. Первые 30 мм толщины указанных образцов сваривали на токе 330 А при скорости сварки 25 м/ч, последующие 20 мм — на токе 370 А и скорости сварки 20 м/ч. Структура новых порций распада аустенита на данном участке представляла преимущественно верхний бейнит и сорбит, а также была близкой к структуре основного металла. Опыт показывает, что для каждого ответственного сварного соединения температурный режим следует определять индивидуально расчетным путем.

В карбидной составляющей структуры рассматриваемого участка после сварочного нагрева (сварка на штатных режимах) выявили небольшое количество карбидов $M_{23}C_6$ (около 7 %). На других участках ЗТВ, а также в металле шва карбиды $M_{23}C_6$ в малом количестве обнаружены после термообработки образцов (сварка на штатных и предлагаемых режимах), что находит подтверждение в работе [3]. Отпуск после сварки (730 °С, 3 ч), к сожалению, способствует сосредоточению карбидных выделений по границам (рис. 7), что зависит от вида новых порций распада аустенита. Экспериментально подтверждается, что интенсивность микроразрушаемости на данном участке определяется степенью структурной неоднородности в условиях эксплуатационной низкотемпературной ползучести.

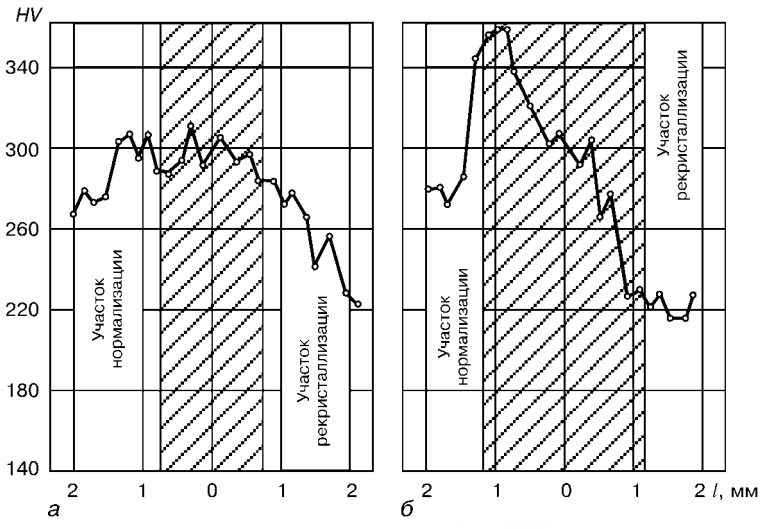


Рис. 5. Исходная микротвердость сварных соединений из стали 15Х1М1Ф (см. рис. 3): *а* — сварка на предлагаемых режимах; *б* — сварка на штатных режимах; участок неполной перекристаллизации заштрихован

При сварке на штатных режимах степень концентрации карбидов $M_{23}C_6$, M_7C_3 и M_3C (мелкодисперсных) по границам зерен (рис. 7) является более высокой, чем в аналогичной структуре участка при сварке на предлагаемых режимах. Пер-

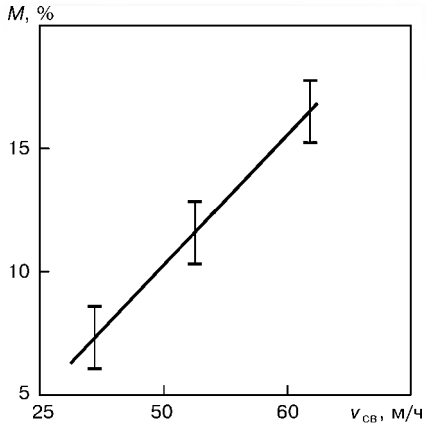


Рис. 6. Зависимость содержания мартенсита M в структуре участка неполной перекристаллизации от скорости сварки $v_{св}$; геометрию образцов см. на рис. 1

воначально значительное зарождение единичных пор в условиях ползучести происходит также по границам зерен, где находятся и коагулирующие (с различной интенсивностью) карбиды $M_{23}C_6$ и M_7C_3, что согласуется с работой [23]. Наличие карбидов по границам зерен способствует не только развитию пористости, но и образованию цепочек пор размером 2...7 мкм по границам зерен (рис. 8). Цепочки пор по телу зерен являются меньшими и составляют 0,5... 2,0 мкм, что соответствует данным работы [4, 15].

Микроповреждаемость в указанных сварных соединениях (I и II стадии ползучести) обусловлена зарождением и развитием пор [16, 21, 23, 24]. Форма микропор на начальной стадии их развития контролируется уменьшающейся поверхностной энергией, в том числе различием концентрации вакансий вдоль поверхности поры, имеющей форму, близкую к эллипсоиду. Установлено, что в процессе развития уже сформировавшихся пор их увеличение, определяющееся интенсивностью объемной диффузии атомов и концентрацией вакансий, зависит от исходной структуры (рис. 9), а форма пор будет отличаться от эллипсоидной.

Можно показать, что поры в испытуемых образцах первоначально зарождаются преимущественно на границах зерен, перпендикулярных к оси приложенного растягивающего напряжения, т. е. там, где расположены и коагулирующие карбиды $M_{23}C_6$. Аналогично первоначально зарождаются поры и в металле сварных соединений, эксплуатирующихся в условиях ползучести. Характерно, что в дальнейшем (II стадия ползучести) микропоры в структуре изучаемых участков (штатный и предлагаемый режимы) образуются и по телу зерен (рис. 8), однако их количество и степень развития находятся в прямой зависимости от исходной структурной неоднородности участков неполной перекристаллизации.

Микроповреждаемости способствует и возможная относительная пластическая деформация отдельных зерен α-фазы, а также их субзерен [14], т. е. возможность развития поверхности микропор может быть реализована по механизму взаимодействия внутреннего скольжения и проскальзывания по границам зерен.

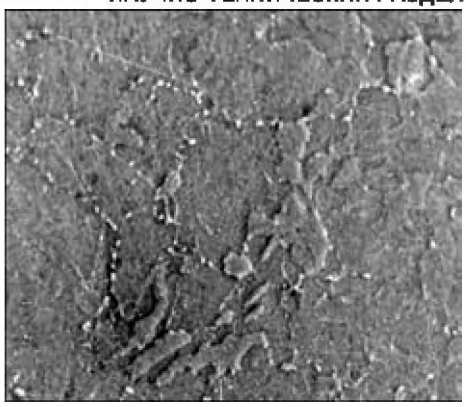


Рис. 7. Исходная структура участка неполной перекристаллизации; светлые цементитные частицы расположены преимущественно по границам зерен отпущенного бейнита; вытравливаемость ферритной матрицы неодинаковая; сварка на штатном режиме; основной металл 15Х1М1Ф. ×2500

Рис. 8. Повреждаемость порами ползучести металла участка неполной перекристаллизации; угольная реплика; ресурс эксплуатации 150000 ч; сварка на штатном режиме; основной металл 15Х1М1Ф, ×6000

Зарождение и развитие пористости в металле рассматриваемого участка в условиях участившихся пусков–остановов является более интенсивным и первоначально осуществляется преимущественно по границам зерен. Однако здесь роль карбидных фаз является скорее вспомогательной.

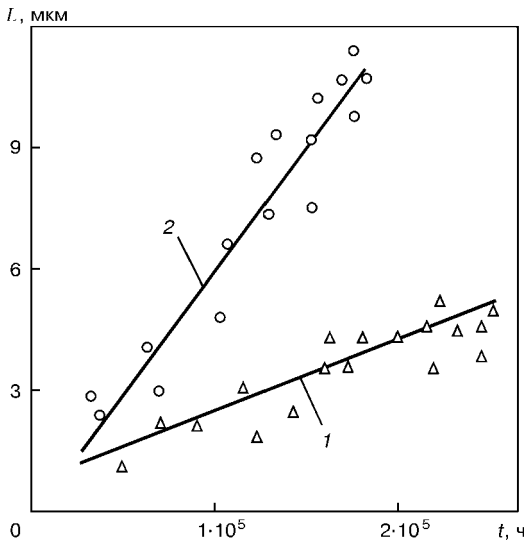


Рис. 9. Увеличение длины пор L в условиях низкотемпературной ползучести при T = 570 °С (область растягивающих напряжений σ = 50...70 МПа): *1* — автоматическая сварка на предлагаемом; *2* — то же на штатном режиме

Таким образом, интенсивность зарождения и развития пористости в образцах, сваренных на предлагаемых режимах (подобранных на основе данных моделирования температурного режима), уменьшается примерно на 25...30 % по сравнению с аналогичными образцами (штатный режим). Соответственно уменьшается и микроповреждаемость сварных соединений из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ.

Выводы

1. Установлено, что интенсивность зарождения и развития пористости металла участка неполной перекристаллизации сварных соединений теплоустойчивых сталей в условиях низкотемпературной ползучести обусловлена видом исходного состояния структуры этого участка.

2. На основе данных моделирования исходной структуры участка неполной перекристаллизации экспериментально определена возможность уменьшения его исходной структурной неоднородности и соответственно снижения интенсивности микроповреждаемости участка, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики сварных соединений.

1. *Земзин В. Н.* Жаропрочность сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1972. — 269 с.
2. *Хромченко Ф. А.* Надежность сварных соединений труб, котлов и паропроводов. — М.: Энергоиздат, 1982. — 117 с.
3. *Шрон Р. З., Небесова И. Ф.* Структура, фазовый состав и длительная прочность металла шва хромомолибденовой стали // Автомат. сварка. — 1971. — № 11. — С. 9–11.
4. *Хромченко Ф. А.* Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 351 с.
5. *Дмитрик В. В., Ильенко Н. А., Кириченко Е. П.* Повышение механических свойств металла участка неполной перекристаллизации // Свароч. пр-во. — 1991. — № 1. — С. 11–12.
6. *Тонкая* структура зоны термического влияния при сварке стали 15Х1М1Ф / Т. Г. Березина, Э. Р. Бородина, Л. А. Ашихмина, А. З. Лепехин // Автомат. сварка. — 1974. — № 12. — С. 19–22.
7. *Миллер К.* Ползучесть и разрушение. — М.: Металлургия, 1986. — 118 с.
8. *Дмитрик В. В.* Моделирование структуры сварных соединений теплоустойчивых перлитных сталей // Автомат. сварка. — 2000. — № 4. — С. 27–30.
9. *Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В.* Долговечность металла в условиях ползучести. — М.: Металлургия, 1988. — 222 с.
10. *«Белая»* полоска в сварных соединениях из стали 15Х1М1Ф / Б. С. Касаткин, Н. Л. Карета, Ю. Н. Вахнин, С. И. Герман // Автомат. сварка. — 1958. — № 12. — С. 12–16.
11. *Дьяченко С. С., Герман С. И., Павляк Я. С.* Исследование зоны разупрочнения, возникающей при сварке сталей // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1960. — № 7. — С. 24–26.
12. *Царюк А. К.* Особенности влияния фосфора на размер неметаллических включений и свойства швов соединений теплоустойчивых сталей // Автомат. сварка. — 1999. — № 4. — С. 26–30.
13. *Готальский Ю. Н.* Сварка разнородных сталей. — Киев: Техніка, 1981. — 182 с.
14. *Розенберг В. М.* Ползучесть металла. — М.: Металлургия, 1967. — 257 с.
15. *Особенности* структурных изменений в сварных соединениях стали 15Х1М1Ф при ползучести / Ф. А. Хромченко, Р. Н. Калугин, В. А. Лаппа, И. В. Федина // Свароч. пр-во. — 1999. — № 10. — С. 12–15.
16. *Влияние* технологической и металлургической наследственности на повреждение зон сварных соединений стали 15Х1М1Ф в условиях ползучести / Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, И. В. Федина, Р. Н. Калугин // Там же. — 1998. — № 4. — С. 18–21.
17. *О природе* белой полосы в сварных соединениях / О. П. Фомина, В. В. Гавранек, С. С. Дьяченко и др. // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1965. — № 1. — С. 46–47.
18. *Моделирование* белой полосы в сварных соединениях / О. П. Фомина, В. В. Гавранек, С. С. Дьяченко и др. // Свароч. пр-во. — 1965. — № 3. — С. 13–14.
19. *Твердость* белой полоски сварных соединений / О. П. Фомина, В. В. Гавранек, С. С. Дьяченко и др. // Там же. — 1965. — № 11. — С. 5–8.
20. *Dmitrik V. V.* A method of determining the temperature conditions in the molten pool // Welding Intern. — 1999. — **13**, № 2. — P. 159–161.
21. *Дмитрик В. В.* Стабилизация режимов автоматической сварки перлитных сталей // Свароч. пр-во. — 1999. — № 5. — С. 11–14.
22. *Металлография* железа. Ч. 2. Структура сталей с атласом микрофотографий / Под ред. Ф. Н. Тавадзе. — М.: Металлургия, 1972. — 478 с.
23. *Крутасова Е. И.* Надежность металла энергетического оборудования. — М.: Энергоиздат, 1981. — 240 с.
24. *Елпанова Н. В., Березина Т. Г.* Влияние структуры на кинетику разрушения стали 12Х1М1Ф при ползучести // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1989. — № 7. — С. 36–39.

It is shown, that the intensity of initiation and development of damageability at creep of welded joints in heat-resistant steels depends on the kind of the initial metal structure in incomplete recrystallization section. Control of the temperature mode of the latter allows imporvement of operating reliabiity of welding equipment.

Поступила в редакцию 28.12.2001,
в окончательном варианте 02.03.2003

УДК 621.791.3.05:620.17:669.6

СТРУКТУРА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУГОВОГО НАГРЕВА

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук, **И. В. ЗВОЛИНСКИЙ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы структура, химическая неоднородность и микротвердость структурных составляющих соединений, полученных с применением дугового нагрева и адгезионно-активных припоев системы Ni–Cr–Zr. Установлено, что при использовании припоев оптимальных составов и соответствующих технологических приемов удается получить наплавленный металл низкой твердости и избежать появления трещин в паяных швах и околошовной зоне. Доказано, что при ремонте лопаток из несвариваемых суперсплавов с высоким (более 60 %) содержанием γ'-фазы наиболее перспективно применение композиционных припоев.

Ключевые слова: высоколегированные никелевые сплавы, суперсплавы, γ'-фаза, дуговой нагрев, паяное соединение, наплавленный металл, припой, композиционный припой, микроструктура, трещины

Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе используются для изготовления лопаток газотурбинных двигателей, применяемых в авиационной технике, судостроении и энергетическом машиностроении. Лопатки чаще всего изготавливают способом литья по выплавляемым моделям, при этом, как правило, образуются различного рода дефекты. Разработка технологии ремонта лопаток с целью удаления этих дефектов является одной из самых актуальных задач современного газотурбостроения.

Применение сварки возможно для ремонта лопаток из сплавов со сравнительно небольшим содержанием γ'-фазы, что в основном зависит от массовой доли алюминия и титана [1]. Считается, что сплавы с высокой суммарной долей этих элементов (ЖС6У-ВИ, ЖС6К, ЖС26, ЧС 70, ЧС 88, ЧС 104ВИ, IN-738LC, 713С и др.) и значительным содержанием γ'-фазы (суперсплавы) не подлежат сварке, если при этом не использовать специальные приемы. Так, в работе [2] для получения швов без трещин при сварке сплавов с высоким содержанием γ'-фазы рекомендуется применять подогрев до 600 °С (при аргонодуговой сварке) и до 900 °С (при электронно-лучевой сварке). По мнению авторов, в этом случае важно контролировать цикл охлаждения в процессе сварки. Отмечается также, что даже небольшие отклонения в химическом составе сплава могут существенно повлиять на поведение суперсплавов при сварке.

Авторы работы [1] утверждают, что при электронно-лучевой сварке сплава IN-738LC возможно получение швов без трещин при сварке с подогревом до 1120 °С как при использовании присадочного металла, так и без него. Паяные соединения имеют высокую кратковременную прочность при 850 °С ($\sigma_в$ = 615...656 МПа, $\sigma_{0,2}$ = = 506...544 МПа) и сопротивление многоцикловой усталости, близкое к основному металлу. Распределение γ'-фазы после полной термообработки носит гомогенный характер, размер частиц составляет 0,4 мкм.

Авторы работы [3] утверждают, что склонность к образованию трещин сплава 713С уменьшается с увеличением вложенной энергии и уменьшением скорости сварки. Очевидно, что данные этой работы аналогичны, содержащимся в работах [1, 2], т. е. сводятся к уменьшению скорости охлаждения при сварке и снижению сварочных напряжений. При всей важности этих данных отметим, что изложенные в них результаты получены в идеальных условиях, которые далеко не соответствуют реальным, когда при ремонте к каждому типу дефектов необходим свой подход.

Экспериментальная часть. Авторами настоящей работы предлагается иной подход к решению проблемы устранения трещин при дуговом нагреве, заключающийся в снижении погонной энергии (не достигается критическая температура плавления основного металла), а также обеспечение возможности «залечивания» трещин, образующихся на границе соединения. Иными словами, предлагается использовать дуговой нагрев неплавящимся электродом в аргоне и припой — в качестве присадочного металла.

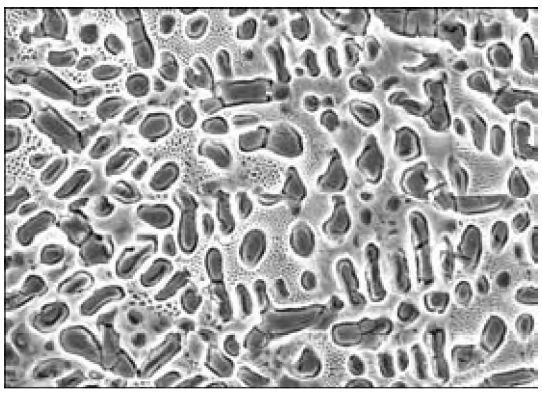


Рис.1. Микроструктура (×1800) наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве с расплавлением основного металла с использованием присадкой припоя системы Ni–Cr–Zr

© В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, И. В. Зволинский, 2003

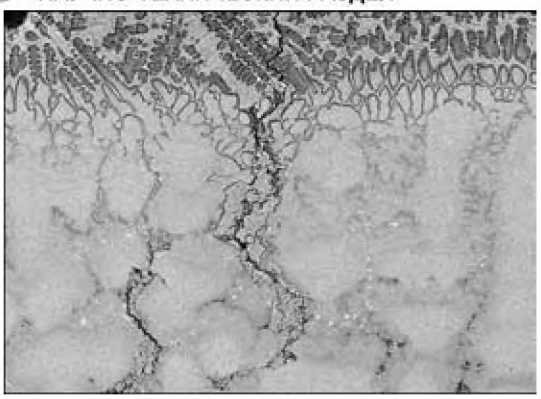


Рис. 2. Горячие трещины (×350), образовавшиеся при дуговом нагреве с расплавлением основного металла

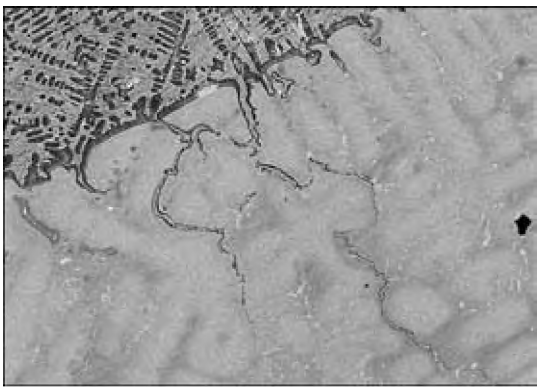


Рис. 3. «Залеченные» трещины на границе сплавления (×300), образовавшиеся при дуговом нагреве без расплавления основного металла с использованием припоя системы Ni–Cr–Zr

Выбор припоя основывался на нашем опыте применения в качестве депрессантов элементов IV и V групп таблицы Менделеева [4–6]. Припои системы Ni–Cr–Zr использовали в литом состоянии и композиционной форме (смесь порошков припоя и жаропрочного сплава). Для проведения исследований в качестве основного металла был выбран сплав с высоким (более 60 об. %) содержанием γ-фазы – ЖС6У-ВИ.

Методика проведения экспериментов была следующей. Для оценки температуры сварочной ванны со стороны «дна» искусственно созданного конусообразного дефекта прикреплялась термопара. Дуговой нагрев производился двумя способами: с расплавлением основного металла и без его расплавления.

Образцы для микрошлифов вырезали перпендикулярно плоскости подложки. Исследование химической неоднородности полученных наплавок проводили на растровом электронном микроскопе

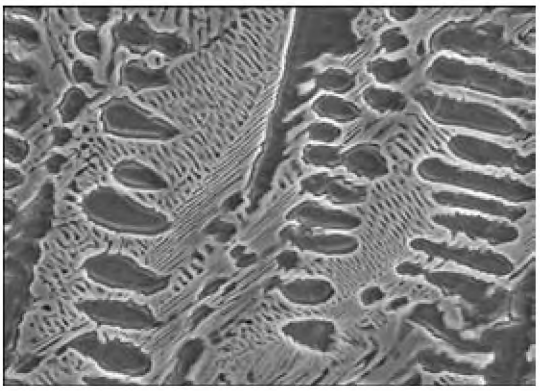


Рис. 4. Микроструктура (×1800) наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве без расплавления основного металла с использованием припоя системы Ni–Cr–Zr

ISM-840 японской фирмы «Джеол», снабженном системой микроанализа. Исследования выполняли в режиме вторичных электронов.

Результаты металлографических исследований образцов, полученных при дуговом нагреве с расплавлением основного металла и последующей присадкой припоя системы Ni–Cr–Zr (в литом виде), показали, что микроструктура наплавленного металла состоит из первичных дендритов твердого раствора на основе никеля и эвтектической составляющей (рис. 1).

При изучении химической неоднородности выявлено, что наплавленный металл обогащен элементами основного металла (таблица). Таким образом, при расплавлении основного металла и припоя металл шва по химическому составу приближался к паяемому материалу. В зоне сплавления наблюдалось образование единичных горячих трещин. Они распространялись по границам зерен паяемого материала и в некоторых местах были частично заполнены припоем (рис. 2).

Существенное снижение теплового воздействия на основной металл достигалось в случае, если последний не расплавлялся, а смачивался расплавленным припоем. Склонность к образованию горячих трещин в этом случае уменьшалась, а главное, все они были заполнены припоем (рис. 3).

Очевидно, что трещины образовались при температуре выше температуры кристаллизации металла шва и более жидкотекучая составляющая припоя проникла по границам зерен паяемого металла. Полученная микроструктура наплавленного металла двухфазная, она состоит из крупных дендритов твердого раствора и эвтектической составляющей (рис. 4). Результаты исследований химической неоднородности наплавленного металла

Распределение элементов структурных составляющих наплавленного металла

Структурные составляющие	Массовая доля элементов, %									
	Ni	Co	Zr	Ti	Cr	Mo	W	Nb	Al	Fe
Дуговой нагрев с расплавлением основного металла										
Дендрит	57,8	3,4	1,5	0,9	15,1	0,2	16,9	1,2	2,6	0,5
Эвтектика	69,3	1,7	19,3	1,0	3,5	–	1,9	1,4	1,9	1,0
Дуговой нагрев без расплавления основного металла										
Дендрит	62,4	2,9	2,2	0,2	20,1	0,3	9,2	0,7	1,1	0,9
Эвтектика	69,8	1,5	19,9	0,4	4,8	–	0,6	1,6	1,4	–

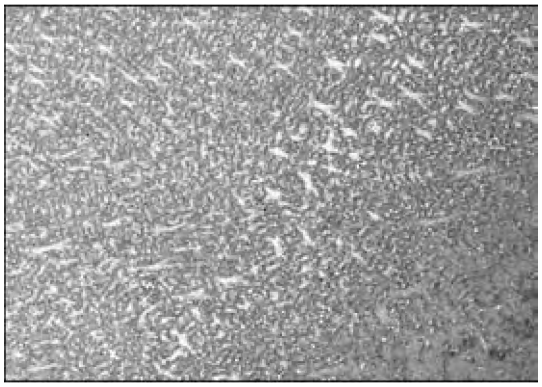


Рис. 5. Микроструктура (×200) металла границы сплавления образца из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ, полученного с использованием композиционного припоя

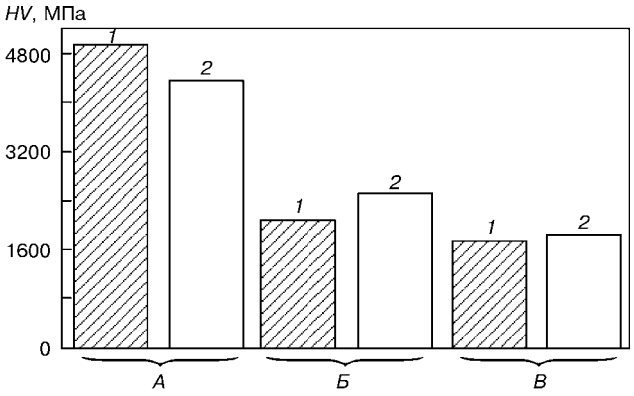


Рис. 6. Микротвердость структурных составляющих наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве с расплавлением основного металла (*1*) и без его расплавления (*2*); *А* — основной металл; *Б* — дендрит; *В* — эвтектика

показали, что в нем имеют место взаимные диффузионные процессы, происходящие между паяемым металлом и припоем, однако они выражены менее ярко (см. таблицу), чем при нагреве с расплавлением основного металла.

Дальнейшее уменьшение теплового воздействия на металл зоны сплавления достигается за счет применения порошковых композиционных припоев — смеси легкоплавкого сплава системы Ni–Cr–Zr и тугоплавкого высоколегированного жаропрочного сплава ЖС-26У. В этом случае особенно важно соотношение припоя и основного металла. С одной стороны, чем выше массовая доля тугоплавкой составляющей, тем выше уровень свойств наплавленного металла; с другой — массовая доля припоя не должна быть слишком низкой, поскольку следует обеспечить хорошее смачивание паяемого металла и возможность «залечивания» горячих трещин в случае их образования. При оптимальном соотношении припоя и наполнителя удается избежать возникновения трещин и получить наплавленный металл с однородной мелкодисперсной структурой (рис. 5).

Обсуждение результатов. Как уже отмечалось выше, высоколегированные сплавы на основе никеля с высоким содержанием γ'-фазы являются несвариваемыми. Если проанализировать суть происходящих процессов, то можно отметить, что, с одной стороны, при сварке происходит значительный перегрев ЗТВ. При этом наблюдается появление жидких прослоек по границам зерен и прочность металла резко падает. В этом случае достаточно воздействия незначительных сварочных напряжений, чтобы в паяемом металле появилась трещина. С другой стороны, при использовании присадочных материалов, близких по химическому составу к основному металлу, отсутствует возможность «залечивания» трещин, поскольку температура затвердевания металла жидкой ванны достаточно высока. Кроме того, трещины могут возникать в основном металле на некотором расстоянии от сварочной ванны. Увеличение вложенной энергии и снижение скорости сварки, как это предлагается в работах [1–3], действительно уменьшают сварочные напряжения, но увеличивают опасность воздействия такого фактора, как появление жидких прослоек на границах зерен.

Предложенный авторами настоящей работы подход оказался весьма эффективным средством устранения горячих трещин. Он отличается тем, что при дуговом нагреве обеспечивает минимальное тепловложение. Тогда жидкие прослойки в околошовной зоне не образуются, а смачивание основного металла происходит при температурах значительно ниже температуры его плавления. Важную роль при этом играет как режим пайки, так и особенности припоев новых систем, например типа Ni–Cr–Zr, который имеет высокую адгезионную активность, более высокую пластичность, чем припои системы Ni–Cr–B–Si, низкую твердость. Последнее наглядно подтверждается результатами измерения микротвердости структурных составляющих наплавленного металла, выполненных различными способами (рис. 6).

Следует отметить, что наилучшие результаты получены при использовании не литых, а композиционных припоев, с помощью которых оказалось возможным регулировать не только состав наплавленного металла, но и тепловложение. Более того, в этом случае на химический состав наплавленного металла мало влияют размеры дефектов. Естественно, также играет роль соотношение легко- и тугоплавкой составляющей композиционного припоя.

Структура наплавленного металла, полученного с использованием композиционных припоев, состоит из равномерно распределенных дисперсных участков твердого раствора и эвтектики, что создает благоприятные условия для гомогенизирующего отжига как вследствие неравновесности структуры, так и сравнительно небольшой протяженности диффузионных потоков.

Выводы

1. Сочетание дугового нагрева и адгезионно-активных припоев, например системы Ni–Cr–Zr, в качестве присадочного металла весьма перспективно для создания технологии ремонта деталей горячего тракта газотурбинных двигателей.

2. Установлено, что использование композиционных припоев особенно эффективно для регулирования химического состава наплавленного металла и тепловложения.

3. Применение композиционного припоя и дугового нагрева позволило исключить образование трещин и получить наплавленный металл с однородной мелкодисперсной структурой.

1. *Jahnke B.* High-temperature electron beam welding of the nickel-base superalloy IN-738LC // Welding J. — 1982. — Nov. — P. 343–347.
2. *Haafkens M. H., Matthey J. H. G.* A new approach to the weldability of nickel-base as-cast and powder metallurgy superalloys // Ibid. — P. 25–30.
3. *Improving* the weldability of Ni-base superalloys 713C / A. Koren, M. Roman, I. Weisshaus, A. Kaufman // Ibid. — 1968. — Nov. — P. 348–351.
4. *Khorunov V. F., Ukader E. M.* Principles for development of eutectic filler metals for heat resistant nickel alloy brazing // Proc. of the Intern. conf. «Joining Welding 2000», Haque, July 1–2, 1991. — Oxford: Pergaman press, 1991. — P. 357–369.
5. *Khorunov V. F., Ivanchenko V. G., Kvasnitskij V. V.* Investigation of Ni–Cr–Zr and Ni–Cr–Hf alloys // Intern. conf. «Brazing, high temperature brazing and diffusion welding», Aachen, May, 1998. — Aachen, 1998. — P. 59–61.
6. *Brazing* filler metal containing Zr and Hf as depressants / V. Khorunov, S. Maksymova, S. Samokhin, V. Ivanchenko // Proc. of the Third intern. conf. «High temperature capillarity», Kurashiki, 19–22 Nov., 2000. — Osaka, 2001. — P. 419–424.

Structure, chemical heterogeneity and microhardness of structural components of joints produced using argon arc heating and adhesion-active brazing alloys of Ni-Cr-Zr system are investigated. It was established that at optimum compositions of brazing alloys and technological procedures it is possible to provide the low hardness of deposited metal and to prevent the crack initiation in brazed welds and HAZ. It is proved that it is most rational to use the composite alloys in repair of blades from non-weldable superalloys with high (more than 60 %) content of γ'- phase.

Поступила в редакцию 24.09.2002

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Автоматическая сварка» входит в перечень изданий, утвержденных и рекомендованных ВАК Украины, публикации в котором учитываются для соискателей ученых степеней.

В соответствии с постановлением ВАК Украины от 15. 01. 2003 г. № 7-05/01 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» редакционные коллегии научных специализированных изданий, признаваемых ВАК, должны принимать к печати только те статьи, которые имеют следующие необходимые элементы:

✓ постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными или практическими заданиями

✓ анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые ссылается автор

✓ выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящена данная статья

✓ формулировка целей статьи (постановка задачи)

✓ изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов

✓ выводы из представленного исследования и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Специализированным ученым советам при приеме к защите диссертационных работ предписано засчитывать статьи, опубликованные, начиная с февраля 2003 года, только при условии выполнения изложенных выше требований.

При подготовке статей к публикации в журнале просьба учитывать рекомендации ВАК Украины.

Редколлегия журнала

УДК 621.791.754'264:001.891.57

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ ВЫЛЕТА ЭЛЕКТРОДА С УЧЕТОМ ТЕПЛА, ПОСТУПАЮЩЕГО ОТ КАПЛИ

И. В. ПЕНТЕГОВ, д-р техн. наук, **О. И. ПЕТРИЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана математическая модель распределения температуры по длине вылета электрода при дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе с учетом нелинейности теплофизических коэффициентов и влияния тепла (поступающего от капли), позволяющая осуществлять вычисления градиента температуры и температуры в любой точке на вылете электрода (от мундштука до капли). Даны рекомендации по выбору величины вылета электрода.

Ключевые слова: дуговая сварка, углекислый газ, вылет электрода, математическая модель, расчет, температура, теплопроводность, распределение температуры

Изучение тепловых процессов на участке вылета электрода продолжает оставаться важнейшим предметом многочисленных исследований в области сварочного производства [1–10]. Однако проведенный анализ теоретических и практических разработок по данному вопросу показал, что процессы распределения температуры по длине вылета электрода с учетом теплофизических параметров и тепла, поступающего от капли, исследованы недостаточно полно. Одной из важных и до сих пор нерешенных задач теории сварочных процессов при сварке плавящимся электродом является решение уравнения теплопроводности для вылета электрода в общем виде, когда теплофизические коэффициенты являются нелинейными функциями от температуры.

Длину вылета электрода можно условно разделить на два участка: участок вылета электрода, примыкающий к мундштуку и нагреваемый электрическим током, на котором несущественно влияние тепла, идущего от капли; участок, примыкающий к капле, на котором происходит нагрев под действием электрического тока и тепла, поступающего за счет теплопроводности от капли. На рис. 1 показано, как эти два участка стыкуются друг с другом при некоторой температуре стыка T_1 и соответствующей этой температуре длине вылета электрода l_1. Данная статья посвящена определению этих величин и выработке рекомендаций по выбору длины вылета электрода.

Представленная математическая модель распределения температуры по длине вылета электрода (при дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе с учетом нелинейности теплофизических коэффициентов и влияния теплопроводности от капли) основана на решении дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [11].

В работе [12] дана методика расчета падения напряжения на вылете электрода для первого участка. Для него уравнение Фурье имеет вид

$$\gamma C_p(T)\, v_{\text{п}} \frac{dT}{dl} - \rho(T) j^2 = 0, \qquad (1)$$

где $v_{\text{п}}$ — скорость подачи проволоки, м/с; γ — плотность металла (стали), кг/м^3; $C_p(T)$ — удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·К); $\rho(T)j^2$ — удельная тепловая мощность, выделяемая проходящим током, Вт/м^3; $\rho(T)$ — удельное электрическое сопротивление металла, Ом·м; $j = 4I/(\pi d^2)$ — плотность тока, А/м^2.

Из этого уравнения получена зависимость текущей длины вылета l от текущей температуры T этого участка вылета и начальной температуры T_0 электродной проволоки на выходе из мундштука

$$l(T, T_0) = \frac{v_{\text{п}}\gamma}{j^2} \int_{T_0}^{T} \frac{C_p(T)}{\rho(T)} dT, \qquad (2)$$

позволяющая определять длину вылета электрода до точки стыка l_1, если известны T_1 и T_0:

$$l_1(T_1, T_0) = \frac{v_{\text{п}}\gamma}{j^2} \int_{T_0}^{T_1} \frac{C_p(T)}{\rho(T)} dT. \qquad (3)$$

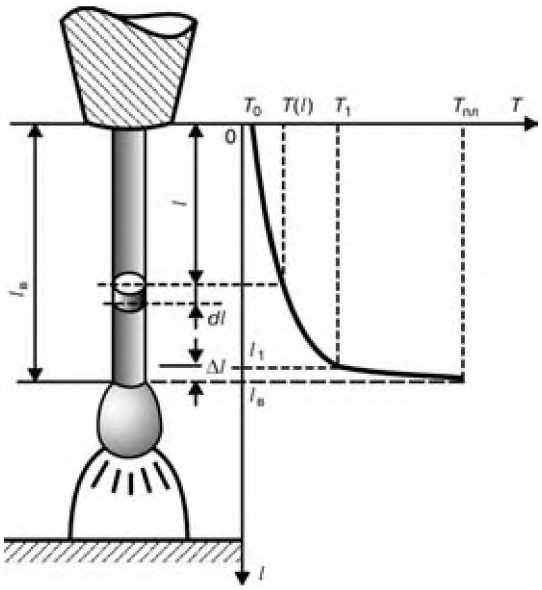


Рис. 1. Схема распределения температуры по длине вылета электрода (обозначения см. в тексте)

© И. В. Пентегов, О. И. Петриенко, 2003

В работе [12] выведена также формула для определения градиента температуры на первом участке вылета электрода (производная dT/dl):

$$\frac{dT}{dl} = \frac{\rho(T)j^2}{\gamma C_p(T)v_п}. \quad (4)$$

При расчете используются нелинейные аппроксимации $\rho(T)$ и $C_p(T)$, приведенные в работе [12]. Однако эти формулы недействительны на втором участке вылета электрода, который находится в интервале температур от T_1 до температуры плавления проволоки $T_{пл}$. Поэтому рассмотрим участок вылета электрода $\Delta l = l_в - l_1$, на котором теплопроводность металла оказывает значительное влияние на его нагрев (см. рис. 1). На всем участке вылета электрода примем для элемента длины вылета электрода dl систему координат, движущуюся вместе с проволокой с постоянной скоростью подачи [12]. При этом температура элемента dl при его движении повышается, и процесс нагрева носит динамический характер. Запишем уравнение Фурье для элемента длины вылета электрода на участке Δl с учетом одномерности задачи (предположив, что потерями на излучение и конвекцию можно пренебречь [13–15]) в виде

$$C_p(T)\frac{dT}{dt} = \lambda(T)\frac{d^2T}{dl^2} + \rho(T)j^2. \quad (5)$$

Для рассматриваемой системы координат текущая длина вылета электрода $l = v_п t$ [12]. Использовав эту зависимость, осуществим в уравнении (5) замену переменной $dt = dl/v_п$ и получим уравнение, описывающее нагрев вылета электрода на втором участке с учетом теплопроводности и нелинейности теплофизических параметров:

$$\frac{d^2T}{dl^2} - \gamma v_п \frac{C_p(T)}{\lambda(T)}\frac{dT}{dl} + \frac{\rho(T)}{\lambda(T)}j^2 = 0, \quad (6)$$

где $\lambda(T)$ — теплопроводность стали, Вт/(м·К).

Это уравнение может быть решено без упрощений численными методами, но при этом теряется возможность теоретических обобщений и анализа, что необходимо для решения поставленной задачи. Для получения аналитического решения на участке вылета электрода Δl воспользуемся усредненными теплофизическими параметрами (средние значения отношений удельной теплоемкости к теплопроводности и удельного электрического сопротивления материала электрода к теплопроводности соответственно) на интервале интегрирования и введем обозначения

$$a = \frac{\gamma v_п}{T_{пл} - T_1}\int_{T_1}^{T_{пл}} \frac{C_p(T)}{\lambda(T)}dT, \quad b = \frac{j^2}{T_{пл} - T_1}\int_{T_1}^{T_{пл}} \frac{\rho(T)}{\lambda(T)}dT. \quad (7)$$

При расчете величин a и b по этим формулам используются нелинейные аппроксимации $\rho(T)$ и $C_p(T)$, приведенные в работе [12], а также аппроксимация зависимости теплопроводности от температуры:

$$\lambda(T) = \begin{cases} 69{,}92 - 0{,}096T & \text{при } T \le 100, \\ 65{,}73 - 0{,}049T & \text{при } 100 \le T \le 500, \\ 60{,}29 - 0{,}039T & \text{при } 500 \le T \le 700, \\ 56{,}10 - 0{,}032T & \text{при } 700 \le T \le 900, \\ 23.027 + 0.005T & \text{при } T \ge 900. \end{cases}$$

В результате введения постоянных a и b уравнение (6) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2T}{dl^2} - a\frac{dT}{dl} + b = 0. \quad (8)$$

При замене переменной $T' = dT/dl$ (новая переменная — градиент температуры) уравнение (8) превращается в линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dT'}{dl} - aT' + b = 0. \quad (9)$$

Интегрируя это выражение в пределах: градиент температур — от $T'(l_1)$ до текущего значения $T'(l)$, длина вылета электрода — от l_1 до текущего значения l, получаем выражение для вычисления градиента температуры в любой точке на участке вылета электрода Δl

$$\frac{dT}{dl} = T' = \frac{(aT'(l_1) - b)\,e^{a(l - l_1)} + b}{a}, \quad (10)$$

где $T'(l_1)$ — градиент температуры вблизи точки стыка со стороны интервала Δl.

При переходе к переменной T и разделении переменных в выражении (10) возьмем интеграл

$$\int_{T(l_1)}^{T(l)} dT = \int_{l_1}^{l} \frac{(aT'(l_1) - b)\,e^{a(l - l_1)} + b}{a}dl, \quad (11)$$

тогда (при $T(l_1) = T_1$) запишем

$$T(l) = T_1 + \left(\frac{T'(l_1)}{a} - \frac{b}{a^2}\right)(e^{a(l - l_1)} - 1) + \frac{b(l - l_1)}{a}. \quad (12)$$

Это уравнение позволяет вычислять температуру в любой точке на участке вылета электрода Δl, если известны значения T_1, l_1 и $T'(l_1)$. Но если величины T_1 и l_1, как будет показано ниже, могут быть выбраны из определенных соображений, то градиент температуры в точке стыка $T'(l_1)$ может быть определен только при использовании граничного условия на границе «вылет электрода — капля». Принимая, что при $l = l_в$ значение $T(l_в)$ равно температуре плавления электродной проволоки $T_{пл}$, и решая при этих значениях уравнение (12) относительно $T'(l_1)$, находим

$$T'(l_1) = \frac{a(T_{пл} - T_1) - b(l_в - l_1)}{e^{a(l_в - l_1)} - 1} + \frac{b}{a}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в формулу (12), получаем уравнение для расчета температуры на участке вылета электрода $l_1 \le l < l_в$:

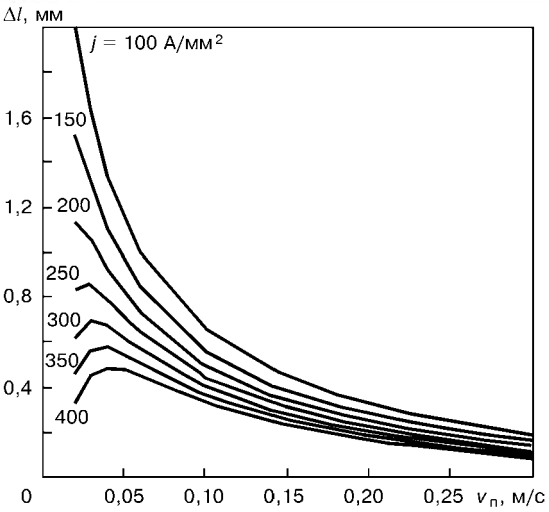


Рис. 2. Результаты вычислений интервала Δl как функции $v_п$ и j при любых значениях T_1

$$T(l) = \frac{e^{a(l-l_1)}-1}{e^{a(l_в-l_1)}-1}\left(T_{пл} - T_1 - \frac{b(l_в-l_1)}{a}\right) + T_1 + \frac{b(l-l_1)}{a}. \quad (14)$$

Выражение (14) обеспечивает условие стыка рассматриваемых двух участков вылета электрода по температуре в точке l_1, но не обеспечивает стык по градиенту температуры. На втором интервале используются усредненные теплофизические параметры, определяемые по формуле (7), а на первом — точные нелинейные зависимости теплофизических параметров от температуры.

Однако существуют условия, при которых можно обеспечить минимально возможное расхождение градиентов температуры в точке стыка. Определение этих условий состоит в следующем. Введем обозначение $\Delta l = l_в - l_1$ и запишем $F(T_1, \Delta l)$ как отношение градиентов температуры в точке стыка по формулам (13) и (4):

$$F(T_1, \Delta l) = \left\{\frac{a(T_{пл}-T_1)-b\Delta l}{e^{a\Delta l}-1} + \frac{b}{a}\right\} \times \frac{\gamma C_p(T_1) v_п}{\rho(T_1) j^2}. \quad (15)$$

Как показывает анализ последнего выражения, эта функция в интервале температур 600... 1044 К всегда больше 1. Очевидно, что в этом случае минимальное значение этой функции, наиболее близкое к 1, соответствует наилучшему условию согласования решений. Поэтому, взяв производную из этого выражения по T_1 (с учетом того, что величины a и b также являются функциями T_1) и приравняв ее к нулю, получим условие наилучшей стыковки

$$\frac{dF(T_1, \Delta l)}{dT_1} = 0. \quad (16)$$

Решая уравнение (16) при заданном значении T_1 относительно Δl, находим интервал Δl как функцию $v_п$ и j. Описанная процедура нахождения Δl легко реализуется с помощью пакета MathCad (от T_0 и T_1 значение Δl практически не зависит). Результаты вычислений интервала Δl как функции $v_п$ и j представлены в виде семейства кривых на рис. 2. Выбирать значения $v_п$ и j (или ток I) для данного диаметра электродной проволоки можно по кривым, приведенным на рис. 3, представляющим собой номографическое обобщение рекомендаций фирмы «Kemppi» и ряда работ [1, 6, 16, 17]. При этом верхний предел рекомендованных значений соответствует вылету электрода, равному 20, а нижний — 6,4 мм для всех диаметров электродной проволоки.

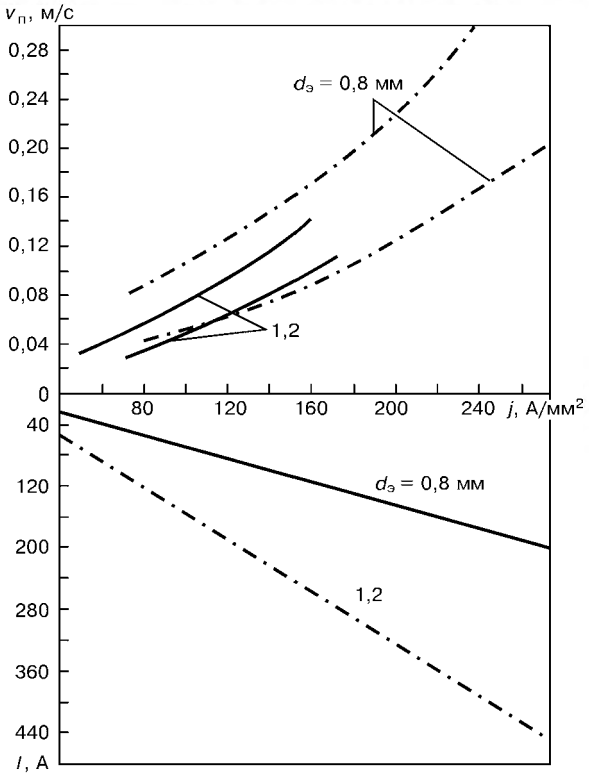


Рис. 3. Номограммы для выбора значений $v_п$ и j

Определив Δl, и используя выражение (3) найдем длину вылета электрода

$$l_в = l_1(T_1, T_0) + \Delta l. \quad (17)$$

Это значение $l_в$ и необходимо подставлять в формулу (14) при расчете распределения температур по длине вылета электрода на втором интервале.

На первом участке электрода при $0 \le l < l_1$ расчет распределения температуры по длине вылета проводится по формуле пакета MathCad для обратных функций, использующей выражение (2),

$$T(l) = \text{root}\left[\frac{v_п \gamma}{j^2}\int_{T_0}^{T}\frac{C_p(T)}{\rho(T)}dT - l, T\right]. \quad (18)$$

На рис. 4 по полученным формулам построено семейство кривых распределения температур вдоль вылета электрода при различных заданных значениях температур точки стыка T_1 и начальных температур T_0 для одного конкретного рекомендуемого

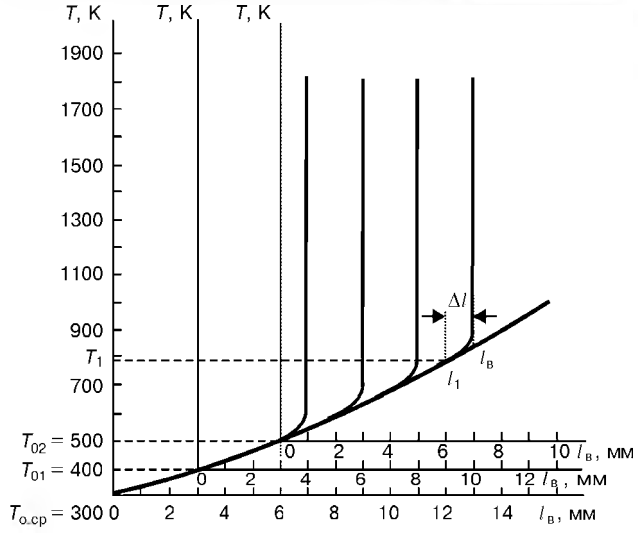


Рис. 4. Распределение температур вдоль длины вылета электрода при различных заданных значениях температуры точки стыка T_1 и начальных температур T_0

режима сварки ($d_э$ = 1 мм, $v_п$ = 0,233 м/с, j = = 318 А/мм^2).

Температура проволоки T_0 при выходе ее из мундштука может находиться в пределах 150...450 °С [3, 18, 19]. Нижняя граница соответствует неизношенному медному мундштуку, верхняя — мундштукам из различных бронз и керметов при сильном износе.

Если известно значение контактного падения напряжения $U_к$ на мундштуке, то температура проволоки T_0 может быть рассчитана по формуле

$$T_0 = \text{root}\left[\frac{\gamma v_п}{j}\int_{T_{o\,ср}}^{\theta} C_p(T)dT - K_U \cdot U_к,\ \theta\right], \qquad (19)$$

где $T_{o\,ср}$ — температура окружающей среды; $C_{p\,ср}$ = = 500 Дж/(кг·К) — усредненное значение удельной теплоемкости стали на интервале температур начального контактного нагрева проволоки; K_U — коэффициент, учитывающий долю мощности, идущую на повышение температуры проволоки, от всей мощности, выделяющейся в контакте.

Расчет по формулам теории Хольма [20] для рассматриваемого случая показывает, что K_U = = 0,512 и практически не меняется при изменении режима сварки. По формуле (19) для ряда режимов сварки, апробированных на практике, были рассчитаны температуры проволоки T_0 на выходе из мундштука (см. таблицу). Расчет проводили для мундштука из меди М1 при значении $U_к$ = 0,65 В, что соответствует случаю нового мундштука [21]. Для этих же режимов по полученным выше формулам находили значения Δl, $l_1 = l_в - \Delta l$ и по формуле (18) при l = = l_1 определяли температуру в точке стыка T_1.

Так как выражения (2) и (18) зависят от температуры проволоки при выходе ее из мундштука T_0, то при построении графических зависимостей по этим выражениям получаем семейства кривых для разных T_0, приведенных на рис. 4. Из рассмотрения полученных кривых следует, что повышение начальных температур с T_0 до T_{01} (например, при износе мундштука) эквивалентно сдвигу начала координат на длину

$$l(T_{01}, T_0) = \frac{v_п \gamma}{j^2}\int_{T_0}^{T_{01}} \frac{C_p(T)}{\rho(T)}dT. \qquad (20)$$

При этом, если необходимо сохранить температуру точки стыка, то на эту длину необходимо укорачивать длину вылета электрода, либо, если сохраняем длину вылета электрода неизменной, температура стыка будет возрастать. Расчетные значения температуры стыка T_1 из таблицы показывают, что T_1 иногда может приближаться к опасной границе, если при изменении режимов сварки пытаться сохранить длину вылета электрода неизменной. Для сохранения качества сварки по мере износа мундштука можно рекомендовать укорачивать длину вылета электрода.

Существует определенная свобода выбора температуры точки стыка и длины вылета электрода, но в довольно узком диапазоне. При очень малой длине вылета (< 2 мм) возникает опасность обгорания мундштука при случайных колебаниях сварочной горелки, снижается производительность процесса сварки. При большой длине вылета (и больших температурах стыка) производительность расплавления возрастает, что объясняется более эффективным использованием тепла для расплавления электродного металла, но при этом может возникнуть недопустимый «пульсирующий» режим разогрева проволоки с резким ухудшением качества сварного шва [18]. Чем больше износ мундштука, тем больше вероятность возникновения этих пульсаций, так как в изношенном мундштуке контакт

Сопоставление расчетных кривых с опытными данными

Опытные данные из работ [6, 17]					Расчетные данные				
$d_э$, мм	I, А	$v_п$, м/с	j, А/мм^2	$l_в$, мм	Δl, мм	l_1, мм	T_0, К (°С)	T_1, К (°С)	$l_в$, мм (при T_1 = 850 К = const)
0,8	150	0,14	298,4	6,4	0,4	6,0	450 (177)	830 (557)	6,66
		0,168		10	0,364	9,64	421 (148)	944 (671)	8,59
	200	0,2	397,9	6,4	0,2	6,11	493 (220)	1027 (754)	4,66
		0,231		10	0,28	9,72	464 (191)	1343 (1070)	5,84
1,2	150	0,05	132,63	6,4	1,07	5,33	493 (220)	671 (398)	11
		0,06		10	0,96	9,04	457 (184)	707 (434)	14
	200	0,085	212,21	6,4	0,65	5,75	605 (332)	952 (679)	4,87
		0,1		10	0,57	9,43	555 (282)	1048 (773)	6,7

нестабилен (возможны чередования скользящих, искровых и дуговых контактов), что является причиной появления тепловых волн, распространяющихся по вылету и приводящих к автоколебаниям.

При большой длине вылета электрода и высоких температурах точки стыка T_1 стабилизировать процесс можно путем регулирования скорости истечения углекислого газа, так как согласно работе [2], с увеличением скорости истечения газа и уменьшением напряжения на участке «мундштук–изделие», температура капли уменьшается и процесс становится более устойчивым. Например, как показывают расчеты [2], при токах порядка 280 А и длине вылета около 25 мм при большом расходе газа температура T_1 предварительного подогрева электрода диаметром 1 мм может достигать 1000 °С и более без потери устойчивости. Однако если скорость истечения газа недостаточна, то в системе саморегулирования дуги могут возникать автоколебания — периодическое изменение скорости плавления электрода и длины дуги с частотой 5...25 Гц. Существует оптимальный диапазон температур точки стыка 400 °С (673 К) $\le T_1 \le$ 800 °С (1073 К), в пределах которого еще не требуется чрезмерного расхода углекислого газа и нет опасности возникновения автоколебаний (с повышением T_1 всегда нужно увеличивать расход CO_2). Нижний предел этого диапазона близок к рекомендациям работы [18], совпадающим с рекомендациями для сварки плавящимся электродом под флюсом. При этой температуре есть полная гарантия отсутствия пульсаций тепловых режимов, однако при такой температуре стыка работать с изношенными мундштуками недопустимо, так как необходимая длина вылета стремится к нулю, если T_0 близка к 450 °С. Поэтому в качестве рекомендованных температур точки стыка необходимо выбирать T_1 в середине диапазона 500...700 °С (773...973 К). В таблице в качестве примера приведены расчетные значения длин вылетов для рассматриваемых режимов сварки, если температуру стыка T_1 поддерживать постоянной и равной 850 К.

Значение l_1 можно рассчитать не по формуле (3), а по аппроксимации

$$l_1 = \frac{v_п}{j^2}\left(T_1^{1/4} - T_0^{1/4}\right)(5\cdot 10^6). \qquad (21)$$

где $v_п$ измеряется в м/с; j — в А/мм^2, T_1 и T_0 — в К, при этом $l_1(T_0)$ получается в мм ($5\cdot 10^6$ — размерный коэффициент). Погрешность вычислений по этой формуле в реальном диапазоне изменения T_1 не превышает 1 %.

Формулу (21) можно преобразовать к виду, удобному для определения текущей температуры на первом участке вылета, примыкающем к мундштуку, как функции от текущего значения l, вместо формулы (18)

$$T(l) = \left(\frac{lj^2}{5\cdot 10^6 v_п} + T_0^{1/4}\right)^4. \qquad (22)$$

Определение рекомендуемой длины вылета электрода сводится к следующему. Для выбранных по кривым рис. 3, рекомендованным для данного диаметра электродной проволоки, значениям $v_п$ и j (или тока I с последующим определением плотности тока j), температуры T_1 и известного значения T_0 по формуле (21) находим l_1 и по кривым рис. 2 определяем интервал Δl. После чего длина вылета электрода определяется по формуле

$$l_э = l_1 + \Delta l. \qquad (23)$$

Результаты расчетов (см. таблицу) согласуются с данными экспериментов, приведенными в работах [6, 16, 17].

Полученные в ходе проведенной работы уравнения для расчета распределения температуры по длине вылета электрода являются основой для дальнейшей разработки более полной математической модели системы «источник питания – сварочная дуга» при дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе.

В заключение следует отметить, что разработанная модель позволяет рассчитать длину зоны, в которой нагрев электрода определяется собственно нагревом от проходящего тока, и длину зоны электрода, в которой основные тепловые процессы определяются нагревом от капли.

Получены выражения, описывающие распределение температуры вдоль твердой части вылета электрода с учетом теплопроводности металла электрода, выражения для вычисления градиента температуры и распределения температуры на первом участке вылета электрода, примыкающем к мундштуку, и выражение для вычисления градиента температуры и температуры на втором участке вылета электрода, примыкающем к капле. При этом распределение температуры по длине вылета электрода представлено в виде функции, зависящей от сварочного тока, скорости подачи проволоки, плотности тока и длины вылета электрода.

Даны рекомендации по выбору длины вылета электрода. Показано, что при изменении режимов сварки лучше сохранять не длину вылета постоянной, а постоянство температуры точки стыка первого и второго участков вылета электрода. При этом с повышением температуры проволоки при выходе ее из мундштука необходимо уменьшать длину вылета электрода.

Установлено, что теплопроводность существенно влияет на нагрев вылета электрода не по всей его длине, а только в области, примыкающей к капле. Полученное выражение позволяет определить начало этой области. Решение задачи с учетом теплопроводности позволяет рассчитать градиент температур на участке вылета электрода, прилегающем к капле.

Модель позволяет определить градиент температур dT/dl на границе с каплей при $T = T_{пл}$, что, в свою очередь, позволит в дальнейшем определить количество теплоты, поступающее из капли в электрод, исследовать тепловой баланс капли более детально и точно, чем прежде.

Разрабатываемая математическая модель процессов в системе «источник питания — сварочная

дуга» для дуговой сварки плавящимся электродом в углекислом газе позволит создать базу данных различных режимов сварки данного процесса.

1. *Акулов А. И.* О количестве тепла, приносимого в дугу нагретым в вылете электродом // Автомат. сварка. — 1966. — № 5. — С. 35–38.
2. *Антипов В. В.* Сварка тонкой электродной проволокой в CO_2 при повышенной скорости истечения газа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1971. — 16 с.
3. *Варуха Е. Н.* Учет предварительного подогрева проволоки в математической модели плавления электрода при механизированной сварке // Современные проблемы сварочной науки и техники «Сварка-97»: Материалы Рос. науч.-техн. конф. — Воронеж, 1997. — Воронеж. гос. архитектурно-строительная акад. — С. 224.
4. *Дубовецкий С. В.* Исследование и разработка метода расчета режимов сварки в CO_2 низкоуглеродистых и низколегированных сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1982. — 16 с.
5. *Маришкин А. К.* Исследование нагрева, плавления и испарения электродной проволоки при дуговой сварке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 1970. — 25 с.
6. *Панибратцев Б. К.* Расчет скорости подачи электродной проволоки при сварке в углекислом газе короткой дугой // Свароч. пр-во. — 1978. — № 11. — С. 42–43.
7. *Патон Б. Е.* Автоматическая электродуговая сварка. — Киев: Машгиз, 1953. — 396 с.
8. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 297 с.
9. *Quinn T. P., Madigan R. B., Siewert T. A.* An electrode extension model for gas metal arc welding // Welding J. — 1994. — **73**, № 10. — P. 241–248.
10. *So G. K., Boer F. G. De.* Analysis of standoff estimation algorithms in GMAW short-circuit transfer mode // Australasian Welding J. — 2001. — **46**. — Second Quarter. — P. 33–39.
11. *Жуковский В. С.* Основы теории теплопередачи. — Л.: Энергия, 1969. — 224 с.
12. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 30–33.
13. *Лебедев А. В.* Влияние тепловыделения в вылете электрода на процесс саморегулирования дуги // Там же. — 1978. — № 7. — С. 10–15.
14. *Патон Б. Е.* Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом // Тр. по автоматической сварке, 1948. — № 3. — С. 13–28.
15. *Патон Б. Е., Шейко П. П.* Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1965. — № 5. — С. 1–7.
16. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 239 с.
17. *Чубуков А. А.* Исследование и повышение надежности оборудования для дуговой сварки плавящимся электродом в углекислом газе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1978. — 24 с.
18. *Шейнкин М. З.* Определение допустимого вылета тонкой электродной проволоки при сварке в углекислом газе // Свароч. пр-во. — 1978. — № 9. — С. 24–28.
19. *Untersuchung* der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertagung auf der Schweissdraht // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität «Otto von Guericke» Magdeburg. — 1987. — № 4. — S. 96–102.
20. *Хольм Р.* Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 461 с.
21. *Кошкарев Б. Т., Михайлов А. Н., Будник Н. М.* Влияние вылета на процесс плавления электрода при сварке в CO_2 // Свароч. пр-во. — 1971. — № 11. — С. 30–32.

A mathematical model has been developed of temperature distrubtion along the length of electrode stick-out in CO_2 consumable-electrode arc welding, allowing for nonlinearity of themophysical coefficients and impact of heat (contributed by the drop), which permits calculation of the temperature gradient and temeprature value in any point on the electrode stick-out (from the nozzle to the drop). Recommendations are given on selection of the value of electrode stick-out.

Поступила в редакцию 13.09.2002

НОВОСТИ НКМЗ

НКМЗ помог Южно-Украинской АЭС

Новокраматорский машиностроительный завод отгрузил в адрес Южно-Украинской АЭС для остановленного на профилактический ремонт реактора второго энергоблока комплект так называемых ложементов парогенераторов.

Как сообщил ведущий специалист НКМЗ по атомной энергетике В. Никитин, учитывая важность этого технического мероприятия, находящегося под контролем высшего руководства страны, ремонт четырех ложементов выполнен досрочно.

Представители Южно-Украинской АЭС высоко оценили работу новокраматорцев и выразили благодарность за значительно ускоренные сроки поставки остро необходимого оборудования. Ведь простой реактора ВВР-1000 всего один час — это потеря одного миллиона киловатт электроэнергии.

Следует отметить, что ранее ремонтом указанного оборудования НКМЗ, как и другие предприятия Украины, не занимался. Это было делом одного из специализированных заводов г. Подольска (Россия). Быстро освоив новую профессию, новокраматорцы выручили атомщиков в нужный момент и теперь могут это делать и в дальнейшем.

Пресс-служба НКМЗ

УДК 621 791 76

РЕЗКА ВЗРЫВОМ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ*

В. Г. ПЕТУШКОВ, д-р техн. наук, **Л. А. ВОЛГИН**, **Л. Д. ДОБРУШИН**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассматриваются основы технологии резки взрывом металлоконструкций с помощью удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ), разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона. Приводятся соотношения, описывающие эффективность действия УКЗ в рамках гидродинамической теории. Содержатся примеры успешного применения технологий резки взрывом в ряде отраслей промышленности, в том числе в особых условиях, когда необходимы специальные меры защиты от побочного воздействия взрыва.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, кумуляция, резка взрывом, удлиненный кумулятивный заряд, магистральный трубопровод, экстремальная ситуация

Гидродинамическая теория кумуляции, достаточно подробно изученная для осесимметричных зарядов [1], основана на предположении, что при соударении кумулятивной струи с преградой развивается высокое давление, при котором прочностью металла можно пренебречь и рассматривать преграду как идеальную несжимаемую жидкость. Эти условия справедливы, если давление при соударении струи с преградой будет превышать $2 \cdot 10^4$ МПа, а именно, если скорость кумулятивной струи составит $v_c > 4000$ м/с.

На рис. 1 представлены схемы сечения осесимметричного кумулятивного заряда с конической металлической выемкой и образования кумулятивной струи. При прохождении плоской детонационной волны по заряду в сторону выемки элементы облицовки кумулятивной выемки, подвергаясь обжатию, двигаются к ее геометрическому центру. При их соударении в результате интенсивного течения внутренних слоев металла облицовки образуется высокоскоростная кумулятивная струя, за которой следует низкоскоростной пест из наружных слоев облицовки, не участвующий в пробивании преграды. При скорости движения струи $v_c > 4000$ м/с можно описать основные положения теории кумуляции с помощью уравнений гидродинамики, решение которых могут быть представлены в следующем виде:

глубина пробивания преграды

$$L = l\sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_п}}; \qquad (1)$$

скорость проникания струи в преграду

$$U = v_c\left(\frac{\rho_п}{\rho_c} + 1\right)^{-0,5}; \qquad (2)$$

скорость струи

$$v_c = v_0 \operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}. \qquad (3)$$

где l — длина струи; ρ_c, $\rho_п$ — плотность соответственно металла струи и преграды; v_0 — скорость обжатия облицовки; α — угол при вершине конуса облицовки.

Согласно (1) глубина пробивания преграды пропорциональна длине кумулятивной струи и корню квадратному из отношения плотности струи и преграды. При этом следует учитывать, что при движении струя растягивается и наибольшая глубина пробивания обеспечивается в том случае, если преграда находится на некотором определенном (фокусном) расстоянии от оси заряда. Пробивная способность струи зависит от плотности материала облицовки. Поэтому на практике предпочтение в первую очередь отдается металлическим, как правило, медным или стальным облицовкам кумулятивной выемки. Кроме того, для образования высокоскоростной струи ($v_c \geq 4000$ м/с) необходимо использовать для снаряжения зарядов мощные бризантные взрывчатые вещества (ВВ), такие как гексоген, октоген и другие аналоги, обладающие высокой скоростью детонации.

Удлиненный кумулятивный заряд (УКЗ) конструкции ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 2, *а*, *б*) представляет собой наполненную ВВ профилированную металлическую трубку. Кумулятивная выемка УКЗ имеет форму полуцилиндра. Корпус

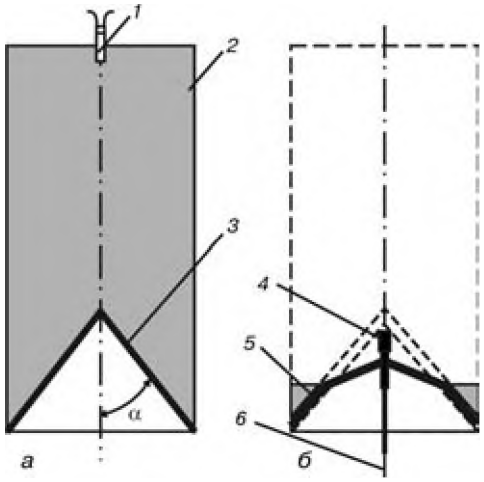


Рис. 1. Схемы сечения осесимметричного кумулятивного заряда с конической металлической облицовкой (*а*) и струеобразования (*б*): *1* — детонатор; *2* — взрывчатое вещество; *3* — кумулятивная полость; *4* — пест; *5* — фронт детонации; *6* — кумулятивная струя

* В основу статьи лег доклад, прочитанный на Международной конференции по технологиям резки («ICC 97», 5–6 марта 1997 г., г. Гашовер).

© В. Г. Петушков, Л. А. Волгин, Л. Д. Добрушин, 2003

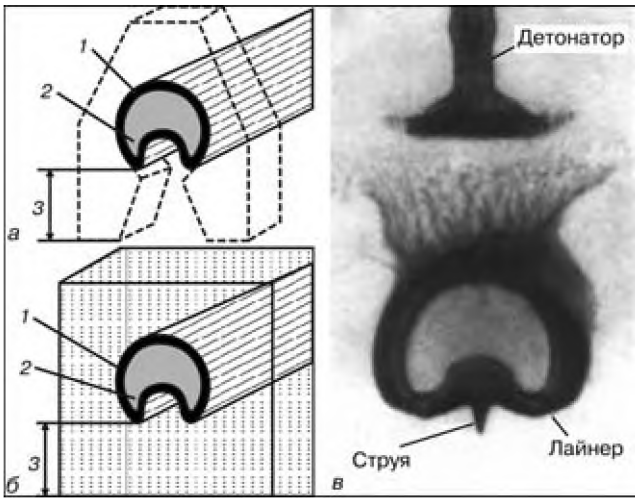


Рис. 2. УКЗ для наземной (*а*) и подводной резки (*б*) и импульсная рентгенограмма взрыва УКЗ в воде (*в*): *1* — ВВ; *2* — облицовка (лайнер); *3* — фокусное расстояние

УКЗ цилиндрической формы выполнен из меди, а для снаряжения применяется гексоген, уплотняемый в процессе изготовления заряда до 1,71...1,74 г/см^3. Скорость детонации УКЗ при этом достигает 8500 м/с.

Результаты определения параметров кумулятивной струи УКЗ методом импульсной рентгенографии (рис. 2, *в*) показали, что скорость головной части струи составляет 2200...3500 м/с, что несколько меньше, чем у кумулятивных зарядов с конической металлической выемкой. Это объясняется тем, что именно при указанных скоростях сказываются такие факторы, как прочность и сжимаемость материала струи и преграды. Уравнения гидродинамики в этом случае применяться не могут.

В результате проведенных исследований по определению оптимальных параметров и геометрическому моделированию УКЗ установлено [2, 3], что

$$\frac{L}{D} = f\left(\frac{d_к}{D}, \frac{\delta_к}{D}, \frac{F}{D}\right), \qquad (4)$$

где D — диаметр УКЗ; $d_к$, $\delta_к$ — соответственно диаметр и толщина кумулятивной выемки; F — фокусное расстояние.

В выражении (4) первых два безразмерных параметра характеризуют собственно УКЗ, а последний — его расположение относительно преграды.

На основании результатов более поздних исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, получены следующие эмпирические соотношения этих параметров:

$$\frac{d_к}{D} = 0{,}42...0{,}44. \qquad (5)$$

$$\frac{\delta_к}{D} = 0.06...0.07. \qquad (6)$$

$$\frac{F}{D} = 1.0...1.5. \qquad (7)$$

Технологический процесс изготовления УКЗ представляет собой последовательное волочение

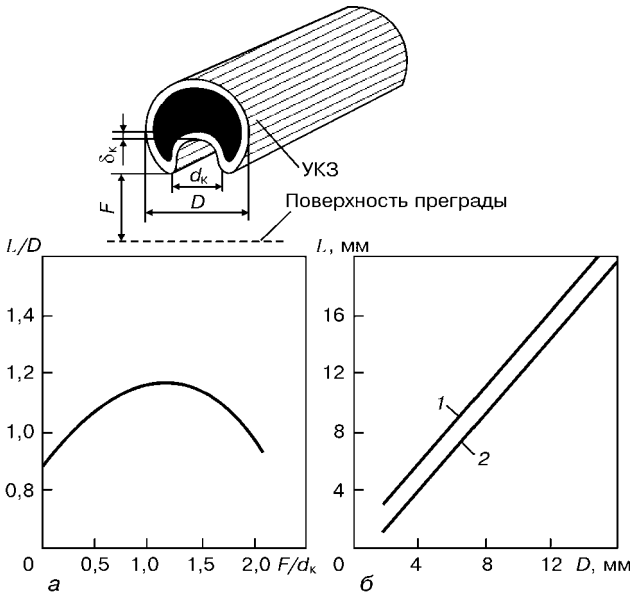


Рис. 3. Зависимость глубины реза от фокусного расстояния (*а*) и диаметра УКЗ (*б*): *1* — низкоуглеродистая сталь; *2* — нержавеющая сталь

медной трубки, предварительно заполненной гексогеном, через профилирующее отверстие нескольких фильер. Волочение заготовки заряда производится с целью придания ему заданных заранее размеров и формы, а также толщины стенки трубки, в том числе кумулятивной выемки, и степени уплотнения ВВ.

Комплекс исследований, проведенных при отработке отдельных технологических операций и изготовлении опытных партий УКЗ, позволил разработать оптимальную технологическую схему их изготовления, обеспечивающую высокую степень безопасности и качество получаемых изделий при минимальных затратах. Полный комплект основного и вспомогательного оборудования для серийного производства УКЗ создан в ИЭС им. Е. О. Патона.

Указанное оборудование позволяет изготавливать УКЗ прямолинейной кольцевой седлообразной и любой другой необходимой формы диаметром от 2,5 до 50,0 мм, а по отдельным заказам —

Основные типоразмеры УКЗ, изготавливаемых в ИЭС им. Е. О. Патона

Маркировка заряда	Содержание ВВ, г/м	Толщина преграды, мм	
		наземной	подводной
УКЗ 10	60	10,0	8,5
УКЗ 13	90	13,0	11,0
УКЗ 14,5	120	14,5	12,5
УКЗ 16	160	16,0	13,5
УКЗ 19	210	19,0	16,0
УКЗ 22	300	22,0	18,5
УКЗ 25	Изготавливаются по заказу		
УКЗ 50			

Примечания. 1. Числа в маркировке УКЗ обозначают его диаметр, а также гарантированную толщину перерезаемой преграды в наземных условиях. 2. Подводная резка взрывом осуществляется на глубине до 200 (водолазами) и до 600 м (с использованием манипулятора).

Рис. 4. Истечение бензина из трубопровода после резки взрывом с применением пенной защиты

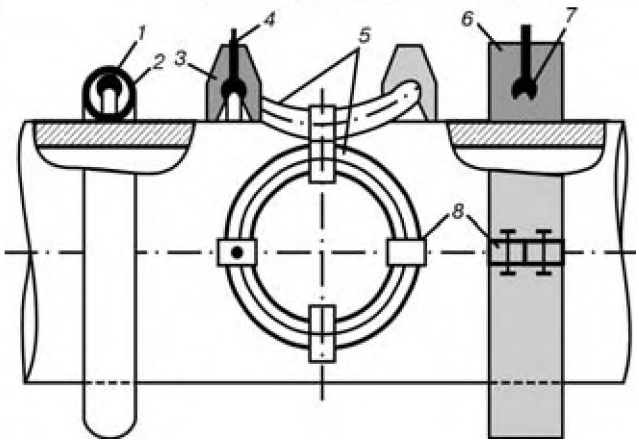


Рис. 5. Схема устройства для резки труб: *1* — УКЗ кольцевого типа; *2* — металлическая защитная трубка, изолирующая зону формирования кумулятивной струи; *3* — дистанционная бобышка; *4* — электродетонатор; *5* — седлообразный заряд; *6* — заряд в цельной пенопластовой оболочке; *7* — собственно УКЗ; *8* — соединительный элемент

до 80,0 мм. Основные типовые УКЗ и их параметры для наземных и подводных работ приведены в таблице, а зависимости, характеризующие величину проникания струи в преграду, показаны на рис. 3.

Нефть и нефтепродукты играют главную роль в топливно-энергетическом балансе любой страны. Перекачка и доставка нефти и нефтепродуктов к потребителям осуществляется магистральными трубопроводами, которые в процессе эксплуатации подлежат техническому обслуживанию и ремонту.

Важнейшими при этом являются работы по резке линейной части трубопровода, вырезке ремонтных «катушек», подключению отводов к действующим магистральным трубопроводам без остановки перекачки продукта и другие, связанные с резкой трубопроводов. Выполнение этих работ с помощью УКЗ имеет ряд характерных особенностей и преимуществ. К последним относятся значительная скорость резки, высокая надежность процесса, возможность дистанционного управления им с любого расстояния, а также получения отверстий и разрезов различных форм и размеров в зависимости от геометрии зарядов.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона и ВНИИСПТнефть (Россия), определены параметры УКЗ из условия обеспечения оптимальной режущей способности кумулятивной струи и разработаны оригинальные и простые по конструкции устройства для резки взрывом магистральных трубопроводов.

Для поперечной резки трубопроводов при вырезке «катушки» или дефектного участка разработано устройство на основе УКЗ — труборез кумулятивный кольцевой наружный (ТрККН). Он состоит из двух полуколец УКЗ и четырех установочных (в том числе двух соединительных) фиксаторов и держателя электродетонатора. Фиксаторы выполнены из полиэтилена и обеспечивают соединение полуколец в кольцо и их равноудаленное расположение относительно поверхности трубы на заданном фокусном расстоянии.

Один из фиксаторов имеет отверстие для установки электродетонатора, с помощью которого осуществляется инициирование трубореза. При взрыве устройство типа ТрККН полностью перерезает стальной магистральный трубопровод с толщиной стенки, как правило, равной диаметру УКЗ. ТрККН предназначен для резки магистральных трубопроводов и других трубчатых конструкций диаметром от 152 до 1420 мм с толщиной стенки от 10 до 30 мм.

Технология вырезки «катушки» или дефектного участка из трубопровода, заполненного нефтью или нефтепродуктами, предусматривает использование двух труборезов. Места установки труборезов на трубопроводе шириной не менее 50 мм тщательно зачищаются по всему периметру трубы. После установки труборезов котлован, где проводится вырезка «катушки», заполняется перед взрывом слоем воздушно-механической пены толщиной не менее 1 м над трубой. Применение пены надежно предотвращает возникновение пожаров и взрывов при вырезке «катушки» из поврежденного трубопровода, когда горючая смесь во взрывоопасной концентрации может находиться как в околотрубном пространстве, так и внутри трубы. На рис. 4 представлен момент истечения бензина из дефектного участка трубопровода непосредственно после вырезки этого участка взрывом двумя труборезами (рис. 5) с применением воздушно-механической пены.

Иногда трубопровод находится в напряженном состоянии под воздействием сжимающих напряжений. В этом случае «катушку» после взрыва заклинивает. Для облегчения ее удаления (демонтажа), помимо двух поперечных труборезов, на трубопровод устанавливается три продольных УКЗ. После взрыва «катушка» разрезается дополнительно еще на три части, которые можно легко удалить.

Если «катушка» имеет протяженную длину, то вырезку ее целесообразно производить по схеме, показанной на рис. 5. Труборезы при этом устанавливаются в плоскости, перпендикулярной к оси трубы, а второй аналогичный труборез — под небольшим углом к ней. Очевидно, что при этом не произойдет заклинивания частей «катушки».

Для вырезки дефектных задвижек, клапанов и другой трубопроводной арматуры разработана технология, согласно которой на трубопроводе по обе стороны от задвижки устанавливают труборезы, рядом с которыми располагают навитый по

спирали заряд ВВ из стандартного детонирующего шнура (ДШ). Инициирование ДШ осуществляется труборезами. При взрыве происходит разрезание и обжатие вырезаемого участка, в результате чего последний легко удаляется из трубопровода.

Изучено также влияние взрыва УКЗ на состояние металла трубопровода в зоне реза. Установлено, что деформация трубы находится в допустимых пределах и не превышает 20 % толщины стенки трубы. При внедрении кумулятивной струи в стенку трубопровода имеет место налипание меди на кромку реза, как и при плакировании сваркой взрывом стали медью. Внедрение кумулятивной струи приводит также к образованию ударных волн в материале трубы вблизи зоны реза. Под их воздействием происходят структурные изменения металла на глубине 10...15 мм от наружной поверхности трубы, сопровождающиеся увеличением его твердости. Причем размеры зоны упрочнения меньше размеров ЗТВ при последующей дуговой сварке новой «катушки». Тем не менее, омедненная часть трубопровода вместе с измененной структурой и твердостью, как правило, удаляются при подгонке новой «катушки» газовой резкой.

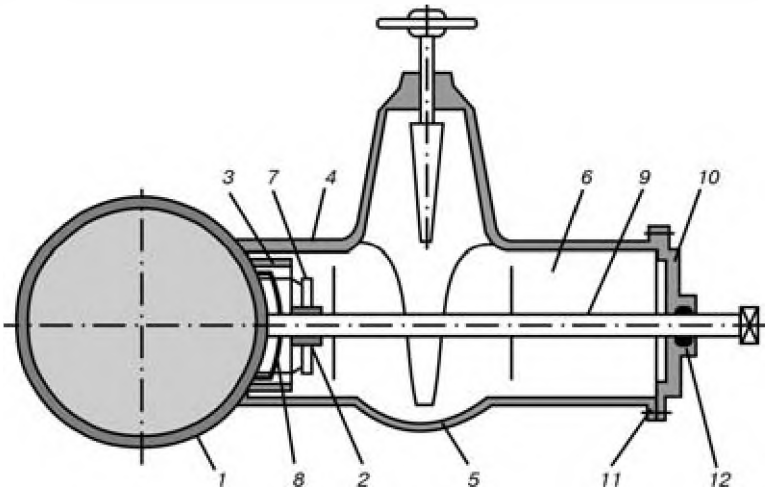


Рис. 6. Устройство на основе УКЗ для подключения отвода к нефтепродуктопроводу (*1–12* — см. в тексте)

Применение УКЗ и разработанного на его основе ТрККН в магистральных трубопроводах России и Украины в течение 1973–1990 гг. позволило осуществить вырезку более 3000 шт. ремонтных «катушек», задвижек и клапанов. Это существенно улучшило культуру производства, исключило использование тяжелого физического труда, повысило технику безопасности, в значительной степени снизило трудоемкость работ и простой трубопроводов. Так, время вырезки «катушки» на трубопроводе диаметром 1200 мм сократилось в 6...8 раз по сравнению с применявшейся ранее технологией, использующей газовую резку.

Для вырезки отверстий в трубопроводах при врезке отводов в действующие нефтепроводы разработано устройство на основе УКЗ, конструкция которого представлена на рис. 6. При отработке устройства определены допустимые зазоры между УКЗ и стенкой отвода, толщина крышки приемной камеры, разработаны конструкции защитного экрана, крестовины многоразового действия для крепления седлообразного УКЗ и приспособления для доламывания перемычки под стыком УКЗ в случае недореза.

Монтаж устройства на нефтепроводе выполняется в следующем порядке. К центру предполагаемого отверстия в нефтепроводе *1* приваривают гайку *2*, а соосно ей — защитный экран *3*, отводной патрубок *4*, открытую задвижку *5* и приемную камеру *6* с фланцем. Крестовину *7* с прикрепленным на кронштейнах седлообразным УКЗ *8* и электродетонатором устанавливают на гайку с помощью вспомогательной штанги. Затем составной шток *9* ввинчивают в гайку, прижимая крестовину с УКЗ к трубопроводу. После выведения через герметичный вывод концов электродетонатора на приемную камеру устанавливают крышку *10*. Закрепление ее на фланце производят с помощью болтов *11*. Уплотнение между крышкой и штоком достигается с помощью сальника *12*, а между крышкой и фланцем приемной камеры — поронитовой прокладкой. При подрыве УКЗ защитный экран надежно предохраняет отводной патрубок, а вырезанная часть трубопровода внутренним давлением жидкого нефтепродукта выталкивается вместе со штоком за пределы задвижки в приемную камеру. После закрытия задвижки приемная камера вместе со всем содержимым отрезается кольцевым труборезом. В дальнейшем устройство для отвода вырезанной части трубы и приемная камера используются многократно. В связи с тем, что комплект устройства снабжен крестовинами различной длины, устройство является универсальным и пригодным для врезки отводов любых диаметров. Седлообразный УКЗ изготавливается из одного прямолинейного отрезка заряда путем формовки. В некоторых случаях в месте стыка УКЗ возможен недорез трубы. Для повышения надежности работы седлообразного УКЗ предложен способ его инициирования в точке, равноудаленной от стыка, где в этом случае происходит повышение давления и разрушение недореза. Если недорез все-таки имеет место, то с помощью рычагов через проушины штоку сообщается возвратно-поступательное движение, вследствие чего недорезанная перемычка доламывается.

Для вырезки отверстия в трубопроводе разработано устройство на основе УКЗ — труборез кумулятивный кольцевой седлообразный (ТрККС). Он состоит из одного седлообразного УКЗ и четырех фиксаторов, в том числе с держателем электродетонатора (см. рис. 5). ТрККС предназначен для вырезки отверстий диаметром от 80 до 970 мм в магистральных трубопроводах диаметром от 219 до 1420 мм с толщиной стенки 8...22 мм. При взрыве с помощью ТрККС можно вырезать отверстие в магистральном трубопроводе с толщиной стенки, равной 0,8 диаметра УКЗ. В соответствии с техническими условиями в ИЭС им. Е. О. Патона

изготавливают по заказам-нарядам 586 типов ТрККС.

Применение УКЗ и разработанного на его основе ТрККС в магистральных трубопроводах России и Украины в течение 1974–1990 гг. позволило осуществить подключение 519 отводов без остановки перекачки нефти и нефтепродуктов, что улучшило культуру производства работ, повысило технику безопасности и исключило вынужденный простой нефтепроводов.

Увеличение добычи нефти и газа на морских промыслах влечет за собой расширение сети подводных магистральных трубопроводов. При их техническом обслуживании и ремонте возникают проблемы, связанные с резкой труб. Возрастает также количество стационарных платформ, которые после окончания эксплуатации месторождений нефти и газа необходимо демонтировать. Проблемы возникают при демонтаже на участках моря глубиной 100... 200 м платформ, имеющих массу основания 15... 30 тыс. т. Стоимость полного их демонтажа может достигать 100... 200 млн дол. США, что составляет 30... 50 % первоначальных затрат на строительство сооружения и его установку. Традиционными остаются операции, связанные с проведением подводных ремонтных работ по разделке корпусов затонувших судов, работ при постройке дамб и др. Таким образом, резка металлоконструкций под водой становится все более распространенной и актуальной.

Резка взрывом с помощью УКЗ выгодно отличается от термических способов резки в подводных условиях. К ее преимуществам относятся простота используемого оборудования и установки подводного заряда, возможность осуществлять процесс дистанционно, что сокращает время пребывания водолаза под водой. Кроме того, процесс резки не зависит от глубины погружения, для его осуществления не требуются специалисты высокой квалификации. Резка взрывом в некоторых случаях вообще незаменима, например, при работах на объектах с горючими или газообразными взрывоопасными смесями, а также в случае опасности появления сдвига, при котором части разрезаемых конструкций могут обрушиться.

С целью обеспечения возможности образования высокоскоростной кумулятивной струи в подводных условиях полость кумулятивной выемки должна быть защищена от попадания воды. С этой целью разработан УКЗ в пенопластовой защитной оболочке, охватывающей его корпус и заполняющей кумулятивную выемку. Потеря эффективности действия УКЗ при этом не превышает 10... 15 %. Подобные заряды способны работать на глубинах до 50 м. При необходимости проведения работ на глубине 60... 70 м на защитную оболочку наносят покрытие, предотвращающее попадание воды, а на глубинах до 200 м, еще доступной для водолаза, и до 600 м, где требуется использование манипулятора, УКЗ помещают в металлическую оболочку из соответствующего материала.

При взрыве подводного заряда в воде возникают ударные волны, которые могут нанести ущерб ихтиофауне акваторий, имеющих важное народнохозяйственное значение. Допустимый уровень интенсивности ударных волн под водой не должен превышать 0,6... 1,0 МПа. Очевидно, что промышленное применение технологии резки взрывом под водой будет обусловливаться эффективностью мер защиты ихтиофауны от воздействия взрыва.

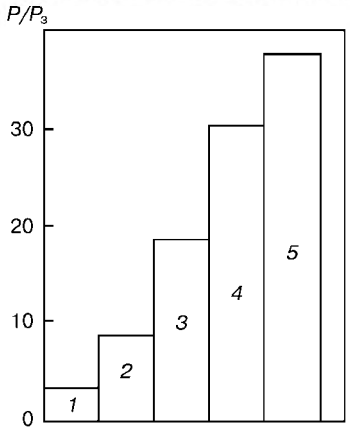


Рис. 7. Эффективность различных защитных экранов по результатам измерений максимального давления волны на удалении 3,5 м от УКЗ: *1* — пузырьковая защита; *2–4* — экраны из песка, гравия керамзитового и пенопласта; *5* — чередующиеся слои песка и пенопласта

В ИЭС им. Е. О. Патона и Институте механики НАН Украины проведены исследования давления ударной волны, распространяющейся в воде при взрыве различных УКЗ, а также влияния различных типов защитных экранов на степень гашения ударных волн. С целью определения эффективности способов и средств защиты проведены измерения ударных волн при взрыве отрезков УКЗ диаметром 19 мм и длиной 250 мм, помещенных в различные защитные экраны — сухой песок, пенопласт, гравий керамзитовый, комбинированные экраны, состоящие из слоев песка и пенопласта, а также экраны из воздушных пузырьков. Сравнительная характеристика испытанных защитных экранов приведена на рис. 7. Здесь на оси ординат приведено отношение максимальных значений давления P в волне при взрыве отрезка УКЗ диаметром 19 мм в воде к пиковому значению давления $P_з$, зафиксированному при взрыве такого же УКЗ с использованием различных защитных экранов. Результаты измерений показали, что пузырьковая защита снижает давление в 5 раз, экран из песка — в 10 раз, из гравия керамзитового — в 20 раз, из пенопласта — в 30 раз, из чередующихся слоев песка и пенопласта — в 40 раз.

Наиболее приемлемым по технологическим и экономическим показателям является пенопластовый экран, который является защитной оболочкой УКЗ и одновременно выполняет роль своеобразной пузырьковой защиты. При необходимости зона безопасного воздействия на ихтиофауну может быть расширена путем отпугивания рыбы из зоны взрыва УКЗ в радиусе до 3... 5 м акустическими методами.

На основе УКЗ в пенопластовой оболочке в ИЭС им. Е. О. Патона и ВНИИСПТнефть (Россия) разработан труборез кумулятивный кольцевой подводный (ТрККП) для резки магистральных трубопроводов диаметром 219... 1420 мм с тол-

Рис. 8. Вид реза многослойной трубы основания морских стационарных платформ

щиной стенки до 18...20 мм. Трубореэ состоит из двух полуколец УКЗ в пенопластовой защитной оболочке с заранее установленными корпусами промежуточных зарядов. Кроме того, защитные оболочки выполнены с приливами, к которым присоединяются утяжеляющие грузы. С их помощью осуществляется закрепление ТрККП на трубе. В корпус промежуточных зарядов вставляются концы участковых ДШ, после чего они заливаются плавленым ВВ. Трубореэ обеспечивает перерезание трубы при наличии слоя воды между ним и трубой толщиной не более 5 мм. Подрыв ТрККП осуществляется электродетонатором, присоединенным под водой к магистральному ДШ (после выхода водолаза из воды).

На основе исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, разработана и успешно апробирована технология демонтажа резкой взрывом морских стационарных платформ с обеспечением защиты ихтиофауны [4]. Впервые эта технология была применена в 1978 г. для резки оснований буровой платформы в Черном море в 75 км от Евпатории. Основание буровой платформы состояло из трех одинаковых блоков, каждый из которых установлен на девяти сваях. Каждая свая представляла собой конструкцию, состоящую из коаксиально расположенных труб диаметром 219...478 мм с толщиной стенки 8...11 мм. Межтрубное пространство было заполнено затвердевшим цементом. Резка труб происходила на глубине 33 м поэтапно по следующей схеме. Сначала на наружной трубе на расстоянии примерно 700 мм производили два кольцевых поперечных реза. Затем «катушку» разрезали на три равные части тремя продольными зарядами. При этом разрушался также цементный раствор. Последующую резку труб меньшего диаметра осуществляли аналогичным образом. Для демонтажа использовали кольцевые заряды ТрККП диаметром 19 и 41 мм и прямолинейные диаметром 19 мм. Вид реза многослойной трубы приведен на рис. 8.

В процессе демонтажа оснований буровой платформы была произведена резка взрывом 96 труб. Общее время проведения непосредственно подводных взрывных работ составило 15 дней.

В 1985 г. взрывная технология была использована при демонтаже разведочной платформы, расположенной в Азовском море на глубине 11 м. В 1986 г. аналогичные работы проведены при демонтаже блоков морских стационарных платформ, находящихся в Черном море на глубине 30 и 33 м. В том же году выполнены работы по подводной резке взрывом 30 гидротехнических трубчатых опор, расположенных в Каспийском море на глубине 6 м, в результате которых был демонтирован участок эстакады длиной 300 м. В 1990–1991 гг. на Каспийском море успешно проведены работы по обрезке взрывом понтонов морских стационарных платформ после их монтажа на шельфе.

Для обеспечения топливно-энергетического баланса во многих развитых странах наряду с возрастанием добычи нефти и газа увеличивается потребность в строительстве атомных электростанций. В процессе эксплуатации они подлежат техническому обслуживанию и ремонту, а впоследствии — закрытию и демонтажу. Так, в 1986 г. в Украине после катастрофы на ЧАЭС возникла необходимость аварийного ремонта укрытия и последующего демонтажа 4-го энергоблока. И в настоящее время возникает необходимость выполнения различного рода работ по разделке металлоконструкций различного типа в экстремальных ситуациях. Очевидно, что с учетом описанных выше преимуществ технологии резки взрывом ее применение в особых условиях является практически безальтернативным решением данной проблемы. Однако при этом к технологии резки взрывом предъявляется ряд специфических требований. Это прежде всего предварительная оптимизация параметров УКЗ применительно к конкретно разрезаемой металлоконструкции, осуществление дистанционной доставки и установки УКЗ с помощью манипуляторов (роботов), обеспечение надежного крепления УКЗ на горизонтальных и вертикальных участках металлоконструкции с гарантированным фокусным расстоянием, выполнение дистанционного подрыва УКЗ с помощью радиосигналов, предотвращение воздействия ударных волн на окружающие объекты и возможного разброса радиоактивной пыли, а также фрагментов заряда и разделяемой конструкции.

В ИЭС им. Е. О. Патона на основании имеющегося опыта и проведенных специальных исследований разработаны, например, две конструкции монтажно-транспортного устройства на базе ТрККН, предназначенные для разделки трубчатых металлоконструкций и удовлетворяющие всем перечисленным требованиям. Первая конструкция под названием «клещи» предназначена для разделки труб диаметром 89...220 мм; вторая — под названием «скоба» используется для резки труб диаметром 820...1440 мм. Если трубы имеют диаметр промежуточного размера, то можно применять как первое, так и второе устройство в зависимости от конкретных условий выполнения работ.

При использовании устройства типа «клещи» (рис. 9) УКЗ вместе с монтажным приспособле-

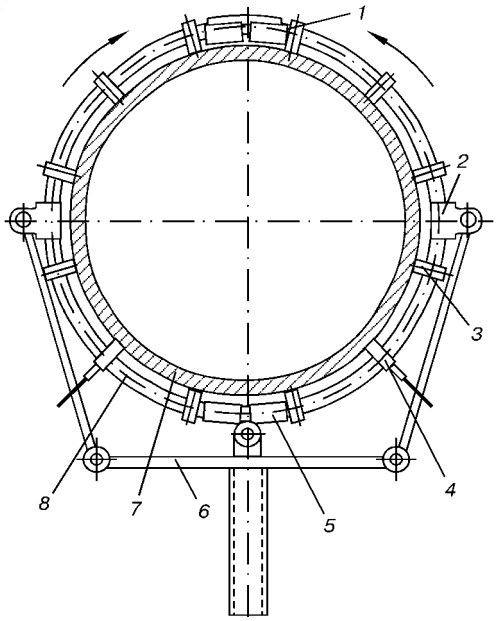


Рис. 9. Устройство на основе УКЗ типа «клещи» для резки труб: *1* — соединитель полуколец УКЗ; *2* — шарнир; *3* — бобышка для установки фокусного расстояния; *4* — то же с гнездом для электродетонатора; *5* — шарнирный замок; *6* — устройство для сочленения и фиксации полуколец УКЗ; *7* — разрезаемая труба; *8* — полукольцо УКЗ

нием доставляется на исходную позицию и подсоединяется к манипулятору. При этом полукольца УКЗ находятся в разведенном состоянии. Манипулятор доставляет устройство к месту работы, подводит УКЗ к месту реза таким образом, чтобы ось трубы и плоскость УКЗ были взаимно перпендикулярны, и посредством поступательного движения производит установку УКЗ на трубу, где оно закрепляется специальным замком и фиксаторами, имеющими на конце эластичный элемент, обеспечивающий удержание УКЗ в любом положении за счет своих упругих свойств. После отхода манипулятора в безопасное место выполняется подрыв УКЗ. Затем при помощи манипулятора производится осмотр места взрывных работ. В зависимости от его результатов взрывные работы могут быть продолжены в случае необходимости. Особенность выполнения монтажных работ при использовании устройства типа «скоба» состоит в том, что для установки УКЗ требуется два манипулятора, а отсоединение монтажного приспособления от УКЗ происходит путем радиального передвижения манипуляторов от центра трубы. Остальные операции аналогичны описанным выше.

При необходимости обеспечения защиты окружающих объектов от побочного действия взрыва используется воздушно-механическая пена, создаваемая портативным пеногенератором, который доставляется к месту работы с помощью манипулятора. Зафиксировано значительное (десятикратное) гашение ударных волн и уменьшение количества осколков оболочки УКЗ, а также практически полное подавление разброса радиоактивной пыли.

Аналог устройства типа «клещи» (рис. 9) в 1986 г. применялся при резке взрывом пожарных трубопроводов диаметром 108 мм на крыше 3-го энергоблока при ликвидации аварии на ЧАЭС. Уровень радиации при этом достигал 150 Р/ч.

В заключение следует отметить, что ИЭС им. Е. О. Патона располагает опытом создания и практического применения сверхпрецизионных и безопасных для человека линейных устройств разделения на основе использования энергии взрыва, необходимых в аэрокосмической технике. Эти устройства находят различные сферы применения, например для создания аварийных выходов в кабине пилота самолета. Аналогичное устройство разрабатывалось для ракетно-космической транспортной системы «Энергия-Буран». Наметились перспективы применения технологии резки взрывом в условиях открытого космоса для демонтажа орбитальных космических станций.

1. *Лаврентьев М. А.* Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. — 1957. — **4**, № 12. — С. 41–56.
2. *Физика* взрыва / Ф. А. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
3. *Райнхарт Д., Пирсон Д.* Обработка металлов взрывом. — М.: Мир, 1966. — 391 с.
4. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Волгин Л. А.* Опыт применения подводной резки взрывом при демонтаже трубчатых оснований морских стационарных платформ // Автомат. сварка. — 1987. — № 6. — С. 27–29.

Principles of the technology for explosion cutting of metal structures using elongated cumulative explosive charges (ECEC) developed by PWI are considered. Relationships describing the efficiency of ECEC within the framework of the hydrodynamic theory are presented. Examples of successful application of the explosion cutting technology in a number of industries are given, including under special conditions where specific measures have to be taken to provide protection from the side effects of explosion.

Поступила в редакцию 11.06.2002

УДК 658.2:621.791

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВЫБОРА СПОСОБОВ СВАРКИ И ВЕНТИЛЯЦИИ

А. А. МАЗУР, канд. экон. наук, **С. В. ЗАЯЦ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены данные о затратах при дуговой сварке, структуре этих затрат, а также данные о затратах на вентиляцию сварочного цеха и т. д.

Ключевые слова: дуговая сварка, фильтровентиляционные агрегаты, вентиляция, экономические факторы, затраты

В условиях современной рыночной экономики перед производителями сварных конструкций стоит задача обеспечения высокого качества и снижения затрат на производство продукции, ее конкурентоспособности. С технологической точки зрения во многих случаях одну и ту же задачу получения качественных сварных соединений можно решить с помощью различных способов сварки. При этом решение об использовании того или иного способа следует принимать с учетом всего комплекса затрат как на сварку, так и на обеспечение требуемых условий труда сварщиков. Однако до настоящего времени затраты на создание требуемых условий труда, являющиеся неотъемлемой составной частью затрат при сварке, учитываются не непосредственно в основных затратах (технологическая себестоимость), а по другим статьям (цеховые и заводские накладные расходы, охрана труда, соцстрах и пр.). Это не позволяет дать объективную экономическую оценку различных способов сварки с учетом затрат на предотвращение их вредного воздействия на окружающую среду и человека [1].

В табл. 1 приведены данные о затратах (технологической себестоимости) при основных видах дуговой сварки низкоуглеродистых сталей на 1 кг наплавленного металла и 1 м углового шва катетом 8 мм с учетом цен и тарифов. Как видно из табл. 2, значительная доля при механизированных способах сварки приходится на сварочные материалы и вентиляцию, а при ручной — на зарплату, сварочные материалы и вентиляцию.

Наиболее значительный выигрыш по производительности процесса, качеству сварного шва, санитарно-гигиеническим условиям труда и сумме затрат в целом производитель получает при использовании технологии и оборудования для автоматической сварки под флюсом. Это следует принимать во внимание при выборе технологии сварки, поскольку в последнее время доля этого высокопроизводительного, экологически чистого процесса, обеспечивающего высокое качество сварных соединений, заметно уменьшилась в общем объеме применения дуговых способов сварки. Далее следуют механизированные способы сварки в углекислом газе, смесях аргона (что во многом зависит от стоимости самого аргона), порошковыми проволоками и ручная дуговая сварка покрытыми электродами. При выборе сварочных материалов следует отдавать предпочтение (если это допускает технология и требования к качеству шва) проволокам с минимальным содержанием марганца и хрома. При дуговой сварке электродами и порошковыми проволоками по возможности следует выбирать электроды и проволоки, не имеющие фтористо-кальциевого наполнителя, что значительно снижает выделение высокотоксичных фтористых соединений. При этом уменьшаются объемы вентиляции и затраты на ее обеспечение.

Таблица 1. Затраты при дуговой сварке, грн., по состоянию на 25.02.2002 г.

Способ сварки	Сварочные материалы и их диаметр, мм	Сварочный ток, А	Затраты на 1 кг наплавленного металла	Затраты на 1 м углового шва (катет 8 мм)
Автоматическая под флюсом	Св-08, 4,0	800	5,47	1,30
Механизированная в CO_2	Св-08Г2С, 1,2	250	9,76	2,64
Ручная дуговая электродами	АНО-4, 4,0	210	12,12	3,85
	УОНИ-13/45, 4,0	160	13,59	4,31

Таблица 2. Структура затрат при дуговой сварке, %

Статья затрат	Автоматическая под флюсом	Механизированная в CO_2	Ручная	
			электродами АНО-4	электродами УОНИ-13/45
Зарплата с начислениями	12,3	28,8	50,9	58,0
Электроды, проволока	37,4	31,1	32,9	27,1
Флюс, газ	23,8	24,2	–	–
Электроэнергия	11,6	3,8	5,0	3,9
Ремонт, амортизация оборудования	15,9	12,1	11,2	11,0
Затраты на сварку, всего	100,0	100,0	100,0	100,0
Затраты на общеобменную вентиляцию (в % к затратам на сварку)	2,6	25,7	28,2	61,9

© А. А. Мазур, С. В. Заяц, 2003

Таблица 3. Технико-экономические показатели вариантов вентиляции, %

Вариант вентиляции	Капитальные вложения	Текущие расходы	Энергоемкость	Срок окупаемости, лет
Общеобменная (базовая)	100	100	100	—
Переносные ФВА с эжекторным побудителем	167	80	45	1,40
Переносные ФВА с электромеханическим побудителем	134	50	35	0,45
Передвижные и стационарные ФВА типа «хобот слона»	238	48	38	0,76
Централизованная вакуумная система с турбовоздуходувкой	100	44	53	0,30

Примечание. Цех на 20 постов механизированной сварки в углекислом газе проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм на токе 250 А. Работу выполняли в одну смену в климатических условиях Киева.

Получение требуемой чистоты воздушной среды в сборочно-сварочных цехах и на участках сварки представляет собой сложную комплексную проблему. Борьба с вредным воздействием сварочных аэрозолей (СА), как показывает мировой опыт, должна вестись по пяти тесно увязанным направлениям: технологическому, санитарно-техническому, гигиеническому, организационному и экономическому [2]. К технологическому направлению относится замена ручных способов сварки механизированными и автоматизированными, внедрение безлюдных технологий (роботизация и комплексная механизация производства), применение малотоксичных сварочных материалов. Основой санитарно-технического направления является максимально возможное улавливание и нейтрализация вредных веществ путем использования высокоэффективной местной и встроенной вентиляции, средств индивидуальной и коллективной защиты, оперативных методов контроля производственной и окружающей среды. Гигиеническое направление включает углубленное исследование медицинских аспектов проблемы, совершенствование психофизиологических критериев профессионального отбора, способов ранней диагностики, профилактики и лечения профзаболеваний у сварщиков. Организационное направление заключается в рациональной организации производства сварочных работ, рассредоточении их в пространстве и времени во избежание залповых выбросов СА. Реализация экономического направления состоит в совершенствовании системы экономических рычагов, в том числе штрафов за вредные выбросы в атмосферу, системы льгот для сварщиков и их пенсионного обеспечения.

Для комплексного решения сложности и многоплановости проблемы охраны воздушной среды и защиты человека при сварке требуются совместные усилия специалистов разных областей знаний — технологов, конструкторов, экологов, врачей-гигиенистов и клиницистов, экономистов. Радикальное решение проблемы обеспечения требуемой чистоты воздушной среды в сварочном производстве сегодня ни с технической, ни с экономической точки зрения не может базироваться на использовании одной лишь общеобменной вентиляции. Эффективность ее (несмотря на чрезмерно высокие затраты) чрезвычайно мала, а при работе в замкнутых отсеках, цистернах, емкостях, шахтах и других замкнутых пространствах, она практически неощутима.

Наиболее действенным способом улавливания СА является применение местных (локальных) вытяжных устройств, максимально приближенных к источнику их образования — сварочной дуге. К их числу относятся местные отсосы, встроенные в сварочное оборудование и инструменты (манипуляторы, кантователи, столы сварщиков), а также переносные, передвижные и стационарные фильтровентиляционные агрегаты (ФВА), с помощью которых СА отсасываются из места сварки, очищаются от вредных веществ, а очищенный воздух возвращается в рабочее помещение. При этом эффективность улавливания составляет 75... 95 %, степень очистки 98,0... 99,5 %, что позволяет намного уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу цеха и объемы подаваемого в цех свежего воздуха для их разбавления до уровня предельно допустимых концентраций. Соответственно снижаются затраты на вентиляцию и подогрев приточного воздуха в холодные периоды года. В итоге с меньшими затратами создаются более комфортные условия труда рабочих, находящихся в сварочных цехах, уменьшаются выбросы в атмосферу.

Сопоставление затрат при различных способах вентиляции, результаты которого приведены в табл. 3, показывает целесообразность замены общеобменной вентиляции местной и встроенной. Использование ФВА, обеспечивающих улавливание СА в непосредственной близости к сварочной дуге с последующей их нейтрализацией и выбросом очищенного воздуха в атмосферу цеха, снижает затраты на вентиляцию в 1,5... 2,5 раза, при этом срок окупаемости инвестиций составляет 0,3... 1,4 г по сравнению с общеобменной вентиляцией.

Все приведенные выше варианты экономических оценок относятся к климатическим условиям Киева. При размещении сварочных цехов в регионах с большей длительностью отопительного сезона и более низкими температурами наружного воздуха в этот период экономическая эффективность замены общеобменной вентиляции местной и встроенной многократно возрастает.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона еще в 1988–1989 гг. методика экономического обоснования выбора способов сварки и вентиляции предусматривает определение широкого круга технологических, экономических и экологических факторов с выдачей результатов расчетов в натуральных и стоимостных показателях. В табл. 4 приведены рассчитанные по этой методике данные энергоемкости процессов сварки и общеобменной вентиляции, которые с достаточной степенью точности совпадают с практическими данными [3].

Данные табл. 1, 2, 4 свидетельствуют о том, что при всех дуговых способах сварки затраты на общеобменную вентиляцию весьма значительны

Таблица 4. Энергоемкость дуговой сварки и общеобменной вентиляции на 1 кг наплавленного металла

Способ сварки	Сварочные материалы и их диаметр, мм	$I_{св}$, А	Объем вентиляции на 1 кг наплавленного металла, тыс. м^3	Энергоемкость, кВт·ч/кг		
				всего	в том числе	
					сварка	вентиляция
Автоматическая под флюсом АН-348А	Св-08А, 4,0	800	0,30	3,11	2,93	0,18
Механизированная в CO_2	Св-08Г2С, 1,2	250	6,78	6,08	2,01	4,07
Ручная дуговая	АНО-4, 4,0	210	10,53	10,53	3,87	6,32
	УОНИ-13/45, 4,0	160	22,61	22,61	3,65	13,56

Таблица 5. Текущие затраты на вентиляцию сварочного цеха

Способ сварки	Сварочные материалы и их диаметр, мм	Вариант вентиляции				
		общеобменная	переносные ФВА с эжекторным побудителем	переносные ФВА с электромеханическим побудителем	передвижные ФВА типа «хобот слона»	централизованная вакуумсистема с турбовоздуходувкой
Автоматическая под флюсом ОСЦ-45	Св-08А	1,0	10,8	4,1	3,6	2,8
Механизированная в CO_2	Св-08Г2С	22,5	18,0	11,3	10,8	10,0
Ручная дуговая	АНО-4	34,5	22,0	15,3	14,8	14,0
	УОНИ-13/45	57,2	35,5	28,8	28,3	27,5

Таблица 6. Энергоемкость вентиляции сварочного цеха

Способ сварки	Сварочные материалы и их диаметр, мм	Вариант вентиляции				
		общеобменная	переносные ФВА с эжекторным побудителем	переносные ФВА с электромеханическим побудителем	передвижные ФВА типа «хобот слона»	централизованная вакуумсистема с турбовоздуходувкой
Автоматическая под флюсом ОСЦ-45	Св-08А	1,0	2,9	0,7	1,4	4,8
Механизированная в CO_2	Св-08Г2С	22,6	10,2	7,9	8,6	11,9
Ручная дуговая	АНО-4	35,1	14,4	12,1	12,8	16,2
	УОНИ-13/45	75,3	27,8	25,5	26,2	29,6

и сопоставимы с затратами на сварочные материалы и зарплату сварщиков, а энергоемкость вентиляции во многих случаях превышает энергоемкость процессов сварки. Гораздо более эффективными в экономическом и экологическом отношении являются способы вентиляции с использованием различных видов местного отсоса и ФВА.

В табл. 5, 6 сопоставлены технико-экономические показатели этих способов при использовании общеобменной вентиляции на примере сварочного цеха, который имеет 20 постов сварки, работающих в одну смену со средним расходом сварочных материалов 2 кг/ч на каждом рабочем посту. Цех расположен в климатической зоне Киева. Все расчеты выполнены с учетом цен и тарифов по состоянию на 25 февраля 2002 г. В табл. 5, 6 за единицу приняты затраты на общеобменную вентиляцию при автоматической сварке под флюсом.

Данные табл. 4–6 свидетельствуют о преимуществах способов местной вентиляции перед общеобменной, механизированных способов сварки перед ручными, низкотоксичных сварочных материалов перед более токсичными.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона методика позволяет не только определять экономическую предпочтительность того или иного способа дуговой сварки, но и давать рекомендации по оптимизации режимов сварки. Так, анализ результатов расчетов технико-экономических показателей механизированной сварки в углекислом газе низкоуглеродистых и низколегированных сталей позволяет сделать вывод, что если в качестве экономического критерия принять сумму затрат на сварку и вентиляцию, то предпочтительными являются варианты сварки проволокой диаметром 1,2... 1,6 мм. Если же в качестве такого же критерия принять минимум трудовых затрат без требований к качеству сварки, то рекомендуется сварка проволокой диаметром 2 мм на максимальном режиме. Если за критерий принять минимальное воздействие на производственную среду, то следует отдать предпочтение сварке на минимальном режиме проволокой наименьшего диаметра. В каждом конкретном случае данные рекомендации подлежат уточнениям, обусловленным техническими или технологическими требованиями, которые предъявляются к сварным конструкциям.

Важнейшим критерием конкурентоспособности сварных конструкций является обеспечение высокого качества сварных швов, поэтому в промышленно развитых странах при сварке в защитных газах наиболее распространены (более 90 %) проволоки диаметром 1,2 мм и менее. Учитывая специфику перехода на новые условия хозяйствования и необходимость расширения выпуска экспортируемой продукции, на этот критерий в первую

Таблица 7. Статьи затрат при механизированной сварке в CO_2, %

Статья затрат	Украина	Швеция
Зарплата с начислениями	28,8	55,0
Проволока	31,1	17,5
Газ	24,2	10,0
Электроэнергия	3,8	10,0
Обслуживание и амортизация оборудования	12,1	7,5

очередь следует обратить внимание, тем более, что его требования практически совпадают с требованиями критерия минимизации затрат при сварке.

Расчет затрат и прибыльности всех возможных способов сварки и вентиляции дают возможность выбрать наиболее эффективный вариант для конкретных производственных условий. Одновременно это позволит преодолеть предвзятое отношение многих хозяйственных руководителей к мероприятиям по оздоровлению условий труда. Таким образом может быть оказана существенная помощь в решении как экономических, так и экологических проблем при сварке.

Приведенные выше данные, а также вытекающие из них выводы и рекомендации относятся к конкретным экономическим условиям Украины. Иная структура затрат при сварке за рубежом (табл. 7), что заставляет очень осторожно относиться к рекламным обещаниям западных фирм.

Так, в Швеции технология сварки, в два раза повышающая производительность труда при удвоении стоимости сварочной проволоки, эффективна, если зарплата составляет 55% затрат, а материалы — 17,5, но та же технология в условиях Украины, где зарплата составляет менее 30%, а материалы 31,1%, будет абсолютно неэкономичной. Только объективная оценка экономичности западных технологий в реальных условиях украинского сварочного производства позволит выявить целесообразность их приобретения и внедрения взамен существующим отечественным.

Выводы

1. В реальных производственных условиях при технологической взаимозаменяемости способов дуговой сварки, обеспечивающих требования конструкторской документации, следует выбирать способы сварки с наименьшими затратами.

2. Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона методика комплексной экономической оценки дуговых способов сварки дает возможность оперативно учитывать затраты на сварку, вентиляцию и подогрев приточного воздуха.

3. Практическое использование методики на протяжении длительного периода показало ее надежность и устойчивость при быстроизменяющейся реальной экономической ситуации не только в Украине, но и в других странах СНГ.

4. В реальной экономической ситуации Украины в условиях непрерывного повышения цен и тарифов возрастает экономическая эффективность применения высокопроизводительных, экологически чистых способов сварки, обеспечивающих высокое качество сварных швов — автоматической сварки под флюсом, механизированной в углекислом газе проволокой малых диаметров (1,2...1,4 мм), а также современных способов и средств вентиляции.

1. *Мазур А. А.* Экономическая эффективность мероприятий по оздоровлению воздушной среды при сварке // Автомат. сварка. — 1989. — № 8. — С. 67–70.
2. *Мазур А. А., Горбань Л. Н., Эннан А. А.* Экономика оздоровления воздушной среды при сварке // Экологические проблемы свароч. пр-ва. — Ин-т сварки в Гливицах, 1992. — С. 39–41.
3. *Мазур А. А., Федорович А. Ю.* Методические рекомендации по расчету экономической эффективности внедрения однопостовых фильтровентиляционных агрегатов производительностью до 150 м^3/ч. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1990. — 63 с.
4. *Мазур А. А., Заяц С. В.* Учет экономических факторов при выборе способов сварки и вентиляции: Сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. «Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве», Одесса, 11–13 сент. 2002 г. — Одесса, 2002. — С. 520–528.

The paper provides data on the cost of arc welding, structure of these costs, as well as the data on the cost of welding shop ventilation, etc.

Поступила в редакцию 14.03.2003

УДК 621.791.011

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ В УЗКИЙ ЗАЗОР ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ БЕЗ ПОДОГРЕВА

А. Т. НАЗАРЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен инженерный расчет оптимальной скорости охлаждения свариваемого металла (с обеспечением технологической прочности) в зависимости от параметров процесса сварки и сечения слоев шва, а также с учетом термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита.

Ключевые слова: дуговая сварка, закаливающиеся стали, многослойные швы, сварные соединения, замедленное разрушение, холодные трещины, порционное тепловложение

Так сложилось, что дуговую сварку плавлением закаливающихся корпусных сталей для обеспечения требуемой стойкости соединений против образования холодных трещин выполняют зачастую с применением высоколегированных аустенитных сварочных материалов [1]. При использовании низколегированных сварочных материалов приходится прибегать к подогреву. В некоторых случаях желаемого результата удается добиться при помощи автоподогрева.

Недостатками этих технологий являются, во-первых, высокая стоимость аустенитных материалов и более низкие показатели свойств соединений, по сравнению с основным металлом; во-вторых, — необходимость дополнительного применения сложной и трудоемкой операции подогрева, не всегда осуществимой, особенно для крупногабаритных изделий.

В последнее время для сварки закаливающихся сталей разрабатываются высокопрочные аустенитно-мартенситные сварочные материалы [2]. При их использовании, помимо отмеченных недостатков, следует указать на невозможность применения последующей термообработки, например высокого отпуска, для снятия остаточных напряжений.

С учетом изложенного полагаем, что перспективным вариантом для сварки закаливающихся трудносвариваемых сталей является возможность получения металла высокопрочных сварных швов, близкого к основному металлу.

Однако для реализации этого предложения необходимы дополнительные исследования, направленные на достижение требуемой технологической прочности сварных соединений закаливающихся сталей при одновременном повышении прочности металла сварных швов до уровня таковой основного металла. Решение этой задачи может быть достигнуто путем сочетания различных вариантов автоподогрева и порционно-дискретного формирования сварных швов [3–5].

В случае автоподогрева, например с применением возвратно-поступательных перемещений дуги (электрода) [3], его преимущества могут быть реализованы, если максимально оптимизировать скорость охлаждения металла при выполнении каждого слоя шва.

Цель работы — показать возможность повышения стойкости металла соединений против холодных трещин без применения подогрева при сварке закаливающихся сталей с получением металла швов, аналогичного основному металлу, благодаря оптимизации охлаждения металла при выполнении каждого отдельного слоя сварного шва.

С учетом отрицательного влияния водорода на технологическую прочность соединений предпринимали меры по ограничению содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле, которое не превышало 1,5 см^3 на 100 г металла. Для определения содержания водорода использовали метод спиртовой пробы.

Чтобы оптимизировать охлаждение сварных соединений после выполнения каждого слоя с учетом термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита конкретной стали, необходимо установить требуемые скорости охлаждения металла шва, ЗТВ в зависимости от условий сварки.

При сварке корневых швов в узкий зазор металла больших толщин для оценки теплового состояния свариваемых элементов можно воспользоваться расчетной схемой Н. Н. Рыкалина, учитывающей распространение тепла в полубесконечном теле от воздействия точечного подвижного источника нагрева [6, 7]. В соответствии с этой схемой температура любой точки тела в квазистационарном состоянии определяется по следующей формуле [7]:

$$T_{(R,\ x)} = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(x+R)}. \qquad (1)$$

При перемещении источника по оси x–x, температура точек (где значения x являются отрицательными) не зависит от скорости его перемещения и равна температурам предельного состояния неподвижного источника, т. е. при $R = -x$

$$T_R = \frac{q}{2\pi\lambda R}. \qquad (2)$$

Для низкоуглеродистой стали $\lambda = 41{,}8$ Вт/(м·°С) [7]. Учитывая, что $q = I_{св} U_д \varphi$ (φ — коэффициент полезного действия дуги), равенство (2) можно записать в виде

© А. Т. Назарчук, 2003

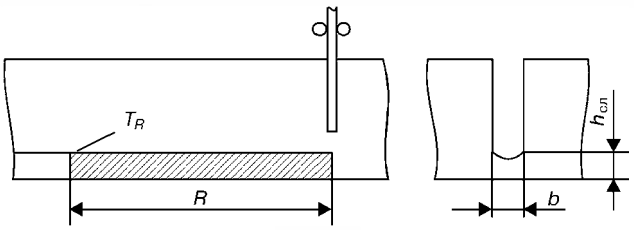


Рис. 1. Схема расчетного определения ширины разделки в зависимости от количества наплавленного металла

$$R = \frac{I_{св} U_д}{2\pi\lambda T_R} \varphi. \qquad (3)$$

где R — расстояние по оси шва от дуги до точки с температурой T_R, м; $I_{св}$ — сварочный ток, А; $U_д$ — напряжение на дуге, В; T_R, °С.

В ЗТВ (на оси y) распределение температур зависит от скорости сварки [6, 7]. Однако поскольку ЗТВ при сварке в узкий зазор невелика и находится практически на одном и том же расстоянии от оси шва, т. е. $b/2$ (где b — ширина зазора), что для зазоров шириной 14... 18 мм составляет 7... 9 мм, то расчет с определенной степенью точности можно выполнять без учета этого замечания.

Действительно, как следует из таблицы, при сварке щитов толщиной 40 и 80 мм размером 1200×1600 мм (шов посередине вдоль длинной стороны) расчетные оценки величины R для температур 220... 275 °С отличаются от экспериментальных на 6... 15 %, что вполне допустимо для инженерных оценок.

Подставляя в формулу (3) соответствующие значения λ и принимая во внимание, что в расчетах такого рода φ можно принять равным 1 (для газоэлектрической сварки на открытой поверхности φ = 0,8... 0,9), получим

$$R = \frac{I_{св} U_д}{2\pi 41.8 T_R}. \qquad (4)$$

Для оптимизации ширины разделки при сварке в узкий зазор закаливающихся сталей важным показателем является определение расстояния от дуги до зоны металла с интересующей нас температурой автоподогрева в зависимости от параметров сварки. Это расстояние может быть определено как экспериментально, так и весьма приближенно расчетным путем.

Если соответствующие замеры или расчеты выполнить для двух температур, например 500 и 300 °С, то можно ориентировочно определить и среднюю скорость охлаждения металла в зоне сварки в этом диапазоне температур. В данном случае используется традиционный анализ термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита свариваемых сталей для оценки структур, образующихся в металле ЗТВ сварных соединений.

В дальнейшем поступим следующим образом. Предположим, что нам необходимо обеспечить распределение температур T_R на оси шва на расстоянии R от дуги при y и z = 0 (рис. 1).

Для сварки в узкий зазор с учетом количества наплавленного металла за время t можно составить следующее уравнение:

$$bh_{сл}R\gamma = Pt, \qquad (5)$$

где $h_{сл}$ — высота слоя; γ — удельная плотность наплавленного металла (для стали $7{,}78\cdot10^{-3}$ г/мм^3); P — количество наплавляемого металла в единицу времени для выбранных параметров процесса (г/с). При этом $t = R/v_{св}$, где $v_{св}$ — скорость сварки при выбранных значениях $I_{св}$ и $U_д$.

Для преобразования формулы (5) отметим, что $\psi_{сл} = b/h_{сл}$, откуда $h_{сл} = b/\psi_{сл}$. Подставим это выражение в формулу (5) и, произведя соответствующие преобразования, получим расчетную ширину разделки (зазора) для выбранных значений сварочного тока и напряжения на дуге при сварке в узкий зазор:

$$b = \sqrt{\frac{P\psi_{сл}}{R\gamma}t}, \qquad (6)$$

где $\psi_{сл}$ — коэффициент формы слоя (отношение ширины разделки к высоте наплавленного слоя $h_{сл}$); R определяется расчетным путем по формуле (4) или экспериментально; t — время охлаждения до температуры T_R, при котором в металле соединений не образуются закалочные структуры, склонные к холодным трещинам, с.

Параметр $t = t_R$ выбирается с учетом термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита конкретных свариваемых сталей (рис. 2).

Принимая во внимание, что $R = v_{св}t$, конечная формула определения ширины зазора при сварке в узкий зазор может быть приведена к виду

$$b = \sqrt{\frac{P\psi_{сл}}{v_{св}\gamma}}. \qquad (7)$$

Для широкого диапазона режимов P = = 6,5... 8,5 кг/ч и может быть определено по формуле $P = pv_{п.п}$, где p — масса погонной длины проволоки 1 м, кг/м; $v_{п.п}$ — скорость подачи проволоки, м/ч.

Таблица 1. Оптимизация параметров процесса сварки однородными швами закаливающихся сталей

Марка стали	Размеры свариваемых заготовок, мм	Параметры сварки		Температура автоподогрева T_R, °С	R, мм	
		$I_{св}$, А	$U_д$, В		экспериментальное	расчетное
14ХН4МДА	1200×1600×40	450...475 / 455	36...38 / 37	220...230 / 225	255	292...301 / 297
30Х2Н2М	120×1600×80	450...500 / 475	38...40 / 39	250...275 / 262,5	265	271...288 / 280

Примечание. В числителе дан разбег значений, в знаменателе — среднее.

Значения коэффициента формы слоя $\psi_{сл}$ следует принимать такими, при которых обеспечивается достаточная стойкость металла швов против образования горячих трещин. Для сварки в узкий зазор $\psi_{сл}$ = 2,5... 5,5.

Пользуясь термокинетическими диаграммами распада переохлажденного аустенита для конкретных сталей, с учетом выбора структур металла, стойких против холодных трещин, можно определить не только T_R, но и время t достижения этой температуры при охлаждении от температур аустенизации. В тех случаях, когда не имеется соответствующих термокинетических диаграмм распада (для конкретных сталей), построенных при нагреве до высоких температур (1300... 1350 °С), можно ориентировочно (как предварительные) использовать диаграммы для термической обработки [8].

Выбрав T_R, по формуле (4) определяют R при заданных $I_{св}$ и $U_д$. Скорость сварки для выбранных параметров процесса находят из соотношения $v_{св}$ = = R/t. Затем по формуле (7) вычисляют требуемую ширину зазора, поскольку при заданных параметрах процесса легко определить P. Впрочем, можно поступить и иначе — задав производительность P, определить требуемые $I_{св}$ и $U_д$.

Выполнив расчеты, в том числе и по определению ширины зазора b, можно обнаружить любопытный факт: обеспечить расчетную ширину шва при выбранных значениях сварочного тока и напряжения на дуге в ряде случаев невозможно, поэтому следует применять поперечные колебания электрода. При этом амплитуду A колебаний ориентировочно определяют на основании экспериментальных данных

$$A = \frac{b - (2...5)}{2}.$$

Выбор оптимального варианта производят методом последовательных приближений, для чего расчеты приходится выполнять для нескольких вариантов параметров процесса ($I_{св}$ и $U_д$).

Следует отметить, что при разных условиях производительность однозначно определяется отношением P/b и повышается с увеличением этого показателя. Причем уменьшение ширины зазора не всегда способствует повышению производительности процесса, поскольку с уменьшением зазора для обеспечения качественного формирования шва (в частности стойкости против образования горячих трещин) приходится уменьшать количество наплавленного металла в единицу времени. Возможны случаи, когда при больших зазорах может быть обеспечена более высокая производительность процесса, чем при меньших. Это достигается путем существенного повышения количества наплавленного металла в единицу времени (для больших зазоров) и обеспечения требуемого коэффициента формы слоя $\psi_{сл}$ для сварки в узкий зазор.

Предложенную методику расчета можно использовать при сварке с традиционной разделкой кромок. В этом случае в первую очередь целесообразно определить площадь поперечного сечения

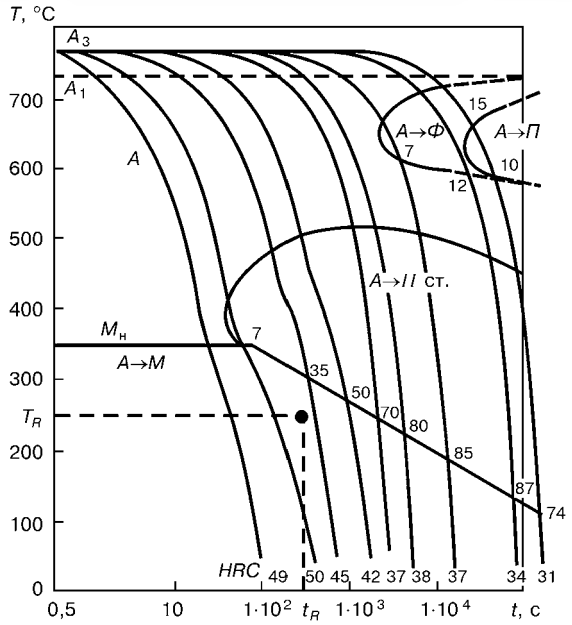


Рис. 2. Термокинстичсская диаграмма распада переохлажденного аустенита в стали марки 30Х2Н2М

наплавляемого слоя S и с учетом этого выполнить обычную разделку кромок. Площадь поперечного сечения слоя определяется по формуле

$$S = \frac{Pt}{R\gamma}.$$

Учитывая, что $R = v_{св}t$, формула может быть приведена к виду

$$S = \frac{P}{v_{св}\gamma}.$$

Здесь уместно отметить, что предлагается по сути новый подход к выбору сечения разделки и амплитуды поперечных колебаний электрода расчетным путем в зависимости от параметров процесса и с учетом стойкости соединений конкретных свариваемых сталей против холодных и горячих трещин.

В настоящее время параметры процесса (с учетом марки свариваемых сталей) выбирают, как правило, в зависимости от регламентированной разделки кромок. Такой подход не всегда позволяет обеспечить необходимую скорость охлаждения металла в нижнем субкритическом интервале температур для многих трудносвариваемых сталей, а следовательно, и стойкость металла их соединений против холодных трещин.

Проверку разработанной методики выбора режимов осуществляли при сварке заготовок из сталей марок 14ХН4МДА и 30Х2Н2М толщиной соответственно 40 и 80 мм. Заготовки размером 600Х700 мм собирали в виде жесткой технологической пробы по типу ЦНИИТС. Шов выполняли вдоль длинной стороны заготовок. Применяли сварочную проволоку Св-07ХГСН3МД. Расчетная ширина разделки при выбранных параметрах процесса, например для стали марки 30Х2Н2М, составляла 21... 23 мм. Остальные параметры следующие: $I_{св}$ = = 450... 500 А; $U_д$ = 38... 40 В; $v_{св}$ = 8,1 м/ч.

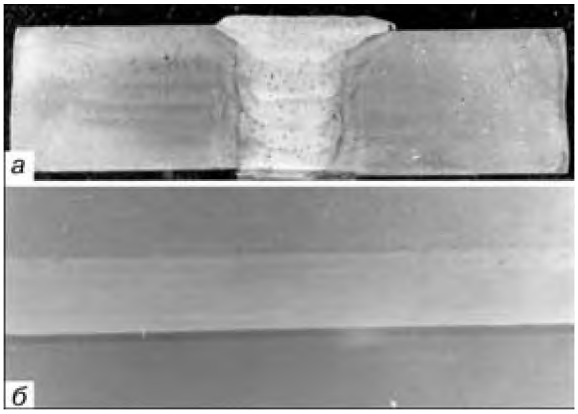


Рис. 3. Макрошлиф соединения стали 14ХН4МДА, выполненного при расчетной ширине зазора: *а* — поперечный; *б* — продольный

Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита для стали 30Х2Н2М представлена на рис. 2 [5, 8]. Температура T_R = = 230...250 °С, при этом в соответствии с диаграммой необходимо было обеспечить $t = t_R = 150$ и 190 с. Упомянутое требование определяется формированием структур металла (в результате распада аустенита и развития процессов самоотпуска при сварке), стойких против образования холодных трещин. Дальнейшие расчеты выполняли с использованием изложенной методики.

Результаты исследований показали, что в сварных соединениях продольные и поперечные холодные трещины не обнаружены (рис. 3). Это свидетельствует о достаточной стойкости металла соединений против образования холодных трещин при сварке по выбранной технологии.

Следует отметить, что несмотря на возможность получения соединений, стойких против образования трещин без применения подогрева (в результате оптимизации охлаждения в процессе сварки отдельного слоя), применять этот способ для соединения трудносвариваемых сталей с высокой устойчивостью аустенита, например стали 34ХН3М, не всегда можно. Дело в том, что оптимизация скорости охлаждения соединений таких сталей при выполнении только одного слоя шва на оптимальных режимах может привести к ухудшению механических свойств металла шва из-за длительного пребывания выше A_{c_3}. Для устранения этого недостатка предлагаемую методику расчета необходимо сочетать с использованием полезного воздействия многослойности швов [5] и их порционно-дискретного формирования [3, 4].

Таким образом, оптимизация параметров сварки и автоподогрева (длина участка автоподогрева, температура) основывается на необходимости обеспечивать на определенном расстоянии от дуги температуру автоподогрева металла в зоне сварки, при которой удается предотвратить образование холодных трещин с учетом своевременного повторного теплового воздействия дуги на этот металл. Такое повторное воздействие рекомендуется осуществлять один или два раза за один проход. Для реализации процесса используют двухдуговую сварку и сварку одной дугой по схеме «за один проход выполняется два или три слоя», что особенно необходимо для корневых швов. При достижении необходимой температуры автоподогрева сварку можно выполнять по схеме «один проход один слой».

Разработанный подход оптимизации ширины разделки (сварка в узкий зазор) или сечения наплавленного слоя (сварка с традиционной разделкой) может использоваться при сварке сталей не только с целью обеспечения необходимой стойкости соединений против образования трещин, но и для получения требуемых механических свойств металла сварных соединений.

Выводы

1. Разработан инженерный расчет скорости охлаждения металла в зависимости от параметров процесса сварки и сечения слоев шва с учетом использования термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита свариваемой стали.

2. Установлена возможность обеспечения требуемой стойкости соединений трудносвариваемых сталей марок 14ХН4МДА и 30Х2Н2М против образования трещин за счет оптимизации скорости охлаждения металла в процессе сварки без применения подогрева.

3. Для повышения эффективности процесса сварки сталей с высокой устойчивостью распада переохлажденного аустенита (без применения подогрева) требуется совершенствование методики расчета применительно к выполнению многослойных швов с порционно-дискретным формированием.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *А. с. 880671 СССР, МПК В 23 К 28/00.* Способ дуговой сварки закаливающихся сталей / Ю. Н. Готальский, В. В. Снисарь, А. Л. Купоров и др. — Опубл. 14.07.81, Бюл. № 42.
3. *Назарчук А. Т.* Управление кристаллизацией металла шва и термодеформационным циклом при автоматической дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1994. — № 5/6. — С. 3–9.
4. *Назарчук А. Т.* Влияние порционно-дискретного формирования швов на термический цикл дуговой сварки плавлением // Там же. — 1997. — № 5. — С. 13–17.
5. *Назарчук А. Т.* Стойкость соединений закаливающихся сталей с многослойными швами против образования холодных трещин // Там же. — 1994. — № 1. — С. 15–19.
6. *Рыкалин Н. Н.* Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
7. *Петров Г. Л., Тумарев А. С.* Теория сварочных процессов. — М.: Высш. шк., 1967. — 508 с.
8. *Попов А. А., Попова Л. Е.* Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Справочник термиста. — М.: Металлургия, 1965. — 500 с.

Suggested is an engineering calculation of the optimal rate of cooling of metal welded (ensuring process strength) depending upon the welding process parameters and section of the weld layers, and allowing for the overcooled austenite CCT diagrams.

Поступила в редакцию 21.09.99,
в окончательном варианте 03.03.2003

УДК 621.791.75:629.4.014.22

ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ЛОКОМОТИВОВ В ХК «ЛУГАНСКТЕПЛОВОЗ»

Г. Г. БАСОВ, канд. техн. наук, **А. Н. ТКАЧЕНКО**, **Н. П. ЕФИМОВА**, инженеры (ХК «Лугансктепловоз»)

Представлены конструкции специализированного сварочного оборудования и описана технология изготовления воздушных резервуаров локомотивов.

Ключевые слова: конструкция, резервуар, днище, обечайка, объем, воздух, давление, технология, режим, сварка, сварочная установка, сварочная проволока, флюс, качество

Неотъемлемой частью выпускаемых локомотивов являются воздушные резервуары вместимостью 25...600 л, которые применяются в системах тормоза, автоматики и пожаротушения [1]. Условия их работы характеризуются наличием внутреннего статического давления, действующего краткое или длительное время при нормальной или пониженной температуре, выполняя при этом функции накопления и сохранения воздуха. В тормозных системах используются резервуары вместимостью 222, 250, 500, 600, в питательных — 120, 222, 250, запасные резервуары имеют вместимость 20, 55, уравнительные — 20, вспомогательные — 5 и 20 л [2–3]. Для огнегасящей жидкости используется резервуар вместимостью 260 л [2, 3].

Резервуар (рис. 1) состоит из следующих конструктивных элементов: цилиндрической обечайки *4*, изготовленной из листовой стали толщиной 5...6 мм, двух выпуклых днищ *2* толщиной 6...8 мм, штуцера *1* для присоединения воздухопровода и штуцера *5* для постановки выпускного крана. Количество и расположение штуцеров зависит от монтажа резервуара на локомотиве. На резервуары укрепляется табличка, где указывается наименование завода-изготовителя, заводской номер, дата изготовления, допускаемое давление и срок освидетельствования [4]. Расчеты резервуаров проводят в соответствии с ГОСТ 14249–73. Обечайки и днища изготавливают из низкоуглеродистой стали марок ВСт3сп5 ГОСТ 380–71 и ВСт3сп4 ГОСТ 380–71 [1].

Ниже приведена технология производства воздушных резервуаров на примере изготовления главных резервуаров тормозной системы локомотивов, которая применима и для изготовления газовых баллонов.

Днища диаметром свыше 300 мм изготавливают горячей штамповкой, которую выполняют в несколько этапов, включающих вырубку заготовок из листовой стали, предварительную формовку, нагрев до 950 °С в печи, окончательную формовку в горячем состоянии, правку и последующую механическую обработку. Для изготовления обечаек из листовой стали вырезают заготовки необходимых размеров, формуют на гибочных трехвалковых машинах до необходимого диаметра, предварительно загнув кромки на листогибочных машинах.

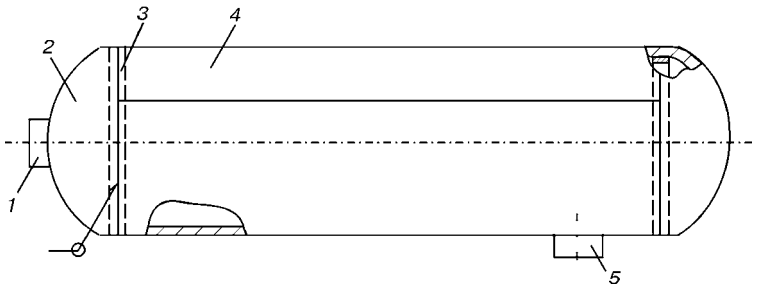


Рис. 1. Схема разделения резервуара на конструктивные элементы: *1*, *5* — штуцера; *2* — днище; *3* — кольцо подкладное; *4* — обечайка

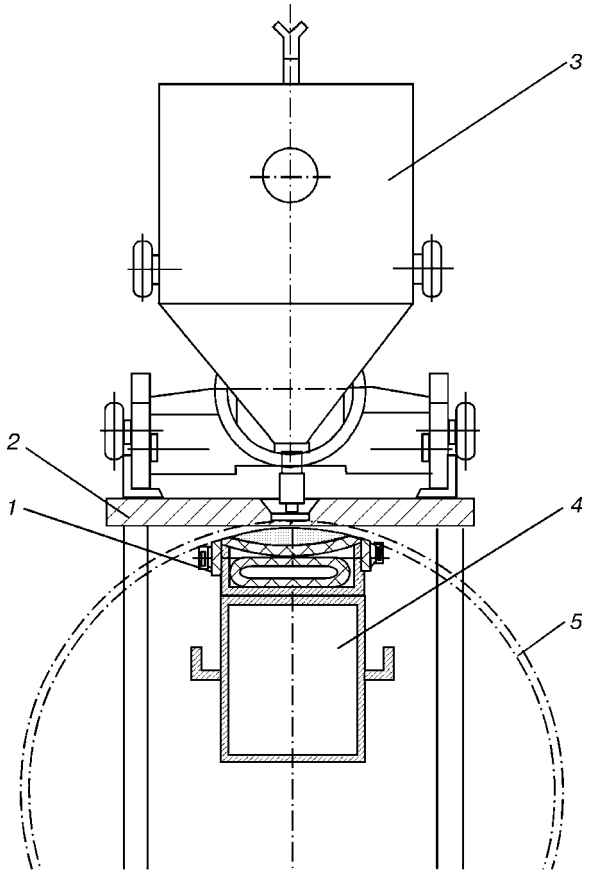


Рис. 2. Схема установки для автоматической сварки под слоем флюса цилиндрических обечаек на флюсовой подушке: *1* — воздушный шланг; *2* — плита с направляющими; *3* — сварочный трактор; *4* — поворотная консоль с флюсовой подушкой; *5* — обечайка

© Г. Г. Басов, А. Н. Ткаченко, Н. П. Ефимова, 2003

Перед выполнением сварки продольного стыкового шва производят предварительную сборку обечайки, для чего состыковывают ее кромки, выдерживая их в одной плоскости и обеспечивая при этом зазор под сварку 1,5 ± 1 мм. Полуавтоматической сваркой в защитном газе по торцам обечайки приваривают две выводные технологические планки.

Сварка продольных швов обечайки диаметром 300... 600 мм выполняется автоматически на установке, приведенной на рис. 2, односторонним швом на флюсовой подушке. Установка состоит из тумбы, смонтированной на плите, поворотной консоли с флюсовой подушкой, двух пневмоцилиндров, плиты с направляющими для перемещения сварочного трактора.

Собранную обечайку устанавливают на предварительно отведенную поворотную консоль. Далее консоль возвращают в рабочее положение, выставляя стык обечайки относительно проема плиты. Для прижатия консоли к плите включают пневмоцилиндры, а затем поджимают флюс к стыку путем подачи давления воздуха, подаваемого в воздушный шланг, уложенный под флюсом. После этого производят автоматическую сварку стыкового шва трактором, перемещающимся по направляющим плиты, начиная на вводной и заканчивая на выводной планках, что предотвращает образование кратеров в сварном шве обечайки. Сварку выполняют проволокой Св-08А диаметром 2 мм с использованием флюса АН-348А. Обязательной операцией, завершающей изготовление обечайки, является ее правка, выполняемая методом прокатки на листогибочной трехвалковой машине. Качество сварного шва контролируется методом рентгеновского просвечивания. Режим выполнения односторонней сварки стыкового продольного шва обечайки на флюсовой подушке следующий [5]: толщина листа 5 мм, ширина зазора 1,5 ± 1 мм, диаметр электрода 2 мм, сварочный ток 425...450 А, напряжение дуги 32...34 В, скорость сварки 35 м/ч, давление воздуха в шланге 0,098...0,147 МПа.

Перед сваркой кольцевых швов резервуара во внутрь днищ устанавливают подкладные кольца (см. рис. 1), которые затем впрессовывают в обечайку. До сборки днищ с обечайкой к ним вначале привариваются штуцера. Приварку осуществляют в защитном газе на автоматизированной установке (рис. 3), состоящей из вращателя, на который устанавливают днище и штуцер, и опоры с укрепленной сварочной горелкой.

Сварку двух кольцевых швов резервуара выполняют одновременно в специализированной установке (рис. 4).

Собранный на прихватках резервуар подают с питателя на рабочий стол, который поднимает его на высоту оси вращения с последующим зажимом изделия с помощью приводов. Затем устанавливаются мундштуки сварочных головок по стыкам обечайки с днищами, и одновременно включается привод вращения резервуара и сварочное оборудование. Автоматическую сварку выполняют в два прохода сварочной проволокой Св-08А под флюсом марки АН-348А на следующих режимах: ширина зазора 4...5 мм, диаметр проволоки 2 мм, сварочный ток 375...400 А, напряжение дуги 28...35 В, скорость сварки 27...35 м/ч, скорость подачи проволоки 180...200 м/ч. После окончания сварки отводятся захваты, опускается стол и резервуар скатывается на приемный стеллаж. Кольцевые швы подвергаются рентгенконтролю. После того, как качество сборки и сварки подтверждено, приступают к приварке мелких деталей: фланцев, штуцеров, скобы (для крепления таблички).

Далее резервуар подают на специализированный стенд для гидроиспытаний, на котором одновременно испытываются четыре изделия.

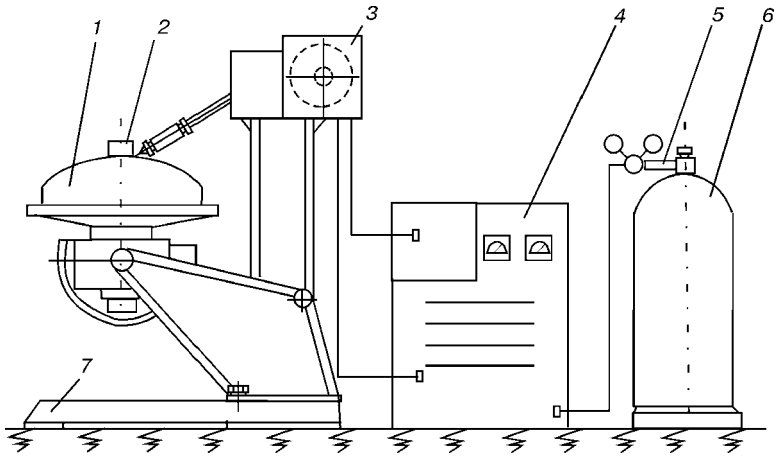


Рис. 3. Схема автоматизированной установки для приварки штуцера к днищу в защитном газе: *1* — днище; *2* — штуцер; *3* — механизм подачи проволоки; *4* — источник питания; *5* — газопровод; *6* — баллон с газом; *7* — манипулятор

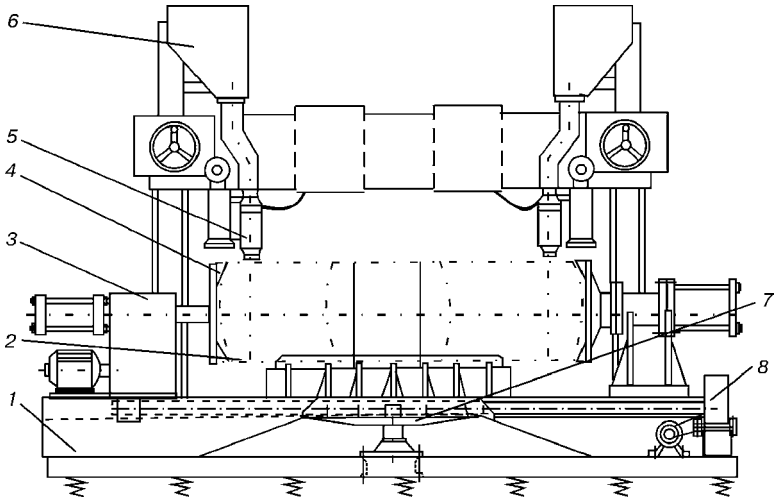


Рис. 4. Схема специализированной установки для сварки под слоем флюса одновременно двух кольцевых швов: *1* — станина; *2* — резервуар; *3* — привод вращения резервуара; *4* — захват; *5* — сварочная головка; *6* — бункер для флюса; *7* — стол подъемный; *8* — привод поднятия резервуара

Техническая характеристика специализированного стенда

Количество одновременно испытуемых резервуаров, шт.	4
Время испытания при наибольшем давлении, мин	5
Давление воздуха, атм	4
Давление воды, атм	
при заливе резервуаров	2,5
наибольшее при испытании	15
наименьшее при испытании	4
Габаритные размеры, мм	4100×3750×1260

Давление при испытаниях должно быть не менее 1,5 рабочего, что составляет 12...15 атм (рабочее давление в тормозной системе локомотивов 8 атм). Обязательным условием при испытании на герметичность является использование теплой (подогретой) воды для исключения образования конденсата на наружной поверхности резервуара. Дефекты, обнаруженные рентгеновским просвечиванием, устраняют методом воздушно-дуговой строжки и последующей заварки ручной дуговой сваркой.

Окончательными операциями изготовления резервуаров являются консервирование и окраска. Консервирование заключается в покрытии резьбовых соединений антикоррозионной смазкой, закупорке отверстий деревянными заглушками. Изготовленные резервуары отправляют на участок сборки локомотивов.

Внедрение описанной выше технологии изготовления резервуаров позволило полностью исключить использование ручной дуговой сварки, что повышает качество сварных соединений, улучшает условия труда, повышает его производительность и снижает себестоимость воздушных резервуаров.

1. *ОСТ 24.140.35–76.* Резервуары воздушные тепловозные. Основные размеры и технические требования. — М.: МТиТМ, ВНИТИ. — 1978.
2. *Тепловоз* ТЭ10М. Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1985. — 421 с.
3. *Тепловоз* 2ТЭ116 / С. П. Филонов, А. И. Гибалов, Н. А. Никитин и др. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. — 334 с.
4. *Иноземцев В. Г.* Тормоза железнодорожного подвижного состава. — М.: Транспорт, 1979. — 424 с.
5. *Справочник* сварщика / Под ред. В. Степанова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1983. — 560 с.

Designs of specialized welding equipment are presented and technology of fabrication of locomotive air tanks is described.

Поступила в редакцию 11.02.2003

ООО НТЦ "АВИАСВАРКА"

8 лет успешной работы на рынке Украины

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ:

- проволоки из алюминиевых сплавов – АК5, АМг, АМц и др.
- проволоки из н/ж стали – Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т, ЭП, ЭИ и др.
- проволоки для чугуна – НМЖМц (монель), ПАНЧ-11, МНЧ-2
- проволоки для меди, латуни и бронзы – МНЖКТ, БрКМц, БрАМц, БрБ2
- проволоки титановые – ВТ 1-00, ОТ4-1, СПТ-2 и др.
- электроды и ролики для контактной сварки – БрХ, БрКд, МК
- электроды вольфрамовые – ЭВИ, ВЛ, ВТ, WS, WT, WC
- прокат 12Х18Н10Т, бронза, латунь, титан, алюминий в ассортименте
- проволоки заклепочные и контровочные из алюминия, н/ж стали ∅0,5–9 мм

04080, г. Киев, ул. Фрунзе, 47 б, корп. 5,
тел.: (044) 417 1517, 417 2352,
тел./факс: (044) 463 76 92

УДК 621 791 75 03-52

БЛОЧНО-МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ДУГОВОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

С. И. ПРИТУЛА, инж., **В. А. ЛЕБЕДЕВ**, канд. техн. наук, **В. А. ТКАЧЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложены новые виды систем управления сварочным и наплавочным оборудованием, базирующимся на блочно-модульном принципе конструирования. В основу таких разработок положены технические решения по регулируемым реверсивным электроприводам с использованием мехатронных принципов конструирования, а в качестве более высокого иерархического звена — программируемый контроллер.

Ключевые слова: дуговая сварка, наплавка, резка, цикл, регулирование, электропривод, контроллер, конструкция, надежность, системы

Проблемы, связанные с качеством выполнения сварочных работ и наплавки, а также с обеспечением надежной работы дугового механизированного и автоматизированного оборудования, по-прежнему остаются главными в сварочном производстве и при организации ремонтно-восстановительных работ. Важным условием при этом является повторяемость полученных результатов с их высоким качеством. Одновременно с этим пользователь механизированного и автоматизированного оборудования хочет получать нужные типы полуавтоматов и автоматов с минимальными затратами и в сжатые сроки. Практически это означает «сегодня на сегодня». Как должны поступать разработчик и изготовитель необходимого оборудования при решении конкретных задач сварочного производства?

Цель настоящей работы заключается в получении одного из возможных ответов на этот вопрос. Очевидно, что одним из путей решения проблем, возникающих при изготовлении, ремонте, восстановлении узлов и деталей различных металлоконструкций со всевозрастающими требованиями к качеству работ, в частности при международном сотрудничестве, может быть постоянное наращивание номенклатуры оборудования. Такой процесс был возможен в прежние времена и позволил конструкторам ИЭС им. Е. О. Патона накопить бесценный опыт разработок оборудования такой номенклатуры, которой, по нашему мнению, не имеет ни одно из предприятий исследовательского и конструкторско-технологического направлений. Отметим, что наряду с указанным разнообразием много внимания уделяли унифицированным техническим решениям [1]. В настоящее время такая возможность исключена в силу новых экономических условий, когда пользователь готов платить только за конечный результат — высокоэффективное, экономически и технологически выгодное оборудование.

Стремление занять достойное место на рынке сварочного оборудования и технологий привело к необходимости создания полуавтоматов, установок и автоматов по блочно-модульному принципу конструирования. Частично эти решения изложены в работах [2–4] и могут иметь различные специфические подходы. Так, например, полуавтоматы конструируются по блочно-модульному принципу с использованием в качестве базовой модели наиболее простого по техническому оснащению полуавтомата с последующим наращиванием его функциональных возможностей. Конструирование установок для наплавки по блочно-модульному принципу основано на использовании отдельных конструктивно заменяемых узлов для обработки наплавкой деталей различной конфигурации. Метод, используемый при разработке сварочных автоматов блочно-модульной конструкции, несколько похож на метод разработки полуавтоматов аналогичной конструкции, но имеет гораздо большее разнообразие узлов и блоков (модулей). Отметим, что при разработке автоматов частично используется методология конструирования сварочных установок блочно-модульного типа.

В последнее время в разработках полуавтоматов и автоматов с блочно-модульной конструкцией все более четко прослеживаются тенденции, связанные с мехатронными методами конструирования качественного, высоконадежного оборудования [5].

Некоторые черты блочно-модульного конструирования можно увидеть в оборудовании ряда зарубежных производителей [6]. При этом часть задач производителя берет на себя разработчик сварочного оборудования. Это касается резкого сокращения номенклатуры покупных изделий, а также проблем, связанных с компоновкой систем, их наладкой, тестированием и последующим сервисным обслуживанием. Это позволяет разработчикам и конструкторам найти наиболее рациональные и эффективные технические решения с минимальными издержками при производстве и эксплуатации, которые будут пользоваться спросом на конкретных рынках оборудования и технологий.

В этой связи рассмотрим новые разработки дугового автоматизированного оборудования, основанные на блочно-модульном принципе конструирования и использовании методологий мехатроники. Основу таких разработок составляет мехат-

© С. И. Притула, В. А. Лебедев, В. А. Ткаченко, 2003

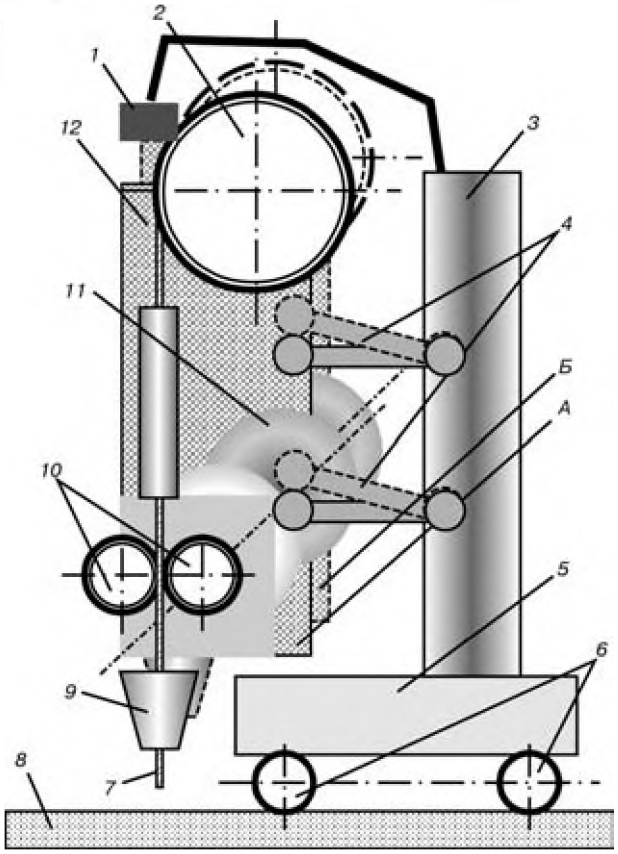


Рис. 1. Фрагмент системы возбуждения дуги под флюсом: *1* — датчик; *2* — кассета с электродной проволокой; *3* — стойка; *4* — подвеска корпуса; *5* — тележка; *6* — привод перемещения автомата; *7* — электродная проволока; *8* — свариваемое изделие; *9* — токоподводящий наконечник; *10* — подающий и прижимной ролики; *11* — электродвигатель механизма подачи; *12* — корпус с механизмом подачи

ронный блок реверсивного регулируемого электропривода постоянного тока, отличительной особенностью которого является высокая степень универсальности, т. е. возможность надежно работать с любыми электродвигателями, применяемыми в сварочном оборудовании (КПК, КПА, СЛ, ДПУ, ДП, Д25, Д90 и другими, имеющими разные напряжение питания, параметры обмоток якорей). Такую возможность обеспечивают перестраиваемые структуры обратных связей [7] в регуляторе частоты вращения вала электропривода и встроенный реверсор, работающий по принципу логического автомата [8]. Указанный электропривод полностью соответствует понятию «мехатронный узел». Следует заметить, что рассматриваемый электропривод может работать как от резистивных, так и от потенциальных задатчиков частоты вращения вала приводного электродвигателя. Кроме того, важным техническим решением, применяемым к регулятору электропривода, является возможность организации обратных связей как по параметрам самого электродвигателя (аналог измерения ЭДС-напряжение и IR-компенсация), так и по выходу тахогенератора (для электродвигателей типа ДПУ87–75). При этом применение электродвигателя с тахогенератором существенно повышает диапазон регулирования частоты вращения его вала. Например, для электродвигателей с тахогенератором диапазон регулирования составляет 20...25 крат при жесткости механических характеристик не хуже 5 %, а для остальных электродвигателей этот диапазон равняется 12...15 крат при этой же жесткости механических характеристик. Такие электроприводы устанавливаются во всех электромеханических системах сварочных автоматов: механизмах подачи электродной проволоки, системах транспортного и сварочного перемещения, системах корректировки положения электродной проволоки относительно свариваемого стыка (следящих системах). Указанные электромеханические системы, а также системы подачи защитной среды (газ, флюс) и питания дуги объединяет следующее по иерархии устройство — устройство управления в виде покупного программируемого контроллера с развитой программной базой, допускающего введение и обработку как цифровых, так и аналоговых сигналов. Ко входам контроллера подключены такие датчики: положения автомата; контроля технологических параметров; особых состояний. К последним мы относим механический датчик возбуждения дуги под слоем флюса для электродных проволок больших диаметров (5 мм и более), используемых для повышения производительности процесса.

По нашему мнению, устройству возбуждения дуги под слоем флюса, применяемому в рассматриваемых автоматах блочно-модульной конструкции, следует уделить особое внимание вследствие оригинальности его технического решения. На рис. 1 представлен фрагмент системы возбуждения дуги под слоем флюса, устанавливаемой, например, на автомате тракторного типа. Устройство работает следующим образом. При включении роликами *10* подачи электродной проволоки последняя перемещается в направлении изделия и в случае контакта между проволокой и изделием в систему управления от датчика тока поступает сигнал о наличии тока в сварочной цепи. При поступлении этого сигнала начинается реверсирование подачи проволоки с растяжкой дуги до момента включения датчика напряжения сварки. При совпадении этих сигналов происходит переключение электродвигателя механизма подачи *11* на рабочее перемещение и поддержание дуги с одновременным включением привода перемещения автомата *6* для сварки. В случае, если имеются какие-либо препятствия для возбуждения дуги, например кусок флюса, что бывает не так уже и редко, электродная проволока упирается в упомянутый кусок флюса, датчик тока не выдает сигнал, а усилие возникшего сопротивления подаче передается корпусу *12*, связанному подпружиненными относительно несущей стойки *3* рычагами с подвеской корпуса *4* (могут быть простые рессоры). Корпус *12* с механизмом подачи *11*, кассетой *2* и токоподводящим наконечником *9* из положения *А* переходит в положение *Б* (смещается вверх), вызывая срабатывание датчика *1*. По сигналу датчика *1* происходит реверс подачи электродной проволоки, и далее по сигналу таймера устройства управления следует повторное движение электродной проволоки к месту возбуждения. Этот цикл повторяется до момента появ-

ления описанной комбинации сигналов от датчиков тока и напряжения дуги. Указанный алгоритм возбуждения может быть изменен таким образом. В случае невозбуждения дуги в данном месте может выполняться команда на небольшой сдвиг автомата (1...2 мм) относительно первого места попытки возбуждения дуги.

Рассмотренная конструкция устройства возбуждения дуги под слоем флюса выполняет две функции: защищает оборудование от поломки, а электродную проволоку от неисправимых перегибов; сигнализирует о состоянии невозбуждения дуги при достижении электродной проволоки положения, при котором возбуждение дуги должно произойти. В алгоритм функционирования может вводиться программирование скорости подачи электродной проволоки, скорости сварки и напряжение холостого хода источника сварочного тока в момент возбуждения дуги, а также при заварке кратера шва в момент окончания сварочного процесса.

Очевидно, что комплекс устройств для возбуждения дуги при использовании электродных проволок повышенного диаметра следует признать системой с определенной методологией ее конструирования и использования. Иногда, в частности для относительно легких автоматов тракторного типа, вместо упругой подвески системы подачи электродной проволоки используют в качестве движения, свидетельствующего о невозбуждении дуги, отрыв самого автомата от изделия.

Рис. 2. Структурная схема новой блочно-модульной системы управления механизированным и автоматизированным оборудованием

Можно указать, что такая система возбуждения достаточно надежна и во всех случаях ее применения не отмечено ни одного сбоя в работе, а также дефектов сварного шва.

Структурная схема новой блочно-модульной системы управления механизированным и автоматизированным оборудованием (однодуговой вариант компоновки) представлена на рис. 2. Естественно, что оборудование может дооснащаться другими электромеханическими системами, например колебателем электродной проволоки, другими датчиками и т. п. Все это приведет лишь к дополнительной установке регулируемых электроприводов и прокладке новых связей. Следует заметить, что контроллер, как правило, выбирается с заведомо большим, чем это требуется в конкретном случае, количеством входов–выходов, и поэтому некоторые изменения в составе оборудования не приводят к кардинальному изменению основного оснащения всей системы. Очевидно, что такая система структурно и функционально легко изменяема и при этом практически лишена тех излишеств в комплектации, которые были свойственны более ранним разработкам оборудования аналогичного типа.

Введение в систему управления интерфейса взаимодействия с другим оборудованием позволяет без особых аппаратных доработок включить в цикл работы автомат с объектами, имеющими собственное программное и аппаратное обеспечение, например современное оборудование для телевизионного или лазерного слежения, а также внешние устройства перемещения свариваемого или наплавляемого изделия.

Выбор типа и структуры программируемого контроллера должен (при необходимости) учитывать условия сварки (большой уровень помех и связанные с этим решения задач помехозащищенности электронных средств управления и регулирования), а также возможность применения различных способов управления сварочным процессом, в том числе алгоритмизированную модуляцию режимов, управление массопереносом электродного металла, адаптацию к изменяющимся параметрам разделки металла шва при использовании сканирующего принципа слежения дуговым сенсором, использованию других внешних устройств, например с целью встраивания в линии или управления вспомогательными перемещениями и др. Можно добавить, что задачи обеспечения помехозащищенности систем оборудования и надежного функционирования тесно связаны с компоновкой его систем и топологией связей. Эффективное решение этих задач возможно при наличии опыта у разработчиков этого специфического вида техники.

Очевидно, что предлагаемая разработка может быть использована как во вновь создаваемых конструкциях механизированного и автоматизированного дугового оборудования, так и при модернизации уже имеющегося у пользователя. Наш опыт использования описанной концепции создания сварочных автоматов показывает, что при наличии

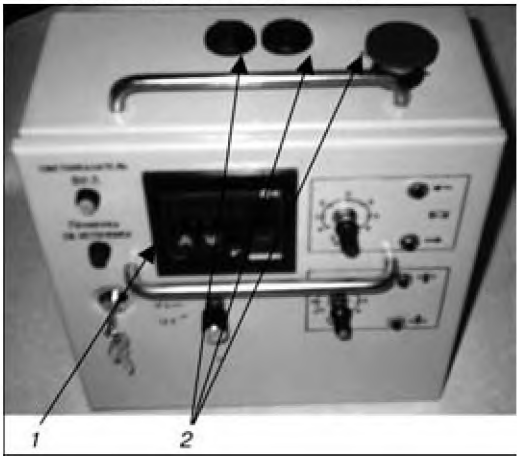


Рис. 3. Вариант новой блочно-модульной системы управления механизированным и автоматизированным оборудованием: *1* — контроллер; *2* — органы управления пуском и остановкой цикла

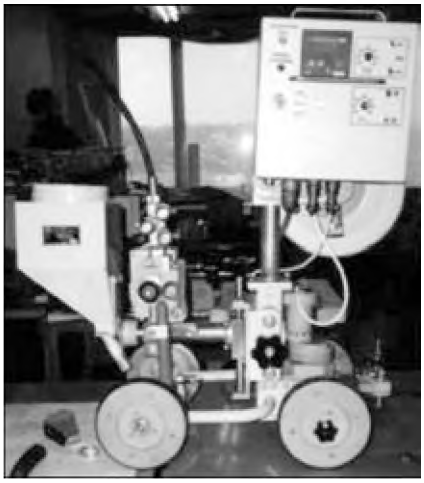


Рис. 4. Вариант однодугового сварочного автомата тракторного типа с новой блочно-модульной системой управления и системой возбуждения дуги под флюсом

комплекта механических узлов рабочий вариант аппарата, работающего по алгоритмам заказчика, может быть получен в 2...3 недельный срок. При этом гарантируется высокая надежность, обусловливаемая тщательной предварительной проработкой всех узлов и систем, их оперативной заменой и ремонтопригодностью (при необходимости), а также гарантированной надежностью серийных покупных изделий.

Вариант разработки новой блочно-модульной системы управления механизированным и автоматизированным оборудованием представлен на рис. 3, а вариант однодугового сварочного автомата тракторного типа с этой системой управления — на рис. 4.

Дополнительно можно еще уточнить, что в данной разработке оказалось достаточным применение относительно несложного контроллера типа «ZELIO», который имеет простой инструментарий программирования, доступный для обслуживания персоналу даже небольших предприятий. В конструкцию сварочного трактора введена система лазерной подсветки, которая по подтвержденным отзывам сварщиков-операторов очень полезна при текущей корректировке положения электродной проволоки относительно свариваемого стыка.

В настоящее время новыми блочно-модульными системами управления механизированным и автоматизированным оборудованием оснащаются и подвесные сварочные и наплавочные автоматы, автоматы для сварки неповоротных стыков труб и другое сварочное и наплавочное оборудование.

Выводы

1. Блочно-модульный принцип конструирования систем управления для дугового механизированного и автоматизированного оборудования предопределяет поиск таких решений, которые бы синтезировали в себе разработку широкой гаммы полуавтоматов и автоматов различного назначения с однотипной элементной базой, программированием цикла работы и регулирования параметров сварочного процесса. Такие системы все больше приобретают черты мехатронных систем.

2. Применение блочно-модульного принципа конструирования можно считать обоснованным, если при этом достигается упрощение комплекса работ по проектированию таких систем, сужение элементной базы, упрощение наладки и поддержания работоспособности, обеспечение надежности функционирования оборудования при высоком качестве сварки, а также максимально быстрое реагирование разработчиков и производителей указанного оборудования на запросы рынка.

1. *Чвертко А. И.* Основы рационального проектирования оборудования для автоматической и механизированной сварки и наплавки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 240 с.
2. *Лебедев В. А., Пичак В. Г.* Новое модульное оборудование для дуговой механизированной сварки, наплавки и резки плавящимся электродом // Свароч. пр-во. — 1997. — № 7. — С. 32–36.
3. *Универсальное* блочно-модульное наплавочное оборудование / В. Ф. Мошкин, В. А. Лебедев, В. Ф. Коваленко, А. А. Фомакин // Там же. — 1998. — № 6. — С. 33–36.
4. *Перспективы* развития оборудования для электродуговой сварки / В. Е. Патон, В. Ф. Мошкин, С. И. Притула, Н. И. Усик // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 198–204.
5. *Подураев Ю. В., Кулешов В. С.* Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Технология машиностроения. — 2000. — № 3. — С. 49–53.
6. *Направления* развития и совершенствования высокоэффективных систем оборудования для дуговых механизированных способов сварки, наплавки и резки (Анализ разработок ведущих фирм-производителей сварочного оборудования / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Ф. Мошкин и др.// Свароч. пр-во. — 1999. — № 11. — С. 30–35
7. *Лебедев В. А., Полосков С. И., Братчук С. Д.* Оценка влияния возмущений в работе электроприводов на надежность оборудования для механизированной и автоматической сварки // Там же. — 2002. — № 9. — С. 9–15.
8. *А. с. 1589361 СССР, МПК Н 02 Р 5/16.* Реверсивный электропривод постоянного тока / О. К. Бесский, А. А. Галигузов, В. И. Корогод, В. А. Лебедев и др. — Опубл. 30.08.90; Бюл. № 32.

New types of modular-configuration control systems for welding and surfacing equipment are suggested. These developments are based on designs of controllable reversible electric drives made by using mechanotronic design principles, and on the programmable controller used as a higher hierarchic link.

Поступила в редакцию 19.03.2003

УДК 621.791.052:539.538

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ «ФЕРРОСПЛАВ–B_4C, SiC»

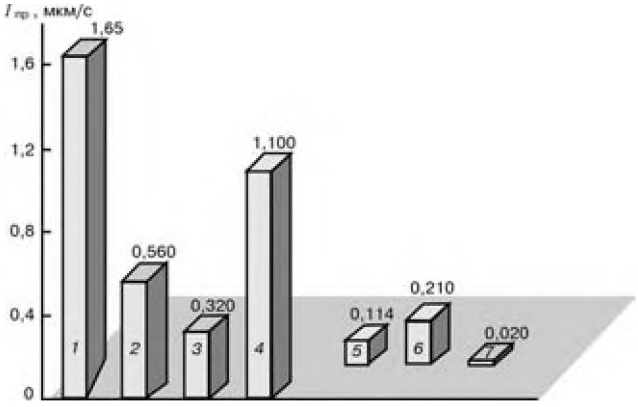
А. П. МУРАШОВ, **Е. А. АСТАХОВ**, кандидаты техн. наук, **И. А. ДЕМЬЯНОВ**, **А. Д. КАПУЛА**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Определено, что износостойкость покрытий в условиях газоабразивного изнашивания зависит от вида синтезированных в процессе напыления упрочняющих фаз, а также пористости (когезионной прочности) покрытия.

Ключевые слова: износостойкость, газоабразивное воздействие, газотермические покрытия, синтез, упрочняющие фазы, карбиды, бориды, приведенный износ

Для повышения работоспособности узлов машин, подверженных абразивному изнашиванию, применяются покрытия из материалов, содержащих карбиды вольфрама, титана или самофлюсующиеся никельхромборкремнистые сплавы [1, 2].

В настоящей работе проведены результаты испытания покрытий, выполненных из композиционных порошков «ферросплав–B_4C, SiC» плазменно-дуговым и детонационным способами. Порошки получали путем конгломерирования с использованием в качестве связующего поливинилового спирта, а также частичного спекания образцов, спрессованных из механической смеси порошков с последующим дроблением, размолом и отбором фракций порошка менее –100 мкм. Плазменно-дуговое напыление проводили на следующем режиме: ток 450 А; напряжение 50 В; дистанция напыления 120 мм; плазмообразующая среда — аргон-азотная газовая смесь. При детонационном напылении был установлен следующий расход газов, $м^3/ч$: 0,50...0,55 пропан-бутана; 1,30 кислорода; 0,65 воздуха. Типы покрытий приведены в табл. 1. Пористость покрытий, определенная с помощью металлографических исследований, составляла 5...11 %, при этом у покрытий, выполненных детонационным способом, наблюдались более низкие значения пористости.



Интенсивность износа $I_{пр}$ плазменного (*1–4*) и детонационного (*5–7*) покрытий из композиционных порошков различных систем при газоабразивном изнашивании: *1* — FeTi–B_4C; *2* — FeTi–SiC; *3* — FeV–B_4C; *4* — FeV–SiC; *5* — FeV–SiC (фракцией –50 мкм); *6* — FeV–SiC (фракцией –63 мкм); *7* — FeV–B_4C

Испытания износостойкости покрытий в условиях газоабразивного изнашивания проводили с использованием камеры струйно-абразивной обработки. Внутри нее находился пистолет, закрепленный таким образом, чтобы его ось была под углом 5° относительно горизонтальной плоскости, на которой прикреплены образцы размером 20×15×4 мм. Толщина покрытий составляла 0,35...0,40 мм. Расстояние от центра образца до среза сопла пистолета равнялось 100 мм. В качестве абразивного материала использовали крошку электрокорунда нормального марки 14А зернистостью 0,5...0,8 мм, имеющую микротвердость 13000...14000 МПа.

Испытания на износ проводили в следующей последовательности. С помощью стабилизатора давления определяли давление сжатого воздуха — 0,2 МПа. Образцы в течение 10 с обдували воздушно-абразивной струей. После контрольного взвешивания их повторно подвергали обработке в течение 10 с. Все эти операции повторяли 4...5 раз. В конце каждой операции оценивали потерю массы образца. По результатам взвешиваний определяли темп износа и массовый приведенный износ покрытия. Последний пересчитывали в линейный приведенный износ, используя значения плотности пок-

Таблица 1. Покрытия, используемые при испытаниях на газоабразивный износ

№ опыта	Способ напыления	Тип покрытия	Исходный порошок, мас. %	Способ получения	Фракция порошка, мкм
1	Плазменно-дуговой	FeTi–B_4C	15,0 B_4C, ост. FeTi	Конгломерат	–80+50
2		FeTi–SiC	22,5 SiC, ост. FeTi		–100
3		FeV–B_4C	20,0 B_4C, ост. FeV		–100
4		FeV–SiC	22,5 SiC, ост. FeV		–100
5	Детонационный	FeV–SiC	22,5 SiC, ост. FeV	Конгломерат	–50
6		FeV–SiC	22,5 SiC, ост. FeV	Спеченный	–63
7		FeV–B_4C	20,0 B_4C, ост. FeV	»	–50

Таблица 2. Фазовый состав и микротвердость покрытий

№ опыта	Тип покрытия	Фазовый состав	Микротвердость, МПа
1	FeTi–B_4C	Fe_3B, Fe_3C, FeTi, Fe_2C, Fe_2Ti, TiB_2, следы B_4C, Fe_2TiO_5 и Fe_3O_4	6660...7660
2	FeTi–SiC	Fe_2Ti, FeSiC, Fe_8Si_2C, Ti_5Si_3, TiO, Fe_2O_3, TiO_2	9000...11000
3	FeV–B_4C	FeV, VB, VC, V_3O_4, V_8O_5, V_2C, σ-VFe, следы Fe_2O_3, Fe_3O_4	16800...18920
4	FeV–SiC	V_4C_3, FeSiC (Fe_8Si_2C), FeV, $VO_{1,27}$, α-SiC, $FeVO_4$	16800...18920
5	FeV–SiC	FeV, $VO_{1,27}$, SiC, V_8C_7	4830...5200
6	FeV–SiC	FeV, $VO_{1,27}$, SiC, V_6Si_5, V_8C_7	4830...5200
7	FeV–B_4C	V_2B_3, FeV, σ-VFe	4700...5200

© А. П. Мурашов, Е. А. Астахов, И. А. Демьянов, А.

Таблица 3. Износ напыленных покрытий при газоабразивном изнашивании

№ опыта	Плотность покрытия, т/м³	Время испытаний, с								Интенсивность износа	
		10	20	30	40	50	60	70	80	массовый, г/с	линейный, мкм/с
1	5,43	0,0300	0,0600	0,0800	0,1100	0,1300	0,1500	0,1900	0,2000	0,00270	1,650
2	5,32	0,0100	0,0200	0,0220	0,0320	0,0410	0,0600	0,0650	0,0780	0,00090	0,560
3	5,24	0,0050	0,0110	0,0150	0,0190	0,0260	0,0310	0,0370	0,0410	0,00050	0,320
4	5,18	0,0180	0,0350	0,0530	0,0680	0,0860	0,1000	0,1200	0,1380	0,00173	1,110
5	5,26	0,0020	0,0040	0,0060	0,0070	0,0080	0,0110	0,0120	0,0130	0,00018	0,114
6	5,25	0,0040	0,0070	0,0090	0,0130	0,0160	0,0180	0,0210	0,0250	0,00033	0,210
7	5,28	0,0003	0,0007	0,0009	0,0012	0,0014	0,0017	0,0022	0,0024	0,00003	0,020

рытий, которые предварительно определяли методом гидростатического взвешивания:

$$И_л = И_{мас} / \rho_{покр} S_{покр},$$

где $И_л$, $И_{мас}$ — соответственно линейный и массовый приведенный износ: $\rho_{покр}$, $S_{покр}$ — соответственно плотность и площадь покрытий.

Испытанию на стойкость к газоабразивному изнашиванию подвергали покрытия, данные о которых приведены в табл. 1. Для испытаний были подготовлены по четыре образца каждого типа. Фазовый состав и максимальная микротвердость покрытий представлены в табл. 2, а результаты испытаний на газоабразивный износ напыленных покрытий — в табл. 3 и на рисунке.

Наиболее износостойкими оказались покрытия, полученные из композиционного порошка системы FeV–B_4C, содержащие в своем составе бориды ванадия.

Покрытия, в состав которых после напыления входят карбиды титана и карбосилициды железа, были менее износостойкими, а полученные из порошков более крупных фракций и отличающиеся высокой пористостью имели самую низкую стойкость при газоабразивном изнашивании.

Детонационные покрытия, полученные из порошка мелких (–50 мкм) фракций, обладали износостойкостью, значительно превосходящей износостойкость плазменных покрытий, напыленных из порошков фракции –100 мкм. При этом детонационные покрытия содержали незначительное количество карбидных и боридных фаз, однако отличались более низкой пористостью.

При одинаковой микротвердости покрытия, в состав которых входили карбиды титана, карбосилициды железа, по износостойкости уступали покрытиям, содержащим бориды ванадия.

Таким образом, износостойкость газотермических покрытий в условиях газоабразивного изнашивания при малых углах атаки абразива определяется износостойкостью упрочняющей фазы и матрицы. Для получения покрытий с высокой износостойкостью в условиях газоабразивного изнашивания целесообразно применение композиционного порошка системы FeV–B_4C, имеющего размеры частиц 50...80 мкм. Это позволит получать плотные покрытия с высокой когезионной прочностью.

1. *Получение* покрытий высокотемпературным распылением / Под ред. Л. К. Дружинина, В. В. Кудинова. — М.: Атомиздат, 1973. — 368 с.
2. *Газотермические* покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. А. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.

Wear resistance of coatings under abrasive wear conditions was found to depend upon the type of hardening phases synthesised during spraying, as well as upon the porosity (cohesion strength) of the coatings.

Поступила в редакцию 21.02.2003

УДК 621 791 1/ 8–621 791 94]03

СХЕМА ПИТАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУАВТОМАТА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА СВАРОЧНОГО ТОКА

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

Описана возможность построения систем управления и регулирования с питанием от напряжения источника сварочного тока. Предложено простое и эффективное техническое решение, позволяющее решить как задачу защиты от высоковольтных выбросов напряжения при ведении сварочного процесса, так и питания систем полуавтомата в период короткого замыкания дугового промежутка. Указанное техническое решение нашло применение в гамме полуавтоматов блочно-модульной конструкции типа ПШ 107В и эксплуатируется в промышленных условиях при сохранении независимости от типа используемого в дуговом процессе источника сварочного тока.

Ключевые слова: механизированная сварка, система управления, электропривод, источник сварочного тока, сварочное напряжение, питание, защита, схема

Системы управления циклом работы полуавтоматов и регулируемые электроприводы при дуговой механизированной сварке в защитных газах могут выполняться с питанием от источника сварочного тока [1]. Это упрощает схемы питания и регулирования и дает существенный технологический эффект [2]. Применение такой схемы оправдано в случае использования простых параметрических регуляторов частоты вращения вала приводного электродвигателя механизма подачи электродной проволоки (как, например, в полуавтоматах А547Ум, А825М). Существенным недостатком таких систем является очень небольшой диапазон регулирования скорости подачи, ограничи-

© В. А. Лебедев, 2003

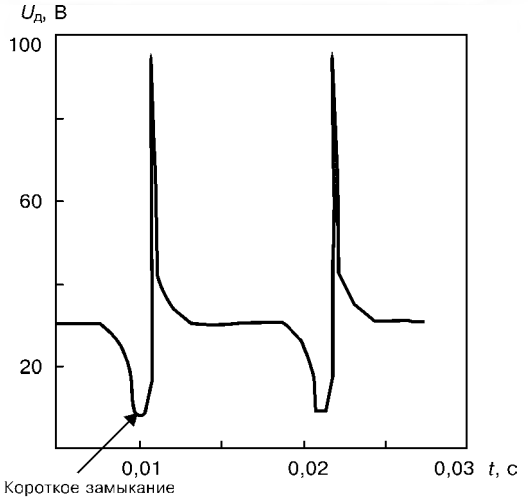


Рис. 1. Осциллограмма напряжения дугового процесса при сварке в углекислом газе

вающий их распространение для других видов и типов дуговых механизированных процессов (сварка алюминия, наплавка, резка, импульсные процессы и др.). В последнее время появилось большое количество разработок систем управления и регулирования полуавтоматов, использующих микросхемотехнику, транзисторные электроприводы с широкими диапазонами регулирования [3]. Было бы полезным осуществить питание таких конструкций от источника сварочного тока, что упрощало бы систему питания и решение задачи введения обратных связей по параметрам дугового процесса, исключало дополнительные электрические связи, идущие к блоку подачи полуавтомата. Однако такое построение электрической части полуавтомата затруднено из-за наличия в спектре напряжения дугового процесса высоковольтных составляющих, которые могут быть следствием переходных процессов при сварке с систематическими короткими замыканиями дугового промежутка, при блуждании дуги, при сварке от вращающихся источников сварочного тока — сварочных генераторов (коммутационные перенапряжения). На рис. 1 представлена одна из возможных характерных осциллограмм напряжения дугового процесса при сварке в углекислом газе электродной проволокой типа Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Видно, что импульсы напряжения могут достигать значительных значений, что для транзисторной техники является источником разрушения полупроводниковых структур.

Для решения задачи защиты систем управления и регулирования при их питании от изменяющегося в широких пределах напряжения источника сварочного тока (от напряжения холостого хода до сварочного напряжения) ранее было предложено техническое решение, описанное в [4]. Для случая с импульсными составляющими в спектре напряжения дугового процесса предлагается устройство, представленное на рис. 2. Схема включает дроссель $L1$, подключенный последовательно с диодом $V1$, который зашунтирован резистором $R1$, конденсаторов $C1$, $C2$ для накопления электроэнергии и диода $V2$. Такая схема защиты отличается от известных и описанных в технической литературе схем фильтров [5]. Это обусловлено необходимостью одновременного решения двух задач: значительного уменьшения или исключения высоких значений импульсной составляющей в спектре сварочного напряжения и обеспечения непрерывного энергоснабжения систем, которые питаются от напряжения источника сварочного тока. До начала сварочного процесса через дроссель $L1$ и диод $V1$ заряжается конденсатор $C1$, а через диод $V2$ — конденсатор $C2$. Энергоснабжение систем полуавтомата (электропривод, схемы цикла управления, сигнализация и др.) снимается с конденсатора $C2$. В процессе сварки в углекислом газе, когда происходит короткое замыкание дугового промежутка, конденсатор $C1$ начинает разряжаться через резистор $R1$ и дроссель $L1$. В последнем накапливается энергия. При исчезновении короткого замыкания (возбуждение дуги) дроссель отдает энергию в сварочную дугу. При этом ЭДС дросселя $L1$ и высоковольтных выбросов источника сварочного тока направлены встречно. Происходит частичное подавление высоковольтного выброса. Кроме того, дроссель, имея определенную индуктивность, отфильтровывает указанный выброс до того времени, пока наступит его насыщение, и индуктивность дросселя становится незначительной. Во время короткого замыкания дугового промежутка заряд конденсатора $C2$ обеспечивает питание систем полуавтомата.

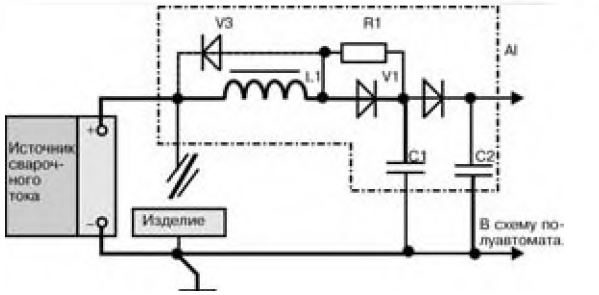


Рис. 2. Схема защиты систем управления полуавтомата при их питании от напряжения источника сварочного тока

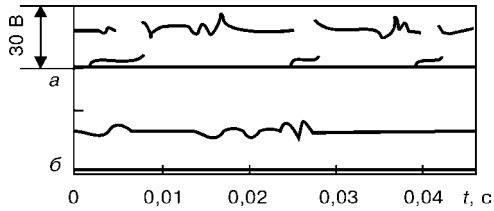


Рис. 3. Осциллограммы напряжения питания схемы полуавтомата: *а* — на дуге; *б* — после схемы защиты

Расчет параметров дросселя $L1$ (индуктивность, нагрев), конденсаторов $C1$, $C2$, резистора $R1$ проводится по методикам [5], а исходные данные соответствуют параметрам короткого замыкания, т. е. известных для дугового процесса длительностей фаз короткого замыкания и горения дуги. Амплитуда высоковольтного выброса, определяемого для данного процесса по осциллограммам напряжения сварки, должна снижаться до уровня, определяемого возможностями применяемой элементной базы. Так, например, для транзисторного электропривода, применяемого в полуавтоматах блочно-модульной конструкции типа ПШ 107В [3] этот уровень не должен превышать 60...70 В. В ряде случаев, когда для подавления высоковольтного импульса достаточно лишь фильтрующих свойств LCR-фильтра и необходимо повысить быстродействие схемы, дроссель шунтируют диодом $V3$ (штриховая на рис. 2).

Предлагаемая схема защиты достаточно проста, а ее эффективность подтверждается безотказной работой полуавтоматов типа П11П07В, где такие схемы используются для решения задачи обеспечения независимости полуавтомата от типа используемого в дуговом процессе источника сварочного тока.

В качестве примера для защиты схемы полуавтомата при ее питании от напряжения на дуге при сварке в углекислом газе с короткими замыканиями дугового промежутка, частота которых находится в пределах 50...100 Гц, а индуктивность дросселя источника сварочного тока 0,5 мГн, параметры схемы следующие: $L1$ = 4,5 мГн, $C1$ = 1000 мкФ, $C2$ = 2000 мкФ, $R1$ = 47 Ом. Характерные осциллограммы напряжения питания схемы полуавтомата без схемы защиты и с ее использованием показаны на рис. 3. При одинаковой структуре схемы защиты ее параметры будут меняться в зависимости от вида сварочного процесса и типа используемого источника сварочного тока (параметры сварочной цепи, способ получения сварочного напряжения, наличие высокого напряжения холостого хода и др.).

Схема защиты может быть конструктивно оформлена в виде отдельного блока-модуля с вариантами исполнений и выпускаться серийно, в том числе и для нужд модернизации парка полуавтоматов, которые уже находятся в эксплуатации.

1. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
2. *Лебедев В. А., Светников Б. Г.* Электропривод сварочного полуавтомата с питанием от источника сварочного тока // Автомат. сварка. — 1988. — № 12. — С. 51–55.
3. *Лебедев В. А., Пичак В. Г.* Полуавтоматы для сварки и наплавки типа ПШ 107 // Там же. — 1998. — № 7. — С. 38–42.
4. *Лебедев В. А., Иванов Г. П., Роздобудько Г. И.* Стабилизация напряжения дуги, питающего схему сварочной установки // Там же. — 1980. — № 9. — С. 75–76.

5. *Векслер Г. С.* Расчет электропитающих устройств. — Киев: Техніка, 1978. — 208 с.

Described is the possibility of developing the control and regulation systems supplied with voltage from the welding current sources. A simple and efficient design is suggested, making it possible to solve the problems of protection from high-voltage surges during the welding process and supplying of the semi-automatic device systems during the period of short-circuiting of the arc gap. The above design has been utilised in a range of semi-automatic modular-configuration devices of the type of PSh107V. It has found commercial application characterised by independence from the type of the welding current source used for the arc process.

Поступила в редакцию 19.02.2003

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

Асинхронный сварочный генератор

Для выполнения сварочных работ в полевых условиях широко используются передвижные сварочные агрегаты, состоящие из сварочного генератора и приводного двигателя внутреннего сгорания. Уже продолжительное время в качестве сварочных генераторов широко применяются так называемые вентильные генераторы постоянного тока. Последние представляют собой двухпакетные индукторные машины переменного тока повышенной частоты с выпрямительным блоком и отличаются относительной простотой и надежностью.

Однако в настоящее время такие генераторы технически и морально устарели и не совсем соответствуют современным технологическим требованиям, предъявляемым к этому оборудованию. В них не предусмотрена корректировка внешних статических и динамических характеристик в зависимости от марки применяемых электродов и условий работы. Плавное регулирование сварочного тока в вентильных генераторах ограничено выбранным весьма узким поддиапазоном.

Ряд современных технологических процессов, выполняемых в полевых условиях, требует наличия не только сварочного напряжения, но и одно-, трехфазного сетевого напряжения 220/380 В частотой 50 Гц. Это заставляет разработчиков и производителей сварочных агрегатов дополнительно соединять с приводным двигателем еще одну машину — вспомогательный генератор переменного тока. Зачастую возникает необходимость в воздушно-плазменной резке в полевых условиях. Однако решить все эти задачи на основе вентильного сварочного генератора без существенной модернизации последнего невозможно.

Специалистами ИЭС проведены необходимые исследования, разработаны основы построения асинхронных сварочных генераторов, рассчитанных на любые токи. Асинхронные сварочные генераторы имеют ряд преимуществ перед известными вентильными сварочными генераторами. Основные из них следующие:

плавное местное и дистанционное регулирование сварочного тока в одном диапазоне стандартным электрическим сигналом управления 0...10 В;

коррекция внешних статических и динамических характеристик в зависимости от марки применяемых электродов и условий работы;

наличие одно- и трехфазной сети переменного тока напряжением 220/380 В частотой 50 Гц;

пониженное переменное напряжение, например 24 или 36 В частотой 50 Гц;

возможность выполнения асинхронного сварочного генератора не только для ручной дуговой, но и для других способов сварки, например, в углекислом газе, для воздушно-плазменной резки, причем без существенных дополнительных материальных затрат.

Таким образом, асинхронные сварочные генераторы значительно превосходят традиционные вентильные генераторы по ряду технических и технологических характеристик. Оригинальный алгоритм управления сварочным током, реализованный в асинхронном сварочном генератора, обеспечивает высокое качество сварки любыми электродами, а также открывает широкие возможности для дальнейшего улучшения сварочных свойств асинхронного сварочного генератора и проявления его новых технологических преимуществ в различных видах сварки. Кроме того, выполнение разработанных асинхронных сварочных генераторов предусмотрено на базе серийных асинхронных электродвигателей соответствующей мощности, что является основой их высокой надежности, относительной простоты и невысокой стоимости. Разработаны варианты асинхронных сварочных генераторов на различные сварочные токи (от 160 до 630 А), в том числе двух- и четырехпостовые.

Техническая характеристика асинхронного сварочного генератора на 315 А

Номинальный сварочный ток при ПН = 60%, А	315
Номинальное рабочее напряжение, В	32,6
Диапазон регулирования сварочного тока, А	40...350
Напряжение холостого хода, В, не более	85
Мощность 3-фазной сети 380 В 50 Гц, кВ·А	8
Мощность однофазной сети 220 В 50 Гц, кВ·А	3
Масса, кг, не более	270

За дополнительной информацией просьба обращаться по тел: (044) 261-50-61, 227-67-46, Г. Н. Москович, И. И. Заруба

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

А. Г. Маринский (ИЭС) защитил 21 мая 2003 г. кандидатскую диссертацию на тему «Твердые градиентные покрытия и электронно-лучевая технология их получения».

В работе исследованы и описаны процессы, протекающие на разных стадиях, от нагрева электронным лучом в вакууме порошковых смесей элементов, образующих карбиды, до их испарения и осаждения на подкладках в виде покрытий. Исследована и разработана методика одновременного испарения многокомпонентных смесей с одного тигля с осаждением на подкладке сложных покрытий.

Установлено, что процесс электронно-лучевого испарения смеси компонентов с одного источника с последующей ее конденсацией в вакууме позволяет стабильно синтезировать карбидные соединения заданного состава непосредственно на подкладке при температурах подкладки 700...800 °С с образованием твердых градиентных покрытий. Скорость конденсации при этом составляет 6...15 мкм/мин.

Диссертантом определены условия и установлены закономерности осаждения карбидных покрытий с градиентом состава

по заранее заданному закону с соотношениями, свойственными и стехиометрическим. Варьирование составом и свойствами можно осуществлять как путем смены концентраций исходных компонентов, так и технологических параметров осаждения.

Исследованные покрытия можно рекомендовать для нанесения на стальной и твердосплавный инструмент, стальные изделия, работающие в условиях трения скольжения без смазки; детали, склонные при эксплуатации к эрозии и коррозии (работа при повышенных температурах и в агрессивных средах).

О. В. Колисниченко (ИЭС) защитил 21 мая 2003 г. кандидатскую диссертацию на тему «Формирование модифицированных слоев при плазменно-детонационной обработке углеродистых сталей».

В диссертации теоретически обоснованы и экспериментально исследованы процессы взаимодействия ударно-сжатого слоя плазмы с поверхностью изделия в условиях плазменно-дуговой обработки (ПДО). На основе полученных результатов установлено, что при ПДО изделий из углеродистых сталей можно осуществлять комплексную обработку поверхностных слоев за счет высокоскоростного термического влияния и процессов легирования.

В работе впервые проведены исследования амплитудно-временных характеристик тока газового разряда в условиях ПДО. Определена продолжительность взаимодействия плазмы с обрабатываемой поверхностью. Показано, что направление прохождения тока между центральным электродом и изделием зависит от емкости конденсаторной батареи разрядного контура. Показано влияние потенциала изделия на процесс нагрева при ПДО.

В результате экспериментов поглощающими покрытиями установлено, что вклад плазменной энергии при теплопереносе в условиях ПДО незначителен и составляет менее 1 % общего теплового потока.

Производственная проверка эффективности ПДО выполнена на ОАО «Череповецкий сталепрокатный завод» (РФ). Стойкость инструмента при этом повысилась в 2...4 раза.

УДК 621.79(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Устройство для кислородно-копьевой резки, отличающееся тем, что копье-держатель выполнено в виде быстроразъемной муфты, внутри которой расположен эластичный трубчатый уплотнительный элемент, закрепленный установленными на верхнем и нижнем краях муфты штуцерами, при этом полость между корпусом муфты и эластичным трубчатым уплотнительным элементом соединена с запорным устройством и копьем. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2198077. В. А. Тепловиков, В. Г. Ордин, А. М. Лебедев, М. И. Трифонова (ОАО «Северсталь») [4].

Устройство для электродуговой сварки, отличающееся тем, что магнитопровод трансформатора выполнен замкнутым, первый участок магнитопровода выполнен с сечением, обеспечивающим его насыщение на холостом ходу, и на нем расположена вторичная обмотка, второй участок выполнен с сечением, обеспечивающим ненасыщение на всех режимах работы, и на нем — первичная обмотка, дроссель имеет магнитопровод и основную обмотку на его первом участке, включенную последовательно согласно с первичной обмоткой трансформатора и охватывающую второй участок магнитопровода трансформатора, первичная обмотка которого охватывает первый участок магнитопровода дросселя. Патент РФ 2198078. А. П. Буденный [4].

Способ управления механизмом импульсной подачи сварочной проволоки, отличающийся тем, что систему управления выполняют адаптивной, в качестве источника управляющего сигнала используют датчик напряжения сварочной дуги, а импульс подачи проволоки производят в момент образования капли расплавленного металла, размер которой регулируют длиной сварочной дуги, и частоту следования импульсов подачи проволоки задают скоростью ее плавления. Патент РФ 2198079. О. Г. Брунов, В. Т. Федько, С. С. Киянов (ОАО «Юрчинский машзавод») [4].

Механизм импульсной подачи сварочной проволоки, отличающийся тем, что возвратный упругий элемент сердечника корпуса выполнен в виде толкающей и демпфирующей пружин сжатия, установленных по обе стороны гаек, опирающихся в корпус и упор соответственно, при этом упор выполнен в виде диска и прикреплен к корпусу, а усилие толкающей пружины больше усилия демпфирующей пружины. Патент РФ 2198080. О. Г. Брунов, В. Т. Федько (То же) [4].

Способ изготовления сварных трубопроводов и/или фитингов, отличающийся тем, что сварку ведут с использованием присадочных прутков или проволоки, изготовленных механическим путем из трубных заготовок из высокопрочного чугуна, в процессе термообработки осуществляют замедленное охлаждение сварного шва со скоростью не более 150 °С/мин, причем присадочный пруток или проволоку берут с площадью поперечного сечения, равной $(0,05...1,0)S^2$, мм^2, где S — толщина стенки трубы, мм. Патент РФ 2198081. В. В. Ветер, М. И. Самойлов, А. А. Бабанов, В. А. Носов, Г. А. Белкин (ООО НПП «Валок-Чугун») [4].

Станок для двухсторонней полировки дисков, отличающийся тем, что суппорт станка выполнен в виде двух частей, соединенных между собой крестообразной пружинной подвеской и механизмом для изменения положения этих частей относительно друг друга, при этом станок снабжен выходной оптической системой лазера с рассеивающей линзой и конденсором, излучателями, расположенными на каждой части суппорта и соединенными с указанной системой посредством гибкого световода, разделенного на два рукава и установленного с возможностью взаимодействия торцом с конденсором, а также датчиками контроля положения излучателей. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2198082. Ю. М. Передрей (Пензенский технологический институт) [4].

Сплав для электродуговой наплавки подслоя, отличающийся тем, что он дополнительно содержит молибден, ванадий, титан и медь при следующем соотношении компонентов, мас. %: 0,2...0,25 углерода; 0,4...0,7 кремния; 0,6...0,8 марганца; 0,8...1 хрома; 0,8...1,2 никеля; 0,6...0,8 молибдена; 0,2...0,6 ванадия; 0,1...0,25 меди; 0,01...0,02 титана; менее 0,05 серы; менее 0,08 фосфора; остальное железо. Патент РФ 2198083. И. С. Сырычев, А. Ф. Пименов, В. П. Меринов (ООО «Ресурс-СП») [4].

Способ подбора параметров устройств газопламенной сварки и резки металлов, отличающийся тем, что подбор диаметров каналов и скоростей подачи горючей смеси осуществляют с помощью диаграммы устойчивого горения пламени. Приведены и другие отличительные признаки. Ю. К. Родин, Г. Л. Хачатрян [4].

Сегмент алмазного режущего инструмента, содержащий паяемую и непаяемую поверхности и расположенный на его поверхности припой, отличающийся тем, что весь припой расположен на непаяемой поверхности сегмента. Патент РФ 2198770. И. Т. Зигашин (ООО «Сплитстоун») [5].

Способ сварки металла в среде защитного газа на основе аргона расходуемым сварочным электродом, отличающийся тем, что получают сварное соединений, обладающее пределом прочности на разрыв более 900 МПа и металл сварного шва с температурой перехода из пластичного в хрупкое состояние

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях РФ «Изобретения. Полезные модели», № 4–9, 2003 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).

ниже −73 °С. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2198771. Д. П. Фэйрчайльд (Эксонмобил Агстрим Рессерч компани, США) [5].

Плазмотрон, отличающийся тем, что он дополнительно снабжен двумя изоляционными втулками, установленными на внешней стороне корпуса на противоположных концах, на которые устанавливается кожух с закрепленным на нем плазмообразующим соплом и выполненными в нем каналами для подвода защитного газа и отвода охлаждающей жидкости. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2198772. Ю. Д. Щицын, В. Ю. Щицын (Пермский ГТУ) [5].

Активирующий флюс для электродуговой сварки в среде защитных газов, содержащий гексафторалюминат лития, диоксид титана и хлорид кальция, отличающийся тем, что в него дополнительно введен оксид алюминия Al_2O_3, а компоненты взяты в следующем соотношении, вес. %: 20...30 гексафторалюминат лития; 20...30 диоксида титана; 10...30 оксида алюминия; 20...30 хлорида кальция. Патент РФ 2198773. С. Г. Паршин, Ю. В. Казаков, К. Б. Корягин (ЗАО «Авиационные технологии») [5].

Состав электродного покрытия, отличающийся тем, что он дополнительно содержит доломит, туфогенный песок, целлюлозу и кальцинированную соду при следующем соотношении компонентов, мас. %: 50...55 доломита; 12...18 плавикового шпата; 8...10 туфогенного песка; 3...8 ферросилиция; 4...6 ферромарганца; 8...12 ферротитана; 0.5...1 кальцинированной соды; 0,5...1 целлюлозы. Патент РФ 2198774. К. Д. Басиев, Г. В. Рухлин, В. Г. Лозовой и др. (Северо-Кавказский технологический университет) [5].

Компонент покрытий сварочных электродов. Показано применение туфогенного песка вулканического происхождения в качестве пластифицирующего и стабилизирующего компонента покрытий сварочных электродов. Патент РФ 2198775. К. Д. Басиев, В. Г. Лозовой, А. Л. Богаевский и др. (То же) [5].

Электрод для сварки низкоуглеродистых сталей, отличающийся тем, что покрытие дополнительно содержит тальк и ферротитан при следующем соотношении компонентов, мас. %: 44...53 концентрата ильменитового; 6...8 мрамора; 10...12 полевого шпата; 10...14 силикомарганца; 1...10 железного порошка; 1...2 целлюлозы; 10...12 талька; 2...5 ферротитана; 22...28 % к массе сухой шихты, связующего — силиката калиево-натриевого, при этом коэффициент покрытия составляет 35...40 %. Патент РФ 2199424. А. В. Тряхин, А. С. Табачников, И. А. Пряхин и др. (ОАО «Артемовский машзавод «Велкон») [6].

Резцовая головка для удаления внутреннего грата в электросварных трубах, отличающаяся тем, что регулируемый упор выполнен в виде регулировочного винта и цилиндра со штоком, соединенного с трубопроводом, при этом шток установлен на упругом элементе с возможностью взаимодействия с рычагом. Патент РФ 2199425. К. И. Колесников, А. М. Козловский, В. Р. Федорин и др. (ОАО «Урал ЛУК трубмаш») [6].

Флюс для сварки и наплавки, содержащий оксиды кальция, магния, алюминия, фторид кальция, оксиды калия, натрия, хрома, силикокальций, оксиды железа и кремния, отличающийся тем, что компоненты взяты в следующем соотношении, мас. %: 4...6 CaO; 20...24 MgO; 18...22 Al_2O_3; 15...20 CaF_2; 5...7 K_2O. Na_2O; 0.5...2 Cr_2O_3; 0.1...1 Si-Ca; 1.5...2 Fe_2O_3; остальное SiO_2. Патент РФ 2200078. И. С. Сарычев, А. Ф. Пименов, В. П. Меринов (ООО «Ресурс-СП») [7].

Способ электроконтактной наплавки поверхностей деталей с помощью роликов, отличающийся тем, что наплавку производят при подаче порошковой присадки совместно с проволокой или лентой через вентиль из бункера. Патент РФ 2200650. В. М. Казаков [8].

Способ сварки труб из алюминиевых сплавов с трубами из нержавеющей стали, отличающийся тем, что промежуточный слой на конце нержавеющей трубы изготавливают в виде трубчатого переходника путем соединения втулки из титанового сплава со втулкой из нержавеющей стали посредством диффузионной сварки, а затем втулку из нержавеющей стали соединяют с трубой из нержавеющей стали сваркой плавлением, после чего втулку из титанового сплава соединяют с трубой из алюминиевого сплава сваркопайкой, при этом соединение сваркопайкой размещают от соединения диффузионной сваркой на расстоянии, обеспечивающем отсутствие повторного нагрева соединения диффузионной сваркой. Патент РФ 2200651. В. П. Гордо, В. Н. Елкин, Г. Н. Шевелев (ФГУП НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежаля) [8].

Горелка для резки металлического материала и обработки поверхности, отличающаяся тем, что она снабжена смесительным элементом и отделяющим форкамеру от камеры сгорания промежуточным соплом, выполненным с радиальными отверстиями для подачи основного расхода окислителя в камеру сгорания, наружная поверхность которого состоит из сопряженных конической и цилиндрической поверхностей. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2201319. С. С. Куршин, В. И. Лапицкий, В. И. Новиков, В. И. Томак (НИИ энергетического машиностроения МВТУ им. Н. Э. Баумана) [9].

Способ аргонодуговой сварки титана и его сплавов, при котором присадочную или электродную проволоку предварительно нагревают, отличающийся тем, что нагрев осуществляют в среде азота до температуры, достаточной для образования на поверхности проволоки защитной пленки из нитрида титана. Патент РФ 2201320. Б. И. Долотов, В. И. Меркулов, Б. Н. Марьин и др. (ФГУП «Комсомольское-на-Амуре АПО им. Ю. А. Гагарина») [9].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

ZVÁRANIE SVÁROVANÍ

(Словакия), 2001. — Vol. 50, 9–10 (словац., чеш.)

Filipensky J. Применение металлических, металлокерамических и керамических покрытий, нанесенных с помощью технологий термического напыления, с. 191–194.

Wilden J., Wanka A., Schreiber F. Пригодность порошковых проволок для нанесения защитных покрытий, стойких к коррозии и износу, с. 194–203.

Brandt O., Siegmann S. Разработка метода высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) и области применения покрытий, с. 204–207.

Bach Fr. W., Josefiak L. A. Применение теплоизоляционных покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления, с. 208–210.

Nowotny St., Zieris R., Naumann T., Eckart G. Комбинированное плазменно-дуговое напыление с использованием лазера для получения плотных покрытий с высоким пределом прочности на отрыв, с. 211–212.

Wielage B., Wilden J., Schnick T. Получение покрытий SiC с помощью высокоскоростного газопламенного напыления, с. 213–217.

Bultmann F., Hartmann S. Свойства термических покрытий, содержащих полимерные материалы ПТФЭ и сополимера этилена и тетрафторэтилена, с. 217–220.

Borck V., Henne R. Диагностика и оптимизация покрытий, полученных плазменно-дуговым процессом, с. 221–224.

Zuravecka E., Comaj M., Enzl R., Suchanek J. Абразивный износ термически напыленных покрытий, с. 224–228.

* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 227-07-77, НТБ ИЭС).

(Словакия), 2001. — Vol. 50, № 11–12 (словац., чеш.)

Kravarikova H., Kovacocy P. Экспериментальная проверка численного моделирования ЗТВ, с. 240–244.

Taraba B., Kolenak R., Turna M. Компьютерное моделирование рабочих параметров паяных соединений между керамикой и металлом, с. 245–250.

Kolenak R., Zubor P. Исследование поверхности раздела паяного металлокерамического соединения, с. 251–253.

Maronek M., Hudakova M. Импульсно-дуговая сварка высокопрочных сталей, с. 253–257.

Blaskovits P., Sukubova I., Farkas T. et al. Наплавочные материалы, стойкие к абразивному и эрозионному износу, с. 258–261.

Kolenak R., Turna M. Альтернативные бессвинцовые припои, с. 561–264.

Holesa M. Контактная сварка титановых решеток на оборудовании VUZ-RAN/L 125, с. 265–266.

(Словакия), 2002. — Vol. 51, № 1–2 (словац., чеш.)

Misicko R., Pesek L. Структура и свойства стальных сварных панелей, сваренных лазером и применяемых для автомобильных кузовов, с. 3–6.

Tusek J. Заполнение зазоров при сварке с помощью нескольких электродных проволок, с. 7–8.

Janovec J., Martines J., Kubenka M., Sveidler Z. Сварка сталей после термомеханической обработки типа Weldox 420 и Hardox 500 с помощью порошковой проволоки, с. 9–13.

Sejc P., Michnik I. Оценка газов, выбранных для термической кислородной резки сталей, с. 13–17.

Kalna K. Выбор присадочных материалов для сварки стальных конструкций — влияние швов, имеющих свойства, отличающиеся от основного металла, на прочность конструкций при разрушении, с. 18–23.

Janota M. Стандарт «Расчет сварных конструкций» и выбор расходуемых материалов, с. 24–27.

Juhas P. Словацкие и новые европейские стандарты для расчета и изготовления стальных конструкций, с. 27–33.

(Словакия), 2002. — Vol. 51, № 3–4 (словац., чеш.)

Hrivnak I. Дуплексные нержавеющие стали и их сварка, с. 49–54.

Kolenic F., Fodrek P., Blazicek P., Paksi L. Электронно-лучевая сварка компонентов из алюминиевых сплавов для автомобильной промышленности, с. 55–59.

Koukal J., Mohyla P. Изменения механических свойств и микроструктуры сварных соединений сталей 0,5 % Cr–0,5 % Mo–0,3 % V после длительной выдержки при высоких температурах в диапазоне ниже текучести, с. 60–66.

Gondar E. Оценка возможности соединения полиэтилена Bralen RB 03-23 с помощью сварки и склеивания, с. 67–70.

Sejc P. Сварка МАГ стальных пластин с коррозионностойкими покрытиями на основе цинка, с. 71–73.

Foldyna V., Hlavaty I., Kubel Z. Повторная наплавка высокоуглеродистых сталей без подогрева, с. 74–77.

Fajdek V., Jajcay A. Правка газовым пламенем — оптимальная технология устранения напряжений, с. 78–83.

(Словакия), 2002. — Vol. 51, № 5–6 (словац., чеш.)

Holzmann M., Jurasek L., Dlouhy I. Применение понятия эталонной кривой для оценки влияния скорости нагрузки на особенности разрушения сталей, с. 93–97.

Vlach B., Holzmann M. Оценка ударной вязкости ферритного чугуна с шаровидным графитом в отливках с разной толщиной стенки, с. 97–102.

Lezdik V., Sobota M., Durmis I. Технология пайки медных труб, с. 102–104.

Hlavaty I., Kubel Z. Повторная наплавка рельсов с помощью дуговой сварки под флюсом без предварительного подогрева, с. 105–109.

Pobol I. L., Kajdalov A. A. Технология поверхностного электронно-лучевого упрочнения первого и второго поколений, с. 109–110.

Brozek M. Сопротивление абразивному износу выбранных слоев наплавленного металла швов на фирме ESAB, с. 113–116.

Halla P. Влияние защитного газа при сварке алюминия и его сплавов, с. 116–117.

(Словакия), 2002. — Vol. 51, № 7–8 (словац., чеш.)

Hobbacher A. Развитие проектирования и изготовления стальных конструкций, с. 137–149.

Shiga C. Решение задач, связанных со сваркой высокопрочных сталей, с. 149–153.

Sobotka J., Janecek M., Cervinka P., Furmanek J. Технологии сварки и последующей термообработки толстолистовых сталей 15 $NiCuMoNb_5$, с. 154–159.

Ruza V., Kosnac L., Adamickova M. Пригодность к пайке твердым/мягким припоями алюминиевых материалов с использованием флюса, с. 160–163.

Pavlik K. Тривиальная технология на практике — седло клапана для батарей водоснабжения, с. 164–166.

(Словакия), 2002. — Vol. 51, № 9–10 (словац., чеш.)

Gnirss G. Сварка и термообработка соединений разнородных материалов, с. 185–196.

Kalna K. Новый мост в Братиславе эксплуатируется уже 30 лет, с. 197–199.

Sobotka J., Trejtnar J. Выбор расходуемых материалов для ручной дуговой сварки хромомолибденовых стойких к ползучести сталей, с. 200–204.

Kroupa V. Исследование влияния меди и сопутствующих элементов на свойства сталей и их сварных соединений, с. 205–208.

Janovec J., Hurych J. Коррозия сварных соединений в атмосферных условиях, с. 208–213.

(Германия), 2002. — № 5 (англ. яз.)

Stauffer H. Отвод сварочных дымов из горелки при сварке промышленными роботами, с. 238–240.

Sitte G. Контактная точечная пайка — альтернатива контактной точечной сварки, с. 242–245.

Appel L., Serve M., Baum L. et al. Высококачественное и экономичное покрытие, полученное с помощью двухдуговой сварки металлическим плавящимся электродом в среде защитного газа, с. 246, 248, 250–253.

Wielage B., Wilden J., Schnick T. Нанесение металлокерамических покрытий на основе SiC с помощью высокоскоростного газопламенного напыления, с. 254–259.

Anagreh N., Dorn L. Повышение прочности сцепления клеевых соединений, состоящих из алюминиевых листов и термопластичного сополимера акрилонитоила, стирола и акриловых эфиров/поликарбоната благодаря обработке поверхности плазмой низкого давления и другим видам обработки, с. 260–266.

Adamiec P., Dziubinski J. Водородное растрескивание стальных сварных труб. Ч. 2. Влияние водорода и растягивающих напряжений на механические характеристики, с. 266–270.

Инновации в области сварочных технологий в 2001 году, с. 271–275.

(Германия), 2002. — № 6 (англ. яз.)

Vollrath K. Различные возможности лазерной резки при обработке листового материала, с. 281–283.

Haferkamp H., Goede M. Быстрое отверждение по глубине клеевых соединений пластмасс с помощью лазерного излучения пластмасс, с. 288, 290–291.

Kaierle S., Kreutz E.W., Poprawe R. Автономная производственная ячейка для лазерной сварки, с. 292–293.

Dilthey U., Goumeniouk A. Формирование луча при электронно-лучевой сварке — измерения и математическая модель, с. 294–299.

Rehfeldt D., Polte T., Franzbecker H. et al. Возможности применения способа дуговой сварки в среде защитного газа с ленточным плавящимся электродом, с. 299–303.

Janssen-Timmen R., Moos W. Сварка и резка в 2001 году удерживает свои позиции, с. 303–312.

Staniek G., Hilger W., Donne C. Ультразвуковые испытания алюминиевых сплавов, выполненных процессом сварки трением с перемешиванием, с. 313–322.

WELDING Journal *(США), 2002. — Vol. 81, № 8 (англ. яз.)*

Johnsen M. R., Cullison A. Что нового в производстве сварочных установок, с. 26–29.

Boillot J.-P., Noruk J. Преимущества лазерной системы видения при роботизированной дуговой сварке, с. 32–34.

Kireta A. Рабочий конец электрода для пайки медных соединительных муфт низко- и высокотемпературными припоями, с. 36–42.

WELDING RESEARCH SUPPLEMENT

Jacobson D. M., Sangha S. P. S. Gales A. et al. Разработка новых бессеребряных высокотемпературных припоев для пайки трубчатых соединений, с. 149–155.

Rowe M. D., Liu S., Reynolds T. J. Влияние добавок ферросплавов и глубины на качество швов, выполненных непосредственно под водой, с. 156–166.

Elmer J.W., Terrill P., Brasher D., Butler D. Соединение обедненного урана с высокопрочным алюминием с использованием ниобиевой прослойки, наплавленной взрывом, с. 167–173.

Bang K.-S., Kim W.-Y. Оценка и прогнозирование разупрочнения ЗТВ катаных сталей с контролем термомеханических свойств и сталей ускоренного охлаждения, с. 174–179.

(США), 2002. — Vol. 81, № 9 (англ. яз.)

Murray R. G. Защитный газ и закаленно-отпущенная сталь QIN для сварки корпуса подводной лодки класса Astute, с. 33–36.

Myers D. Металлические порошковые проволоки — преимущества и недостатки, с. 39–42.

Vaidya V. V. Смеси защитного газа для полуавтоматической сварки, с. 43–48.

Moyer N. Достижения в области защитных газов, с. 51–52.

Carlucci P. Значение систем подачи газа в CO_2-лазерах, с. 55–56.

Collins S. Сварка палубной лебедки, с. 95–99.

Безопасное обращение со сжатыми газами, с. 109–111.

Mendez P. F., Rice C. S., Brown S. B. Соединение с использованием полутвердых металлов, с. 181–187.

Mossman M. M., Lippold J. C. Испытания по свариваемости разнородных сочетаний алюминиевых сплавов серий 5000 и 6000, с. 188–194.

Cheien C.-S., Kannatey-Asibu E. Исследование систем контроля контактной точечной сварки, с. 195–199.

VTE *(Германия), 2002. — Heft 4, August (нем. яз.)*

Stuttgart V. HDI — технология изготовления печатных плат. Состояние и перспективы, с. 170–174.

Hoffmann H. Практические условия применения HDI, с. 175–180.

Kohler R., Ganz B. J. HDI-печатные платы. Производственные технологии и материалы, с. 180–186.

(Германия), 2002. — Heft 5, Oktober (нем. яз.)

Pusch R., Kuster U. Оптическая техника соединения в системах телекоммуникации, с. 222–227.

Выставка «Электроника 2002». Продукты и услуги, с. 248–256.

О работе Центра техники соединения в электронике, с. 257.

НОВАЯ КНИГА

Косторнов А. Г. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. В 2 т. — Киев: Наук. думка, 2002. — Т. 1. — 569 с.

Вышел в свет первый том двухтомной монографии известного специалиста в области получения и изучения пористых материалов — А. Г. Косторного. В этом фундаментальном труде рассмотрены процессы получения металлов и сплавов в дисперсном состоянии, формирования из них изделий без приложения давления и с помощью обработки давлением, высокотемпературной обработки пористых объектов в твердой и жидкой фазах, в том числе в условиях воздействия ультразвуковых колебаний, электрических и магнитных полей, а также посредством горячего прессования, экструзии и штамповки. Проанализированы особенности рекристаллизации при температурной обработке пористых тел, а также спекания материалов из ультрадисперсных частиц и волокон.

Монография состоит из трех глав.

Материал монографии представлен с позиций единства технологических особенностей, структуры и свойств металлических композиций при переходе от дисперсного состояния исходного материала к компактному или заданному пористому.

При изложении материала автором использованы результаты собственных многолетних исследований в области металлических дисперсных систем, а также отечественных и зарубежных авторов, опубликованные на протяжении последних сорока с лишним лет. Обширная библиография (свыше 600 источников) придает монографии фундаментально-справочный характер.

Предназначена для специалистов в области материаловедения, научных сотрудников, преподавателей, докторов, аспирантов и студентов вузов.