



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона,
МА «Сварка»

**ИЗДАТЕЛЬ:
МА «Сварка»**

Адрес редакции:
03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>Махненко В. И., Маркашова Л. И., Махненко О. В., Берд-никова Е. Н., Шекера В. М., Зубченко А. С.</i> Рост коррозионных трещин в конструкционной стали 10ГН2МФА	3
<i>Позняков В. Д., Жданов С. Л., Максименко А. А.</i> Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S335 J2)	7
<i>Костин В. А.</i> Математическое описание углеродного эквивалента как критерия оценки свариваемости сталей	12
<i>Гайворонский А. А., Позняков В. Д., Маркашова Л. И., Берд-никова Е. Н., Клапатюк А. В., Алексеенко Т. А., Шишкевич А. С.</i> Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства восстановленных железнодорожных колес	18
<i>Хорунов В. Ф., Воронов В. В.</i> Новая система припоев для пайки титановых сплавов	25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Интервью с генеральным директором ОАО «Турбоатом» <i>В. Г. Субботиным</i>	29
<i>Лащенко Г. И.</i> Комбинированные технологии сварки плавлением (Обзор)	32
<i>Царюк А. К., Моравецкий С. И., Скульский В. Ю., Гришин Н. Н., Вавилов А. В., Кантор А. Г., Гринченко Е. Д.</i> Создание сварнокованого комбинированного ротора среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт	39
<i>Кучук-Яценко В. С., Наконечный А. А., Гавриш В. С., Чернобай С. В.</i> Технология рельефной сварки деталей больших толщин с Т-образными соединениями	45
<i>Ющенко К. А., Лычко И. И., Козулин С. М., Фомакин А. А., Дакал В. А., Оганисян Е. С.</i> Портативный аппарат для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком	48
<i>Левченко О. Г., Левчук В. К., Гончарова О. Н.</i> Пространственное распределение магнитного поля и его минимизация при контактной точечной сварке	50

ХРОНИКА

XI Международная конференция-выставка «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов «Коррозия-2012»	56
Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»	58
Наши поздравления (Ю. С. Борисову, В. Ф. Хорунову, А. И. Гедровичу)	60
ИНФОРМАЦИЯ	63

Avtomaticheskaya Svarka

№ 8 (712)
August 2012
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushchina
Electron galley:

I. R. Naumova, A. I. Sulima
State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

This publication and each of the articles
contained here in are protected
by copyright

Permission to reproduce material
contained in this journal must be obtained
in writing from the Publisher

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Makhnenko V. I., Markashova L. I., Makhnenko O. V., Berdnikova E. N., Shekera V. M., Zubchenko A. S.</i> Growth of corrosion cracks in structural steel 10GN2MFA	3
<i>Poznyakov V. D., Zhdanov S. L., Maksimenko A. A.</i> Structure and properties of welded joints on steel S390 (S335 J2)	7
<i>Kostin V. A.</i> Mathematical description of carbon equivalent as a criterion for evaluation of weldability of steels	12
<i>Gaivoronsky A. A., Poznyakov V. D., Markashova L. I., Berdnikova E. N., Klapatyuk A. V., Alekseenko T. A., Shishkevich A. S.</i> Effect of composition of deposited metal on structure and mechanical properties of repaired railway wheels	18
<i>Khorunov V. F., Voronov V. V.</i> New system of filler metals for brazing of titanium alloys	25

INDUSTRIAL

Interview with V. G. Subbotin, Director General of «Turboatom»	29
<i>Lashchenko G. I.</i> Combined technologies for fusion welding (Review)	32
<i>Tsaryuk A. K., Moravetsky S. I., Skulsky V. Yu., Grishin N. N., Vavilov A. V., Kantor A. G., Grinchenko E. D.</i> Manufacture of the combined welded-forged medium-pressure rotor for 325 mW steam turbine	39
<i>Kuchuk-Yatsenko V. S., Nakonechny A. A., Gavrish V. S., Chernobaj S. V.</i> Technology for T-shaped joint projection welding of thick parts	45
<i>Yushchenko K. A., Lychko I. I., Kozulin S. M., Fomakin A. A., Dakal V. A., Oganisyan E. S.</i> Portable device for consumable-nozzle electroslag welding	48
<i>Levchenko O. G., Levchuk V. K., Goncharova O. N.</i> Spatial distribution of magnetic field and its minimisation in resistance spot welding	50

NEWS

XI International Conference-Exhibition «Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Structural Materials «Corrosion-2012»	56
International Scientific-and-Technical Conference «Surface Engineering and Renovation of Parts»	58
Our congratulations (Yu. S. Borisov, V. F. Khorunov, A. I. Gerdovich)	60
INFORMATION	63

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.



УДК 621.791.669.14/.15

РОСТ КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 10ГН2МФА

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Л. И. МАРКАШОВА**, **О. В. МАХНЕНКО**, доктора техн. наук,
Е. Н. БЕРДНИКОВА, **В. М. ШЕКЕРА**, кандидаты техн. наук
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. С. ЗУБЧЕНКО, д-р техн. наук («Гидропресс», г. Подольск, РФ)

Описана взаимосвязь между скоростью роста коррозионных трещин и коэффициентом интенсивности напряжений на основе диаграммы статической коррозионной трещиностойкости. Подтверждена основная рабочая гипотеза о дискретности роста трещины конструкционной стали.

Ключевые слова: сварные конструкции, парогенератор АЭС, диаграмма статической коррозионной трещиностойкости, конструкционная сталь, коррозионные трещины, электронная микроскопия, коэффициент интенсивности напряжений, водородное охрупчивание

Коррозионные трещины являются одними из наиболее опасных дефектов, которые образуются в современных стальных конструкциях длительного срока эксплуатации. В целом ряде случаев процесс зарождения и формирования таких дефектов трудно поддается определению, поэтому в зависимости от достаточно малых изменений конкретных факторов длительность этого процесса формирования коррозионных трещин может существенно меняться во времени.

В этих условиях имеет большое значение своевременное обнаружение сформированной коррозионной трещины и кинетика ее роста во времени при эксплуатации соответствующей конструкции. Последнее очень часто является определяющим и требует соответствующего накопления и обобщения экспериментальных данных. Отмеченному и посвящена настоящая работа.

Рассматриваемое в данной работе сварное соединение № 111 (рис. 1) в парогенераторах ПГ-1000 современных атомных энергетических блоков ВВЭР-1000 является в этом отношении проблемным, поскольку каждый блок имеет в составе четыре парогенератора. В настоящее время в Украине эксплуатируется 13 таких блоков на четырех АЭС с длительностью эксплуатации в пределах от 8 до 28 лет.

Первые дефекты в сварных соединениях № 111 на украинских АЭС были обнаружены в 2003 г. на Южно-Украинской АЭС. До этого такие трещины в соединении № 111 были обнаружены на Нововоронежской и Калининской АЭС в России примерно после 20-летней эксплуатации. Первые обнаруженные трещины в основном были продольные, т. е. вдоль сварного шва и достаточно

больших размеров как по окружности, так и по глубине [1], что связано с трудностями их обнаружения методами неразрушающего контроля. Для этих целей была разработана специальная методика ультразвукового контроля [2], позволявшая обнаруживать такие дефекты на ранних стадиях их формирования. Поскольку процедура ремонта обнаруженных на ранней стадии формирования рассматриваемых дефектов достаточно длительная и связана с остановкой всего блока, возникла необходимость в прогнозных оценках ресурса безопасной эксплуатации парогенератора с обнаруженными трещинообразными дефектами в сварном соединении № 111, как «горячего» коллектора (соединение № 111-1), так и «холодного»

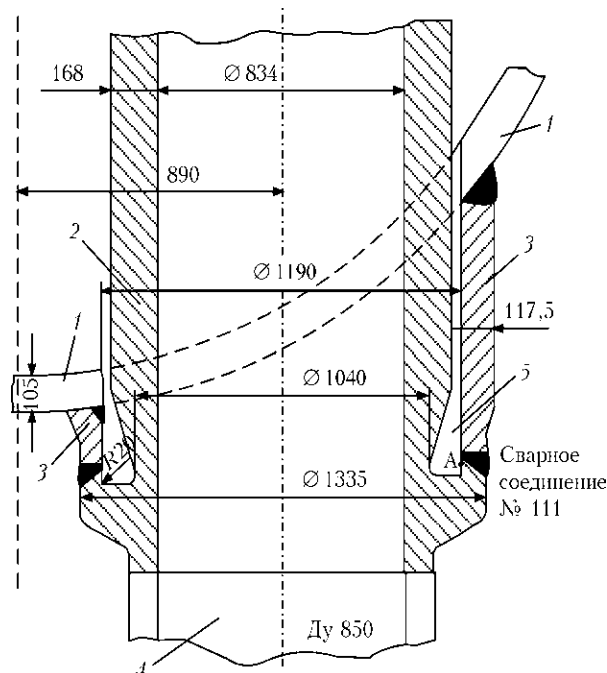


Рис. 1. Схема узла соединения коллектора с корпусом парогенератора с помощью патрубка: 1 — корпус парогенератора; 2 — коллектор; 3 — патрубок; 4 — главный циркуляционный трубопровод; 5 — карман

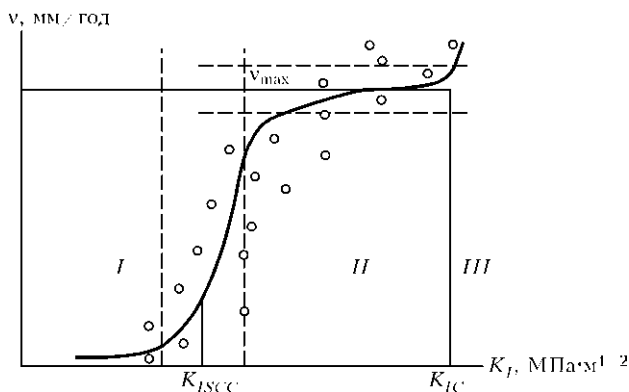


Рис. 2. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости (обозначения см. в тексте)

(соединение № 111-2) с патрубками корпуса парогенератора (рис. 1).

В основу таких прогнозов положено знание диаграммы статической коррозионной трещиностойкости (ДСКТ) (рис. 2). Такие диаграммы разрабатываются для конкретных материалов (сталей) и агрессивных сред в зависимости от силового фактора K_I — коэффициента интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва. ДСКТ (рис. 2) содержит три зоны [3]. В I зоне ($0 < K_I < K_{ISCC}$), где механизмом коррозионного роста является анодное растворение, роль силового фактора невелика. Во II зоне ($K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$) — зоне водородного охрупчивания — скорость роста коррозионной трещины значительно выше. Верхняя граница этой зоны $K_I = K_{IC}$ соответствует III зоне, где трещина растет спонтанно.

Применительно к сварным соединениям № 111 из высокопрочной низколегированной стали 10ГН2МФА достаточно надежных ДСКТ, связывающих скорость роста $v = f(K_I)$, пока нет, поскольку состав агрессивной среды в кармане 5 на соединения № 111 зависит от многих обстоятельств и меняется в зависимости от длительности эксплуатации парогенератора. В начальной стадии эксплуатации это питательная вода второго контура при температуре около 300 °С и давлении 6,4 МПа. В такой среде сталь 10ГН2МФА, из которой изготовлен (см. рис. 1) корпус парогенератора I, «холодный» и «горячий» коллекторы



Рис. 3. Внешний вид установки для определения параметров ДСКТ

2, патрубок 3, практически не склонна к образованию коррозионных трещин. Однако при длительной эксплуатации, благодаря застойным явлениям в кармане 5, меняется состав среды, контактирующей с поверхностью односторонних сварных соединений. Создаются условия для язвенной многоочаговой поверхностной коррозии вдоль окружного сварного шва, которая затем переходит в I стадию коррозионной трещины (рис. 2). Очевидно, что неконтролируемое состояние поверхности в кармане в зоне одностороннего сварного шва оказывает немаловажное влияние на время перехода от язвенной коррозии к формированию коррозионной трещины. При этом вполне возможно, что промежуточным состоянием является образование канавочного коррозионного дефекта вдоль сварного шва, из которого затем образуется окружная трещина.

Повышение тщательности контроля зоны сварных соединений № 111 на АЭС в период ежегодных планово-предупредительных работ (ППР) способствует раннему обнаружению рассматриваемых дефектов. Однако прогнозные оценки их поведения оказываются слишком консервативными, что связано с консерватизмом используемых

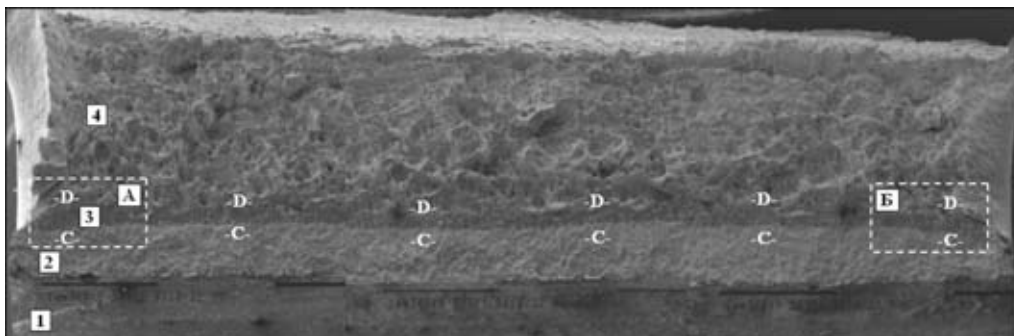


Рис. 4. Панорама излома образца № 1 (обозначения см. в тексте)

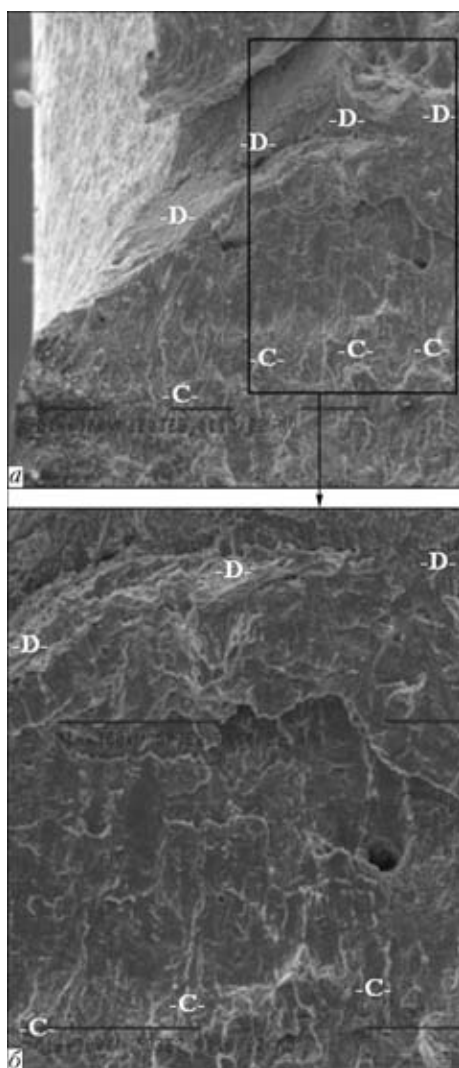


Рис. 5. Фрагменты фрактографии и зона А (см. рис. 4): а — $\times 203$; б — $\times 503$

приближенных данных относительно скорости роста размеров трещины $v = f(K_I)$.

В отсутствие соответствующих ДСКТ в прогнозах использовали литературные данные для близких корпусных сталей и аналогичных эксплуатационных условий [4], хорошо согласующихся с расчетными скоростями $v = f(K_I)$, полученными при решении обратной задачи по результатам измерений на Южно-Украинской АЭС в 2003 г., согласно которым [1]

$$\begin{aligned} v &= 0 \text{ при } K_I < K_{ISCC} \\ v &\approx 44 \text{ мм/год при } K_I > K_{ISCC} \\ K_{ISCC} &\approx 10 \dots 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}. \end{aligned}$$

Такое приближение для ДСКТ достаточно хорошо описывает II стадию (см. рис. 2) при глубинах дефекта более 30...40 мм и весьма консервативно при глубине менее 25 мм.

Существенные расхождения прогнозных данных с результатами контрольных измерений при последующих ППР, как, например, для результатов роста, обнаруженных в 2009 г. на парогенераторах третьего блока Ривненской АЭС в сварных швах соединений № 111-2 трещинообразных дефектах, габаритные размеры которых a и $2c$ практически не менялись при контроле во время последующих ППР в 2010 и 2011 гг., поставили под сомнение применимость механизма роста таких дефектов (см. рис. 2, II стадия) для стали 10ГН2МФА.

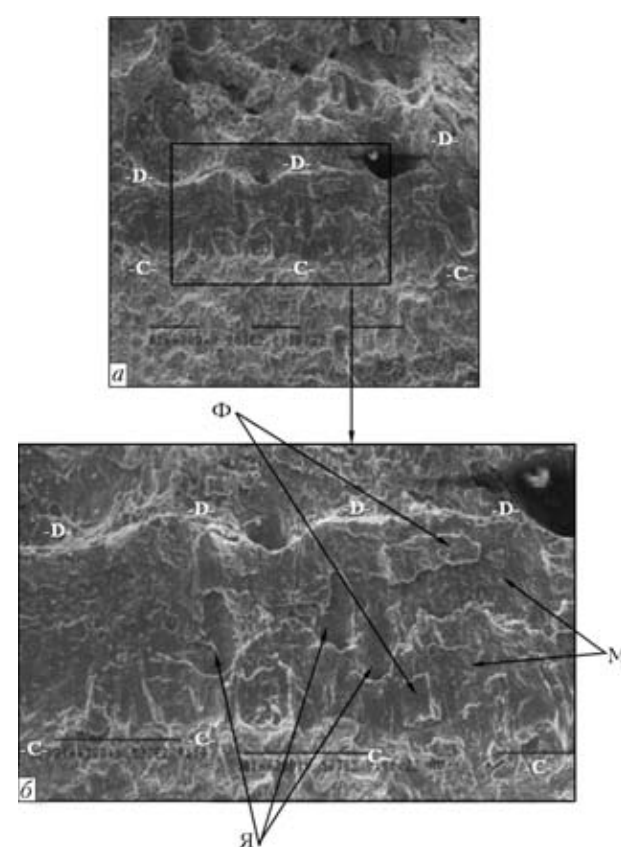


Рис. 6. Фрагменты фрактографии и зона Б (см. рис. 4): а-б — то же, что и на рис. 5

В этой связи было проведено экспериментальное исследование на образцах из стали 10ГН2МФА следующего химического состава, мас. %: 0,11С; 0,28 Si; 0,89 Mn; 0,19 Cr; 2,1 Ni; 0,44 Mo; 0,04 V; 0,11 Cu.

Образцы типа Шарпи сечением 10×10 мм с острым надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной нагружали трехточечным изгибом на установке (см. рис. 3), описанной в работах [5–7]. Испытание проводили в 3%-м растворе NaCl при температуре 35 °С и нагрузке, соответствующей $K_I = 25 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Нагрузка фиксировалась динамометром ДОСМЗ-3. Установка снабжена датчиком акустической эмиссии для фиксирования скачков роста трещины с помощью прибора АЕС-USB-1.

Испытывали два образца в течение 778 ч (№ 1) и 601 ч (№ 2). После окончания испытания образцы доламывали, поверхность очищали от коррозионного налета, после чего с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ-515 фирмы



«Philips», оснащенного энергодисперсионными спектрометрами системы «Link», получали панорамное изображение поверхности излома (см. рис. 4).

На рис. 4 четко различают четыре зоны. Зона 1 соответствует надрезу образца Шарпи глубиной 2 мм, зона 2 — предварительно выработанная усталостная трещина, зона 3 — коррозионная трещина между линиями C–C–C и D–D–D, зона 4 — зона долома.

Ширина зоны коррозионного роста трещины, величина Δl между линиями C–C–C и D–D–D, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа в 16-ти участках с шагом 500...600 мкм, составила 200...350 мкм. Для образца № 1 в участках 1 $\Delta l = 229$ мкм; 2 — 260; 3 — 250; 4 — 240; 5, 6 — 250; 7 — 280; 8 — 300; 9 — 270; 10 — 230; 11 — 240; 12 — 260; 13 — 300; 14 — 350; 15, 16 — 200.

Кроме того, измерения проводили на боковых поверхностях образца с помощью измерительного микроскопа УИМ-21 с точностью не ниже ± 2 мкм и ширина роста трещины составили 284 и 207 мкм, что соответствует скорости роста 3,2 и 3,01 мм/год.

Дальнейшие детальные исследования фрактографии разрушения проводили на участках А и Б (см. рис. 4) вблизи боковых поверхностей образца. Соответствующие данные при различном увеличении для участка А приведены на рис. 5, а для участка Б — на рис. 6.

Фрактографическое исследование показывает, что коррозионная трещина во II зоне ДСКТ водородного охрупчивания растет скачками, частота которых соответствует фиксируемым сигналам акустической эмиссии, но не одновременно по всему фронту трещины, а отдельными пятнами, перемещающимися вдоль фронта достаточно хаотично, но все же образуя слои роста толщиной около 30...40 мкм. Сигнал акустической эмиссии сопровождает скачок образования указанного пятна трещины, что можно рассматривать как признак II стадии водородного охрупчивания на рис. 2.

Выводы

1. Сталь 10ГН2МФА, из которой изготавливают парогенератор, коллектор и трубопровод, имеет достаточно высокую коррозионную стойкость в

контакте со средой второго контура, о чем свидетельствует незащищенная поверхность корпуса парогенератора. Однако в условиях высокой температуры и давления, которые имеют место внутри коллектора и трубопровода, стенки последних защищают коррозионностойкой наплавкой из аустенитной стали.

2. В карманах, где находится соединение коллектора с патрубком Ду1200, в связи с застойными явлениями образуется достаточно агрессивная среда (по крайней мере, по сравнению с питательной водой внутри парогенератора), что обуславливает проявление коррозионного процесса в области сварного шва № 111.

3. В зависимости от агрессивности среды в карманах и состояния поверхности контакта образованию коррозионной трещины предшествует процесс язвенной коррозии различной длительности и возможность образования коррозионного канавочного дефекта.

4. Консервативность прогнозных оценок роста обнаруженного трещинообразного дефекта на ранней стадии связана с многоочаговостью процесса, когда по длине дефекта формирование трещины происходит неодновременно.

1. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
2. МЦУ-11-98н. Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000. — М.: ЦНИИТМАШ, 2000.
3. Механіка руйнування та міцності матеріалів: Довід. посібник / Під заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка. В 7 т. — Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / За ред. І. М. Дмитраха. — К.: Академперіодика, 2005. — 376 с.
4. Magdovski R., Kraus A., Speidel O. Environmental degradation assessment and life prediction of nuclear pressure vessels and piping steels // Proc. of Intern. Symp. on plant aging and life prediction of corrodable structures, 1995. — P. 895–902.
5. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник / За ред. проф. З. Т. Назарчука. В 6 т. — Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1132 с.
6. Махненко В. И., Шекева В. М., Оноприенко Е. М. Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–35.
7. Кинетика роста коррозионных трещин в трубной стали 17Г1С / В. И. Махненко, Л. И. Маркашова, Е. Н. Бердникова и др. // Там же. — 2010. — № 6. — С. 11–15.

The paper describes the interrelation between corrosion crack growth rate and stress intensity factor based on the diagram of static corrosion crack resistance. The main working hypothesis on the discrete nature of crack growth in structural steel is confirmed.

Поступила в редакцию 18.04.2012



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ С390 (S355 J2)

В. Д. ПОЗНЯКОВ, д-р техн. наук, **С. Л. ЖДАНОВ**, канд. техн. наук, **А. А. МАКСИМЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние термических циклов сварки на изменение структуры и механических свойств металла ЗТВ сварных соединений стали С390 (S355 J2). Установлен диапазон допускаемых скоростей охлаждения металла ЗТВ в температурном интервале 600...500 °С и выбраны сварочные материалы, обеспечивающие свойства сварных соединений на уровне требований к основному металлу, а также высокую их сопротивляемость образованию холодных трещин.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочная сталь, строительные металлоконструкции, термический цикл сварки, структура, механические свойства, скорость охлаждения, холодные трещины, диффузионный водород

В последние годы в Украине для изготовления строительных сварных металлоконструкций все более широкое применение находит высокопрочная сталь С390 (S355 J2) с пределом текучести более 390 МПа. Отечественными металлургическими комбинатами освоен выпуск проката из этой стали в листах толщиной 16...100 мм. В соответствии с EN 10025-2:2004 она может поставляться как в нормализованном состоянии, так и после контролируемой прокатки. Сталь имеет следующий химический состав, мас. %: 0,14...0,17 С; 1,42...1,45 Мн; 0,18...0,25 Si; 0,06...0,09 Cr; 0,22...0,24 Ni; ≤ 0,06 Cu; 0,003...0,005 S; 0,013...0,019 P. Механические свойства этой стали характеризуются следующими показателями: $\sigma_T = 370...420$ МПа; $\sigma_B = 530...570$ МПа; $\delta_5 = 28...32$ %; $\psi = 52...68$ %, $KCV_{-20} = 110...210$ Дж/см².

В отечественной литературе сведений о формировании структуры и свойствах сварных соединений стали С390 в условиях дуговой сварки не имеется, что и явилось предметом исследований, изложенных в настоящей статье.

Было изучено влияние термических циклов сварки (ТЦС) на структуру и механические свойства металла ЗТВ сварных соединений стали С390, выполнена оценка их сопротивляемости образованию холодных трещин в зависимости от жесткости закрепления и содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, определены механические свойства соединений, выполненных ручной дуговой и механизированной сваркой в защитном газе.

Для оценки влияния ТЦС на изменение микроструктуры и ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений использовали метод валиковых проб. Наплавку валиков на пластины разме-

ром 600×400×20 мм осуществляли автоматической сваркой под флюсом АН-60 проволокой Св-10НМА на режимах, обеспечивающих погонную энергию сварки $Q_{св} = 16...54$ кДж/см. При этом скорость охлаждения металла ЗТВ в температурном интервале 600...500 °С ($w_{6/5}$) изменяли от 3 до 50 °С/с. Образцы для анализа структуры, измерения твердости и испытаний на ударный изгиб металла ЗТВ с острым (V-образным) надрезом вырезали в поперечном направлении по отношению к оси наплавки. Согласно ГОСТ 13585–68 надрезы располагали таким образом, что их вершины находились на границе сплавления в участке перегрева металла ЗТВ и на расстоянии 1,5 мм от границы сплавления (участок неполной перекристаллизации).

Данные о влиянии ТЦС на прочность и пластичность металла ЗТВ стали С390 были получены по результатам механических испытаний на статическое растяжение стандартных образцов (тип II по ГОСТ 6996–66). Они изготавливались из модельных образцов размерами 150×13×13 мм, которые в соответствии с ТЦС подвергали нагреву до температуры 1250 °С (скорость нагрева 150 °С/с), а затем охлаждали с разными скоростями. Условия остывания модельных образцов были подобраны таким образом, чтобы в температурном интервале 600...500 °С обеспечить скорость их охлаждения в диапазоне от 20 до 3 °С/с.

В ходе металлографических исследований установлено, что в исходном состоянии сталь характеризуется тонкодисперсной строчечной ферритно-перлитной структурой, в которой по всему объему аустенитного зерна равномерно распределены выделения структурно-свободного феррита (рис. 1, а). Анализ образцов, изготовленных из валиковых проб, показал, что в зависимости от скорости охлаждения сварных соединений стали S355 J2 структура и твердость металла ЗТВ может существенно изменяться. Основными составляющими структуры металла на участке перегрева металла ЗТВ соединений, которые охлажда-

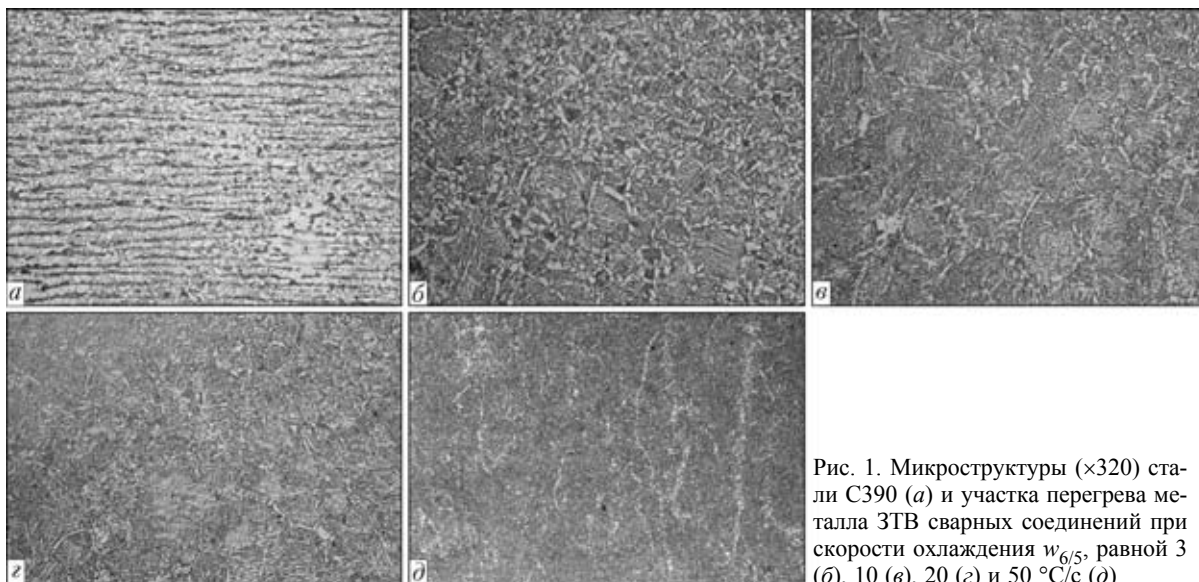


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 320$) стали С390 (а) и участка перегрева металла ЗТВ сварных соединений при скорости охлаждения $w_{6/5}$, равной 3 (б), 10 (в), 20 (г) и 50 °C/s (д)

дались со скоростью $w_{6/5} = 3$ °C/s, являются доэвтектоидный (по границам зерен) и неравноосный (внутри зерен) феррит, а также небольшое количество бейнита пластинчатой и глобулярной морфологии (рис. 1, б). По мере увеличения скорости охлаждения сварных соединений от 3 до 50 °C/s количество доэвтектоидного и неравноосного феррита в структуре уменьшается, а доля бейнита и дисперсность всех структурных составляющих увеличивается. Это обуславливает повышение твердости металла ЗТВ от HV 150 до HV 220 (рис. 2).

Как показали результаты испытаний образцов на статический разрыв, структурные изменения в металле ЗТВ, произошедшие под воздействием термических циклов сварки, оказывают влияние на его прочность и пластичность (рис. 3). При увеличении скорости охлаждения $w_{6/5}$ от 3 до 20 °C/s предел текучести металла на участке перегрева ЗТВ повышается по сравнению с исходным состоянием от 410 до 550 МПа, а предел прочности от 555 до 725 МПа. В то же время показатели его пластичности (относительное удлинение и относительное сужение) снижаются соответственно от 30 до 24 и от 75 до 62 %.

Под воздействием ТЦС изменяются и показатели ударной вязкости металла ЗТВ (рис. 4).

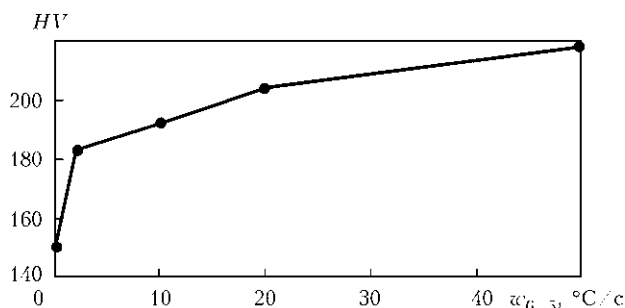


Рис. 2. Зависимость твердости металла ЗТВ от скорости охлаждения сварных соединений

Резкое их снижение наблюдается на участке перегрева металла ЗТВ при температуре испытаний -40 °C (независимо от погонной энергии сварки), а при температуре испытаний 20 и -20 °C в том случае, когда скорость охлаждения $w_{6/5}$ находится ниже 20 °C/s. Однако несмотря на это, ударная вязкость металла ЗТВ сварных соединений стали С390 остается на уровне требований, предъявляемых к основному металлу ($KCV_{-20} \geq 34$ Дж/см²).

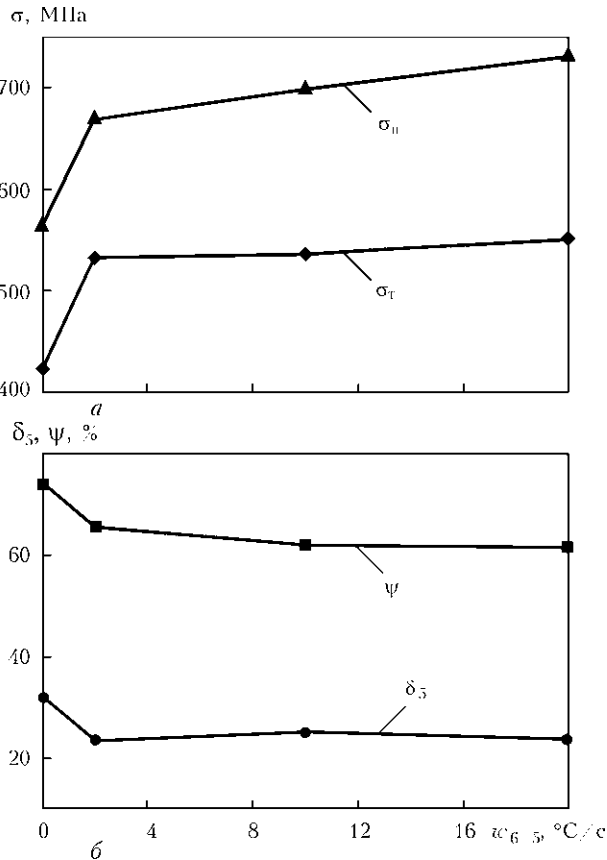


Рис. 3. Зависимость показателей прочности (а) и пластичности (б) на участке перегрева металла ЗТВ от скорости охлаждения модельных образцов

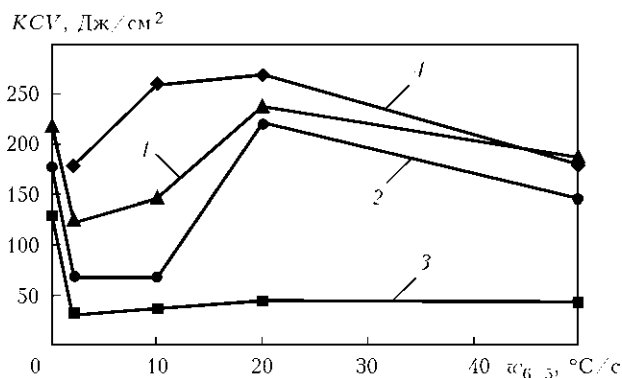


Рис. 4. Влияние скорости охлаждения на ударную вязкость участка перегрева (1–3) и неполной перекристаллизации (4) металла ЗТВ при температуре испытаний 20 (1), –20 (2, 4) и –40 °C (3)

С увеличением скорости охлаждения до 20 °C/с показатели хладостойкости металла ЗТВ на данном участке сварных соединений возрастают и приближаются к значениям ударной вязкости, полученным при испытании образцов, изготовленных из основного металла (рис. 4, $w_{6/5} = 0$ °C/с).

Ударная вязкость металла ЗТВ на участке неполной перекристаллизации независимо от погонной энергии сварки сохраняется на уровне основного металла, а в диапазоне скоростей охлаждения 10...20 °C/с даже выше этих значений (рис. 4, кривая 4).

Склонность стали С390 к замедленному разрушению в зависимости от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле оценивали по методу Имплант [1]. Сопротивляемость образованию холодных трещин сварных соединений изучали по результатам испытания жесткозакрепленных на массивной плите стыковых соединений шириной 100 и 200 мм [2], а также технологических проб «жесткий тавр» [3]. Содержание диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле определяли методом карандашных проб с использованием в качестве запирающей жидкости смеси глицерина с дистиллированной водой.

При испытании по методу Имплант использовали образцы-вставки диаметром 6 мм, изготовленные из стали С390 толщиной 100 мм и вырезанные вдоль оси Z, с концентратором напряжений в виде винтового надреза. Сварку образцов, установленных в отверстиях закрепленной в испытательной установке базовой пластины толщиной 20 мм, выполняли электродами УОНИ-13/55 на режиме $I_{\text{св}} = 160$ А, $U_{\text{д}} = 25$ В, $v_{\text{св}} = 9,5$ м/ч. Скорость охлаждения металла ЗТВ варьировали путем изменения исходной температуры базовой пластины (использовали предварительный подогрев), а также регулированием погонной энергии сварки. Концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле изменяли с помощью электродов с различной влажностью покрытия.

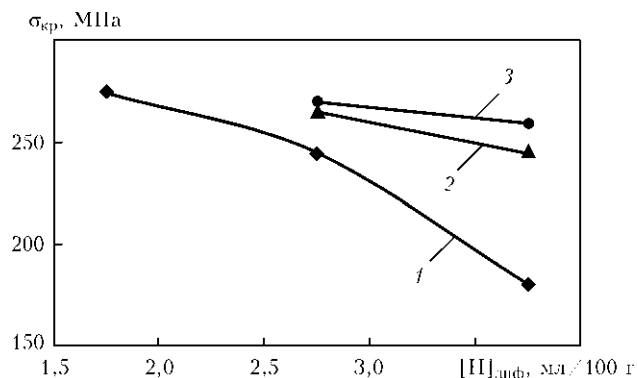


Рис. 5. Влияние диффузионного водорода в наплавленном металле и предварительного подогрева на стойкость стали С390 к замедленному разрушению: 1 — $T_{\text{п.п.}} = 20$; 2 — 60; 3 — 90 °C

Нагружение образцов начинали при достижении после сварки температуры 150...100 °C. За показатель сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин принимали критическое напряжение $\sigma_{\text{кр}}$, при котором образец не разрушался на протяжении 24 ч.

Технологические пробы из стали С390 толщиной 20 мм выполняли ручной дуговой сваркой электродами УОНИ-13/55 диаметром 4 мм, а также механизированной сваркой в CO₂ проволокой сплошного сечения Св-08Г2С и порошковой проволокой Megafil 821R диаметром 1,2 мм. Сварку осуществляли на режимах, обеспечивающих погонную энергию 11,0...12,5 (ручная дуговая сварка) и 14...17 кДж/см (механизированная сварка). Температуру предварительного подогрева проб $T_{\text{п.п.}}$ варьировали от 20 до 90 °C, а содержание диффузионного водорода в наплавленном металле — от 1,0 до 5,3 мл/100 г.

По результатам испытаний образцов Имплант (рис. 5) установлено, что при малых концентрациях диффузионного водорода ($[H]_{\text{диф}} = 1,7$ мл/100 г) сталь С390 имеет низкую склонность к замедленному разрушению даже при сварке без предварительного подогрева ($\sigma_{\text{кр}} \approx 275$ МПа $\approx 0,7\sigma_{\text{т}}$ стали). Увеличение количества диффузионного водорода в наплавленном металле до 3,8 мл/100 г при аналогичных условиях сварки повышает вероятность образования холодных трещин в металле ЗТВ сварных соединений из данной стали ($\sigma_{\text{кр}}$ образцов не превышают 180 МПа $\approx 0,45\sigma_{\text{т}}$ стали). Уменьшить риск образования трещин в образцах при данной концентрации водорода возможно за счет предварительного их подогрева до температуры 90 °C (рис. 5, кривая 3).

Данные, полученные по результатам испытаний образцов Имплант, хорошо согласуются с результатами исследований технологических проб. Испытания последних показали, что в том случае, когда содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3 мл/100 г образование холодных трещин в технологических



Таблица 1. Результаты испытаний технологических проб

Тип соединения	Способ сварки	Сварочный материал	$Q_{св}$, кДж/см	$T_{пл}$, °C	$[H]_{диф}$, мл/100 г	Наличие трещин
Жесткий тавр	МАГ	Св-08Г2С	14,0	20	1,0	Нет
		Megafil 821R	17,0	20	3,0	»
	ММА	УОНИ-13/55	12,5	20	3,0	»
				20	5,3	Есть (100 %)
				60	5,3	Нет
Жесткозакрепленное стыковое соединение, $b = 100$ мм	МАГ	Св-08Г2С	15,0	20	1,0	»
		Megafil 821R	15,8	20	3,0	»
	ММА	УОНИ-13/55	14,0	20	3,0	»
				20	5,3	Есть (100 %)
				60	5,3	Нет
Жесткозакрепленное стыковое соединение, $b = 200$ мм		УОНИ-13/55	11,0	20	5,3	»

пробах сводится к минимуму даже при сварке без предварительного подогрева, если она выполняется при температуре окружающей среды выше 10 °C (табл. 1).

С увеличением содержания диффузионного водорода в наплавленном металле до 5,3 мл/100 г сварные соединения стали С390 становятся склонны к образованию холодных трещин. При сварке без предварительного подогрева трещины в технологических пробах «жесткий тавр» визуально наблюдались на поверхности швов через 2,5, а в жесткозакрепленных стыковых соединениях шириной 100 мм — через 4 ч после формирования соединений. Установлено, что при данной насыщенности швов диффузионным водородом повысить стойкость сварных соединений к образованию холодных трещин можно за счет их предварительного подогрева до температуры 60 °C. При таких условиях сварки трещины отсутствовали как в тавровых, так и в жесткозакрепленных стыковых соединениях.

Снизить риск образования холодных трещин в сварных соединениях стали С390 можно за счет уменьшения жесткости их закрепления, что подтверждают результаты испытания стыковых соединений шириной 100 и 200 мм. Они показали,

что, увеличив базу закрепления b , т. е. ширину соединений, и снизив тем самым в них уровень остаточных напряжений с 350 до 230 МПа, исключить образование холодных трещин в технологических пробах удалось даже в том случае, когда содержание $[H]_{диф}$ в наплавленном металле составляло 5,3 мл/100 г, а сварку осуществляли без предварительного подогрева.

С учетом выбранных условий сварки были выполнены стыковые соединения стали С390 толщиной 16 и 20 мм с V-образной разделкой и толщиной 50 мм с X-образной разделкой кромок (С17 и С25 по ГОСТ 14771–76). Сварку соединений проводили без предварительного подогрева традиционно применяющимися для этого класса сталей электродами УОНИ-13/55 диаметром 4 мм и проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в CO_2 и смеси газов (80 % Ar + 20 % CO_2), а также порошковой проволокой марки Megafil 821R диаметром 1,2 мм в CO_2 . Режимы сварки обеспечивали значения погонной энергии, указанные в табл. 2. Там же приведены результаты механических испытаний образцов из металла швов на статическое растяжение, из сварных соединений — на статический разрыв и загиб, а также на ударный изгиб. Круглый и острый надрез на об-

Таблица 2. Механические свойства металла швов и сварных соединений стали С390

Способ сварки	Условие сварки	$Q_{св}$, кДж/см	Металл шва						
			σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV , Дж/см ² , при t , °C		
							20	–40	–20
МАГ	Св-08Г2С, Ar + CO_2 , $\delta = 16$ мм	14	—	—	—	—	240	90	—
	Св-08Г2С, Ar + CO_2 , $\delta = 50$ мм	14	—	—	—	—	—	60	—
ММА	УОНИ-13/55, $\delta = 20$ мм	11	497	596	29	75	166	44	30
МАГ	Св-08Г2С, CO_2 , $\delta = 20$ мм	15	522	601	27,3	71	105	39	24
	Megafil 821R, CO_2 , $\delta = 20$ мм	16	491	605	27,1	62,6	135	61	35



Окончание табл. 2

Способ сварки	Условие сварки	Сварное соединение						
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\alpha_{\text{заг}}$, град	KCU		KCV		
				Дж/см^2 , при t , °C				
				20	−40	20	−20	−40
МАГ	Св-08Г2С, Ar + CO ₂ , δ = 16 мм	543	81	205	197	208	197	—
	Св-08Г2С, Ar + CO ₂ , δ = 50 мм	569	65	—	101	—	70	—
ММА	УОНИ-13/55, δ = 20 мм	—	—	—	—	106	—	70
МАГ	Св-08Г2С, CO ₂ , δ = 20 мм	—	—	—	—	248	—	166
	Megafil 821R, CO ₂ , δ = 20 мм	—	—	—	—	219	—	140

разцы для ударных испытаний наносили по оси шва и по линии сплавления, а сами испытания проводили при температурах от 20 до –40 °C.

Результаты механических испытаний свидетельствуют, что показатели прочности и пластичности металла швов сварных соединений стали С390, выполненные указанными материалами, сопоставимы с аналогичными характеристиками основного металла и отвечают предъявляемым к ним требованиям. Ударная вязкость металла шва таких соединений также находится на высоком уровне и удовлетворяет требованиям не только отечественных стандартов ($KCU_{-40} \geq 29$ Дж/см²), но и евроном ($KV_{-20} \geq 27$ Дж или $KCV_{-20} \geq 34$ Дж/см²).

Выводы

1. В исходном состоянии сталь С390 характеризуется тонкодисперсной строчечной ферритно-перлитной структурой, что обеспечивает ей высокую пластичность и ударную вязкость.

2. Под воздействием ТЦС на участке перегрева металла ЗТВ формируется ферритно-бейнитная структура. По мере повышения скорости охлаждения $w_{6/5}$ от 3 до 50 °C/с количество феррита в структуре уменьшается, а доля бейнита и дисперсность всех структурных составляющих увеличивается.

3. Прочностные показатели металла ЗТВ сварных соединений стали С390 по отношению к основному металлу повышаются, а пластичность и ударная вязкость снижаются, но остаются на уровне требований, предъявляемых к прокату. Наиболее заметное уменьшение показателей ударной вязкости наблюдается при $w_{6/5} < 20$ °C/с.

4. Сварные соединения стали С390 отличаются высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин при условии, если содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3 мл/100 г.

5. Требуемые механические свойства сварных соединений стали С390 достигаются с использованием традиционно применяемых для сварки сталей этого класса прочности материалов: электродов УОНИ-13/55 и проволоки Св-08Г2С.

1. Гривняк И. Свариваемость сталей: Пер. со слов. Л. С. Гончаренко / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
2. Риск образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей / В. И. Махненко, В. Д. Позняков, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 5–10.
3. Позняков В. Д. Механические свойства металла швов и сопротивляемость образованию холодных трещин тавровых соединений стали 13ХГМРБ // Там же. — 2008. — № 2. — С. 20–25.

Influence of thermal cycles of welding on the change of structure and mechanical properties of HAZ metal of welded joints on С390 (S355 J2) steel was studied. The range of admissible rates of HAZ metal cooling in the temperature range of 600...500 °C was established, and welding consumables were selected which ensure welded joint properties on the level of requirements to base metal, as well as their high resistance to cold cracking.

Поступила в редакцию 18.04.2012



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УГЛЕРОДНОГО ЭКВИВАЛЕНТА КАК КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ

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

Предложен новый критерий склонности металла ЗТВ соединений закаливающихся сталей к образованию холодных трещин, основанный на учете кинетики распада аустенита и экспериментальном определении инкубационного времени начала мартенситного превращения. Показано, что этот критерий может быть математически сведен к традиционному параметру оценки свариваемости закаливающихся сталей — углеродному эквиваленту. Предложена математическая зависимость нового критерия от углеродного эквивалента, которая была проверена экспериментальным путем.

Ключевые слова: моделирование, углеродный эквивалент, свариваемость, критерии, холодные трещины, диаграмма распада аустенита, мартенсит, технологические пробы

Практика показывает, что не все стали одинаково хорошо свариваются. Одни свариваются без каких-либо ограничений, для сварки других необходимо применять специальные технологические приемы. Существует довольно широкое трактование понятия «свариваемость» [1–4]. Исходя из анализа работ, посвященных свариваемости, оно должно включать четыре взаимозависимых фактора — это вид материала, тип конструкции, требуемые свойства и степень надежности [5]. В зависимости от их выбора и сочетания достигается тот или иной уровень свариваемости.

Большую работу по систематизации понятия «свариваемость» и методов его оценки внес К. А. Ющенко. Так, им [6, 7] предложено новое понимание этого термина на основании анализа существующих подходов к оценке свариваемости и стандартов, действующих в различных странах и организациях. Им было показано, что в абсолютном большинстве случаев свариваемость оценивается качественно и субъективно. Этот термин рассматривается скорее как философское понятие, а его определение через способность материала образовывать сварное соединение не указывает как и чем его можно измерить.

Пригодность стали к сварке определяется испытаниями на свариваемость, которая в большинстве случаев подменяется испытаниями на склонность к образованию трещин различного типа. Например, для сварных соединений углеродистых и легированных сталей используют такие показатели, как сопротивляемость образованию горячих трещин, холодных трещин, ламелярных трещин, трещин отпуска и др.

Зачастую свариваемость различных сталей оценивают по испытаниям различных сварочных проб. Для определения склонности к образованию холодных трещин на практике используют пробы «Теккен», «Имплант», торцевую, крестовую, валиковую пробы. Для оценки сопротивления металла шва образованию горячих трещин используют пробу Холдкрофта («рыбья кость») или пробу по способу ИЭС им. Е. О. Патона. Для ламелярного разрушения используют пробы «Кренфилд», пробу типа «Окно», Н-подобную пробу, усовершенствованную пробу «Имплант», а также крестовую пробу (ГОСТ 28870–90). Для трещин отпуска используют кольцевые пробы BWRA, «Теккен», Лихайского университета, CTS или MRT [5]. Большинство из этих проб основано на определении внешней нагрузки, прикладываемой к сварному соединению, которое приводит к разрушению или просто к появлению трещин.

Холодные трещины наиболее часто возникают по причине закаливаемости стали при быстром охлаждении и насыщении металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) водородом. Они, как правило, зарождаются по истечении некоторого времени после сварки и наплавки (замедленное разрушение) и развиваются в течение нескольких часов или даже суток.

Для оценки склонности металла к образованию холодных трещин используют понятие углеродного эквивалента. В настоящее время принято использовать ряд показателей [8–11]. Все они справедливы для определенных, причем довольно узких концентрационных диапазонов и скоростей охлаждения металла шва. В работе [12] систематизированы показатели углеродного эквивалента, предложенные разными авторами (табл. 1).

Таким образом, анализ проведенных работ показывает достаточно широкие диапазоны используемых коэффициентов, что обусловлено особенностями регрессионного описания влияния леги-



Т а б л и ц а 1. Коэффициенты (обратные) в показателях углеродного эквивалента, предложенные различными авторами [12]

№ п/п	Автор	Год	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B
1	МИС	1967	1	6	—	15	15	5	5	—	5	—
2	Ito, Bessyo	1968	1	20	30	20	60	20	15	—	10	1/5
3	Ito, Bessyo	1968	1	20	25	20	40	10	15	—	10	—
4	Stout	1976	1	6	—	40	20	10	10	—	—	—
5	Graville	1976	1	16	—	—	50	23	7	8	9	—
6	Harasava	1977	1	6	—	15	15	5	5	—	5	—
7	Duren	1980	1	16	25	16	50	20	40	—	13	—
8	Yurioka	1982	1	6	24	13	40	6	4	5	5	1/10
9	Yurioka	1980	1	6	30	15	20	4	6	—	—	—
10	Yurioka	1981	1	6	24	15	20	5	5	5	5	1/5
11	Duren	1982	1	8	11	9	17	5	6	—	3	—
12	Terasaki	1984	1	3	—	4	8	10	3	—	—	1/5
13	Cottrell	1984	1	6	—	—	—	5	5	4×C	3	—
14	Susuki	1985	1	6	24	15	15	5	5	—	3	1/15
15	Yurioka	1987	1	6	24	15	12	8	4	—	—	—
16	Yurioka	1987	1	5	24	10	18	5	2,5	3	3	—
17	Yurioka	1987	1	3,6	—	20	9	5	4	—	—	—

рующих элементов на сопротивление образованию холодных трещин. Недостатком применения такого подхода является невозможность прямого экспериментального определения углеродного эквивалента и его сравнения с расчетными значениями.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи предложенного математического описания критерия оценки свариваемости стали с углеродным эквивалентом и проверка его экспериментальным путем.

Известно, что холодные трещины возникают в металле ЗТВ при наличии трех условий: образования закалочных микроструктур; наличия диффузионного водорода и растягивающих напряжений. В основу математического подхода к описанию углеродного эквивалента было положено предположение, что свариваемость можно оценить по показателю, определяющему, какое минимальное критическое время охлаждения необходимо, чтобы в металле шва образовалось 100 % мартенсита. Традиционно для оценки свариваемости сталей используют показатели образования 50 или 90 % мартенсита. В данной работе используется показатель критического времени образования 100 % мартенсита, в связи с достаточно наглядным его положением на термокинетической диаграмме распада аустенита (рис. 1).

Расчет углеродного эквивалента основан на правиле аддитивности [13], в соответствии с которым примем, что τ является некоторым инкубационным (подготовительным) периодом, зави-

сящим от температуры и химического состава материала и показывающим, что превращение еще не началось. Разделяя кривую сварочного охлаждения на отдельные участки длительностью dt , доля инкубационного времени на каждом шаге выражается как функция dt/τ . Если превращение полностью прошло, то, проинтегрировав все эти участки dt/τ , получим 1. Кстати, такой ход рассуждений иногда используют при преобразовании ТТТ-диаграммы в ССТ-диаграмму распада аустенита.

Условие, при котором превращение не идет, выражается следующим образом:

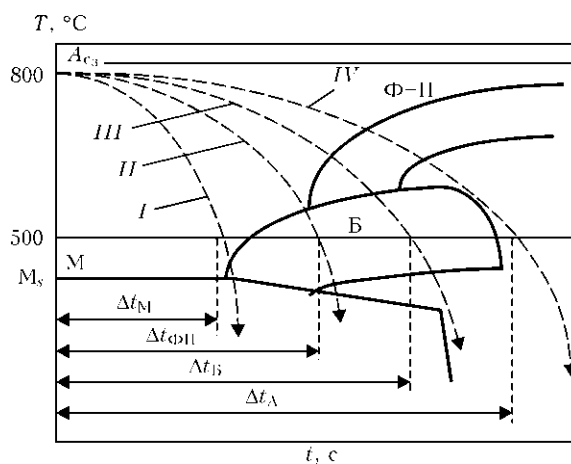


Рис. 1. Определение критического времени охлаждения при образовании мартенситной, бейнитной и ферритно-перлитных структур по ССТ-диаграмме



$$\int_0^{t_e} \frac{dt}{\tau} \leq 1. \quad (1)$$

Таким образом, превращение заканчивается, когда левая часть уравнения (1) становится равной не более 1, а структура стали составляет 100 % мартенсита.

Из этого уравнения можно определить критическое время охлаждения, при котором значение левой части равно 1, при интегрировании от $t = 0$, когда температура сварного шва достигает точки $T = A_{e3}$, до $t = t_e$ при температуре $T = M_s$, температуре начала мартенситного превращения.

Кривая охлаждения I на рис. 1 соответствует случаю, когда уравнение (1) равно 1. Положение кривой I на рис. 1 соответствует критической скорости охлаждения, при которой структура ЗТВ состоит из 100 % мартенсита. Это означает, что критическое время охлаждения Δt_M определяется скоростью охлаждения от температуры 800 до 500 °С вдоль кривой I охлаждения аустенита. Если инкубационное время τ задается как функция химического состава стали, то углеродный эквивалент можно определить с помощью уравнения (1). Кроме того, если формула будет содержать зависимости τ от других факторов (например размера аустенитного зерна), то можно оценить степень их влияния на углеродный эквивалент, что в большинстве случаев не учитывается.

Для того чтобы установить влияние химического состава на Δt_M модифицируем уравнение (1)

$$\int_0^{t_e} \frac{dt}{\tau} = \int_{A_{e3}}^{M_s} \frac{1}{\tau} \left(\frac{dT}{dT} \right) dT = 1, \quad \frac{dt}{dT} \approx \frac{\Delta t_M}{300}, \quad (2)$$

$$\Delta t_M = 300 / \int_{A_{e3}}^{M_s} \frac{dT}{\tau}. \quad (3)$$

Оценить закаливаемость металла ЗТВ можно по следующему уравнению:

$$\ln(\Delta t_M) = A \cdot CE_M + B, \quad (4)$$

где A , B — константы, а индекс «М» относится к мартенситу. С учетом выражения (3) уравнение (4) примет следующий вид:

$$\ln(\Delta t_M) = \ln(300) - \ln \left(\int_{A_{e3}}^{M_s} \frac{dT}{\tau} \right). \quad (5)$$

Из сопоставления уравнений (4) и (5) видно, что углеродный эквивалент соответствует линейному члену, который получится, если второй член

уравнения (5) разложить в ряд Тейлора по каждому элементу:

$$A_X = \frac{\partial}{\partial X} \left[\ln \left(\int_{A_{e3}}^{M_s} \frac{dT}{\tau} \right) \right],$$

где $X = (C, Si, Mn, Mo \text{ и т. д.})$.

Тогда углеродный эквивалент можно выразить в виде

$$\ln(\Delta t_M) = \ln(300) - \{A_C(C - C_0) + A_{Si}(Si - Si_0) + A_{Mn}(Mn - Mn_0) + \dots\} = C_0 - A_C CE_M. \quad (6)$$

Сопоставив левую и правую части уравнения (6), получим

$$C_0 = \ln(300) A_C C_0 + A_{Si} Si_0 + A_{Mn} Mn_0 + \dots, \quad (7)$$

$$CE_M = C + \frac{A_{Si}}{A_C} Si + \frac{A_{Mn}}{A_C} Mn + \dots,$$

где C_0 , Si_0 , Mn_0 и т. д. — концентрации, соответствующие концентрациям, при которых ряд Тейлора выполняется; CE_M — выражение для углеродного эквивалента, которое может быть вычислено.

Для определения CE_M с помощью уравнения (7) необходимо знать выражения для τ , A_{e3} и M_s . В качестве таких были выбраны выражения, предложенные в работах [14, 15]:

$$\tau = \frac{\exp(83500/RT)}{2^{N/8} (A_{e3} - T)^3} (60C + 90Si + 160Cr + 200Mo), \quad (8)$$

$$A_{e3} = 1185 - 203\sqrt{C} = 15,2Ni + 44,7Si + 104V + 13,5Mo + 13,1W - 30Mn - 11Cr - 20Cu + 700P + 400Al + 120As + 400Ti, \quad (9)$$

$$M_s = 831 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo. \quad (10)$$

В приведенных выше уравнениях T — температура, °С; N — балл зерна по ASTM; R — газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К).

В работах [14, 16] для точки, в окрестностях которой проводят разложение в ряд Тейлора, были получены следующие коэффициенты: $C_0 = 0,46$; $Si_0 = 0,23$; $Mn_0 = 0,78$; $Ni_0 = 0,27$; $Cr_0 = 0,26$; $Mo_0 = 0,1$; $Cu_0 = 0,1$.

В результате уравнение для углеродного эквивалента приобретает следующий вид:

$$CE_M = C + \frac{1}{38}Si + \frac{1}{6,0}Mn + \frac{1}{12}Ni + \frac{1}{1,8}Cr + \frac{1}{2,3}Mo + \frac{1}{9,1}Cu. \quad (11)$$

Результаты вычислений коэффициентов в уравнении углеродного эквивалента и их соответс-



Таблица 2. Сравнение расчетных коэффициентов (уравнение 11) углеродного эквивалента с литературными данными

Элемент	A_x	A_x/A_c	МИС [9]	Ито [10]	Юриока [17]
C	-3,02	1	1	1	1
Si	-0,08	1/38	1/24	1/25	1/24
Mn	-0,50	1/6,0	1/6	1/20	1/6
Ni	-0,25	1/12	1/15	1/40	1/12
Cr	-1,64	1/1,8	1/5	1/10	1/8,0
Mo	-1,30	1/2,3	1/5	1/15	1/4,0
Cu	-0,33	1/9,1	1/15	1/20	1/15
V	—	—	1/5	1/10	—

твие литературным данным приведены в табл. 2. Анализ результатов показывает хорошее соответствие расчетных коэффициентов с коэффициентами, предложенными МИС и Юриокой с сотр.

Таким образом, предложенный подход к оценке свариваемости по склонности к образованию холодных трещин, основанный на оценке критического времени, необходимого для прохождения

100 % мартенситного превращения, с одной стороны, подтверждается математически, а с другой — имеет понятный физический смысл. Парадоксально, но смысл заключается в том, что чем меньше подготовительного времени необходимо для образования 100%-й мартенситной структуры (т. е. чем выше критическая скорость охлаждения), тем лучше свариваемость и выше сопротивление образованию холодных трещин. Это свидетельствует о том, что подготовительные процессы, связанные с образованием холодных трещин имеют кинетический (диффузионный) характер, и напрямую связаны с перераспределением водорода в металле шва. В случае малого инкубационного периода (1...10 с) образования мартенсита водород быстро фиксируется в металле шва, однако его локальная концентрация оказывается не достаточной для инициирования образования холодных трещин. В случае длительного инкубационного периода образования мартенсита (1000...2000 с) времени оказывается вполне достаточно для охрупчивания свариваемого металла в результате действия водорода. При малом ин-

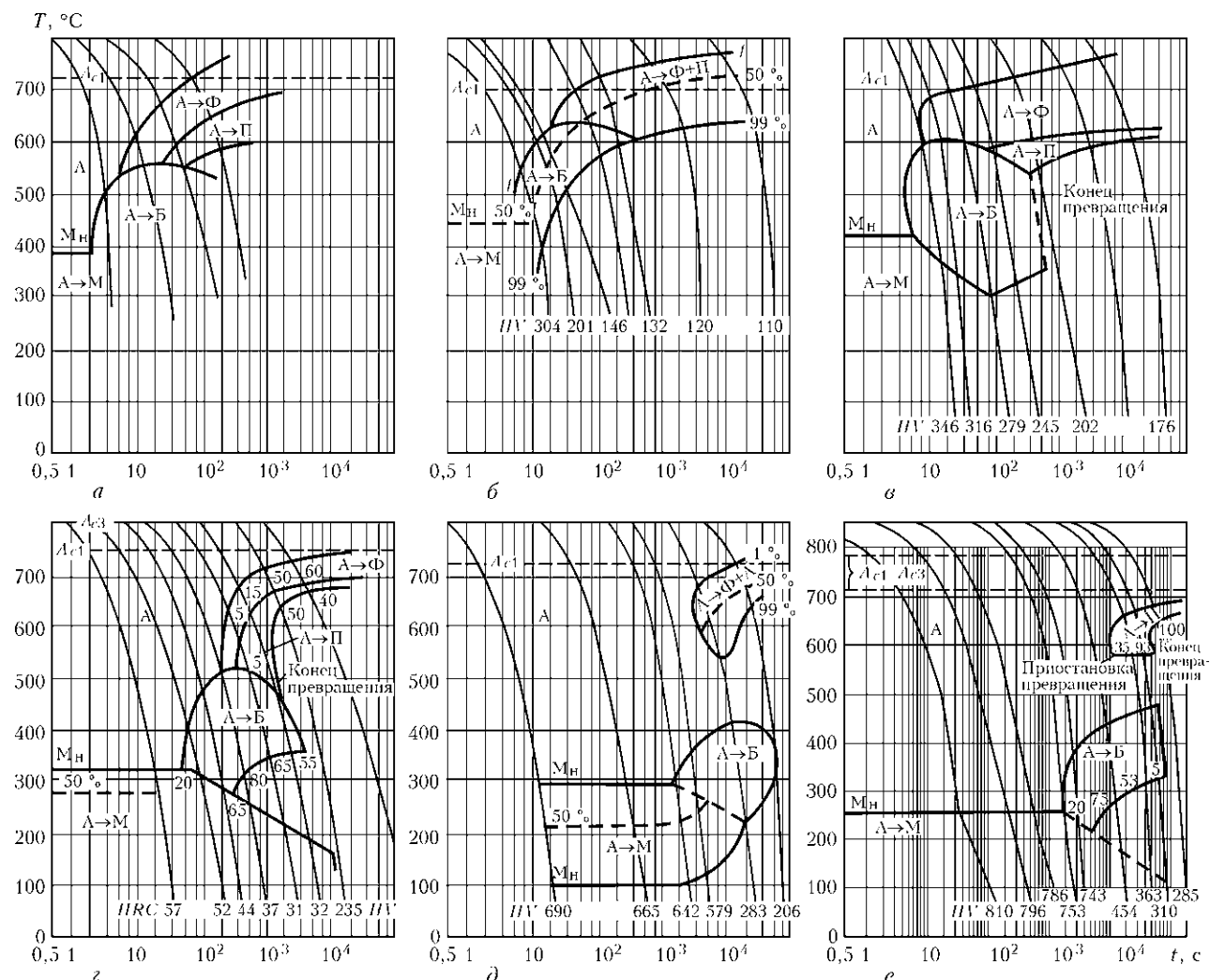


Рис. 2. Термокинетические диаграммы распада аустенита исследуемых сталей [18]: а — 17Г1С; б — 10Г2С; в — 16Г2АФ; г — 35ХМ; д — 35ХГСМ; е — 50ХНМ



Таблица 3. Химический состав и температуры точек превращения исследуемых сталей

Марка стали	Свариваемость	Химический состав сталей, мас. %						
		C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ni/B
17Г1С	Хорошая	0,17	0,60	1,48	—	—	—	—
10Г2С	»	0,08	0,35	1,45	—	—	—	0,006
16Г2АФ	Удовлетворительная	0,17	0,36	1,44	—	0,11	—	—
35ХМ	Ограниченная	0,37	0,30	0,79	1,0	—	0,18	—
35ХГСМ	Плохая	0,39	1,49	1,41	0,74	—	0,51	—
50ХНМ	»	0,52	0,29	—	1,09	0,14	0,43	1,72

Окончание табл. 3

Марка стали	Свариваемость	Температура, °С				Δt_M , с	CE_M , % (МИС)
		A_1	A_3	M_s	T_n		
17Г1С	Хорошая	730	—	390	1130	2	0,44
10Г2С	»	700	850	440	880	4	0,37
16Г2АФ	Удовлетворительная	700	830	425	950	6	0,45
35ХМ	Ограниченная	750	—	320	850	60	0,75
35ХГСМ	Плохая	725	857	290	885	2000	0,94
50ХНМ	»	710	790	260	950	2000	0,98

кубационном периоде, но последующей длительной выдержке в зависимости от типа формирующейся микроструктуры возможно постепенное перераспределение водорода, что и вызывает эффект замедленного разрушения.

В заключении экспериментально проверим принятое нами допущение (уравнение (4)). Для этих целей выберем стали исходя из их свариваемости, а именно: хорошо сваривающиеся стали (17Г1С, 10Г2С), удовлетворительно сваривающиеся (16Г2АФ), ограниченно сваривающиеся (35ХМ), плохо сваривающиеся (35ХГСМ, 50ХНМ) [19]. Термокинетические диаграммы распада аустенита этих сталей приведены на рис. 2. Химический состав и характерные температуры критических точек приведены в табл. 3.

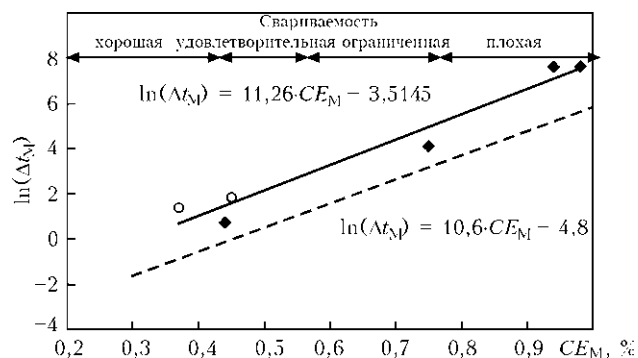


Рис. 3. Влияние углеродного эквивалента рассмотренных сталей на функцию времени начала мартенситного превращения: точки — экспериментальные значения; сплошная кривая — расчетная; штриховая — кривая из работы [20]

Анализ результатов табл. 3 и рис. 3 показал, что зависимость, предложенная в уравнении (4), справедлива. Экспериментально установлены коэффициенты уравнения (4): $A = 11,26$ и $B = - 3,51$. Данные коэффициенты находятся в хорошем соответствии с уравнением, принятым в работе [20] для численной оценки свариваемости низколегированных сталей, а некоторое несоответствие объясняется различием в формулах, принятых для расчета самого углеродного эквивалента.

Преимущество предложенного критерия оценки свариваемости сталей, с одной стороны, заключается в том, что он может быть определен непосредственно в ходе эксперимента, а с другой — термокинетическая диаграмма распада аустенита сварного шва уже учитывает как технологические особенности сварки (вид и режимы сварки), так и ее металлургические параметры (химический состав, влияние сварочной проволоки, флюса или защитного газа, влияние примесных или легирующих элементов, неметаллических включений и пр.).

Таким образом, предложенный новый критерий оценки свариваемости сталей может быть математически сведен к традиционному параметру оценки свариваемости сталей — углеродному эквиваленту. Предложенная математическая зависимость нового критерия от углеродного эквивалента была проверена экспериментальным путем.

1. ISO 581:1980. Weldability. — Definition. General information.
2. BS 499-1:2009. Welding terms and symbols. Glossary for welding, brazing and thermal cutting.



3. DIN 8528. Pt 1. Weldability of metallic materials; concepts.
4. Российский ГОСТ 29273-92 (ИСО 581-80). Свариваемость. Определение.
5. Гривняк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
6. Yushchenko K. A., Derlomenko V. V. Weldability of materials. — S. 1. [2007]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. VI-842-07. Pt1).
7. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 9-13.
8. Olson G. B., Cohen M. A general mechanism of martensitic nucleation. Pt. I-III // Metallurgical Trans. A. — 1976. — 7. — P. 1897-1923.
9. The IIW formula for carbon equivalent // Techn. Rep. — S. 1. [1967]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-535-67).
10. Ito I., Bessyok K. Cracking parameter of high strength steels related to HAZ cracking // JWES. — 1968. — 37, № 9. — P. 983-991.
11. Yurioka N., Ohsita S., Tamehiro H. Pipe-line welding in the 80s // AWRA symp., March, 1981.
12. Lundin C. D., Gill T. P., Qiao C. Y. Carbon equivalence and weldability of microalloyed steels. — S. 1., 1991. — 247 p. — (SSC-357, AD-A234-850).
13. Scheil E. Nucleation period of austenite transformation // Arch. Eisenhuettenwesen. — 1935. — № 12. — P. 565-567.
14. Kirkaldy J. S., Thomson B. A., Bagaries E. A. Hardenability concept with application to steel / Ed. D. V. Doane, J. S. Kirkaldy. — Warrendale: AIME, 1978. — 82 p.
15. Seyffarth P. Schweiß-ZTU-Schaubilder. — VEB, Berlin: Verlag Technik, 1982. — 152 S.
16. Tadashi K., Yuji H. Carbon equivalent to assess hardenability of steel and prediction of HAZ hardness distribution // Nippon Steel Techn. Rep. — 2007. — № 95. — P. 53-61.
17. Prediction of HAZ hardness of ferritic steels / N. Yurioka, M. Okumura, T. Kasuya, H. Cotton // Metal Constr. — 1987. — № 19. — P. 217-223.
18. Попова Л. Е., Понов А. А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1991. — 503 с.
19. Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. — 3-е изд. — М.: Машгиз, 1974. — 520 с.
20. Xavier C. R., Delgado Junio H. G., de Castro J. A. Numerical evaluation of the weldability of the low alloy ferritic steels T/P23 and T/P24 // Mat. Res. — 2011. — 14, № 1. — P. 73-90.

A new criterion is proposed for cold cracking susceptibility of HAZ metal of joints on hardenable steels, based on allowing for the kinetics of austenite decomposition and experimental determination of the incubation period of the start of martensite transformation. It is shown that this criterion can be mathematically reduced to the traditional parameter for assessment of such a weldability of hardenable steels — the carbon equivalent. A mathematical dependence of the new criterion on the value of carbon equivalent is proposed, which was verified experimentally.

Поступила в редакцию 08.05.2012

НОВАЯ КНИГА

О. В. Білоцький. Високотемпературна рентгенографія фазових перетворень у металевих матеріалах. — К.: Міжнародна асоціація «Зварювання», 2012. — 222 с.

В монографії на основі системних досліджень изложены впервые разработанные методические основы и результаты особенностей кинетики фазовых превращений в лучах высокотемпературной рентгенографии металлических материалов. Кинематографические съемки осуществлены на оригинальных конструкциях рентгеновского оборудования. Это обеспечило возможность регистрации полиморфных превращений, диффузионных процессов и изучения температурно-временных условий последовательности образования и распада твердых растворов и химических соединений. Показана доминирующая роль и значение изменений химического состава и физического состояния фазовых составляющих сплавов во время термической и химико-термической обработки как средства управления их структурой и свойствами.

Для научно-технических работников, разрабатывающих новые материалы и изучающих их строение и свойства, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

По вопросам реализации просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка».





ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ, канд. техн. наук, **В. Д. ПОЗНЯКОВ**, **Л. И. МАРКАШОВА**, доктора техн. наук,
Е. Н. БЕРДНИКОВА, канд. техн. наук, **А. В. КЛАПАТЮК**, **Т. А. АЛЕКСЕЕНКО**, **А. С. ШИШКЕВИЧ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены экспериментальные данные по влиянию состава наплавочных материалов на формирование структуры и механические свойства наплавленного металла на колесах из стали марки 2. С применением аналитических методов оценены прочностные свойства, пластичность и трещиностойкость восстановленных наплавкой железнодорожных колес. Установлено, что для обеспечения требуемого комплекса механических свойств, высокой стойкости против образования трещин в основном и наплавленном металле для восстановления дуговой наплавкой железнодорожных колес из стали марки 2 целесообразно применять наплавочные материалы бейнитного или бейнитно-мартенситного класса.

Ключевые слова: дуговая сварка, железнодорожные колеса, наплавленный металл, зона термического влияния, структура, свойства, трещиностойкость

Вопрос об обеспечении надежности и долговечности подвижного состава с увеличением количества перевозок и интенсивности движения железнодорожного транспорта становится все более актуальным. Наиболее остро это касается базовых деталей и механизмов ходовых частей вагонов и локомотивов, основным элементом которых является колесо, непосредственно контактирующее с рельсом. При эксплуатации поверхность катания колеса изнашивается. В значительной степени подвержена износу внутренняя поверхность гребня, что определяется условиями работы пары трения-качения колесо-рельс. Восстановление изношенного профиля катания колеса выполняют на специализированных ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта методом механической обточки или, что экономически более выгодно, предварительно выполнив восстановительную наплавку поверхности гребня.

Железнодорожные колеса грузового транспорта, бандажи колес локомотивов, бандажи трамвайных колес пассажирского транспорта изготавливают из высокопрочных углеродистых сталей,

химический состав и механические свойства которых приведены в табл. 1, 2. Как видно, колесные стали отличаются высокой прочностью и твердостью. Такие свойства металла обеспечивают необходимый уровень эксплуатационной прочности колес. На железнодорожном транспорте Украины и стран СНГ наиболее широко применяются бандажи и цельнокатаные колеса из стали марки 2. В соответствии с ГОСТ 10791–89 содержание углерода в колесной стали марки 2 составляет 0,55...0,65 %. Однако, как свидетельствует опыт, наиболее часто железнодорожные бандажи и колеса изготавливают из стали, содержание углерода в которой не превышает 0,60 мас. %.

В настоящее время при восстановлении наплавкой изношенных поверхностей железнодорожных колес применяют несколько технологий — это одно- или двухдуговая наплавки под слоем флюса, реже наплавка в среде защитных газов. При этом в качестве наплавочных материалов используют сварочные проволоки сплошного сечения ферритно-перлитного (Св-08ГС, Св-08Г2С), бейнитного (Св-10ГСМТ, Св-08ХМ) или бейнитно-мартенситного (Св-10ХГ2СМФ) классов [1–3]. При восстановлении наплавкой изношенных гребней цельнокатаных колес грузовых вагонов применяют бейнитные и бейнитно-мартенситные наплавочные

Таблица 1. Химический состав высокопрочных колесных сталей, мас. %

Нормативный документ	Марка стали	C	Mn	Si	V	S	P
						не более	
ГОСТ 10791–89	1	0,44...0,52	0,80...1,20	0,40...0,60	0,08...0,15	0,030	0,035
ГОСТ 10791–89	2	0,55...0,65	0,50...0,90	0,22...0,45	≤ 0,10	0,030	0,035
ТУ У 35.2-23365425-600:2006	T	0,58...0,67	0,70...0,90	≤ 0,4	0,08...0,15	0,020	0,025



Таблица 2. Механические свойства высокопрочных колесных сталей

Марка стали	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU_{+20} , Дж/см ²	HB , МПа
		не менее			
1	900...1100	12	21	30	2480
2	930...1130	8	14	20	2500
T	≥ 1100	8	14	18	3200

материалы. Наплавку выполняют при регулируемом термическом цикле с применением предварительного подогрева от 150 до 250 °С и замедленного охлаждения колес после наплавки. Технологии обеспечивают качественное восстановление изношенного металла колес и их работоспособность при последующей эксплуатации. В то же время при восстановлении профиля катания бандажей трамвайных колес на некоторых предприятиях еще используют технологию 1960-х годов, когда наплавку выполняли проволокой Св-08А без предварительного подогрева и замедленного охлаждения изделий.

Очевидно, что при таком разнообразии технологий свойства наплавленного металла, зоны сплавления и участков металла ЗТВ соединений существенно отличаются. Это влияет на трещиностойкость восстановленных наплавкой колес и их дальнейшую работоспособность. С точки зрения надежности и безопасности движения железнодорожного транспорта при восстановлении наплавкой колес необходимо обеспечить эксплуатационные свойства наплавленного металла на уровне колесной стали. Например, при восстановлении гребней цельнокатаных колес грузовых вагонов твердость наплавленного металла HB должна быть не ниже 2500 МПа, а предел прочности — не ниже 700 МПа. При этом необходимо обеспечить однородность структуры и минимальный уровень градиента напряжений в переходной зоне от наплавленного к основному металлу, так как нормализация изделий после наплавки не предусмотрена.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительной оценки комплекса свойств наплавленного металла в зависимости от его состава, определение особенностей структурных изменений в наплавках и их влияние на механические свойства соединений колесной стали. В качестве объекта исследований была выбрана колесная сталь марки 2 следующего химического состава, мас. %: 0,58 С; 0,77 Мн; 0,44 Si.

Влияния термомеханического цикла сварки на структуру и механические свойства колесной стали

марки 2 рассмотрено в работе [2], где показано, что скорость охлаждения может существенно влиять на структурно-фазовый состав и механические свойства металла ЗТВ. В диапазоне скоростей охлаждения $w_{6/5} = 1,15...32$ °С/с предел прочности металла ЗТВ колесной стали может изменяться от 940 до 1060 МПа, а предел текучести — от 600 до 715 МПа. При этом его относительное удлинение δ_5 находится в диапазоне 9,3...13,3 %, а сужение ψ — 24,9...33,3 %.

Для определения механических свойств наплавленного металла был выбран метод, при котором образцы для испытаний вырезали из верхних слоев металла шва многослойных сварных соединений с V-образной разделкой размером 350×250×20 мм, зазор в корне которых составлял 10 мм. При таком варианте соединения перемещение основного металла и шва в центральном его сечении минимальное, что может быть приравнено к условиям многослойной наплавки. Автоматическую сварку таких соединений выполняли под слоем флюса АН-348 проволоками сплошного сечения марок Св-08Г2С, Св-08ХМ и Св-08ХМФ диаметром 2,0 мм. Некоторые соединения были сварены в среде углекислого газа порошковой проволокой ПП-АН180МН (тип легирования 10ХГСМНФТ) диаметром 2,0 мм. Сварку соединений выполняли с предварительным подогревом до температуры 150 °С. Режимы сварки были подобраны таким образом, чтобы обеспечить погонную энергию $Q_{св}$ в диапазоне 11...13 кДж/см. В дальнейшем из верхних слоев металла шва соединений вырезали специальные образцы для испытаний на растяжение (ГОСТ 1497) и ударный изгиб (ГОСТ 9454). Химический состав и механические свойства металла швов приведены в табл. 3, 4. Как показали результаты испытаний, за исключением проволоки Св-08Г2С, все наплавочные материалы позволяют получить наплавленный металл, прочность и твердость ко-

Таблица 3. Химический состав металла швов, мас. %

Проволока	С	Мн	Si	Cr	Ni	V	Mo
Св-08Г2С	0,10	2,10	0,95	—	—	—	—
Св-08ХМ	0,12	1,36	0,60	0,60	—	—	0,42
Св-08ХМФ	0,12	1,25	0,62	0,61	—	0,10	0,36
ПП-АН180МН	0,12	1,00	0,35	0,67	0,80	0,10	0,40

Таблица 4. Механические свойства металла швов

Проволока	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU_{+20} , Дж/см ²	HB , МПа
Св-08Г2С	510	590	25,4	63,0	130	2100
Св-08ХМ	535	705	21,0	61,0	98	2500
Св-08ХМФ	610	730	17,2	56,3	86	2600
ПП-АН180МН	700	790	12,7	57,6	97	2600



торого находится на уровне требований, предъявляемых к восстановленным железнодорожным колесам грузовых вагонов.

Как известно, свойства наплавленного металла определяются его структурно-фазовым составом, который формируется в процессе сварки и охлаждения соединений. Поэтому цель дальнейших исследований заключалась в изучении влияния условий сварки на структурно-фазовый состав металла шва и ЗТВ сварных соединений колесной стали марки 2. Состояние структуры металла исследовали на различных уровнях — от макро (зеренного) до микро (дислокационного).

С учетом этих данных, применив уравнение Арчарда, а также известные зависимости Холла–Петча, Орована и др., было установлено расчетным путем как изменяется в различных зонах сварного соединения предел текучести $\sigma_{0,2}$ металла:

$$\Sigma\sigma_T = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р} + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_{д.у}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_0$ — сопротивление решетки металла движению свободных дислокаций; $\Delta\sigma_{т.р}$ — упрочнение твердого раствора легирующими элементами и примесями; $\Delta\sigma_z$; $\Delta\sigma_c$ — упрочнения за счет изменения величины зерна и субзерна; $\Delta\sigma_n$ — упрочнение за счет перлита; $\Delta\sigma_d$ — дислокационное упрочнение; $\Delta\sigma_{д.у}$ — дисперсионное упрочнение.

При этом был оценен вклад отдельных структурных составляющих, величины зерна, субзерна, плотности дислокаций на изменение общей (интегральной) прочности. Метод проведения аналитической оценки при выполнении данных исследований аналогичен, приведенному в работах [4, 5].

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1C} , характеризующий сопротивляемость металла хрупкому разрушению, и локальные внутренние напряжения $\tau_{в.н}$ в структуре, являющиеся потенциальными источниками зарождения и распространения трещин, определены по формулам

$$K_{1C}^* = (2E\sigma_T\delta_l)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\tau_{в.н} = Gbh\rho/[\pi(1-\nu)], \quad (3)$$

где E — модуль Юнга; σ_T — расчетное значение предела текучести; δ_l — значение критического раскрытия трещины, приравненное к параметрам субструктуры (размер субзерен, ширина рек или размер фрагментов); G — модуль сдвига; b — вектор Бюргерса; h — толщина фольги ($2 \cdot 10^{-5}$ см); ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность дислокаций.

Все указанные выше исследования выполняли применительно к вариантам наплавки с использованием проволоки сплошного сечения Св-

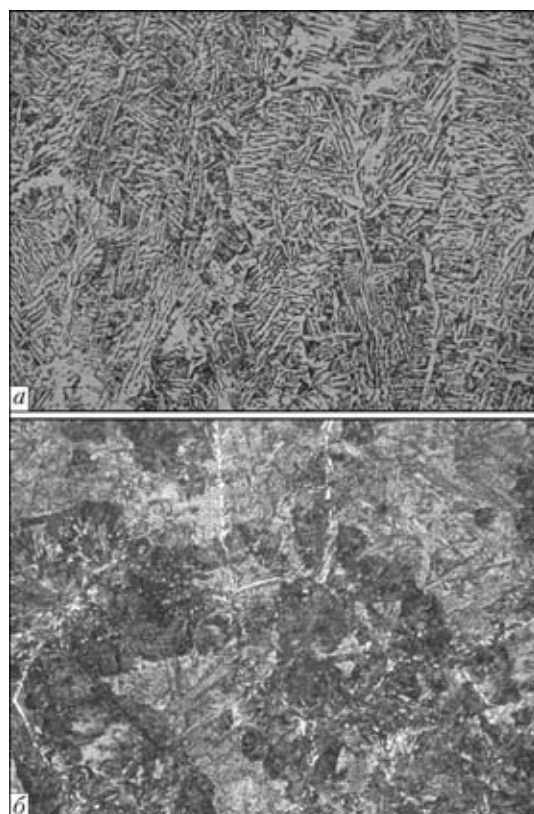


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 500$) металла шва (а) и участка крупного зерна ЗТВ (б) колесной стали марки 2 при сварке проволокой Св-08Г2С

08Г2С и порошковой проволоки ПП-АН180МН, а их результаты представлены на рис. 1–5.

Как показали металлографические исследования, металл швов соединений колесной стали марки 2, выполненных проволокой Св-08Г2С, имеет крупнозернистую структуру, состоящую из феррита и перлита (рис. 1, а). Размеры кристаллитов ($h_{кр} \times l_{кр}$) ориентировочно равны $(30 \dots 130) \times (60 \dots 250)$ мкм. Микротвердость феррита $HV(\Phi) = 2010$, а перлита $HV(\Pi) = 2210 \dots 2510$ МПа. Структура металла на участке перегрева ЗТВ таких соединений состоит из мартенсита (М), бейнита (Б), которые имеют соответственно следующую микротвердость: $HV(М) = 3660 \dots 4540$, $HV(Б) = 2570 \dots 3570$ МПа и ферритных оторочек $\Phi_{от}$ толщиной $\delta(\Phi_{от}) = 3 \dots 7$ мкм, расположенных по границам зерен (рис. 1, б). Размер зерен D_3 М и Б соответственно составляет $115 \dots 215$ и $40 \dots 155$ мкм, а их объемная доля равна $V_M = 30$ и $V_B = 65 \dots 68$ %.

Металл швов соединений, выполненных порошковой проволокой ПП-АН180МН, характеризуется бейнитно-мартенситной (Б–М) структурой (рис. 2, а) с микротвердостью $HV(Б–М) = 2860 \dots 3290$ МПа и размерами кристаллитов $h_{кр} \times l_{кр} = (25 \dots 60) \times (65 \dots 180)$ мкм, а также наличием по границам зерен ферритных оторочек толщиной $\delta(\Phi_{от}) = 3 \dots 5$ мкм. Соотношение объемных долей Б и М в металле швов составляет 70 к 30 %. Близкая по составу структура выявлена

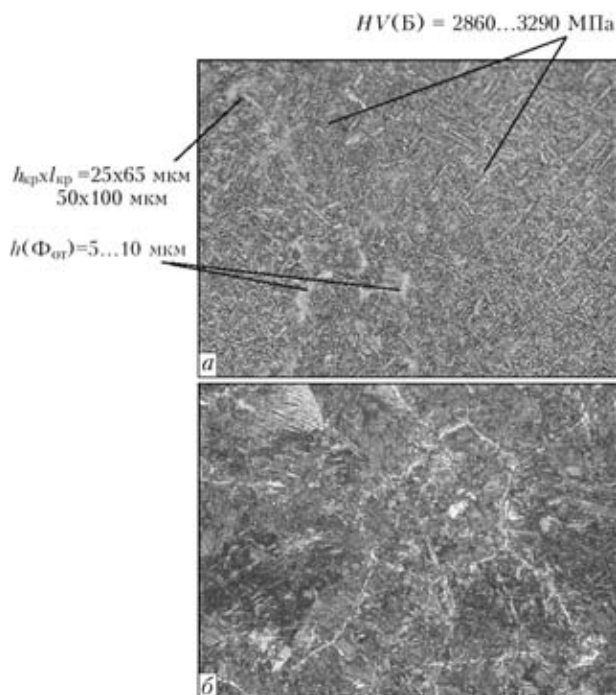


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 500$) металла шва (а) и участка крупного зерна ЗТВ (б) колесной стали марки 2 при сварке проволокой ПП-АН180МН

и в металле на участке перегрева ЗТВ таких соединений (рис. 2, б). Объемная доля Б и М в данной зоне сварного соединения составляет соответственно 75...80 и 25...20 %, а микротвердость находится в пределах $HV(M) = 3660...4540$ МПа и $HV(B) = 2570...3570$ МПа. Размеры зерен Б и М составляют 115...215 мкм (М) и 40...155 мкм (Б). Как и в предыдущих случаях, по границам зерен были выявлены ферритные оторочки толщиной $\delta(\Phi_{от}) = 3...7$ мкм.

Таким образом, оптическая металлография показала, что в металле шва соединений, выполненных проволокой Св-08Г2С, формируется круп-

нозернистая, резкоградиентная по величине зерна (изменяется в 2...4 раза) ферритно-перлитная структура, а в металле ЗТВ — мелкозернистая бейнитно-мартенситная структура, микротвердость которой практически в 1,5 раза превышает микротвердость наплавленного металла. В сварных соединениях, выполненных порошковой проволокой ПП-АН180МН, в металле шва и ЗТВ формируется достаточно близкая по фазовому составу бейнитно-мартенситная структура, не имеющая резких градиентов как по величине зерна, так и по твердости.

Особенности изменения тонкой структуры (ширины реек, размера субструктуры и плотности дислокаций) металла шва и ЗТВ соединений колесной стали изучали методами просвечивающей электронной микроскопии. Они показали, что в основном объеме металла шва соединений, выполненных проволокой Св-08Г2С, размеры цементитных $h_{ц}$ и ферритных $h_{ф}$ пластин в перлите составляют соответственно 0,1...0,4 и 0,7...1,5 мкм, а плотность дислокаций $\rho = (4...6)10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 3, а, б). Установлено также, что на участке шва, расположенном в непосредственной близости к линии сплавления и на удалении от нее до 500 мкм, структура измельчается на порядок, а плотность дислокаций повышается до $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3, в, г). В металле на участке перегрева ЗТВ ширина реек бейнита верхнего $h_{Бв}$ составляет 0,8...1,3 мкм, бейнита нижнего $h_{Бн}$ — 0,3...0,8 мкм, мартенсита $h_{М} = 1...1,5$ мкм. Размеры фрагментов бейнита нижнего $d_{фр}(Б_{н})$ находятся в пределах 0,15...0,5 мкм. По сравнению с металлом шва плотность дислокаций в данной зоне сварного соединения увеличивается до $\rho = (5...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3, д, е).

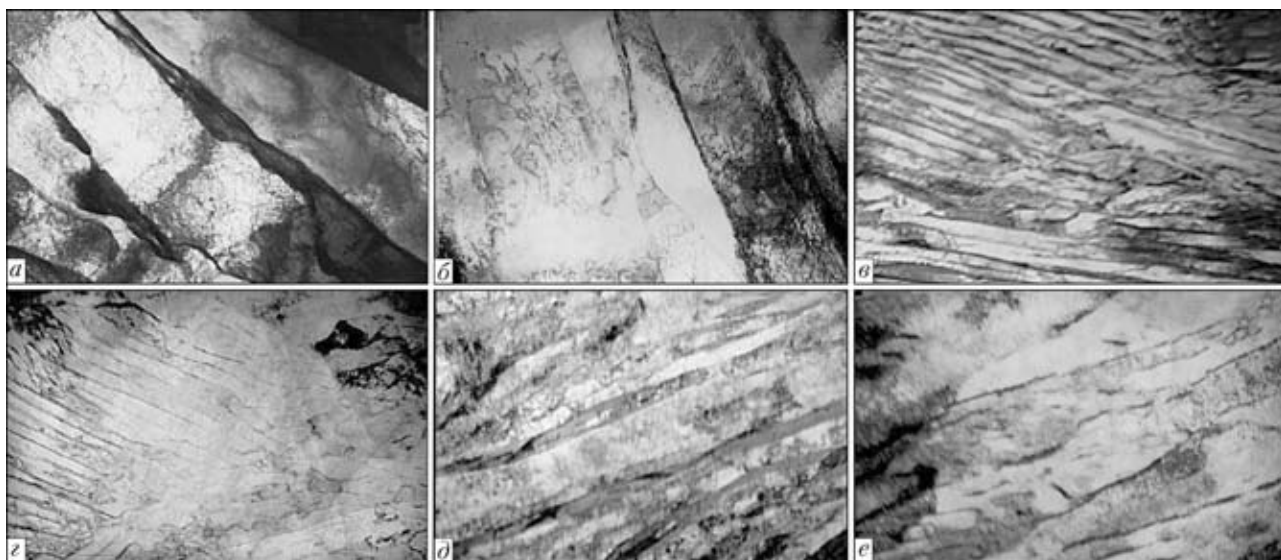


Рис. 3. Тонкая структура металла шва (а-г) и участка металла крупного зерна ЗТВ (д, е) соединений колесной стали марки 2 при сварке проволокой Св-08Г2С: а, б, г, д — $\times 20000$; в, е — $\times 30000$

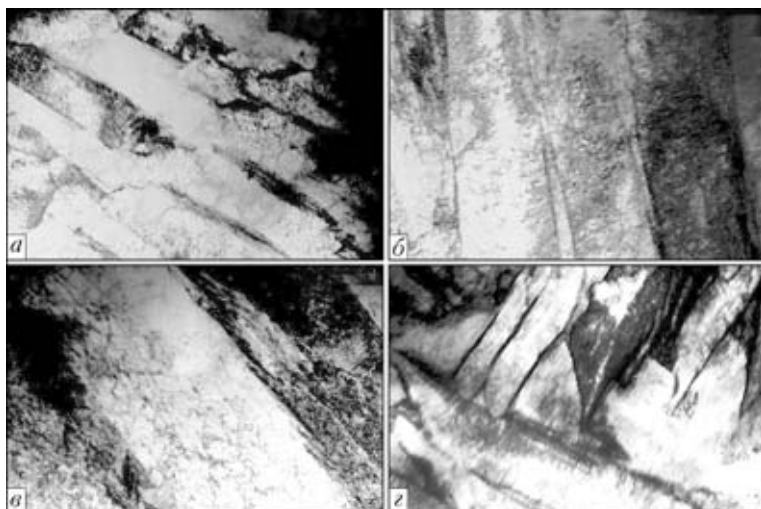


Рис. 4. Тонкая структура металла шва (а, б) и участка металла крупного зерна ЗТВ (в, з) соединений колесной стали марки 2 при сварке проволокой ПП-АН180МН: а — $\times 15000$; б — $\times 20000$; в, з — $\times 30000$

При сварке порошковой проволокой ПП-АН180МН в металле шва (рис. 4, а, б) и ЗТВ (рис. 4, в, з) формируется близкая по составу и размерам элементов структура, состоящая из верхнего и нижнего бейнита, а также мартенсита. Ширина реек бейнита верхнего $h_{БВ}$ составляет $0,5...1,2$ мкм, бейнита нижнего $h_{БН} = 0,4...0,7$ мкм, мартенсита $h_M = 1...1,5$ мкм. Распределение плот-

ности дислокаций в таком соединении относительно равномерное $\rho = 5 \cdot 10^{10}...10^{11} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 5 показано как в зависимости от состава наплавленного металла изменяется предел текучести металла в разных зонах сварных соединений. Установлено, что упрочнение основного объема металла шва сварных соединений, выполненных проволокой Св-08Г2С, преимущественно обусловлено влиянием карбидных фаз ($\Delta\sigma_{ду} = 190...230$ МПа) (рис. 5, а). Вблизи линии сплавления предел текучести металла шва возрастает практически в 1,7 раза от 480 до 800 МПа. Это происходит главным образом за счет дополнительного вклада в упрочнение металла

субструктурного ($\Delta\sigma_c = 300$ МПа) и дислокационного ($\Delta\sigma_d = 60$ МПа) факторов.

Изменение значений предела текучести металла в различных зонах сварных соединений, выполненных порошковой проволокой ПП-АН180МН, происходит плавно (рис. 5, б). Упрочнение металла шва таких соединений в основном происходит за счет субструктурного ($\Delta\sigma_c = 345$ МПа) и дислокационного ($\Delta\sigma_d = 140...200$ МПа) упрочнения. В меньшей мере на этот процесс оказывают влияние частицы карбидных фаз ($\Delta\sigma_{ч} = 75$ МПа). При этом упрочнение за счет измельчения (диспергирования) субструктуры бейнита нижнего составляет порядка 33 % ($\Delta\sigma_c = 280$ МПа) общего уровня упрочнения.

Упрочнение металла ЗТВ указанных соединений происходит одинаково. Это связано прежде всего с фрагментацией субструктуры бейнита нижнего ($\Delta\sigma_c = 367$ МПа) и повышением плотности дислокаций ($\Delta\sigma_d$ до 200 МПа), что составляет соответственно 42...48 и 20...25 % общего

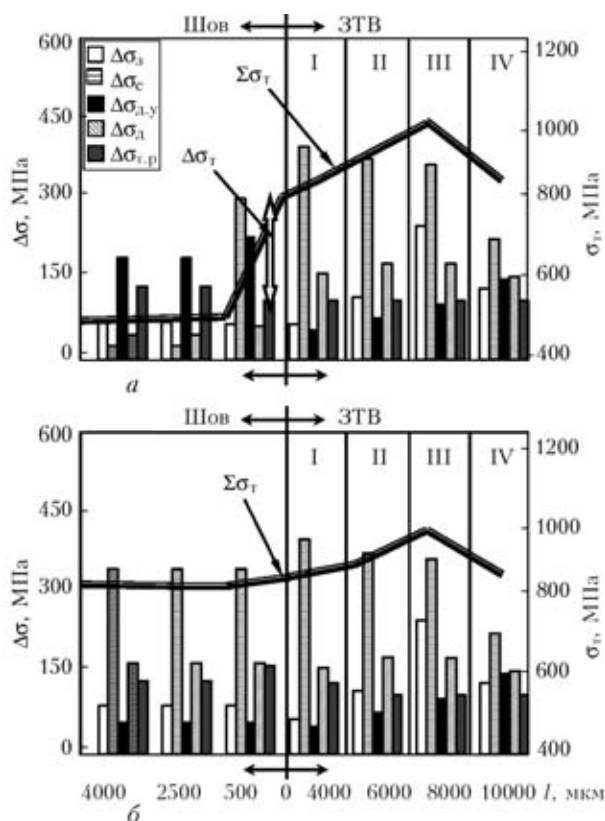


Рис. 5. Вклад структурных составляющих и упрочнение металла сварных соединений при сварке проволокой Св-08Г2С (а) и ПП-АН180МН (б): I-IV — участки ЗТВ соответственно перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации, рекристаллизации

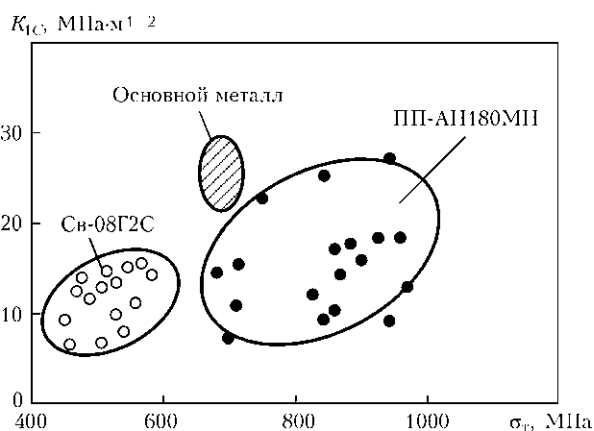


Рис. 6. Диаграмма изменения расчетных механических свойств ($\sigma_{0.2}$, K_{1C}) металла швов сварных соединений колесной стали в зависимости от состава наплавленного металла

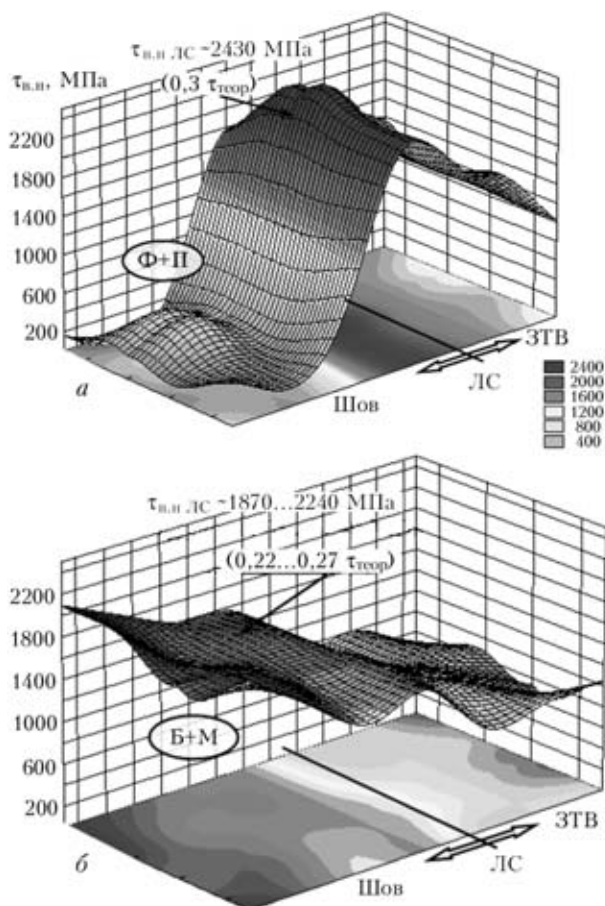


Рис. 7. Уровень локальных внутренних напряжений $\tau_{в.н.}$, формирующихся в сварных соединениях колесной стали, в зависимости от состава наплавленного металла: а — Св-08Г2С; б — ПП-АН180МН

уровня упрочнения. Предел текучести металла ЗТВ находится в пределах 820...1000 МПа.

Результаты расчетных оценок значений K_{1C} сварных соединений колесной стали 2, выполненных проволоками Св-08Г2С и ПП-АН180МН (рис. 6), показали следующее. Несмотря на более высокие прочностные характеристики, основной объем металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН180МН, обладает такими же значениями K_{1C} как и соединения, выполненные проволокой Св-08Г2С, а на некоторых участках превышает их практически в 2 раза. Это связано с особенностями формирования в нем благоприятной субструктуры, более равномерным распределением дислокаций и измельчением зерен, в то время как металл, наплавленный проволокой Св-08Г2С, отличается неравномерным распределением плотности дислокаций и наличием перлитных структур с протяженными цементитными фазовыми выделениями, что отрицательно влияет на показатели K_{1C} . В целом такие исследования показали, что при сварке проволокой ПП-АН180МН в металле шва формируется структура, сочетающая высокую прочность с хорошей сопротивляемостью хрупкому разрушению.

Результаты расчетных оценок локальных внутренних напряжений $\tau_{в.н.}$ при сопоставлении этих значений с теоретической прочностью материала (рис. 7), показали, что более низкий общий уровень распределенных в шве локальных внутренних напряжений формируется в сварных соединениях, выполненных проволокой Св-08Г2С (рис. 7, а). Их значение не превышает 400 МПа, что составляет примерно 0,04 теоретической прочности металла $\tau_{теор}$. Повышение плотности дислокаций от $(4...6) \cdot 10^9$ до $(5...8) \cdot 10^{10}$ см⁻² в зоне шва, которая находится в непосредственной близости к линии сплавления (ЛС) и в ЗТВ таких соединений, приводит к резкому увеличению $\tau_{в.н.}$ до 2240...2430 МПа, что составляет $(0,3...0,4)\tau_{теор}$ и к формированию значительных градиентов внутренних напряжений ($\Delta\tau_{в.н.} \sim 2000$ МПа). Максимальные значения $\tau_{в.н.}$ формируются на границе сопряжения Ф-П и Б-М структур.

Общий уровень $\tau_{в.н.}$ в металле швов в соединениях, выполненных порошковой проволокой ПП-АН180МН, выше (1870...2240 МПа), однако они равномерно распределены по металлу шва и относительно плавно снижаются при переходе к металлу ЗТВ до 900...1100 МПа. За счет этого резких градиентов локальных напряжений в таких соединениях не наблюдается, что является благоприятным с точки зрения предупреждения трещинообразования.

Выводы

1. Требуемый комплекс механических свойств наплавленного металла при восстановлении изношенных поверхностей железнодорожных колес (твердость $HB \geq 2500$, прочность $\sigma_b \geq 700$ МПа) могут обеспечить наплавочные материалы бейнитного или бейнитно-мартенситного классов — проволоки сплошного сечения Св-08ХМ, Св-08ХМФ и порошковая проволока ПП-АН180МН.

2. Металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН180МН, сочетает высокую прочность, твердость и трещиностойкость. Все участки сварных соединений, выполненных данной проволокой, имеют однородную мелкодисперсную, бейнито-мартенситную структуру с равномерным распределением локальных внутренних напряжений.

1. Наплавка гребней вагонных колесных пар / Н. В. Павлов, И. Д. Козубенко, Н. Е. Бызова, А. И. Рассоха // Ж.-д. трансп. — 1993. — № 7. — С. 37–40.
2. Влияние технологических факторов на структуру и свойства металла ЗТВ при ремонтно-восстановительной наплавке гребней цельнокатаных вагонных колес / В. А. Саржевский, А. А. Гайворонский, В. Г. Гордонный, В. Ф. Горб // Автомат. сварка. — 1996. — № 3. — С. 22–27, 33.
3. Гудков А. В., Лозинский В. Н. Новые технологические и технические решения в области сварки на железнодорожном транспорте // Вест. ВНИИЖТ. — 2008. — № 6. — С. 3–9.



4. Влияние легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М / Л. И. Маркашова, В. Д. Позняков, Т. А. Алексеенко и др. // Автомат. сварка. — 2011. — № 7. — С. 7–15.
5. Оценка прочности и трещиностойкости металла железнодорожных колес после длительной эксплуатации / Л. И. Маркашова, В. Д. Позняков, А. А. Гайворонский и др. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2011. — № 6. — С. 73–79.

Experimental data are given on the effect of composition of cladding consumables on formation of structure and mechanical properties of the deposited metal on wheels of steel 2. Strength properties, ductility and crack resistance of the railway wheels repaired by cladding were evaluated by the analytical methods. Cladding consumables of the bainitic or bainitic-martensitic grade were found to be most appropriate for repair of railway wheels of steel 2 by arc cladding to ensure the required combination of mechanical properties and high crack resistance of the base and deposited metals.

Поступила в редакцию 05.05.2012

12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «СВАРКА-2012»

4–6 декабря 2012

г. Екатеринбург, МВЦ ЭКСПО

Организатор выставки: Выставочное общество «Уральские выставки» при поддержке Правительства Свердловской области, Администрации Екатеринбурга, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Уральского института сварки

Основные направления выставки:

- Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов
- Оборудование и технологии для наплавки и напыления
- Оборудование и технологии для плазменной, газопламенной сварки и резки
- Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- Оборудование и технологии для производства сварочных электродов и проволок
- Вспомогательное сварочное оборудование
- Сварка в стройиндустрии
- Материалы для сварки, наплавки, напыления и резки
- Средства и методы защиты от вредных производственных факторов, промышленная вентиляция
- Методы обучения и повышения квалификации персонала

Контакты: менеджеры проекта Рушенцева Галина и Кириллова Елена
тел. +7(343)310-03-30, E-mail: rushentseva@uv66.ru, www.uv66.ru



НОВАЯ СИСТЕМА ПРИПОЕВ ДЛЯ ПАЙКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ, В. В. ВОРОНОВ**, магистр
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе результатов систематических исследований сплавов системы Ti–Zr–Co, учета литературных данных с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента построена поверхность ликвидуса этой системы. Установлено, что в данной системе имеется область сплавов с пониженной температурой ликвидуса, наиболее перспективная с точки зрения разработки припоев. Исследована растекаемость опытных припоев по титановым сплавам разных классов (OT4, BT6, BT22). Приведены данные о механических свойствах паяных соединений.

Ключевые слова: пайка, титановые сплавы, новая система припоев, поверхность ликвидуса, смачивание, механические свойства

Титановые сплавы играют важную роль в современной промышленности, особенно в авиастроении, благодаря их высоким характеристикам, низкой плотности, высокой прочности, в частности, высокой коррозионной и усталостной стойкости, а также высокому значению удельной прочности.

Между тем в настоящее время насущной проблемой является создание паяных конструкций из титановых сплавов, которые нельзя изготовить с помощью сварки. К таким изделиям следует отнести ответственные теплообменные устройства для охлаждения компактных ядерных реакторов, пластинчато-ребристые и сотовые конструкции в авиа- и кораблестроении и др. [1].

Современная технология пайки и припои должны обеспечивать паяные швы со свойствами, близкими к свойствам основного материала. Этим обусловлены важные температурно-временные пределы циклов пайки, определяемые природой титановых сплавов. Данные пределы ограничивают возможность появления нежелательных изменений структуры и свойств сплавов, обусловленных полиморфизмом титана.

При температуре ниже 882 °С титан находится в α -состоянии (гексагональная решетка), а выше этой температуры — в β -состоянии (кубическая решетка). Это обстоятельство существенно влияет на диффузию элементов-депрессантов из шва в паяемый металл и как следствие на структуру и свойства паяных соединений.

Согласно работе [2] необходимость ограничения температуры пайки титана и его сплавов обусловлена большой скоростью роста его зерна при температурах выше 1000 °С. Таким образом, температура плавления припоя не должна превышать 950...1000 °С [2].

В работе [3] верхняя граница температуры пайки снижена до 900 °С для α - и псевдо- α -сплавов, до 935 °С для $\alpha + \beta$ -сплавов, до 870 °С для псевдо- β -сплавов и до 760...800 °С для β -сплавов.

Ограничение температур пайки значением температуры $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения особенно важно для тонкостенных конструкций, обычно применяемых в авиастроении, так как активный рост зерен и активная диффузия компонентов припоя в основной металл небольшой толщины приводит к охрупчиванию паяного шва.

На сегодня наиболее распространенными припоями для высокотемпературной пайки титана, которые успешно применяются при изготовлении

Промышленные припои на основе титана

Припой	Состав, мас. %	Температура, °С		
		солидус	ликвидус	пайки
BTi-1	Ti–15Cu–15Ni	902	950	980...1050
BTi-2	Ti–15Cu–25Ni	901	914	930...950
BTi-3	Ti–26Zr–14Cu–14Ni–0,5Mo			820...920
BTi-4	Ti–20Zr–20Cu–20Ni	848	856	
Ticuni 70	Ti–15Cu–15Ni	902	950	980–1050
MBF 5011	Ti–18,5Cu–27,5Ni	910	920	
MBF 5012	Ti–20Cu–20Ni	915	936	
ВПр16	Ti–(8-16)Ni–(11-14)Zr–(21-24)Cu	880	900	920...970
СТЕМЕТ1201	Ti–12Zr–12Ni–23Cu	830	955	900...1000
Ti–Zr–Be–Al	Ti–45Zr–4,7Be–5Al		910	
Ti–Zr–Be	Ti–48Zr–2Be		930	

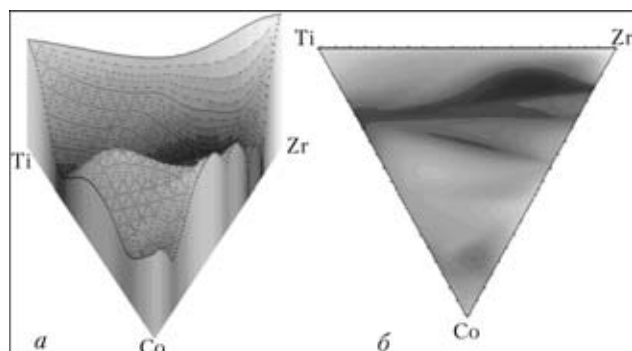


Рис. 1. Результаты расчета поверхности ликвидуса системы сплава Ti–Zr–Co в объемном виде (а) и на плоскости (б)

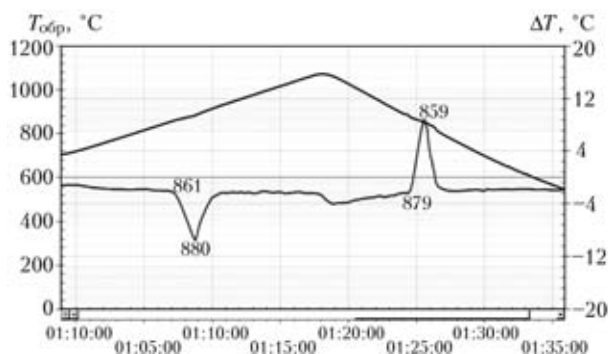


Рис. 2. Результаты высокотемпературного дифференциально-го термического анализа экспериментального сплава системы Ti–Zr–Co

конструкций различного назначения, являются припои систем Ti–Cu–Ni, Ti–Zr–Cu–Ni (таблица).

Однако данные припои имеют ограничение по применению из-за содержания меди и никеля, и необходимо исследовать новые системы сплавов, в которых эти элементы отсутствуют. В качестве альтернативы известным системам припоев в последнее время в литературе рассматриваются системы Ti–Zr–Fe [4–6] и Ti–Zr–Mn [5, 6]. Припои данных систем имеют хорошие технологические свойства и обеспечивают хорошую прочность паяных соединений. Однако температура плавления $T_{пл}$ у данных припоев находится в пределах 960 (для системы Ti–Zr–Fe) ... 1050 °C (для системы Ti–Zr–Mn) [5, 6]. Соответственно температуры пайки для данных припоев превышают верхнюю границу допустимых температур.

Целью настоящей работы являлась разработка нового поколения припоев для пайки титановых сплавов в целях расширения области применения паяных титановых конструкций, не содержащих указанные элементы и имеющих пониженную температуру плавления (ниже 900 °C).

Изучение диаграмм состояния показало, что неограниченные твердые растворы с титаном образуют лишь тугоплавкие металлы (цирконий, ванадий, молибден, ниобий). Среди них цирконий и ванадий образуют твердые растворы с минимумом на кривой ликвидуса, что дает возможность использовать системы Ti–Zr, Ti–V в качестве основы для разработки припоев. В частности, перспективной, по нашему мнению, является система Ti–Zr–Co.

Для определения оптимальных соотношений элементов в сплаве необходимо было построить диаграмму ликвидуса тройной системы Ti–Zr–Co. Построение такой поверхности традиционными экспериментальными методами является сложной и трудоемкой задачей, поэтому нами использовано сочетание расчетного и экспериментального методов, в частности, метод симплекс-решетчатого планирования эксперимента, математический аппарат которого подробно описан в работах [7, 8].

В процессе построения диаграммы ликвидуса системы Ti–Zr–Co было изучено около 50 сплавов, которые выплавляли на холодной подложке с применением электронно-лучевого нагрева. Результаты расчета представлены на рис. 1.

Исходя из приведенной диаграммы можно предположить, что в данной системе в области сплавов с низким содержанием кобальта (приблизительно вдоль линии, проходящей от сплава Ti–22Co до сплава Zr–15Co) имеется линия моновариантной эвтектики, а также область с пониженной температурой ликвидуса (менее 900 °C), которая, по нашему мнению, и является наиболее перспективной с точки зрения разработки припоев.

По результатам расчета и построения поверхности ликвидуса для дальнейшего исследования был выбран ряд сплавов системы Ti–Zr–Co.

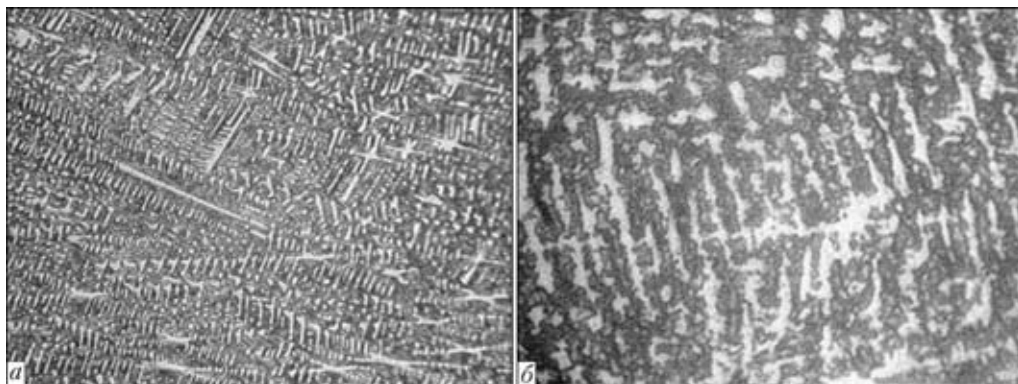


Рис. 3. Микроструктуры сплава Ti–Zr–Co в литом состоянии: а — $\times 500$; б — $\times 1000$

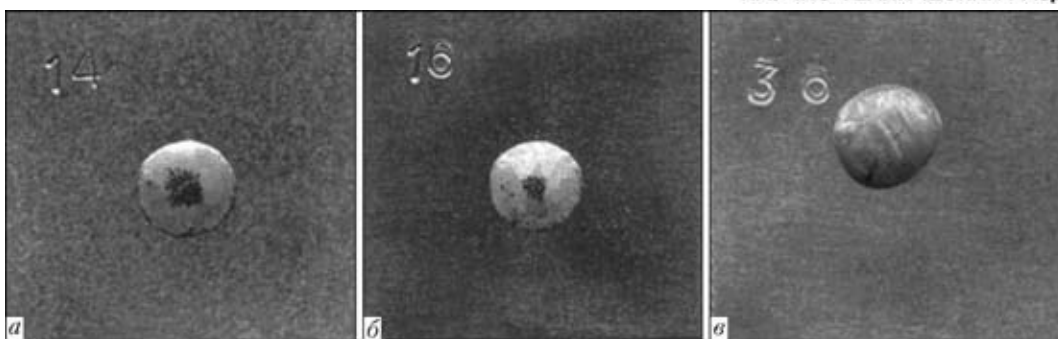


Рис. 4. Внешний вид образцов с расплавленным припоем на подложке из сплава ОТ4: а — ВПр16 (СТЕМЕТ 1201) ($T_{\text{пл}} = 990^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); б — Ti-Zr-Fe ($T_{\text{пл}} = 1000^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); в — Ti-Zr-Co ($T_{\text{пл}} = 920^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин)

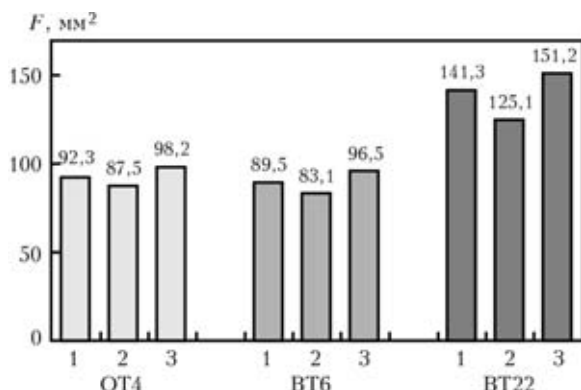


Рис. 5. Площади растекания литых припоев по сплавам ОТ4, BT6 и BT22 (нагрев в вакууме $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.): 1 — ВПр16 (СТЕМЕТ 1201) ($T_{\text{пл}} = 990^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); 2 — Ti-Zr-Fe ($T_{\text{пл}} = 1000^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); 3 — Ti-Zr-Co ($T_{\text{пл}} = 920^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин)

После выплавки опытных сплавов с целью проверки сходимости показаний расчетного метода и экспериментальных данных был проведен дифференциальный термический анализ и металлографические исследования данных сплавов.

Дифференциальный термический анализ сплавов проводили на установке ВДТА 8М-3 (скорость нагрева и охлаждения составляла $30^\circ\text{C}/\text{мин}$).

По результатам проведенных экспериментов для дальнейших более детальных исследований был выбран один потенциально перспективный сплав. Как видно из данных, представленных на рис. 2, выбранный сплав имеет температуру начала плавления 861°C и полного расплавления 880°C .

Как видно из рис. 3, а, б, данный сплав представляет собой смесь двух фаз — твердого раствора (белая фаза) и эвтектики (темная фаза). Тот факт, что на дифференциальной кривой при нагреве и охлаждении выбранного сплава (см. рис. 2) имеет место только один пик, может быть объяснено тем, что данные фазы, возможно, имеют близкие температуры плавления.

Для определения уровня смачивания и растекания экспериментального припоя по подложке из титановых сплавов различных классов была проведена серия экспериментов, целью которой было определить площади растекания припоев

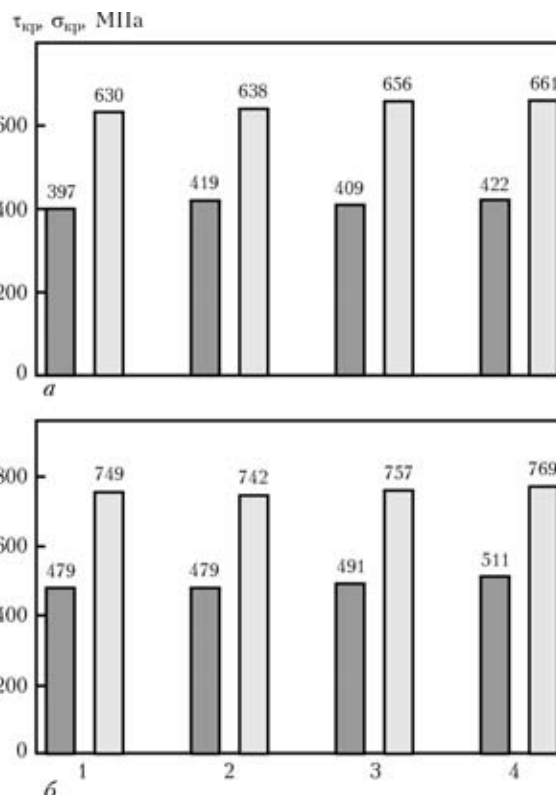


Рис. 6. Механические свойства нахлесточных (темные столбцы) и стыковых (светлые) соединений из сплавов ОТ4 (а) и BT6 (б), выполненных разными припоями: 1, 2 — соответственно ВПр16, литой и СТЕМЕТ 1201, аморфной лентой ($T_{\text{пл}} = 990^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); 3 — Ti-Zr-Fe ($T_{\text{пл}} = 1000^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин); 4 — Ti-Zr-Co ($T_{\text{пл}} = 920^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин)

системы Ti-Zr-Co по подложке из сплавов ОТ4 (низколегированный псевдо- α -сплав), BT6 (среднелегированный $\alpha + \beta$ -сплав) и BT22 (высоколегированный $\alpha + \beta$ -сплав). Для сравнения был взят припой Ti-12Zr-12Ni-23Cu (СТЕМЕТ 1201) в литом виде, а также новый экспериментальный припой Ti-35Zr-25Fe, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона.

Нагрев образцов проводили в вакуумной печи СГВ 2,4-2/15-ИЗ при следующих условиях: среда в рабочем пространстве печи — вакуум, $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.; скорость нагрева $\sim 30^\circ\text{C}/\text{мин}$; температура пайки для припоя Ti-Zr-Co составляла 920°C , для припоев Ti-Zr-Fe и СТЕМЕТ 1201 — 1000°C .



Площадь растекания припоев по подложке определяли с помощью программы AUTOCAD 2007. Результаты эксперимента приведены на рис. 4, 5.

Как можно заметить из приведенных диаграмм, площадь растекания припоя Ti–Zr–Co по титановым подложкам трех типов выше, чем у припоев других систем, что связано, возможно, с повышенным содержанием циркония в экспериментальном сплаве.

Предварительные механические испытания соединений, паяных припоем системы Ti–Zr–Co (рис. 6), показали, что прочность соединений из сплава VT6, выполненных экспериментальным припоем, выше, чем прочность соединений, выполненных стандартными припоями, несмотря на более низкую температуру пайки.

Приведенные результаты демонстрируют, что экспериментальный припой системы Ti–Zr–Co отвечает требованиям, предъявляемым к припоям для изготовления конструкций из титановых сплавов различного назначения.

Выводы

1. На основе результатов исследований сплавов системы Ti–Zr–Co, а также построенной поверхности ликвидуса этой системы выбран перспективный припой для пайки титановых сплавов различных классов.

2. Установлено, что площадь растекания опытного сплава по подложкам из титановых сплавов различных классов выше стандартных припоев для пайки титановых сплавов.

Based on the results of systematic studies of Ti–Zr–Co system alloys, allowing for published data, the liquidus surface of this system was constructed, using simplex-lattice experiment-planning method. It is established that this system has an area of alloys with lower liquidus temperature, the most promising in terms of filler alloy development. Spreadability of experimental filler metals over titanium alloys of different classes (OT4, VT6, VT22) was studied. Given are the data on mechanical properties of brazed joints.

3. Площадь растекания всех исследуемых сплавов увеличивается с повышением концентрации легирующих элементов в паяемых титановых сплавах. Так, при исследовании растекания наилучшие результаты получены на высоколегированном псевдо-β-сплаве VT22.

4. Механические свойства паяных соединений из сплавов OT4 и VT6, выполненных экспериментальным припоем, превышают прочность соединений, выполненных известными припоями.

1. Shapiro A., Rabinkin A. State of the art and new potential aerospace applications of titanium-based brazing filler metals: overview // 2-nd Intern. brazing and soldering conf., San-Diego, Feb. 17–19, 2003.
2. Лауко Н. Ф., Лауко С. В. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.
3. Shapiro A.E., Flom Y. A. Brazing of titanium at temperatures below 800 °C: review and prospective applications // http://www.titanium-brazing.com/publications/DVS-Manuscript_1020-Copy2-19-07.pdf.
4. Muller H., Breme J. Brazing of titanium with new biocompatible brazing filler alloys // Titanium-99 science and technology: Proc. of the Ninth world conf. on titanium, CRISM «Prometey», Saint-Petersburg, Russia 7–11, June 1999. — P. 1758–1655.
5. Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Иванченко В. Г. Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 27–32.
6. Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Зелинская Г. М. Исследование структуры и фазового состава сплавов на основе системы Ti–Zr–Fe // Там же. — 2010. — № 9. — С. 14–19.
7. Зедгендзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. — М.: Наука, 1976. — 390 с.
8. Scheffe H. Experiments with mixtures // J. Roy. Stat. Soc. B. — 1958. — 20, № 2. — P. 344.

Поступила в редакцию 07.05.2012

Научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ, ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

К 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники,
проф. Д. М. Рабкина и д-ра техн. наук, проф. И. И. Фрумина

25-26 октября 2012

г. Киев
ИЭС им. Е. О. Патона

Организаторы конференции: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Общество сварщиков Украины

Контакты: (044) 200 54 06; 200 63 57; 200 24 66; 200 82 77
E-mail: office@paton.kiev.ua; tzu@e-mail.ua

ИНТЕРВЬЮ С ГЕНЕРАЛЬНЫМ ДИРЕКТОРОМ ОАО «ТУРБОАТОМ» В. Г. СУББОТИНЫМ

Виктор Георгиевич, под Вашим руководством ОАО «Турбоатом» значительно укрепил и продвинул свои позиции на мировом рынке оборудования для АЭС, ТЭС и ГЭС. Какие экономические показатели характеризуют работу Вашего предприятия?

В 2011 г. доход от реализации продукции составил 1,4 млрд грн. с темпом роста к 2010 г. 136,7 %. Удельный вес экспорта в объеме реализованной продукции составил 67 %. Общая сумма средств, которые «Турбоатом» перечислил в государственный и местные бюджеты в виде налогов и других платежей, составила 256,2 млн грн. По итогам работы I квартала этого года темп роста составляет около 45 % по отношению к аналогичному периоду прошлого года.

Какая среднемесячная заработная плата промышленно-производственного персонала ОАО «Турбоатом»?

Увеличение объема производства позволило получать большую прибыль, что обеспечило и соответствующий рост заработной платы, который по отношению к аналогичному периоду прошлого года составляет около 12 %. Среднемесячная заработная плата промышленно-производственного персонала составляет 3447 грн., у основных производственных рабочих — 4803 грн. Это одна из самых высоких зарплат в машиностроении Украины. Рабочий персонал трудится в основных цехах в полные три смены. Средний возраст работающих на «Турбоатоме» за последние пять лет снизился с 51 года до 44.



Виктор Георгиевич, как отразилась катастрофа на АЭС в Японии на объеме заказов для атомной энергетики?

Катастрофа на АЭС в Японии практически не оказала влияния на развитие атомной энергетики и на объем заказов, которые выполняет «Турбоатом». Портфель заказов нашего предприятия состоит из реальных контрактов, их объем постоянно растет, и сегодня достигает 3 млрд грн. Ожидаем в ближайшее время ряд новых выгодных контрактов.

Какое оборудование для тепловых, атомных и гидроэлектростанций изготовило и отгрузило Ваше предприятие в этом году?

Три паровые турбины общей мощностью 748 тыс. кВт для блока № 6 ТЭС Аксу (Казахстан), блока № 5 Старобешевской ТЭС, блока № 8 Кураховской ТЭС (Украина);

— конденсатор и четыре ротора для третьего блока Ростовской АЭС (Россия);

— узлы и детали для модернизации конденсатора для ТЭС Аксу (Казахстан);

— четыре комплекта модернизированных турбин К-500-65/3000 для атомных электростанций России;

— энергетическое оборудование для блока № 1 Запорожской ТЭС, блока № 4 Зуевской ТЭС (Украина);

— комплекты энергетического оборудования для модернизации Назаровской ГРЭС, Ростовской АЭС, Балаковской АЭС, Иркутской ТЭЦ (Россия), ТЭС Гавана (Куба);

— три гидравлические турбины общей мощностью 192 тыс. кВт, в том числе для Днепро-ГЭС-2 ст. № 13, Днепродзержинской ГЭС ст. № 2, Каневской ГЭС № 12 (Украина);

— рабочее колесо и детали для Кременчугской ГЭС № 2 (Украина);

— закладные части для Камской ГЭС № 15, Гоцатлинской ГЭС, Новосибирской ГЭС (Россия);

— комплекты энергетического оборудования для модернизации Камской ГЭС и Нурекской ГЭС (Таджикистан).



Виктор Георгиевич, ОАО «Турбоатом» заключил крупнейший в своей истории контракт на изготовление оборудования для Ростовской АЭС. Что это за контракт?

Наше предприятие получило заказ на изготовление и поставку паровой турбины мощностью 1100 МВт с конденсатором для блока № 4 Ростовской АЭС. Сума сделки свыше 120 млн дол. США. Это действительно самый крупный контракт за всю историю «Турбоатома». Условия тендера по этому контракту были очень жесткими. Нашему успеху способствовало и то, что на Ростовской АЭС уже успешно работают два энергоблока с турбинами «Турбоатома», а конструкции эксплуатируемых турбин характеризуются высокой степенью надежности.

Существенное увеличение темпов развития ОАО «Турбоатом» требует модернизации технологического оборудования и применения прогрессивных технологий?

«Турбоатом» проходит систематическую техническую модернизацию. На техническое перевооружение в 2010 г. наше предприятие потратило 35 млн грн., в 2011 — 57,4 млн грн. Например, мы приобрели новейшие металлорежущие станки и сварочное оборудование. В текущем году на модернизацию, а также опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы запланировано потратить свыше 70 млн грн.

Какие новые сварочные технологические процессы осваиваются на Вашем предприятии?

За последнее время на «Турбоатоме» мы внедрили несколько новых технологий. К примеру, это электродуговое напыление деталей гидротурбин, технология орбитальной сварки, которая была применена при изготовлении конденсаторов с титановыми и нержавеющими трубками для Ростовской, Балаковской, Калининской, Нововоронежской АЭС.

С помощью специалистов ИЭС им. Е. О. Патона и НТУ «ХПИ» (руководители НИР А. К. Царюк, В. В. Дмитрик) внедряется новая сварочная технология для изготовления сварковоканных роторов среднего давления для турбин К-325. Конструктивной особенностью таких роторов является то, что они состоят из двух частей, соединенных автоматической сваркой. Одна часть





ротора выполнена из стали 20Х3МВФА, а другая — из 25Х2НМФА. Таким образом, мы впервые в турбостроении применили при изготовлении роторов технологию сварки разнородных сталей, отличающихся уровнем теплостойкости. Внедрение данных роторов обусловлено тем, что в процессе их эксплуатации одна из частей ротора нагревается до температуры 350, а другая — до 560 °С. Конструктивное выполнение новых роторов, изготовленных с учетом результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивает в процессе эксплуатации роторов существенное увеличение их виброустойчивости и надежности.

Что касается оборудования, то модернизируем линии газовой и плазменной резки. На сегодня модернизировано две установки для газовой резки фирмы «Messer Griesheim» и проводится тендер на модернизацию установки для плазменной резки. Для вспомогательного производства закуплено и внедрено оборудование для стыковой сварки инструмента.

Президент Украины поставил перед «Турбоатомом» задачу поставки оборудования для модернизации объектов гидроэнергетики Днепропетровского каскада. Как идет выполнение этого важнейшего для экономики Украины заказа?

«Турбоатом» модернизирует весь Днепровский каскад, а это 100 гидротурбин. Сегодня реконструировано уже более половины. В 2009 г. был запущен в работу первый гидроагрегат Днестровской гидроаккумулирующей электростанции, а сегодня мы успешно выполняем модернизацию второго гидроагрегата, главного стратегического объекта Украины. Это значительные по объему работы, ведь масса одной гидротурбины около 1,5 тыс. т. И значительная доля трудозатрат приходится на выполнение сварочных работ.

Хочу заверить Президента, что коллектив «Турбоатома» приложит все усилия, чтобы ко Дню энергетика следующего года выполнить эту очень важную для экономики Украины задачу.

Беседу записал д-р техн. наук В. В. Дмитрик

Харьковский турбинный завод был построен всего за три с половиной года и 21 января 1934 г. введен в эксплуатацию. С этой даты начинается отсчет славных побед харьковских турбостроителей. Уже в 1935 г. с заводского стенда сошла первая паровая турбина мощностью 50 МВт, в 1938 г. была изготовлена паровая турбина мощностью 100 МВт и генератор к ней — на то время самые мощные турбины.

Сегодня ОАО «Турбоатом», являясь головной научной организацией Министерства промышленной политики Украины по энергетическому машиностроению, входит в число ведущих турбостроительных фирм мира.

Предприятие специализируется на выпуске турбин для тепловых, атомных электростанций, теплоэлектроцентралей, гидравлических турбин для гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций, газовых турбин и парогазовых установок для ТЭС и другого энергетического оборудования.

Производственные возможности позволяют выпускать в год паровых и гидравлических турбин общей расчетной мощностью соответственно 8 и 2 млн кВт. Производство турбин осуществляется по замкнутому циклу: от проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ до изготовления, сборки, испытания турбин и отгрузки.

Ежегодно проводятся внутренние аудиты Системы менеджмента качества предприятия и подтверждается ее результативность. Первичный аудит на ОАО «Турбоатом» проходил в 1996 г., и уже на протяжении 15 лет предприятие подтверждает соответствие Системы менеджмента качества Международному стандарту ISO 9001.

В сферу сертификации входят: проектирование, производство, шефнадзор за монтажом и обслуживание стационарных паровых турбин, парогазовых установок, гидравлических турбин, предтурбинных затворов, подогревателей дымовых вытяжных вентиляторов, конденсаторов для паровых турбин и эжекторов.

Наличие у ОАО «Турбоатом» Сертификата соответствия, выданного независимой австралийской компанией «SAL GLOBAL», дает возможность на равных конкурировать с ведущими производителями турбостроительного оборудования в мире, принимать участие в торгах и выигрывать тендеры.



КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ (Обзор)

Г. И. ЛАЩЕНКО, канд. техн. наук (НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнен анализ комбинированных и гибридных технологий сварки с использованием в качестве источников нагрева газового пламени, электрической дуги, лазера, электронного луча и различных способов защиты. Показана целесообразность промышленного использования различных способов двух- и трехдуговой сварки плавящимися электродами диаметром 1...2 мм. Предложено использовать в качестве комбинированных источников нагрева дугу и газовое пламя, лазерный и электронный луч.

Ключевые слова: комбинированные и гибридные технологии, источники энергии, электрическая дуга, газовое пламя, лазер, электронный луч, защитная среда

Решение вопросов свариваемости конкретного материала, обеспечение требуемого качества швов и соединений сварных конструкций, при достаточной производительности, является главной задачей технологии сварки [1–4]. При различных технологиях сварки плавлением эту задачу решают за счет выбора типа, мощности и распределения между потребителями источников нагрева, комбинирования электродного и присадочного материала в части формы и химического состава, вида и состава защиты зоны сварки, а также других способов и приемов [1, 2, 5, 6]. В частности, в сварочном производстве получили распространение комбинированные технологические процессы, в которых одновременно используют два и более одно- или разнородных источников энергии [7, 8]. В случае применения разнородных источников энергии, воздействующих на одну зону обработки (например, сварочную ванну), вследствие чего совместный результат превосходит сумму результатов действия каждого из составляющих энергетических источников, процесс называют гибридным. В последние годы возрос интерес к гибридным процессам сварки, в которых используют комбинированную энергию лазерного луча, плазмы, электрической дуги [9].

Целью настоящей работы является анализ существующих и определение новых возможных направлений совершенствования технологии сварки плавлением на основе комбинирования энергии и защитной среды, подаваемых в рабочую зону.

Комбинирование источников энергии и защитных сред. При сварке основными источниками энергии являются химические реакции, протекающие с выделением тепла (экзотермические), электрическая дуга, низкотемпературная плазма, электронный луч, лазерное излучение, электроконтактный, электрошлаковый и индукционный

нагрев, нагрев в электроплитах, трением и ультразвуком [1, 3, 5, 6, 10, 11]. При необходимости механическую энергию в зону сварки вводят путем статического, динамического и импульсного нагружения.

В табл. 1 приведены существующие и возможные сочетания способов сварки на основе двойных комбинаций источников энергии и видов механического нагружения применительно к соединению металлических материалов.

Естественно, что количество возможных способов сварки может быть расширено за счет тройных комбинаций источников термической энергии и видов механического нагружения.

Внутри конкретного способа сварки плавлением могут применяться различные способы защиты металла от воздуха (табл. 2) [9, 12].

В случае применения нескольких источников нагрева для каждого из них могут быть использованы как одинаковые, так и различные по составу и конструктивному исполнению способы защиты.

Защитные среды, выполняя свою основную функцию защиты расплавленного металла от воздуха, оказывают огромное влияние на физические, металлургические и технологические характеристики процесса сварки.

Ниже рассмотрены некоторые известные и предлагаемые автором способы сварки с комбинированием источников нагрева и защитных сред.

Двух- и трехдуговая сварка плавящимися электродами. Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом занимает лидирующие позиции среди других сварочных технологий. Наиболее широко применяют однодуговую сварку. Менее распространены двух-, трех-, четырех- и пятидуговая сварка в общую ванну [9]. Последние две технологии в основном используют при производстве труб большого диаметра. Двух- и трехдуговую сварку под флюсом проволоками диаметром 3...5 мм применяют в судостроении, резервуаростроении, трубном производстве, при изготов-

Таблица 1. Комбинирование источников термической энергии и видов механического нагружения при сварке

Источник термической энергии и вид механического нагружения	ГП	ТР	ЭД	НП	ЭЛ	ЛЛ	ЭКН	ЭШН	НЭ	ИН	Т	УЗ	СН	ДН	ИМН
Газовое пламя (ГП)	+	+	+				+	+		+	+		+	+	
Термитная реакция (ТР)	+	+	+					+		+		+	+	+	
Электрическая дуга (ЭД)	+	+	+	+		+	+	+		+		+	+	+	
Низкотемпературная плазма (НП)			+	+		+			+	+			+	+	
Электронный луч (ЭЛ)			+		+	+				+		+	+	+	
Лазерный луч (ЛЛ)			+	+	+	+	+		+	+		+	+	+	
Электроконтактный нагрев (ЭКН)			+			+	+		+	+	+		+	+	+
Электрошлаковый нагрев (ЭШН)		+	+	+				+		+		+	+		+
Нагрев в электролитах (НЭ)				+		+	+			+		+	+	+	
Индукционный нагрев (ИН)	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+	
Трение (Т)	+						+			+	+		+	+	
Ультразвук (УЗ)			+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	
Статическое нагружение (СН)	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Динамическое нагружение (ДН)	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	
Импульсное нагружение (ИМН)							+	+							+

Примечание. Знак «+» обозначает, что процесс применяется или возможен.

лении балочных и листовых конструкций различного назначения с протяженными швами.

В работе [13] показано, что двух- и трехдуговую сварку в защитных газах и под флюсом электродными проволоками диаметром 1...2 мм, учитывая их технологические возможности, целесообразно применять более широко, взамен однодуговой сварки проволоками диаметром 3...5 мм, в том числе для решения таких важных задач, как повышение производительности труда (в 2...3 раза), снижение тепловложения (в 1,7...2,0 раза), уменьшение остаточных деформаций и обеспечение требуемых служебных характеристик различных металлоконструкций.

Главным недостатком двух- и трехдуговой сварки в защитных газах считается повышенное разбрызгивание металла и нарушение стабильности процесса в результате магнитного взаимодействия дуг. В то же время эта и другие проблемы могут быть успешно решены благодаря возможностям, которыми в настоящее время располагает электротехника, электроника и сварочная металлургия (рациональное питание дуг, специальные источники тока, системы управления, защитные газовые среды, порошковые проволоки и др.).

Одним из направлений дальнейшего совершенствования двухдуговой сварки открытыми дугами может быть использование двухскоростной газовой защиты одной (первой) или обеих дуг (рис. 1).

В первом варианте, приведенном на рис. 1, а, первую по ходу сварки дугу 1, питаемую пос-

Таблица 2. Виды защиты расплавленного металла от воздуха при различных способах сварки плавлением

Способ защиты	Способ сварки					
	Газовая	Дуговая	Плазменная	Лазерная	Электронно-лучевая	Электрошлаковая
Газами:						—
инертными	—	+	+	+	+	—
активными	+	+	+	+	—	—
смесями	+	+	+	+	—	—
парами	—	+	—	—	—	—
сплошная струя	+	+	+	+	+	—
кольцевая струя	—	+	—	+	—	—
двухслойные струи	—	+	+	+	—	—
двухскоростные струи	—	+	+	—	—	—
импульсная струя	—	+	+	+	—	—
в камерах	—	+	+	+	—	—
Газами и шлаками	+	+	+	+	+	—
Шлаками (под флюсом)	—	+	—	—	—	+
Созданием вакуума	—	+	+	+	+	—

Примечание. Знак «+» обозначает возможность применения способа защиты; «—» — способ защиты не используется.

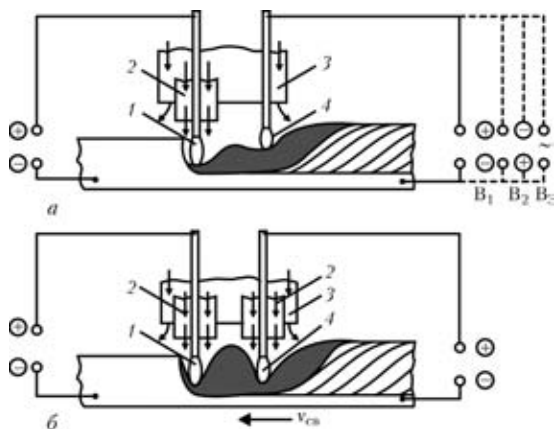


Рис. 1. Схема двухдуговой сварки с двухскоростной газовой защитой одной (а) и двух (б) дуг: 1, 4 — соответственно первая и вторая дуга; 2 — сопло для подачи высокоскоростного потока газа; 3 — сопло для подачи защитного газа с обычной скоростью

тоянным током обратной полярности, дополнительно сжимают потоком защитного газа, подаваемого по соплу 2 со скоростью, значительно превышающей скорость потока основного защитного газа, подаваемого по соплу 3. Основной защитный газ используется для защиты расплавленного металла и второй дуги 4.

Во втором варианте (рис. 1, б) скоростной поток используют и для сжатия второй дуги 4. В этом случае концентрация нагрева больше, чем в предыдущем случае. Эффективность использования дополнительного скоростного потока газа аргона впервые была исследована при однодуговой сварке алюминия плавящимся электродом [13, 14]. При этом глубина проплавления и полный тепловой КПД процесса сварки на оптимальных режимах увеличились примерно в два раза. По сути речь идет о плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом, а улучшение энергетических характеристик связано с дополнительным сжатием дуги и улучшением теплопередачи к основному металлу под воздействием скоростного потока газа.

В работе [15] показано, что повышение скорости дополнительного потока защитного газа до 40 м/с позволяет увеличить глубину проплавления стали в 1,5...2,0 раза по сравнению с глубиной проплавления при обычном способе сварки электродной проволокой диаметром 1...1,2 мм.

При сварке с высокой скоростью истечения дополнительной струи CO_2 образуется узкий шов с коэффициентом проплавления 0,71...0,33, высоким усилением без плавного перехода к основному металлу.

На наш взгляд, формирование швов может быть улучшено за счет использования двух дуг, горящих в общую ванну и питаемых от отдельных источников.

В этом случае для дополнительного сжатия дуги (дуг) и защиты зоны сварки могут быть использованы как одно-, так и разнородные газы (смеси газов). Улучшение формирования швов и уменьшение разбрызгивания также возможно за счет разнополярного горения первой и второй дуги (вариант B_2), питание второй дуги переменным током (вариант B_3) (рис. 1, а), использования одной или двух порошковых проволок.

Эффект, аналогичный использованию порошковой проволоки, может быть достигнут за счет подачи в зону сварки, в том числе посредством скоростной струи газа, небольшого количества флюса соответствующего состава. Такой процесс может быть использован как при сварке сталей, так и других сплавов, в частности, алюминиевых.

Трехдуговая сварка плавящимися электродами диаметром 1...2 мм в защитных газах в общую ванну пока недостаточно исследована. В случае трехдуговой сварки большую роль играет схема питания дуг, минимизирующая их магнитное взаимодействие. Три возможных варианта подключения дуг к независимым источникам тока представлены на рис. 2. Согласно варианту, представленному на рис. 2, а, первая и третья по ходу сварки дуги питаются постоянным током обратной полярности, а вторая дуга — постоянным током прямой полярности. Поскольку направление тока, протекающего по первой и третьей дуге не совпадает с направлением тока, который протекает по второй дуге, то они будут отталкиваться от нее, а сварка будет протекать более стабильно, чем при питании всех дуг током обратной полярности.

В варианте подключения дуг, представленном на рис. 2, б, первая дуга питается постоянным током обратной полярности, третья — прямой по-

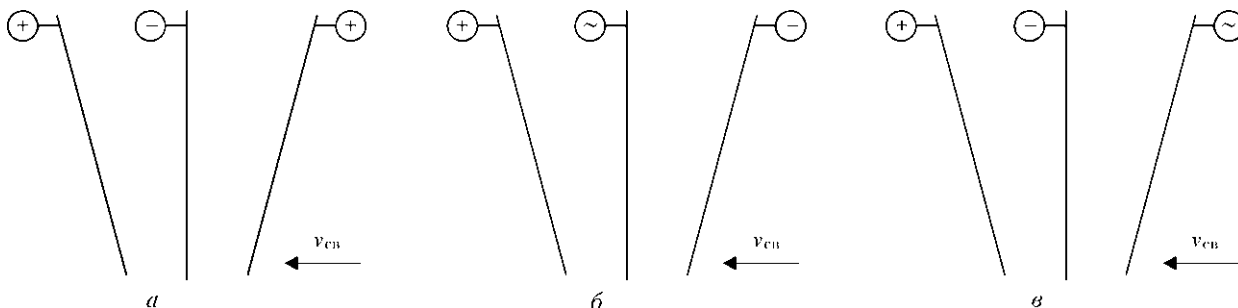


Рис. 2. Схемы подключения электродов при трехдуговой сварке в защитных газах на постоянном токе (а), постоянном и переменном токе (б, в)

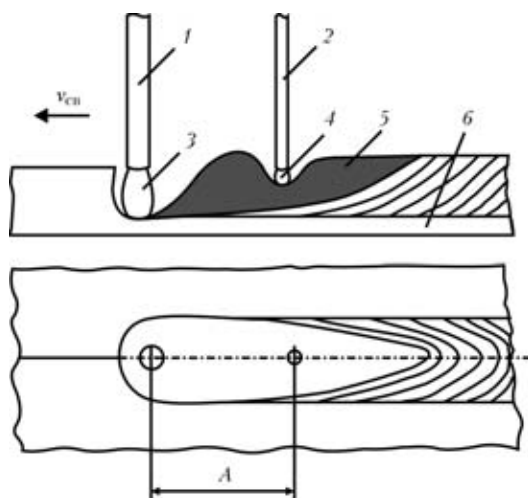


Рис. 3. Схема способа двухдуговой сварки двумя дугами асимметричной мощности: 1, 2 — соответственно первый и второй электрод; 3, 4 — соответственно первая и вторая дуга; 5 — сварочная ванна; 6 — свариваемое изделие; A — расстояние между электродами

лярности, а вторая дуга — переменным током. В этом случае первая и третья дуга поочередно, с частотой переменного тока, притягиваются и отталкиваются относительно второй дуги.

Вариант питания дуг, представленный на рис. 2, в, может иметь некоторые преимущества при сварке ферромагнитных материалов по сравнению с вариантом на рис. 2, б.

Во всех рассмотренных вариантах повышению стабильности процесса способствуют оптимизация параметров режима сварки, выбор соответствующего защитного газа (смеси газов) и использование в качестве одного, двух или трех электродов порошковой проволоки. В случае, представленном на рис. 2, а, рациональной может быть комбинация, при которой в качестве второго электрода используется неплавящийся вольфрамовый электрод, подключенный к источнику постоянного тока или питающийся модулированным током.

Трехдуговая сварка может обеспечить примерно трехкратное повышение производительности и существенно расширить диапазон регулирования тепловложения при соединении различных материалов. В практике сварочного производства часто возникает необходимость более тонкого регулирования тепловложения и локального перераспределения тепла в границах образующейся сварочной ванны. С этой целью при однодуговой сварке в защитных газах и под флюсом используют питание дуги модулированным током или колебания конца электрода по различным траекториям [9].

При двух- и многодуговой сварке появляются дополнительные возможности реализации эффекта модуляции тока и колебания электрода. В качестве такого примера можно привести способ сварки, представленный на рис. 3, где предложено использовать две дуги, которые существенно от-

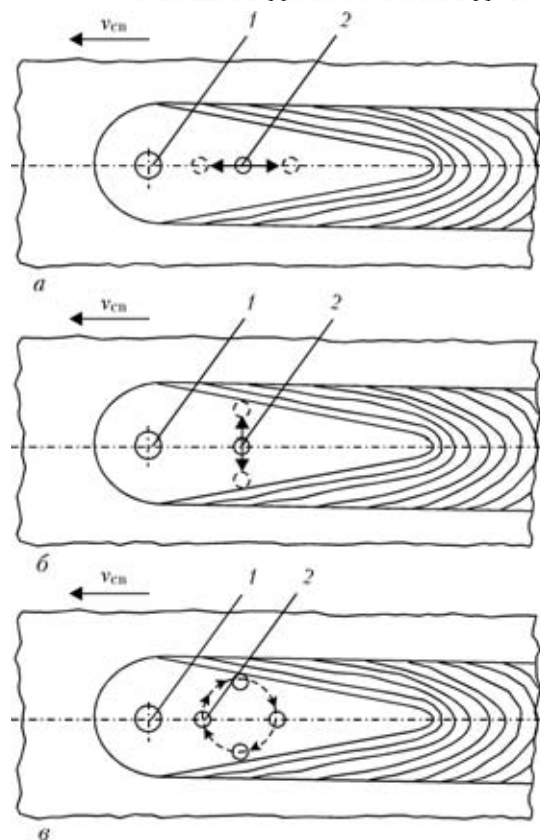


Рис. 4. Схема двухдуговой сварки с колебаниями второго электрода вдоль (а), поперек (б) шва и по кругу (в)

личаются мощностью, а именно — мощность второй по ходу сварки дуги значительно ниже мощности первой дуги. При этом базовые характеристики процесса (тепловложение, производительность) в основном определяются мощностью первой дуги, а вторая, относительно маломощная дуга, служит для более тонкого регулирования термических, гидродинамических и металлургических процессов в сварочной ванне. Такое влияние второй дуги усиливается за счет использования механических колебаний второго электрода (рис. 4) или модуляции тока, которым питается эта дуга.

Тот или иной вид колебаний и его параметры выбирают в зависимости от того, какой технологический эффект хотят достигнуть (улучшить формирование швов, увеличить скорость сварки, уменьшить содержание вредных газов в сварочной ванне, повысить стойкость против образования трещин, пор, снизить количество неметаллических включений, улучшить механические свойства и служебные характеристики сварных соединений).

Вариант двухдугового процесса с питанием второй дуги модулированным током, когда первая дуга горит стационарно, позволяет, не изменяя базовых параметров режима первой дуги, а значит и основных условий образования шва (в частности, глубины провара), активно влиять на его кристаллизацию за счет подачи импульсов тока на вторую дугу,



расположенную в хвостовой, более холодной, части сварочной ванны. При этом создаются более благоприятные условия и расширяются возможности для регулирования процесса формирования и кристаллизации шва в сравнении с односторонней сваркой модулированным током.

Реализация предлагаемого способа возможна и в варианте совместного использования колебаний второй маломощной дуги и ее питания модулированным током. При этом подача импульсов тока может осуществляться как постоянно на всей траектории движения дуги, так и в отдельных ее точках, в том числе с использованием мгновенных остановок электрода в этих точках. В последнем случае появляются дополнительные возможности для термоциклической обработки различных зон сварного соединения в зависимости от вида и состава свариваемых материалов.

Упомянутый способ может быть реализован как при сварке под флюсом, так и в защитных газах материалов различного назначения не только без снижения производительности, но и с ее увеличением в 1,3...1,5 раза.

Гибридная сварка (дуга + газовое пламя). В сварке и родственных процессах для получения тепла широко используют реакцию сгорания углеводородов.

Низшая теплота сгорания основных горючих газов и температура пламени в смеси с кислородом приведены в табл. 3 [16]. Эффективная тепловая мощность пламени может регулироваться в весьма широких пределах.

В серийной огневой аппаратуре (сварочных, линейных закалочных горелках и резаках для кислородной резки) скорость истечения смеси находится в пределах 40...160 м/с, в горелках ракетного типа — 800...1000 м/с, а в установках детонационного напыления — до 3000 м/с [16, 17].

Максимальное давление газовой струи на сварочную ванну при скоростях истечения горючей смеси 120...150 м/с может достигать 1 Па, а глубина проплавления при большой тепловой мощности пламени — 15 мм [17]. Давление дугового потока, как известно, пропорционально квадрату силы тока. При дуговой сварке вольфрамовым электродом в аргоне при силе тока 200 А давление на оси дугового потока составляет $5 \cdot 10^{-2}$ Па [5]. С возрастанием силы тока до 500 А давление увеличивается примерно в 2 раза, оставаясь на порядок ниже, чем в рассматриваемом выше случае газовой сварки.

Хотя газовое пламя и является менее сосредоточенным источником нагрева ($10^2...10^3$ Вт/см²) чем электрическая дуга ($10^3...10^5$ Вт/см²), оно характеризуется рядом преимуществ:

возможностью весьма гибко регулировать распределение теплоты по заданным поверхностям

Таблица 3. Низшая теплота сгорания и температура пламени горючих газов в смеси с кислородом

Газ	Низшая теплота сгорания, мДж/м ³	Температура пламени в смеси с кислородом, °С
Ацетилен	100,8	3100...3200
Н-бутан	111,2	2700...2900
Водород	19,2	2400...2600
Метан	32,0	2400...2700
Пропан	83,2	2700...2850
МАПП	83,2	2800...2900

изделия, а также между основным и присадочным металлом при сварке и наплавке;

не подвержено влиянию магнитных полей; газодинамическое воздействие на поверхность расплавленного металла может изменяться в широких пределах и использоваться для регулирования глубины провара, формирования шва и удержания жидкого металла в сварочной ванне, в том числе при различных положениях шва в пространстве.

Еще в 1930 г. Г. Мюнтер предложил способ сварки «аркоген», объединявший нагрев ацетилено-кислородным пламенем и электрической дугой. Из-за сложности существующей тогда техники ручной сварки этот способ не составил конкуренции распространенным в то время более простым способам с одним источником нагрева [18].

Можно привести только один известный пример промышленного использования комбинированной технологии сварки электрической дугой и газовым пламенем — дуговая сварка с предварительным или сопутствующим подогревом газовым пламенем. Правда, в этом случае источник газопламенного нагрева действует за пределами сварочной ванны. Гибридный же способ сварки предполагает, что два разнородных источника нагрева (в данном случае дуга и газовое пламя), воздействуют на одну зону обработки (сварочную ванну). Такое воздействие может осуществляться различным образом (рис. 5).

На рис. 5, а представлен вариант гибридной сварки электрической дугой и газовым пламенем, при котором газовое пламя расположено перед электрической дугой в непосредственной близости от нее. В этом случае газовое пламя может способствовать увеличению глубины провара, скорости плавления электродной проволоки и влиять на перенос жидкого металла через дуговой промежуток.

В варианте гибридной сварки электрическая дуга + газовое пламя, представленном на рис. 5, б, источник газопламенного нагрева расположен за дугой и, изменяя расстояние A между источниками нагрева, можно в достаточно широком диапазоне изменять термический цикл сварки, фор-

мирование швов, в том числе при выполнении многослойных и угловых швов.

Гибридная сварка электрическая дуга + газовое пламя может быть реализована в сочетании с газовой и газо-шлаковой защитой в варианте механизированного процесса. Учитывая специфику предлагаемой технологии, ее можно использовать для сварки и ремонта изделий из углеродистых сталей, чугуна, меди и медных сплавов.

Комбинированные технологии лазерной, электронно-лучевой и дуговой сварки. В последние годы в мире возрос интерес к лазерной сварке, гибридным и комбинированным способам сварки [19].

Для повышения экономической эффективности лазерной сварки (снижения требований к подготовке кромок, уменьшения опасности образования утонений, пор, подрезов, снижения капитальных и других затрат) используют различные приемы и способы, в том числе сочетание лазерного нагрева с плазменным дуговым или высокочастотным [9, 11, 20–25].

Установлено [20], что при односторонней гибридной сварке сталей толщиной более 5 мм 1 кВт мощности дуги может заменить 0,5 кВт мощности лазерного излучения. Речь идет об использовании менее мощных (более дешевых) лазеров для сварки толстолистового металла, что в ряде случаев экономически целесообразно. Однако выяснилось, что применение гибридного процесса при фиксированной мощности лазерного излучения имеет смысл только до определенной толщины свариваемого металла, выше которой глубина проплавления не возрастает, независимо от снижения скорости сварки. Для дальнейшей интенсификации процесса проплавления необходимо увеличивать мощность лазерного излучения.

Считают [19], что капитальные затраты на волоконную лазерную установку составляют около 0,1 млн евро на 1 кВт выходной мощности. Поэтому экономическая эффективность лазерно-дуговой сварки в основном будет определяться капитальными затратами на приобретение более мощной лазерной установки.

Если исходить из необходимости увеличения глубины проплавления при лазерной сварке без увеличения мощности лазерной установки, то эта задача может быть решена и за счет использования вакуумной защиты. С одной стороны, это лишает лазерный луч определенных преимуществ перед электронным, а с другой — даже небольшая степень вакуумирования позволяет увеличить проплавление в 3...5 раз [26]. Кроме того, специфика лазерного луча позволяет передавать его через прозрачное ограждение или с помощью волоконной оптики, что может быть использовано при изготовлении ряда изделий в вакуумной камере.

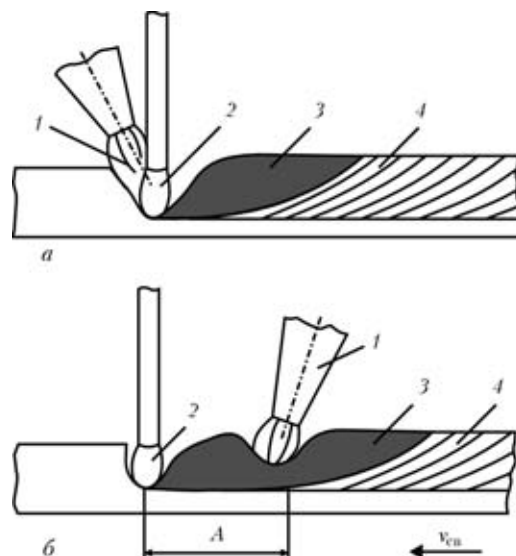


Рис. 5. Схема гибридной сварки дуга + газовое пламя: а — газовое пламя расположено перед дугой; б — за дугой; 1 — газовое пламя; 2 — электрическая дуга; 3 — сварочная ванна; 4 — шов

При лазерной сварке в вакууме лучом мощностью порядка 5 кВт можно прогнозировать увеличение глубины проплавления стали до 20 мм. Такое проплавление в случае обычной лазерной сварки может быть получено при мощности лазера около 20 кВт, т. е. для реализации этой технологии потребуется дополнительно порядка 1,5 млн евро капитальных затрат.

При лазерной сварке в вакууме необходимы дополнительные капитальные затраты на вакуумную камеру и систему вакуумирования. Если эти затраты не выходят за пределы 1...1,3 млн евро, то вариант лазерной сварки в вакууме металла толщиной 20 мм является экономически целесообразным.

Задача лазерной сварки в вакууме может решаться проще тогда, когда на предприятии уже эксплуатируется установка для электронно-лучевой сварки. Вакуумная система этой установки может быть использована для лазерной сварки. Более того, в этом случае появляются экономические предпосылки для реализации гибридной сварки лазерный луч + электронный луч. Технологический эффект и экономическую целесообразность такого процесса сегодня оценить трудно. Электронный луч и лазер имеют различную природу, но их совмещение вполне допустимо, учитывая, что лазерный луч не подвержен воздействию магнитных полей и может применяться с электронным лучом в различных вариантах. Нужны эксперименты. Что касается комбинированной электронно-лучевой и дуговой сварки, то такие эксперименты проводились [27].

Установлено, что при двусторонней комбинированной сварке дуговой разряд расширяет парогазовый канал в корневой части шва. При этом



силы, обусловленные воздействием электронного пучка и дугового разряда на жидкий металл, имеют противоположное направление, в результате чего стабилизируются гидродинамические процессы в канале проплавления, снижается разбрызгивание и повышается устойчивость расплавленного металла против вытекания в широком диапазоне параметров режима.

Выводы

1. Двух- и трехдуговая сварка плавящимися электродами диаметром 1...2 мм с использованием газовой и газшлаковой защиты расплавленного металла, дополнительного сжатия дуги (дуг) газовым потоком, питания одной из дуг модулированным током и перемещением конца электрода по заданным траекториям позволяет повысить производительность, снизить тепловложение, перераспределить тепловые потоки в сварочной ванне и улучшить формирование швов. Применение этих технологий целесообразно при изготовлении металлоконструкций из углеродистых, низколегированных, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов, свариваемость которых является недостаточной при использовании традиционной однодуговой сварки.

2. Проведенный анализ показал перспективность использования в сварочных процессах комбинации таких источников энергии, как электрическая дуга и газовое пламя, а также лазерный и электронный луч, поскольку эти сочетания позволяют повышать глубину провара, улучшать формирование швов с одновременным снижением себестоимости процесса сварки (по сравнению с выполнением проваров той же глубины каким-либо одним из указанных источников).

1. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Сварка и свариваемые материалы*: В 3 т. — Т.1: Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
3. *Теория сварочных процессов* / Под ред. В. Ф. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
4. *Патон Б. Е., Труфяков В. И.* Пути повышения надежности и снижения металлоемкости сварных конструкций // Проблемы сварки и специальной металлургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 4–10.
5. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
6. *Сварка в машиностроении: Справочник в 4 т.* / Под ред. Н. А. Ольшанского. — М.: Машиностроение, 1978. — Т. 1. — 504 с.

7. *Литвинов А. П.* Направления развития комбинированных и гибридных технологий сварки и наплавки // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 48–52.
8. *Лащенко Г. И.* Применение принципа комбинирования в сварочном производстве // Сварщик. — 2010. — № 1. — С. 16–20.
9. *Лащенко Г. И.* Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. — Киев: Екотехнологія, 2006. — 384 с.
10. *Попилов Л. Я.* Основы электротехнологии и новые ее разновидности. — Л.: Машиностроение, 1971. — 216 с.
11. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
12. *Новожилов Н. М.* Основы металлургии дуговой сварки в газах. — М.: Машиностроение, 1979. — 231 с.
13. *Лащенко Г. И.* Технологические возможности одно-, двух- и трехдуговой сварки // Сварщик. — 2011. — № 2. — С. 14–19.
14. *Алов А. А., Шмаков В. М.* Аргонодуговая сварка с дополнительным потоком аргона // Свароч. пр-во. — 1962. — № 3. — С. 13–15.
15. *Ковалев И. М., Акулов А. И.* Особенности газодинамического способа управления проплавлением действием дуги при сварке плавящимся электродом в углекислом газе // Там же. — 1967. — № 6. — С. 19–21.
16. *Мидлов С. Г.* Газотермические покрытия в технологии упрочнения и восстановления деталей машин (Обзор) Ч. 1. Газопламенное и детонационное напыление // Там же. — 2007. — № 10. — С. 35–45.
17. *Антонов И. А.* Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 264 с.
18. *Muenter H.* Der einfluss von schweiss und schutzgas flammen auf die vorgänge im schweislichtbogen // Elektroschweißung. — 1933. — № 7. — S. 80–84.
19. *Лащенко Г. И.* Тенденции развития технологий сварочного производства // Сварщик. — 2011. — № 6. — С. 6–11.
20. *Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
21. *Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Бернацкий и др. // Там же. — 2010. — № 10. — С. 37–40.
22. *Райзен У., Ольмок С.* Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом // Там же. — 2009. — № 4. — С. 46–51.
23. *Мидельдорф К., Хофе фон Д.* Тенденции развития технологий соединения материалов // Там же. — 2008. — № 11. — С. 39–47.
24. *Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий* / У. Дилтай, Л. Штайн, К. Вестке и др. // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 151–157.
25. *Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж.* Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) // Там же. — 2010. — № 6. — С. 38–47.
26. *Назаренко О. К., Морочко В. П.* Применение мощных CO₂-лазеров в зарубежном сварочном производстве (Обзор) // Там же. — 1988. — № 4. — С. 43–46.
27. *Овечников С. А., Драгунов В. К.* Двусторонняя одновременная сварка электронным лучом и дуговым разрядом // Радиотехника, электротехника и энергетика: Восьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва 28 февр.–1 марта, 2002: Тез. докл. — М.: Изд-во МЭИ, Т. 3. — 2002. — С. 270.

Analysis of the combined and hybrid welding technologies using gas flame, electric arc, laser, and electron beam as the heat sources, and various shielding methods was performed. The rationality of industrial application of various processes of two- and three-arc welding with 1...2 mm dia. consumable electrodes is shown. It is proposed to use the arc and gas flame, laser and electron beam as the combined heat sources.

Поступила в редакцию 03.04.2012

СОЗДАНИЕ СВАРНОКОВАННОГО КОМБИНИРОВАННОГО РОТОРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОЩНОСТЬЮ 325 МВт

А. К. ЦАРЮК, канд. техн. наук, **С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж., **В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

Н. Н. ГРИШИН, канд. техн. наук, **А. В. ВАВИЛОВ**, **А. Г. КАНТОР**, **Е. Д. ГРИНЧЕНКО**, инженеры
(ОАО «Турбоатом», г. Харьков)

Описан сварнокованный комбинированный ротор среднего давления для паровой турбины мощностью 325 МВт, изготавливаемый из стали 20Х3МВФА (высокотемпературные условия эксплуатации) и стали 25Х2НМФА (низкотемпературные условия). Выбраны сварочные материалы, разработана и аттестована технология механизированной сварки под флюсом соединений сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415. Оценены физико-механические свойства металла сварного соединения в состоянии после высокого отпуска в случае применения как отечественных, так и импортных сварочных материалов.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, низколегированная сталь, тепловая энергетика, паровая турбина, ротор, комбинированное сварное соединение, сварочные материалы, механические свойства соединений

В последние годы в турбостроении наметилась тенденция проектирования и изготовления мощных паровых турбин со сварным комбинированным ротором, работающим в высоко- и низкотемпературном режиме [1, 2]. Последние изготавливаются из разнородных конструкционных материалов для работы цилиндров при высоком давлении (ЦВД), среднем давлении (ЦСД) и низком давлении (ЦНД). Особенностью выполнения сварки комбинированных соединений ротора является возможность развития процессов диффузии углерода и легирующих элементов в зоне сплавления разнородных сталей, что существенно сказывается на формировании структуры и служебных свойств сварных соединений. Кроме того, существует весьма сложный вопрос послесварочной термической обработки таких комбинированных соединений, так как ее необходимо выполнять для

каждой из свариваемых сталей в различных температурных интервалах.

В ОАО «Турбоатом» был спроектирован сварнокованный комбинированный ротор ЦСД для паровой турбины мощностью 325 МВт (рис. 1). При этом часть ротора, работающего в высокотемпературном режиме (1–11 ступень), должна изготавливаться из стали ЭИ 415 (20Х3МВФА), а для 12–16 ступеней, работающих в низкотемпературном режиме, предусмотрено применение стали 25Х2НМФА. Предложенная конструкция комбинированного ротора ЦСД позволяет также исключить применение насадных дисков на ступенях низкого давления. Для внедрения в производство созданной конструкции необходимо разработать технологический процесс изготовления сварнокованного комбинированного ротора. Поэтому целью настоящей работы являлся выбор сварочных материалов и разработка технологии автоматической сварки под флюсом, обеспечивающей качество и требуемые служебные свойства сварных соединений создаваемого комбинированного ротора.

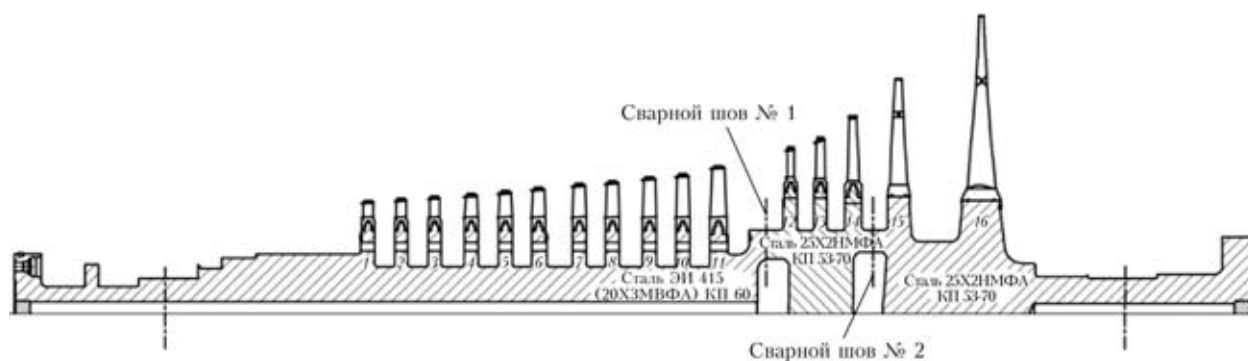


Рис. 1. Эскиз продольного сечения сварного ротора ЦСД турбины мощностью 325 МВт



Таблица 1. Содержание химических элементов в проволоках для сварки роторных сталей и в металле шва контрольного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415, мас. %

Объект исследования	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	S	P
Проволока Св-08ХН2ГМЮ (ГОСТ 2246–70)	0,06...0,11	0,25...0,55	1,00...1,40	2,00...2,50	0,70...1,10	0,40...0,65	0,06...0,18	≤ 0,03	≤ 0,03
Проволока Св-08ХН2ГМЮ ¹⁾	0,08	0,32	1,09	2,15	0,87	0,47	0,11	0,012	0,015
Проволока Union S 3 NiMoCr (ISO 26304)	≤ 0,15	≤ 0,4	1,20...1,90	1,50...2,25	0,20...0,65	0,30...0,80	—	≤ 0,018	≤ 0,018
Проволока Union S 3 NiMoCr ¹⁾	0,14	0,05	1,84	2,06	0,35	0,35	—	0,011	0,013
Металл шва при использовании проволоки Св-08ХН2ГМЮ	0,032	0,440	0,66	2,14	0,86	0,52	—	0,012	0,033
Металл шва при использовании проволоки Union S 3 NiMoCr	0,088	0,319	1,61	2,31	0,44	0,60	—	0,009	0,022
Union S 3 NiMoCr ²⁾	0,09±0,01	0,3±0,1	1,3±0,1	2,0±0,1	0,6±0,05	0,5±0,1	—	min	min

¹⁾ Фактически использованная в работе проволока.
²⁾ Требование по содержанию химических элементов в импортной проволоке.

Действующая на заводе штатная технология сварки ротора ЦНД турбины мощностью 325 МВт предусматривает сварку стали 25X2НМФА проволокой Св-08ХН2ГМЮ (ГОСТ 2246–70) под плавным флюсом АН-17М (ГОСТ 9087–81). Учитывая острый дефицит в Украине применяемой проволоки (выпускается в РФ по спецзаказу), а также прекращение в ближайшем будущем производства плавных флюсов, ОАО «Турбоатом» принял решение об использовании импортных сварочных материалов. Проведенные маркетинговые исследования показали, что взамен отечественных сварочных материалов наиболее целесообразно выбрать сварочную проволоку Union S 3 NiMoCr (ISO 26304) в сочетании с агломерированным флюсом UV420TT (EN 760), которые производятся фирмой «Белер-Тиссен» (Австрия, Германия). Химический состав выбранной проволоки в сравнении с проволокой Св-08ХН2ГМЮ приведен в табл. 1.

Фторидно-основной флюс UV 420 TT содержит следующие компоненты: (SiO₂ + TiO₂) — 15 мас. %; (CaO + MgO) — 35; (Al₂O₃ + MnO) — 21; CaF₂ — 25, имея при этом основность 2,5 по Бонишевскому [3]. В ходе предварительных экспериментов установлено, что концентрация диффузионно-подвижного водорода Н_{диф} составляет не более 1 см³/100 г наплавленного металла при определении методом спиртовой пробы [4]. Содержание остаточных газов в металле шва определяли методом плавления образца в потоке высокочистого газа-носителя (гелия). Установлено, что применение проволоки Union S 3 NiMoCr в сочетании с флюсом UV 420 TT обеспечивает в

металле шва 0,0076...0,016 % [N], 0,029...0,034 % [O] и 2,0...2,2 см³ [H] на 100 г водорода наплавленного металла. С учетом положительных результатов предварительных исследований выполнены работы по разработке и аттестации технологии сварки комбинированного соединения стали 25X2НМФА + ЭИ 415 с применением как импортных, так и отечественных материалов.

Аттестацию технологического процесса сварки комбинированных соединений сталей 25X2НМФА + ЭИ 415 проводили в соответствии с ДСТУ 3951–2000 (ISO 9956:1995), что предполагало подготовку и сварку контрольного стыкового сварного соединения натуральных размеров (наружный диаметр 940 мм, толщина основного металла 95 мм) в условиях реального производства согласно предварительной технологической инструкции по сварке (pWPS), составленной производителем.

Поскольку стали 25X2НМФА и ЭИ 415 принадлежат к одному структурному классу (табл. 2), то для получения контрольного комбинированного сварного соединения этих сталей выбрали тот же технологический процесс, что и для однородных сварных соединений стали 25X2НМФА. Применяемые в рамках штатной технологии сварки однородных соединений стали 25X2НМФА сочетания отечественных сварочных материалов, режимы сварки и параметры послесварочной термообработки позволяют получить металл шва и сварного соединения с физико-механическими характеристиками, удовлетворяющими техническим требованиям (табл. 3, нижняя строка). Эти значения рассматривали в качестве технических тре-

Таблица 2. Содержание химических элементов в роторных сталях, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr
25X2НМФА (ТУ 108-995-81)	0,23...0,27	0,17...0,35	0,40...0,70	≤0,015	≤0,015	1,80...2,20
25X2НМФА ¹⁾	0,27	0,28	0,50	0,010	0,014	2,10
20X3МВФА (ТУ 108-1029-81)	0,17...0,24	≤0,40	0,25...0,60	≤0,022	≤0,025	2,40...3,30
20X3МВФА ¹⁾	0,22	0,27	0,32	0,010	0,012	3,14

Окончание табл. 2

Марка стали	Mo	V	W	Ni	Cu
25X2НМФ (ТУ 108-995-81)	0,40...0,60	≤0,05 по расчету	—	1,30...1,60	≤0,25
25X2НМФА ¹⁾	0,42	0,05	—	1,40	0,14
20X3МВФА (ТУ 108-1029-81)	0,35...0,55	0,45...0,70	0,30...0,50	≤0,50	≤0,25
20X3МВФА ¹⁾	0,40	0,66	0,40	0,30	0,12

¹⁾ Фактически использованная в работе сталь.

бований также к металлу комбинированного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415.

В соответствии с принятым технологическим процессом сварку контрольного сварного соединения 25X2НМФА + ЭИ 415 выполняли в U-образную разделку кромок шириной 26 мм с программным управлением раскладкой валиков по два валика в слое на постоянном токе обратной полярности. Для предотвращения холодных трещин при сварке осуществляли предварительный и сопутствующий подогрев контрольного сварного соединения до температуры 350 °С.

С целью снижения материало- и трудоемкости исследований запланировали заполнение разделки контрольного комбинированного соединения на половину ее высоты отечественными материалами, а второй половины — импортными

(рис. 2). Поэтому нижнюю часть шва до половины высоты разделки выполнили с применением сварочной проволоки Св-08ХН2ГМЮ диаметром 2 мм в сочетании с флюсом АН-17М. Заполнение верхней части шва проводили с применением проволоки Union S 3 NiMoCr диаметром 2,5 мм в сочетании с флюсом UV 420 ТТ. Сварку с использованием обоих сочетаний сварочных материалов вели на режиме: сварочный ток 380...400 А; напряжение на дуге 36...40 В; скорость сварки 19...22 м/ч. Готовое сварное соединение подвергали высокому отпуску при температуре 630 °С длительностью 40 ч. После этого сварное соединение разрезали на темплеты для подготовки образцов по программе аттестационных испытаний.

Темплеты, поперечные по отношению к шву, позволяли изготовить образцы для испытания металла сварных соединений, включающие все возможные сочетания основного металла и металла шва, на растяжение, ударный и статический изгиб. В образцах типа II по ГОСТ 6996-66 для испытания на растяжение при комнатной температуре и типа 2к по ГОСТ 9651-73 для испытания на растяжение при температуре 350 °С линия сплавления находилась посередине рабочей части образца (рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 — участки переменного химического состава; 2, 3 — образцы соответственно типа II (ГОСТ 6996-66) и типа 2к (ГОСТ 9651-73) для испытаний при нормальной и повышенной температуре металла сварного соединения шов (проволока S 3 NiMoCr) — сталь 25X2НМФА;

Таблица 3. Результаты испытания металла комбинированного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415 на статическое растяжение (по результатам трех испытаний)*

Объект исследования	Механические характеристики при температуре испытания, °С							
	20				350			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Металл шва (Св-08ХН2ГМЮ)	607,2	507	26,2	67,2	539,9	424	19,3	61,2
Металл шва (S 3 NiMoCr)	741	503,1	22,9	61,2	675,4	472,2	22,2	60,5
Металл сварного соединения:								
шов 1 — сталь ЭИ 415	623,6	—	—	67,4	540,6	—	—	61,3
шов 1 — сталь 25X2НМФА	614,1	—	—	65,3	537,9	—	—	62,5
шов 2 — сталь ЭИ 415	739,1	—	—	61	617,2	—	—	56,3
шов 2 — сталь 25X2НМФА	709,3	—	—	66,6	611,7	—	—	64,0

* Требования к кратковременным механическим свойствам металла сварных соединений роторных сталей после высокого отпуска: для 20 °С: $\sigma_B > 590$ МПа; $\sigma_{0,2} > 470$ МПа; $\delta_5 > 14$ %; $\psi > 40$ %; для 350 °С: $\sigma_B > 530$ МПа; $\sigma_{0,2} > 400$ МПа; $\delta_5 > 14$ %; $\psi > 40$ %.

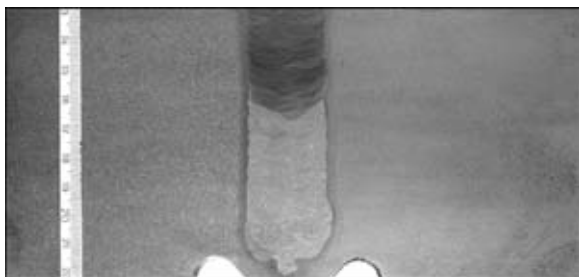


Рис. 2. Макроструктура металла комбинированного сварного соединения сталей ЭИ 415 и 25X2НМФА (справа)

4, 5 — соответственно шов (проволока Св-08ХН2ГМЮ) — сталь 25X2НМФА; 6, 7 — шов (проволока S 3 NiMoCr) — сталь ЭИ-415; 8, 9 — шов (проволока Св-08ХН2ГМЮ) — сталь ЭИ-415. В образцах типа IX по ГОСТ 6996–66 для испытания на ударный изгиб острый надрез выполнялся по металлу шва, по линии сплавления и по металлу ЗТВ на каждой из сталей на расстоянии 1...1,5 мм от линии сплавления (рис. 4). На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1, 2 — зоны шва, не подлежащие исследованию (расположение указано на рис. 3); 3, 4 — образцы для определения KCV металла шва, полученного с применением импортных и отечественных материалов; 5, 6 — образцы для определения KCV металла сварного соединения со швом, полученным с применением импортных материалов; 7, 8 — соответственно с применением отечественных материалов; 9, 10 — образцы для определения KCV металла ЗТВ сварного соединения со швом, полученным с применением импортных материалов; 11, 12 — соответственно с применением отечественных материалов. В образцах типа XXVII по ГОСТ 6996–66 для испытания металла сварного соединения на статический изгиб ось шва находилась посередине длины образца. Образцы типа II по ГОСТ 6996–66 и типа 2к по ГОСТ 9651–73

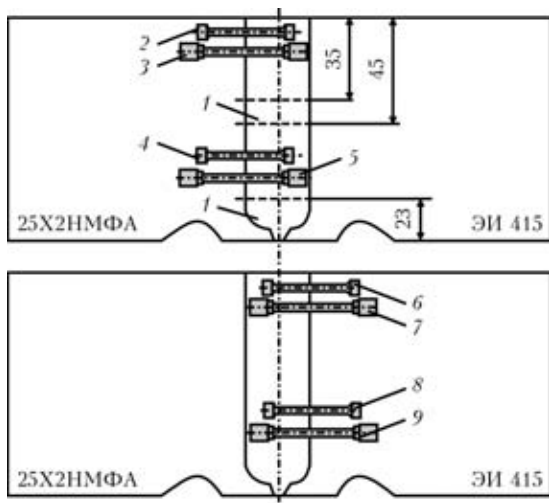


Рис. 3. Расположение зон шва по высоте поперечного сечения комбинированного сварного соединения и схема вырезки образцов для испытания на растяжение (обозначения см. в тексте)

для испытания на растяжение металла шва при температуре соответственно 20 и 350 °С изготавливали из темплетов, продольных по отношению к шву.

Как видно из приведенных в табл. 3 результатов испытания на растяжение, прочностные свойства и характеристики пластичности металла шва и сварного соединения вполне удовлетворяют предъявляемым требованиям при сварке как отечественными, так и импортными сварочными материалами. Металл шва, полученный с применением импортных материалов, более прочный, чем металл шва, полученный с применением отечественных сварочных материалов. При комнатной температуре его временное сопротивление выше на 22 % при одинаковом пределе текучести. При температуре 350 °С значение σ_b шва, полученного с применением импортных сварочных материалов, становится выше на 25,1 %, а предел текучести — выше на 11,4 %.

Установлено, что при любой температуре испытания соединения, сваренные с применением отечественных сварочных материалов, разрушаются по металлу шва. Соединения, сваренные с применением импортных сварочных материалов, разрушились по металлу шва лишь при температуре 20 °С и только в образцах, включающих основную металл — сталь ЭИ 415 (см. рис. 3, образцы поз. 6, 7). Во всех остальных случаях соединения, сваренные с применением импортных

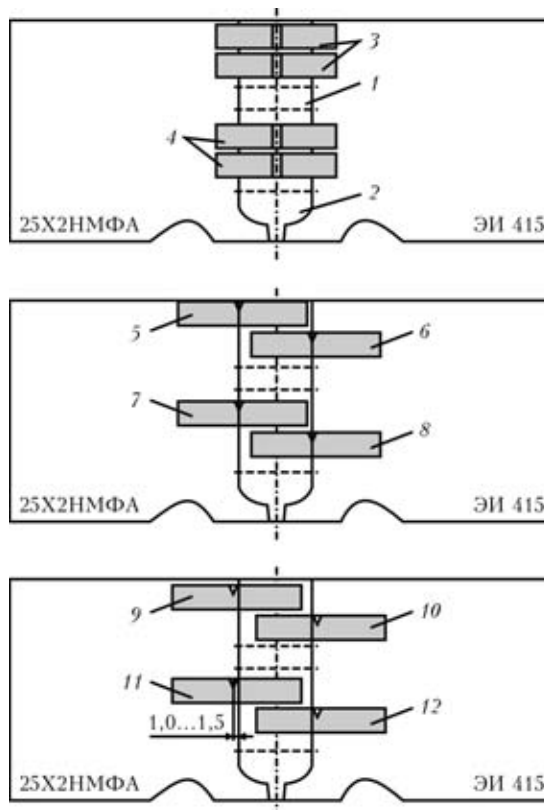


Рис. 4. Схема вырезки образцов типа IX по ГОСТ 6996–66 для испытания на ударный изгиб (обозначения см. в тексте)

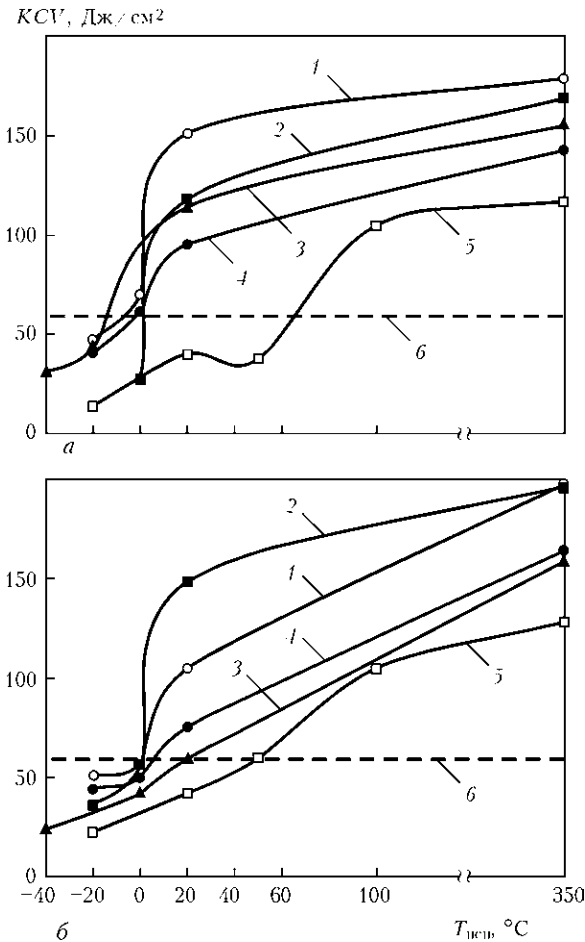


Рис. 5. Температурная зависимость ударной вязкости металла комбинированного сварного соединения сталей 25X2NMFA + ЭИ 415 со швом, полученным с применением отечественных (а) и импортных (б) сварочных материалов: 1, 2 — надрез по ЗТВ соответственно стали 25X2NMFA и ЭИ 415; 3 — надрез по шву Св-08ХН2ГМЮ (а) и S 3 NiMoCr (б); 4, 5 — надрез по линии сплавления соответственно со сталью 25X2NMFA и ЭИ 415; 6 — требование ТЗ

сварочных материалов, разрушаются по основному металлу на расстоянии 4 мм от линии сплавления.

Испытания на статический изгиб показали, что угол загиба комбинированных сварных соединений сталей 25X2NMFA + ЭИ 415 составляет не менее 150° независимо от сочетания сварочных материалов.

По результатам испытаний на ударный изгиб построены графики температурной зависимости ударной вязкости KCV металла (рис. 5). В качестве критерия для сравнительных оценок было принято значение ударной вязкости $KCV = 59 \text{ Дж/см}^2$, являющееся согласно действующим техническим требованиям минимально допустимым значением для любого участка однородных сварных соединений стали 25X2NMFA, сваренных по штатной технологии. Как видно, хладостойкость сварного соединения 25X2NMFA + ЭИ 415 определяется хладостойкостью зоны сплавления шва и стали ЭИ 415 независимо от выбора сварочных материалов. При графическом определении критической температура хрупкости зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 в случае применения отечественных сварочных материалов (надрез — по линии сплавления) составляет 66°C . В случае применения импортных сварочных материалов критическая температура $T_{кр}$ зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 равна 50°C . Для сравнения: критическая температура зоны сплавления шва со сталью 25X2NMFA составляет -2 и 6°C в случаях применения соответственно отечественных и импортных сварочных материалов.

Распределение твердости металла поперек контрольного комбинированного сварного соединения представлено на рис. 6. Как видно из графика, металл, наплавленный с применением импортных сварочных материалов, имеет твердость в среднем на 30 ед. выше, чем металл шва, выполненный отечественными сварочными материалами. Средняя твердость зоны сплавления швов со сталью ЭИ 415 равна 276, что на 40 ед. выше, чем у зоны сплавления со сталью 25X2NMFA.

Полученные результаты показывают, что температура послесварочного отпуска, оптимальная для соединения шов — сталь 25X2NMFA, является недостаточной для уменьшения твердости на участке перегрева стали ЭИ 415. Повышенная твердость зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 и ЗТВ на этой стали закономерно обуславливает пониженные значения ударной вязкости металла сварного соединения шов — сталь ЭИ 415 независимо от выбранных сварочных материалов.



Рис. 6. Распределение твердости металла поперек комбинированного сварного соединения сталей 25X2NMFA + ЭИ 415: 1, 2 — сварное соединение со швом, выполненным соответственно проволоками Св-08ХН2ГМЮ и S 3 NiMoCr



При испытаниях на ударный изгиб установлено также, что отечественные сварочные материалы обеспечивают несколько выше значения ударной вязкости металла шва при комнатной и отрицательных температурах, чем импортные сварочные материалы. При температуре 350 °С значения ударной вязкости металла шва весьма близки для обоих сочетаний сварочных материалов. Значение $T_{кр}$ металла шва составляет –14 и 20 °С при использовании соответственно отечественных и импортных сварочных материалов.

Результаты испытаний металла шва на растяжение и ударный изгиб при использовании импортных сварочных материалов в сравнении с отечественными можно объяснить слишком высоким уровнем легирования сварочной проволоки Union S 3 NiMoCr углеродом и особенно марганцем (см. табл. 1). В связи с этим для практического применения указанной сварочной проволоки при сварке ротора с фирмой-поставщиком было согласовано требование обеспечить ее химический состав в рамках ISO 26304, но в более узких пределах (см. табл. 1, нижняя строка).

На основании результатов выполненной работы по аттестации технологического процесса сварки комбинированного ротора ЦСД паровой турбины К-325 для механизированной сварки соединений сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415 могут быть выбраны импортные сварочные материалы (проволока Union S 3 NiMoCr в сочетании с флюсом UV 420 TT) взамен отечественных (проволока Св-08ХН2ГМЮ в сочетании с плавным флюсом АН-17М). Импортные сварочные материалы обеспечивают хорошие сварочно-технологические свойства, требуемый химический состав и минимальное содержание вредных примесей и газов в металле шва. Для обеспечения высоких служебных свойств сварных соединений роторов ЦСД сварочная проволока Union S 3 NiMoCr должна поставляться в соответствии с требованиями ISO 26304-A-S-55-4. При этом импортная проволока должна иметь более жестко заданный химический состав в рамках ISO 26304-A-S-55-4, что позволит его приблизить к составу отечественной проволоки и соответственно обеспечить высокую ударную вязкость металла шва.

A forge-welded combined medium pressure rotor for 325 MW steam turbine is described, which is made from 20Kh3MVFA steel (high-temperature operation conditions) and 25Kh2NMFA steel (low-temperature conditions). Welding consumables were selected, and technology of mechanized submerged-arc welding of joints of 25Kh2NMFA + EI 415 steels was developed and certified. Physico-mechanical properties of welded joint metal in the condition after high-temperature tempering in the case of application of both local and imported welding consumables were assessed.

Техсовет ОАО «Турбоатом» обсудил выполненную работу по созданию сварнокованного ротора ЦСД турбины мощностью 325 МВт и принял решение о пригодности аттестуемой технологии для изготовления комбинированных роторов паровых турбин из сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415. На основании того, что сварной шов комбинированного соединения (см. рис. 1, шов 1) будет работать при температуре около 200 °С, когда значение KCV металла зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 превышает 100 Дж/см² (см. рис. 5), импортные сварочные материалы, обеспечивающие необходимую стойкость металла шва к хрупкому разрушению ($T_{кр} \leq 20$ °С), были признаны приемлемыми для выполнения сварного соединения сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415.

Выводы

1. Спроектирован сварнокованный комбинированный ротор цилиндра среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт. Разработанная конструкция позволяет исключить применение насадных дисков на ступенях низкого давления.
2. Разработана и аттестована технология механизированной сварки под флюсом комбинированного соединения ротора ЦСД из сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415.
3. Для механизированной сварки рекомендуется применение импортной сварочной проволоки Union S 3 NiMoCr (ISO 26304-A-S-55-4) в сочетании с агломерированным флюсом UV420TT (EN 760) производства фирмы «Бёлер-Тиссен» (Австрия, Германия).
4. Механизированная сварка под флюсом с использованием выбранных импортных сварочных материалов может применяться для изготовления роторов ЦНД и ЦСД мощных паровых турбин.

1. *Development of large-capacity, highly-efficient welded rotor for steam turbines.* Mitsubishi heavy industries / T. Shige, R. Magoshi, S. Ito et al. // Techn. Rev. — 2001. — 38. — N 1.
2. *Proceedings of PWR 2005 ASME Power*, April 5-7, 2005, Chicago, N 50348.
3. *Welding filler metals. Welding guide of Boehler Thyssen Schweissttechnik Deutschland GmbH.* — Sept., 2005. — 576 p.
4. *Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей.* — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.

Поступила в редакцию 21.05.2012



ТЕХНОЛОГИЯ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН С Т-ОБРАЗНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, канд. техн. наук, **А. А. НАКОНЕЧНЫЙ**, инж., **В. С. ГАВРИШ**, канд. техн. наук,
С. В. ЧЕРНОБАЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучена рельефная сварка низкоуглеродистых сталей больших сечений с Т-образными соединениями. Показано, что программируемое изменение усилия сжатия на стадии плавления и кристаллизации металла сварного соединения позволяет увеличить тепловложение в зону сварки, избежать возникновения дефектов при формировании и получить более высокие механические характеристики сварного соединения. Установлено, что управление усилием сжатия дает наибольший эффект при сварке изделий большого сечения, когда сварочные машины не имеют необходимого запаса мощности для сварки на жестких режимах.

Ключевые слова: рельефная сварка, низкоуглеродистые стали, Т-образное соединение, большие сечения, литое ядро

Развитие современного машиностроения зависит от внедрения ресурсосберегающих технологических процессов, повышающих производительность труда и качество продукции. Этим требованиям отвечает процесс контактной рельефной сварки. Однако в настоящее время влияние технологических параметров режимов сварки на формирование сварных соединений большой площади исследовано недостаточно. Целью настоящей работы явилось изучение влияния изменения сварочного усилия на нагрев в зоне контакта, размеры литого ядра и прочность Т-образного сварного соединения с площадью сечения 1200 мм^2 . Сварной узел из низкоуглеродистой стали представляет собой бонку прямоугольного сечения $26 \times 47 \text{ мм}$ высотой 28 мм , приваренную к плите толщиной 20 мм , и является ребордой стрелочного перевода.

При рельефной сварке Т-образных соединений типа стержней, болтов, бонок, привариваемых к пластине, в основном применяют циклограмму с постоянным усилием зажатия. Это обусловлено небольшой площадью сварного соединения и конструкцией сварочного оборудования, которое не обеспечивает необходимого быстрого действия силового привода сварочной машины.

Для предупреждения кристаллизационных трещин и пор при контактной точечной сварке, и, как следствие, повышения механических свойств сварных соединений существуют рекомендации по использованию ковочного усилия, однако для рельефной сварки с Т-образными соединениями целесообразность его применения изучена недостаточно. На практике значение пос-

тоянного сварочного усилия выбирают опытным путем, исходя из необходимости избежать начальных и значений конечных выплесков расплавленного металла при заданном значении сварочного тока. Необходимые размеры литого ядра обеспечивают регулировкой силы сварочного тока и временем сварки. Однако в условиях Т-образной рельефной сварки стержня с пластиной формирование соединения проходит в условиях твердого жидкого состояния металла в контакте и значительной пластической деформации, что ограничивает влияние времени сварки на тепловложение в металл формируемого соединения. Основным фактором, влияющим на формирование сварного соединения, является температура фронта пластической деформации, зависящая от плотности тока и сварочного давления.

Бонка имеет несимметричную форму, что вынуждает использовать несколько рельефов для получения зоны сплавления по всей свариваемой площади с формированием литого ядра. Это обеспечивает перемешивание металла соединяемых поверхностей даже при наличии окалины, ржавчины и других загрязнений и получение гарантированно высоких прочностных качеств.

Разработан вариант с двумя деформируемыми конусами и ограничительным буртиком, который удерживает расплавленный металл от выплесков, и, деформируясь, образует зону пластической деформации вокруг литого ядра. В ходе экспериментов установлено, что оптимальным является конус с углом вершины 160° . Такой рельеф обеспечивает наиболее качественную сварку, без предварительных и конечных выплесков, предотвращает деформацию по периметру бонки и обеспечивает высокие механические свойства сварных соединений. Форма рельефа позволяет проводить сварку даже по слою ржавчины и окалины без

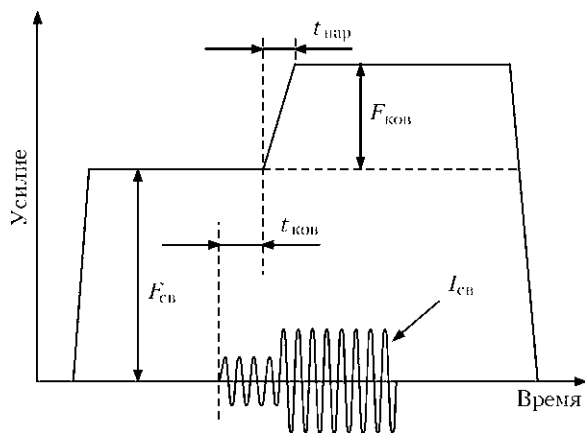


Рис. 1. Циклограмма сварки с ковочным усилием (обозначения см. в тексте)

значительного снижения механических свойств металла и обеспечивает стабильное качество сварного соединения.

Рассмотрим влияние циклограммы сварочного усилия на нагрев в зоне контакта, размеры литого ядра и прочность Т-образного сварного соединения. На рис. 1 представлена циклограмма сварки с приложением ковочного усилия $F_{\text{ков}}$. Основными параметрами являются усилие сварки $F_{\text{св}}$, усилиековки $F_{\text{ков}}$, время включенияковки $t_{\text{ков}}$.

Как известно, тепловыделение в контакте пропорционально электрическому сопротивлению контакта и связано с усилием сжатия при сварке. Связь эта нелинейная и зависит от температуры контакта. В связи с этим провели сравнительное изменение динамического электрического сопротивления контакта при постоянном сварочном усилии и с применением ковочного усилия. Динамическое сопротивление контакта можно рассчитывать, зная падение напряжения, ток во время сварки и сопротивление сварочного контура при разомкнутых электродах.

На рис. 2 представлено изменение сопротивления контакта при оптимальном режиме с пос-

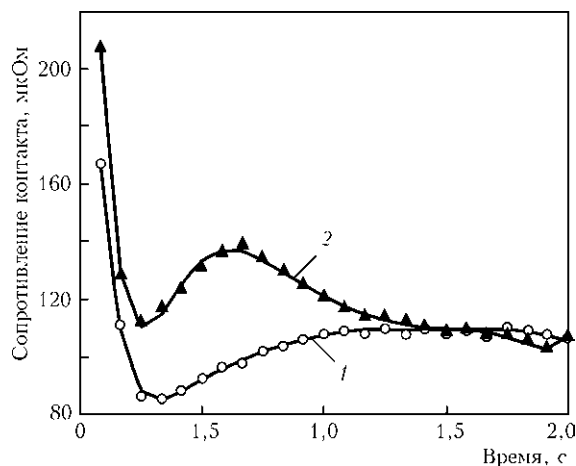


Рис. 2. Изменение сопротивления контакта во время сварки: 1, 2 — соответственно постоянное и возрастающее усилие

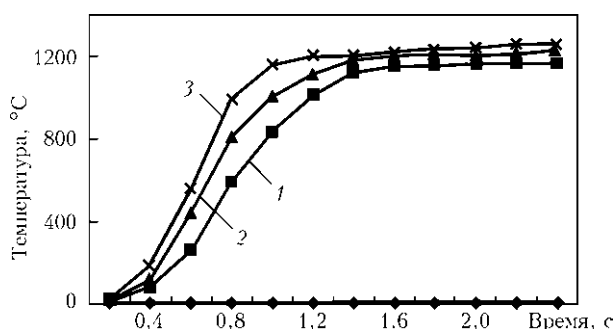


Рис. 3. Нагрев зоны сварки на различных режимах приложения сварочного давления: 1 — $F_{\text{св}} = 3200$ кН; 2, 3 — $F_{\text{ков}} = 4000$ кН (2 — соответственно $F_{\text{св}} = 2000$ кН; 3 — 1500)

тоянным усилием сварки $F_{\text{св}} = 3200$ кН и режимом, при котором начальное давление сварки составляло $F_{\text{св}} = 2000$ кН и усилиемковки $F_{\text{ков}} = 4000$ кН. Сварочный ток составлял 34,5 кА, время сварки 100 периодов (2 с). Более высокое электрическое сопротивление в зоне сварки очевидно связано с более высокой температурой деформируемого металла рельефа и всей зоны сварного соединения.

Измерение температурных полей в зависимости от усилий сварки $F_{\text{св}}$ и $F_{\text{ков}}$ представлено на рис. 3. Очевиден термический эффект и более высокая температура зоны сварки на этапе формирования зоны сплавления при циклограммах с возрастанием давления за цикл сварки. Регистрация температурных полей показала, что температура в приконтактной зоне в точке чеканки термопары в момент формирования зоны сплавления выросла на 140 °С, что свидетельствует об увеличении термического КПД процесса.

Снижение давления сварки $F_{\text{св}}$ до 1500 кН приводит как к более интенсивному нагреву, так и к начальным выплескам металла.

Оптимальным является режим с $F_{\text{св}} = 2000$ кН и возрастанием за время сварки до 4000 кН ковочного давления (рис. 4), силой сварочного тока 34,2 кА, временем сварки 120 периодов сети (модуляция увеличения сварочного тока от нуля до номинального составляла 10 периодов сети).

Диаметр зоны сплавления и глубина проплавления составляли 25 и 5 мм соответственно, что

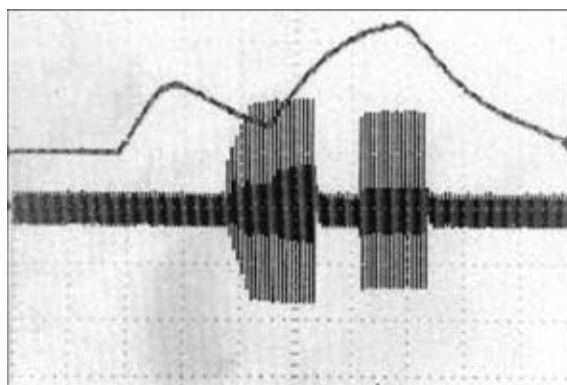


Рис. 4. Осциллограмма с возрастающим усилием сжатия



Рис. 5. Макрошлиф (×4) соединения с возрастающим усилием сварки

на 12 и 25 % больше, чем при сварке с постоянным сжатием.

Эксперименты также проводили на режимах относительно мягких и жестких к заданному режиму, обеспечивающему качественное формирование соединения. Мягкие режимы имеют меньшую силу тока и большее время сварки, характеризуются большим теплоотводом в металл детали и электроды. Жесткие режимы имеют большую силу тока и меньшее время сварки, при жестких режимах возможны такие дефекты, как начальные и конечные всплески. Проводили три серии экспериментов по три опыта. Сравнивали результаты механических испытаний на срез $P_{ср}$ и отрыв $P_{от}$ (таблица).

На рис. 5 представлены макрошлиф сварного соединения с возрастающим усилием сварки. Ширина зоны сплавления 25 мм, глубина проплавления 7 мм, ширина зоны уплотняющего пояса (зоны сварки в твердой фазе) 2,5 мм.

В зоне пластической деформации, близкой к зоне ядра, количество бейнита больше, что дает право предположить, что металл этой зоны был нагрет до более высоких температур. В этой зоне образца наблюдается подплавление зерен, что свидетельствует о деформации в твердожидком состоянии.

Центральная зона не имеет четких признаков литой дендритной структуры, межкристаллической ликвации и усадочных дефектов. Это свидетельствует о том, что формирование сварного соединения при тавровой рельефной сварке всегда происходит с пластической деформацией зоны контакта.

Металлографический анализ зоны сварного соединения показывает, что у образца с переменной

Режимы рельефной сварки на мягких (№ 1–3), оптимальных (№ 4–6) и жестких (№ 7–9) режимах

Номер п/п	$U_{х.х}$, В	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$P_{ср}$, кН	$P_{от}$, кН
1	8,5	30,5	2,7	28700	23100
2	8,5	30,5	2,7	29000	23900
3	8,5	30,5	2,7	27900	23300
4	9	34,2	2,4	31700	25500
5	9	34,2	2,4	32400	26100
6	9	34,2	2,4	31300	25200
7	9,5	37,1	2	29100	23900
8	9,5	37,1	2	29400	23000
9	9,5	37,1	2	29800	23500

циклограммой давления металл зоны пластической деформации нагревался до более высокой температуры в результате большего тепловыделения и более высокой температуры фронта деформации вследствие увеличения усилия сварки пропорционально повышению площади зоны деформации.

Заключение. Изучена рельефная сварка низкоуглеродистых сталей больших сечений с Т-образными соединениями. Показано, что программируемое изменение сварочного усилия на стадии плавления и кристаллизации металла сварного соединения позволяет увеличить тепловложение в зону сварки, избежать дефектов при формировании и получить более высокие механические характеристики сварного соединения.

Управление усилием сжатием дает наибольший эффект при сварке изделий большого сечения, когда сварочные машины не имеют необходимого запаса мощности для сварки на жестких режимах.

1. Гилевич В. А. Технология и оборудование рельефной сварки. — Л.: Машиностроение, 1976. — 152 с.
2. Козловский С. Н. Основы теории и технологии контактной точечной сварки. — Красноярск: СибГАУ, 2003. — 384 с.
3. Zhang H., Senkara J. Resistance welding fundamentals and applications. — Boca Raton, 2006. — 239 p.
4. Tang H., Hou W., Hu S. J. Forging force in resistance spot welding // J. Eng. Manufacture. — 2002. — P. 216.
5. Гилевич В. А. О выборе соотношений между нормальными значениями усилия электродов и сварочного тока в машинах рельефной сварки. — М.: Машиностроение, 1970. — 26 с.

T-shaped joint projection welding of large-cross section low-carbon steels was studied. It is shown that the programmable change of the compression force at the stage of melting and solidification of welded joint metal allows increasing the heat input into the welding zone, avoiding defect development at joint formation and obtaining higher mechanical characteristics of the welded joint. It is found that control of the compression force yields the greatest effect in welding large cross-section items, when the welding machines do not have the required power margin for welding in the rigid mode.

Поступила в редакцию 18.04.2012



ПОРТАТИВНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ МУНДШТУКОМ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО, И. И. ЛЫЧКО**, канд. техн. наук,
С. М. КОЗУЛИН, А. А. ФОМАКИН, В. А. ДАКАЛ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Е. С. ОГАНЕСЯН, инж. (ООО «Укритарм», г. Киев)

Приведена информация о портативном сварочном аппарате для электрошлаковой сварки и наплавки плавящимся мундштуком. Изложены конструктивные особенности и технические преимущества аппарата, а также рекомендации по его применению, в частности, в строительстве.

Ключевые слова: портативный сварочный аппарат, электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком

Работникам сварочного производства предлагается портативный универсальный сварочный аппарат для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком прямолинейных и криволинейных стыковых, угловых и тавровых соединений толщиной 40...120 мм АШП 113 М 2 УХЛ4 (рис. 1). Сварка осуществляется постоянным током при вертикальном расположении стыка (отклонение $\pm 15^\circ$). Аппарат можно применять при изготовлении толстостенных крупногабаритных металлоконструкций из углеродистых и легированных сталей, деталей сложной конфигурации, наплавочных и ремонтных работах в стационарных и монтажных условиях.

Аппарат (рис. 1) состоит из компактного механизма 1 для подачи двух сварочных проволок как сплошного сечения, так и порошковых, который крепится на кронштейне 3. Последний также обеспечивает крепление плавящегося мундштука и подвод к мундштуку 5 сварочного тока. Уст-

ройство корректировки положения плавящегося мундштука относительно свариваемых кромок в зазоре 4 обеспечивает его плавное перемещение с фиксацией в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Высокая надежность ведения электрошлакового процесса обеспечивается за счет использования привода подачи электродной проволоки на базе мотор-редуктора переменного тока с частотным регулированием оборотов 2. Блочная схема компоновки позволяет легко и оперативно осуществлять установку аппарата над стыком, а также быстрый его демонтаж с изделия.

Электрическая часть аппарата создана на современной элементной базе. Шкаф управления 2 (рис. 2) может размещаться отдельно от используемого источника питания 1 и непосредственно на нем, что существенно повышает надежность

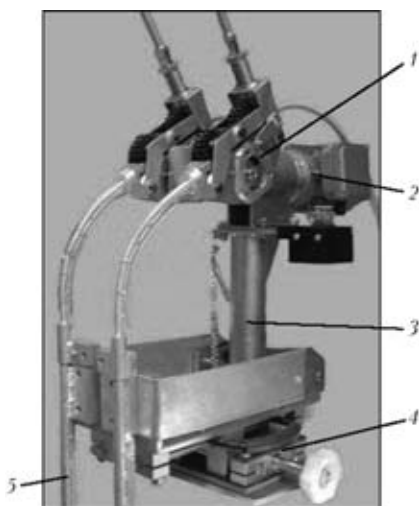


Рис. 1. Внешний вид аппарата АШП 113 М2 (обозначения см. в тексте)

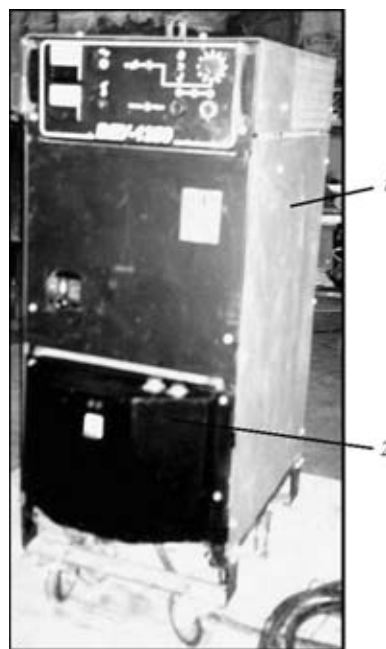


Рис. 2. Источник питания аппарата АШП 113 М2 (обозначения см. в тексте)



Рис. 3. Пульт управления аппарата АШП 113 М2

работы электрической части, а также облегчает перестановку сварочного оборудования при сварке большого количества стыков, особенно при работе в монтажных условиях. Процесс сварки осуществляется с помощью переносного пульта управления аппаратом (рис. 3), который отвечает современным требованиям информативности и эргономики. Пульт обеспечивает цифровую индикацию основных параметров режима (напряжение на шлаковой ванне, сварочный ток, скорость подачи электродных проволок) и удобное управление процессом сварки. Органы индикации и управления защищены от возможного проникновения влаги и пыли. Электрическая часть аппарата предусматривает возможность подключения дополнительного блока, содержащего информационно-регистрирующую систему мониторинга сварочного процесса, позволяющую осуществлять дистанционную визуализацию и регистрацию основных параметров режима ЭШС, которые можно использовать при паспортизации сварных изделий.

Ниже приведены основные технические характеристики рассматриваемого аппарата:

Напряжение питающей сети, В	380
Частота питающей сети, Гц	50
Диаметр электродной проволоки, мм	2,4...4,0
Количество электродных проволок, подаваемых сварочным модулем, шт.	2
Номинальный сварочный ток на один модуль (при ПВ 100 %), А	1000
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	30...300

The paper presents a portable welding unit for consumable-nozzle electroslag welding and surfacing. Design features and technical advantages of the unit, as well as recommendations on its application, in particular, in construction, are described.

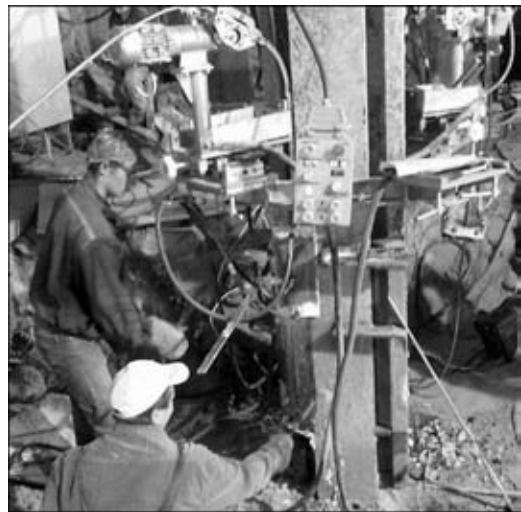


Рис. 4. ЭШС плавящимся мундштуком элементов усиления проемов поясов строительных колонн с использованием аппаратов АШП 113 М2

Режимы работы аппарата: ручной, автоматический, наладочный, ПВ 100 %.

Основные преимущества нового аппарата:

- расширение технологических возможностей процесса электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком за счет использования как проволоки сплошного сечения, так и порошковой проволоки разных диаметров;
- благодаря блочно-модульной схеме компоновки можно легко и оперативно осуществлять установку аппарата над стыком, а также его демонтаж с изделия;
- высокая надежность ведения электрошлакового процесса за счет использования привода подачи электродной проволоки на базе мотор-редуктора переменного тока с частотным регулированием оборотов;
- подающие механизмы оборудованы системами подачи электродных проволок повышенной надежности;
- для использования аппарата в монтажных условиях органы индикации и управления защищены от возможного проникновения влаги и пыли.

Новые аппараты успешно применяются при сварке элементов усиления проемов поясов строительных колонн типа «мальтийский крест» (рис. 4). К настоящему времени с их помощью заварено более 1500 стыков (около 1250 погонных метров швов) в монтажных условиях.

Благодаря новым аппаратам существенно уменьшается трудоемкость сварочных работ, повышается производительность за счет сокращения времени на монтажно-сборочные операции.



ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО МИНИМИЗАЦИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО, д-р техн. наук, В. К. ЛЕВЧУК, О. Н. ГОНЧАРОВА, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено пространственное распределение магнитного поля (МП), создаваемого машиной контактной точечной сварки, в рабочей зоне с учетом его спектрального состава. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров режимов сварки и расстояния от токоведущих элементов сварочного контура на показатель превышения уровня МП согласно современным медицинским требованиям. Предложены рекомендации по защите сварщиков от МП для разработчиков машин контактной точечной электросварки, технологов и пользователей данными машинами.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, электромагнитное излучение, показатель превышения уровня магнитного поля, способы защиты сварщиков, защитные магнитные материалы, сплав с аморфной структурой

В настоящее время контактная электросварка нашла широкое применение в отдельных отраслях промышленности Украины и является одним из ведущих технологических процессов современного производства. Имеется большой парк электрооборудования и машин различных типов и назначения мощностью от нескольких до сотен киловольт на ампер, в основном это машины переменного тока частотой 50 Гц.

При эксплуатации этих машин генерируются магнитные поля (МП) значительной напряженности, превышающей значение, которое регламентируется старыми санитарными нормами, в несколько раз [1]. МП такой интенсивности может влиять на здоровье обслуживающего персонала, обуславливая определенные негативные функциональные изменения в организме из-за воздействия на сердечно-сосудистую, нервную, мочеполовую, эндокринную и другие системы. В связи с этим возникла необходимость в контроле электромагнитной обстановки на рабочих местах сварщиков и обеспечении безопасных условий их труда. Актуальность этой задачи возросла с введением в Украине в действие новых нормативов [2], регламентирующих условия безопасности при работе с источниками электромагнитных полей и учитывающих современные медицинские исследования.

При контактной электросварке в рабочей зоне создаются импульсные МП. На рабочих местах сварщиков основными источниками данных полей являются не полностью экранированный корпус машины сварочный трансформатор и, как

правило, неэкранированные силовоточные элементы сварочного контура (электроды, свечи, консоли, шины), а также токоведущие кабели и свариваемые изделия сложной формы. МП, образующиеся при контактной электросварке в различных частотных диапазонах, и общая методика определения их уровней описаны в работе [3].

Цель настоящей работы — установление пространственного распределения МП возле машины контактной точечной сварки и определение возможностей минимизации его интенсивности.

При проведении экспериментов возможные режимы контактной точечной сварки моделировали на серийной точечной машине МТ-2202 средней мощности с учетом следующих соображений.

Во-первых, режимы сварки определяются конструкцией сварочного оборудования и возможностью их регулирования. Для современного оборудования контактной точечной сварки они достаточно широки и предусматривают следующие регулирования тепловложения в свариваемое соединение: переключение ступеней мощности сварочного трансформатора с тиристорным контактором; изменение длительности протекания импульсов синусоидального однофазного тока частотой 50 Гц в одной пачке; сварку (и термообработку свариваемого соединения в электродах сварочной машины) несколькими (до трех) пачками синусоидальных однофазных импульсов с регулированием количества импульсов в пачках и времени пауз между пачками; фазовое регулирование нагрева (сварочного тока) в каждой пачке ($\alpha_\phi = 20 \dots 180^\circ$); модуляцию передних и задних фронтов пачек импульсов, т. е. амплитуд определенного количества импульсов от нулевого до максимального значений.

Во-вторых, поскольку аппаратура управления сварочным циклом предусматривает (разрешает) эти регулировки, технологи-сварщики использу-

ют их при работе не всегда обоснованно и без учета требований санитарных норм [2].

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования показывают, что для контактной электросварки излучения в диапазоне частот 50...1000 Гц являются определяющим санитарно-гигиеническим фактором при оценке уровней МП. Наименее опасным режимом сварки, спектр МП которого содержит наименьшее количество существенно значимых гармонических составляющих выше основной гармоники частотой 50 Гц, в основном определяющих энергетическую нагрузку МП, является режим сварки одной пачкой синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока, причем как можно большей длительностью и меньшей амплитудой (так называемый мягкий режим сварки). Установлено также, что для этого режима сварки с учетом санитарного аспекта можно принять количество синусоидальных импульсов (периодов) не менее 15, т. е. время сварки одной точки должно составлять $t_{св} \geq 15 \cdot 0,02 \geq 0,3$ с. Этот режим сварки удобно было бы принять за контрольный, с которым можно было бы сравнивать другие возможные режимы, получаемые в результате гигиенической оценки, и проводить сравнительный анализ. В реальной практике на производстве отдают предпочтение более жестким режимам. Поэтому в качестве контрольного режима был принят жесткий режим сварки образцов (1,5 + + 1,5) мм из углеродистой стали одной пачкой десяти синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока ($I_2 = 12$ кА, $U = 0,69$ В) частотой 50 Гц на первой (минимальной) ступени регулирования мощности трансформатора при имеющихся четырех. При переходе от мягкого режима к жесткому напряженность МП в упомянутом выше диапазоне частот увеличивается примерно в 2 раза.

Для объективной оценки уровней МП во всех имеющихся диапазонах частот предложено новый обобщенный показатель — показатель превышения уровня магнитного поля (ППУ МП)

$$\text{ППУ МП} = \sum_n \frac{H_n^2}{H_{n\text{ПДУ}}^2}, \quad (1)$$

где H_n — фактическая напряженность МП по диапазонам частот n , А/м; $H_{n\text{ПДУ}}$ — напряженность предельно допустимых уровней МП по диапазонам частот n , А/м.

На рис. 1 в качестве примера представлены характерные экспериментально полученные зависимости ППУ МП для пятичасовой экспозиции перед точечной машиной средней мощности от расстояния до ее электродов для различных видов сигналов МП, где 1 — для одной пачки из десяти синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока частотой 50 Гц с модуляцией переднего и заднего фронтов (по одному полупериоду) на

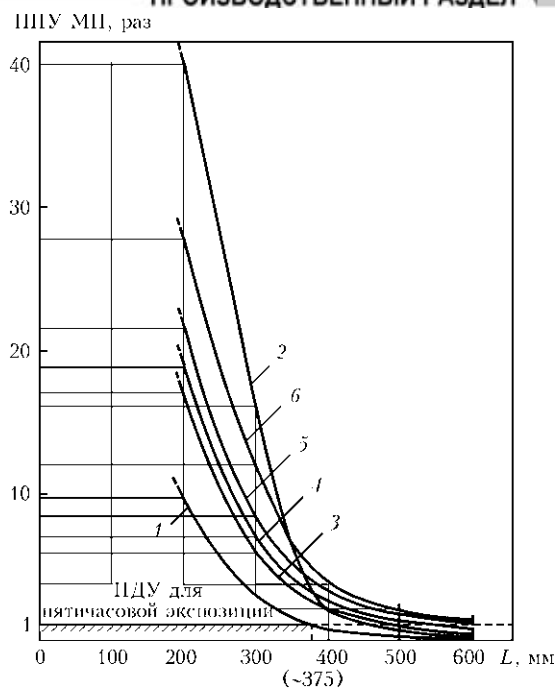


Рис.1. Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 и параметров режима сварки в рабочей зоне сварщика (перед машиной) на высоте $h = 1000$ мм (в плоскости сварного соединения) от пола (обозначения см. в тексте)

минимальной ступени трансформатора; 2 — то же, но на максимальной ступени; 3 — для угла фазового регулирования нагрева $\alpha_{\phi} = 45^\circ$ (импульс соответствует кривой 1); 4 — для одной пачки из десяти импульсов с 50%-й модуляцией переднего фронта пачки, т. е. пяти первых импульсов от нулевого до амплитудного значения; 5 — для двух пачек по пять импульсов с паузой между импульсами в два периода; 6 — для двух пачек по пять импульсов со 100%-й модуляцией передних фронтов пачек с паузой между импульсами в два периода. На рис. 2 представлено ориентировочное пространственное распределение ППУ МП перед сварочной машиной при сварке на жестком режиме одной пачкой из 10 синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока частотой 50 Гц с модуляцией переднего и заднего фронтов (по одному полупериоду) на первой ступени трансформатора. Полученные данные свидетельствуют о существенном превышении уровней магнитных излучений во фронтальной и еще более значительного в профильной области рабочего пространства сварщика.

Как видно из данных рис. 1, любое предусмотренное аппаратурой регулирование параметров режима сварки (отличных от контрольного режима) приводит к увеличению ППУ МП в рабочей зоне. Наибольшее значение ППУ МП наблюдается перед сварочной машиной в горизонтальной плоскости xOy , проходящей через свариваемую точку, в данном случае на высоте 1 м от неферромагнитного пола. Проаппроксимировав данные гра-

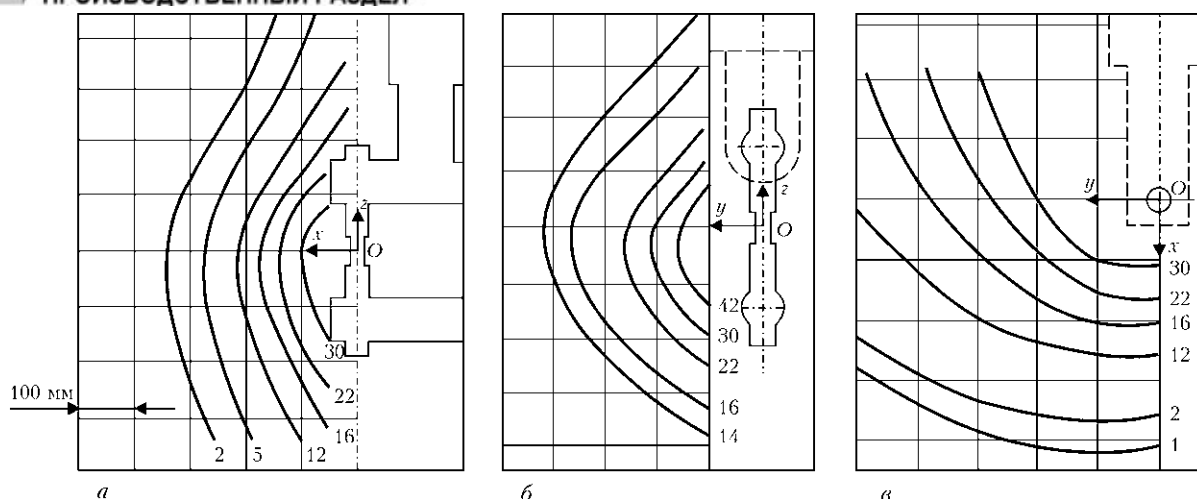


Рис. 2. Распределение ППУ МП (для пятичасовой экспозиции) в плоскости xOz (а), yOz (б) и xOy (в)

фиков рис. 2 на область головы и ног сварщика, установлено, что ППУ МП в этих областях ориентировочно в 4...6 раз ниже, чем на уровне пояса. Расчет ППУ МП сбоку от сварочного контура в вертикальной плоскости zOy показывает (рис. 2, б), что его пространственное распределение в этой области аналогично распределению перед машиной, но в горизонтальной плоскости он в 2...2,5 раза выше, а в области головы и ног сварщика остается примерно тем же.

Анализ полученных данных показывает, что надежное обеспечение максимальной эффективности защиты сварщика можно достичь увеличением расстояния до источника излучения или применением полной автоматизации и удалением сварщика из зоны действия МП на расстояние не менее 1 м, что в реальных условиях производства вряд ли возможно. Поэтому для разрешения создавшейся ситуации и возможности работы сварщика на контактных точечных машинах во фронтальной области, в так называемом ручном режиме, на расстоянии $L \geq 150...200$ мм необходимая эффективность защиты $\mathcal{E}_3$ от магнитных излучений должна составлять не менее 60...40 раз (см. рис. 1). Необходимая эффективность защиты определяется выражением

$$\mathcal{E}_3 = H_m / H_p, \quad (2)$$

где H_m — максимальное значение напряженности МП на рабочем месте; H_p — предельно допустимое значение напряженности МП.

При расчете $\mathcal{E}_3$ используют значение H_m , измеряемое на рабочем месте сварщика.

Разработка средств защиты сварщиков от электромагнитного излучения при обслуживании машин контактной точечной сварки в ручном режиме с обеспечением $\mathcal{E}_3$ порядка 100 раз, по-видимому, должна предусматривать использование всех возможных способов снижения магнитного излучения до регламентируемого уровня [2], а именно:

защиту расстоянием (до $L_{\min} \geq 250...300$ мм);
защиту временем;

защиту оптимизацией режимов сварки, использование новых способов сварки с более приемлемыми физическими параметрами электрического тока с санитарной точки зрения и новыми принципами регулирования тепловложения при выполнении сварного соединения;

экранирование токоведущих элементов сварочного контура с сохранением максимально возможного рабочего пространства;

применение индивидуальных экранирующих средств;

мониторинг магнитной обстановки на рабочем месте самим сварщиком с помощью сигнализатора уровня МП.

Рассмотрим возможности этих способов.

Защита расстоянием. При работе на стационарных точечных машинах в полуавтоматическом режиме наиболее нагруженными МП частями тела являются кисти рук и руки, т. е. локальные части тела. В отличие от европейских украинские санитарные нормы [2] не предусматривают при работе в импульсных МП применение локального повышающего коэффициента для допустимого уровня напряженности МП, равного 2,5, поэтому нахождение кистей рук на расстоянии $L \leq 300$ мм от электродов машины во фронтальной, а тем более в профильной по отношению к сварочному контуру машины области недопустимо. Допустимое расстояние до кистей рук при работе должно быть таким же, как и до туловища. В этом случае использование таких устройств, как специальная технологическая оснастка, поворотных столов и др., а также пультов управления с двумя блокированными кнопками включения сварки, обеспечивающих минимально допустимое расстояние, является насущной необходимостью.

Особенно негативные результаты воздействия МП на сварщика возможны при работе с ручным инструментом для контактной электросварки



(клещи, пистолеты для точечной сварки и пистолеты для ударной конденсаторной приварки шпилек) [3]. Так, при пятичасовой экспозиции в этом случае ППУ МП превышает норму примерно в 400 раз для кистей рук и в 100 раз для головы и туловища сварщика. Поэтому при проектировании ручного инструмента необходимо предусматривать расстояние от токоведущих частей пистолетов до его рукояток не менее 250...300 мм, а при возникновении при этом значительных моментов инерции необходимо оснащать инструмент балансировочным устройством. Конструкторская и технологическая документация должны включать эргономическую составляющую, т. е. чертежи, схемы перемещения инструмента в пространстве во время работы, положения инструмента при сварке каждой точки изделия и его расположения относительно тела (головы и туловища) сварщика.

Однако видно, что при работе в ручном режиме использования только защиты расстоянием недостаточно.

Защита временем. Защита работающих от электромагнитного излучения при различных видах контактной электросварки достигается за счет ограничения суммарного времени воздействия МП с учетом его спектрального состава ([2]) на сварщика в течение рабочего дня путем перевода его на другие операции, не связанные с воздействием МП. С учетом реально возможного снижения времени работы сварщика (времени экспозиции до 2 ч в смену) эффективность защиты этого способа может составить до 2,5 раза.

Защита путем оптимизации режимов сварки и выбора способа сварки. Иллюстрацией способа улучшения магнитной обстановки на рабочих местах путем оптимизации режимов в некоторой степени могут служить графики, представленные на рис. 1. Режимы точечной (рельефной, шовной, конденсаторной) сварки можно считать достаточно разнообразными по получаемым спектрам МП, которые и определяют значение энергетической нагрузки на организм сварщика. Разработчикам и изготовителям нового серийного сварочного оборудования необходимо учитывать условия их применения и действующие санитарные нормы, поскольку использование этого оборудования в промышленности будет ограничиваться уровнями электромагнитного излучения в рабочей зоне при его испытаниях на максимальной ступени мощности сварочного трансформатора с различными комбинациями установок регулятора цикла сварки (см. рис. 1). В случае превышения регламентируемых уровней электромагнитных излучений и недостаточности технических возможностей по их снижению производительники и конструкторы сварочного оборудования должны применять дополнительные меры за-

щиты работающих. Например, для улучшения магнитной обстановки вокруг ручного инструмента возможны следующие технические решения:

максимальное ограничение режимов сварки по току (до $I_2 = 8$ кА);

выполнение сварки по возможности на мягких режимах одной пачкой полнофазных синусоидальных импульсов тока с модуляцией фронтов пачки (по одному полупериоду);

осуществление регулировки мощности нагрева только переключением ступеней мощности трансформатора;

подключение инструмента (клещей, пистолетов и др.) к отдельно стоящему сварочному трансформатору малоиндукционными (бифилярными) кабелями.

Проблему можно было также решить путем более широкого применения технологии сварки распорными пистолетами с дистанционным включением, при котором снимаются все ограничения к используемым регуляторам цикла сварки, значению и форме кривой сварочного тока, структуре сварочного цикла и обеспечивается высокое качество сварных соединений. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона работы показывают, что наилучшие санитарно-гигиенические характеристики имеют сварочные процессы, выполняемые выпрямленным или импульсным выпрямленным током достаточно большой длительности (несколько сотен миллисекунд). Поэтому технологам-сварщикам и конструкторам сварочного оборудования рекомендуется внимательно отнестись к возможности использования контактной сварки выпрямленным током, особенно при точечной сварке ручным инструментом.

Ориентировочное снижение энергетической нагрузки МП на рабочих местах за счет оптимизации режимов сварки может составить от 2 до 10 раз.

Экранирование сварочного оборудования и сварщика. При работе в ручном режиме стационарные экраны, кроме функционального назначения, должны обеспечивать выполнение двух наиболее важных требований: не искажать характер технологического процесса и не существенно снижать производительность труда.

Важно обеспечить первое требование — не изменять электрические параметры вторичного контура трансформатора, сварочного контура внесением дополнительного сопротивления, что приведет к ограничению максимального значения сварочного тока в нем и соответственно к изменению режима сварки.

Высокую производительность труда фактически можно обеспечивать свободным доступом к месту сварки, сохранением необходимых размеров рабочего объема для выполнения технологического процесса, т. е. установки и снятия деталей,

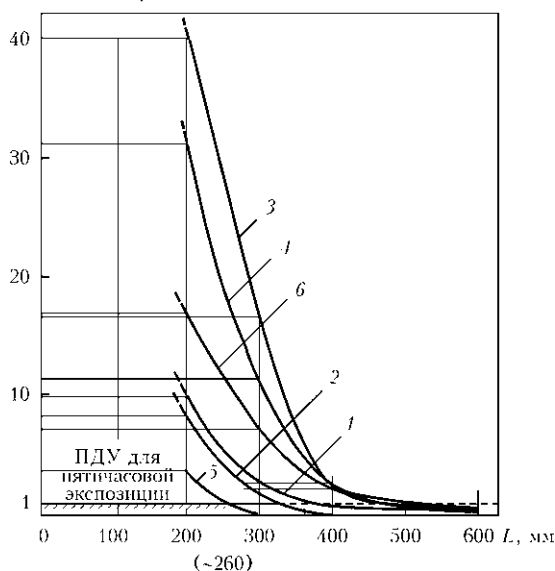


Рис. 3. Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 при экранировании туловища сварщика эластичным экраном в виде фартука [4] (обозначения см. в тексте)

предотвращением дополнительных операций на перемещение защитного экрана.

С конструктивной и технико-экономической точки зрения наиболее приемлемым материалом при изготовлении экранов для сварочного оборудования являются ферромагнитные материалы (электротехническая сталь, углеродистая сталь). Специфика работы сварочного оборудования и особенности конструктивного выполнения рабочих электродов и токоподводящих шин не позволяют применять наиболее эффективные замкнутые электромагнитные экраны, а представляется возможным устанавливать полузамкнутые экраны, которые менее эффективны.

Снижение напряженности МП, создаваемых рабочими элементами и токоподводящими шинами точечных стационарных машин, может быть достигнуто с помощью экранирующих устройств (цилиндра, замкнутого экрана, магнитного шунта), эффективность которых составляет от 2 до 30 раз. Под эффективностью экранирования понимают отношение напряженности (максимального значения) на рабочем месте H_m при отсутствии экрана к напряженности в той же точке рабочего места при наличии экрана $H_{м.э}$:

$$\mathcal{E}_э = H_m / H_{м.э}. \quad (3)$$

Для расчета $\mathcal{E}_э$ используют параметр H_m , измеряемый на рабочем месте сварщика при непрерывной работе трансформатора и допустимом токе

$$I_{2 \text{ доп}} = I_{2н} \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \quad (4)$$

где $I_{2н}$ — номинальный сварочный ток, А; ПВ — продолжительность включения, %.

Оценка $\mathcal{E}_э$ по выражению (3) является вполне приемлемой, хотя интегральная эффективность экранирования импульсных МП по аналогии с выражением (2) и в соответствии с требованиями [2] определяется как

$$\mathcal{E}_э = \sum H_n^2 / H_{нПДУ}^2. \quad (5)$$

Окончательная проверка эффективности экранирования проводится экспериментально с учетом спектрального состава МП по выражению (5).

Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 (характеристики тока те же, что и на рис. 1) при экранировании туловища сварщика эластичным экраном в виде фартука [4] представлена на рис. 3, где 1, 3 — для одной пачки импульсов сварочного тока соответственно на минимальной и максимальной мощности; 2 — с эластичным экраном из двух сплошных незамкнутых слоев при сварке на минимальной мощности; 4 — за эластичным однослойным незамкнутым экраном при сварке на максимальной мощности; 5 — за эластичным однослойным экраном при сварке на минимальной мощности для одной пачки сварочного тока с фазовым регулированием нагрева $\alpha_\phi = 45^\circ$; 6 — то же, что и 5, но без экрана.

Конструктивно экраны, установленные на рабочие электроды и токоведущие шины, могут представлять собой параллелепипед или цилиндр, выполненный из углеродистой стали толщиной 2...3 мм.

Применение средств индивидуальной защиты (халатов с капюшонами, фартуков, накидок, курток с брюками и др.), разработанных для сверхвысоких частот, в диапазоне низких частот практически теряет смысл, так как исчезает эффект отражения электромагнитных волн от материала с сетчатой или ячеистой структурой.

Средства индивидуальной защиты, например, сплошной эластичный магнитный экран с высокой магнитной проницаемостью из магнитомягкого кобальтового сплава системы легирования Co-Fe-Cr-Si-B с аморфной структурой в виде фартука сварщика [4], дополненного нарукавниками, могут быть полезными в определенных ситуациях при экранировании туловища в локальных МП средней напряженности (до 1500 А/м по основной гармонике) и должны рассматриваться как последнее средство обеспечения магнитной безопасности, поскольку для их эффективной работы необходимо предварительное снижение уровня МП до 1500 А/м; уменьшение времени установления МП в тонком экране граничной толщины (0,015 мм) путем увеличения крутизны фронта нарастания импульсов сварочного тока, что приводит к увеличению энергетической нагрузки МП в области кистей и головы сварщиков (при

этом в области живота и груди сварщика эффективность экранирования может составить от 2 до 5 раз (см. рис. 3)); обеспечение условий, исключающих прикосновение к открытым токоведущим частям сварочного оборудования [2], поскольку основа эластичного экрана металлическая.

1. *Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц.* — М., 1986. — № 3206–85. — 7 с.

2. *ДСН 3.3.6.096–2002.* Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. — К.: МОЗ України, 2002. — 16 с.
3. *Левченко О. Г., Левчук В. К.* Безопасный уровень напряженности электромагнитного поля при контактной сварке // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 46–55.
4. *Пат. UA50293 МПК G 12B 17/00 Україна.* Фартух електрозварника / Л. М. Лобанов, О. Г. Левченко, В. К. Левчук та ін. — Опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

Spatial distribution of the magnetic field (MF) generated by the resistance spot welding machine in the work zone was determined with allowance for its spectral composition. Results of experimental studies of the effect of welding process parameters and distance from current-conducting elements of the welding circuit on the indicator of excess of the MF level, according to the current medical requirements, are presented. Recommendations on protection of welders from MF are suggested, intended for designers of the resistance welding machines, production engineers and users of these machines.

Поступила в редакцию 12.03.2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ДЕСТРУКЦИЮ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ И КОРРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — канд. техн. наук А. О. Рыбаков)

Результаты и их новизна:

- исследованы свойства и частичное изменение состава продуктов электрохимической деструкции полимерных покрытий, которые образуются при катодной защите на начальной стадии;
- уточнен механизм влияния продуктов деструкции полимерных покрытий на КРН трубных сталей;
- определены условия, которые вызывают электрохимическую деструкцию защитных покрытий и коррозионное разрушение магистральных трубопроводов: наличие дефекта в защитном покрытии, коррозионно-активная среда и катодная поляризация;
- установлено наличие влияния составляющей фактора стресс-коррозионного растрескивания магистральных газопроводов, связанного с электрохимической деструкцией покрытия при катодной защите;
- уточнены критерий оценки составляющей фактора «защита трубы от коррозии», связанный с электрохимической деструкцией покрытия при катодной защите, и численные показатели к диапазонам нормированных значений потенциалов для вычисления вероятности КРН на участке магистрального газопровода по компьютерной программе.

ХІ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА «ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИИ И ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» «КОРРОЗИЯ-2012»

4–6 июня 2012 г. во Львове состоялась ХІ Международная конференция-выставка «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов» «КОРРОЗИЯ-2012».

В развитых странах условия жизнедеятельности людей и функционирование производственных объектов формируются под влиянием факторов, определяющих экологическую безопасность и коррозионную активность техногенных сред. Проблема защиты от коррозии исключительно актуальна в Украине и мире, особенно в современных экономических условиях дефицита металла и энергетических ресурсов, в период стремления Украины интегрироваться в единую европейскую систему поставщиков энергоносителей. В этих условиях возрастают требования к надежности трубопроводных систем. Проблема защиты от коррозии занимает второе место после проблемы защиты окружающей среды. С учетом косвенных потерь по приблизительным подсчетам в развитых странах убытки по причине коррозии составляют около десятой части их национального дохода. Поэтому надежная и долговечная работа металлических сооружений и их сварных соединений в значительной степени определяется эффективностью их противокоррозионной защиты.

Международные конференции-выставки, проводящиеся во Львове, посвященные проблемам коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов, дают возможность широкому кругу специалистов ознакомиться с новыми теоретическими и практическими разработками в этой области науки, обменяться опытом по современным методам повышения коррозионной стойкости металлоконструкций различного назначения, а также установить более тесные научно-производственные контакты между украинскими и зарубежными специалистами в этой сфере.

Организатором конференций-выставок является Украинская ассоциация коррозионистов во главе с ее президентом, чл.-кор. НАН Украины, д-ром техн. наук В. И. Похмурским. Украинская ассоциация коррозионистов, основанная в 1992 г., является добровольным объединением организаций и отдельных специалистов, работающих в сфере защиты от коррозии, и на сегодня объединяет порядка 50 научно-исследовательских учреждений, организаций и предприятий и более 100 индивидуальных членов. Украинская ассоциация коррозионис-



С приветственным словом к участникам конференции-выставки обращается чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук В. И. Похмурский

тов способствует сотрудничеству со специалистами международных неправительственных организаций по вопросам коррозии и противокоррозионной защиты.

Программный комитет конференции представляли: Европейская коррозионная федерация, Национальная академия наук Украины, Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины, Украинская ассоциация коррозионистов, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАНУ, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Научное товарищество им. Т. Шевченко.

В работе конференции приняли участие представители науки и промышленных предприятий Германии, России, Украины, Польши, Казахстана,



Заседание секции «Противокоррозионная защита оборудования нефтегазовой промышленности»



Коррозионисты отдела № 28 ИЭС им. Е. О. Патона

Турции, Италии и других стран, количество которых возрастает с каждым годом, что свидетельствует об ее актуальности.

Проведение конференции поддержали журналы «Физико-химическая механика материалов», «Металлы», Всеукраинская отраслевая газета «Металлы. Технологии. Оборудование», интернет-портал: <http://www.corrosion2012.ipm.lviv.ua/>

XI Международную конференцию-выставку «КОРРОЗИЯ-2012» открыли чл.-кор. НАНУ д-р техн. наук В. И. Похмурский и директор ФМИ им. Г. В. Карпенко, академик НАНУ В. В. Панасюк. Приветственное письмо в адрес конференции направил Президент Национальной академии наук Украины, академик Б. Е. Патон.

Главные и традиционные вопросы, освещавшиеся на конференции — это фундаментальные аспекты коррозии и коррозионно-механического разрушения; водородная и газовая коррозия; ингибиторная и биоцидная защита; методы исследований и коррозионный контроль; электрохимическая защита; новые коррозионностойкие материалы и покрытия; применение газотермических и других покрытий для противокоррозионной защиты конструкций; противокоррозионная защита оборудования нефтегазовой промышленности; противокоррозионная защита энергетического и химического оборудования; коррозия и экологические проблемы.

В процессе работы конференции были заслушаны пленарные выступления, посвященные теоретическим исследованиям в области водородной коррозии, оценке влияния свойств ингибиторов на коррозию углеродистой стали, использованию электрохимических и квантово-химических методов для исследования коррозии металлов, исследованию свойств модифицированных наноструктурированных полимеров (докладчики Г. Гесе, Технический

университет, г. Бурса, Турция; С. Белоглазов, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия; М. Хома, ФМИ НАНУ и др.). Проведено ознакомление со стендовыми докладами, посвященными проблемам сохранения металлофонда.

Представителей предприятий нефтегазовой отрасли заинтересовали работы прикладного характера, в которых освещались вопросы мониторинга металлических сооружений, в том числе газо-, нефтепроводов, электрохимической защиты и защитных покрытий (докладчики Р. Джала, В. Черватюк, Г. Никифорчин, ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины и др.).

Отличительной особенностью конференции было проведение обсуждения за круглыми столами по следующим секциям: применение газотермических и других покрытий для противокоррозионной защиты конструкций; противокоррозионная защита оборудования для нефтегазовой промышленности; противокоррозионная защита энергетического и химического оборудования.

ИЭС им. Е. О. Патона представляла делегация молодых ученых-коррозионистов, возглавляемая канд. хим. наук, ст. науч. сотр. Л. Нырковой. Темы выступлений и стендовых докладов патоновцев — актуальные прикладные разработки в области мониторинга техногенных сред, в том числе атмосферной коррозии, исследования влияния продуктов деструкции полимерного покрытия на коррозионные свойства трубной стали в нейтральном растворе с применением электрохимических и коррозионно-механических методов исследований. Важное значение для работников нефтегазовой отрасли имел доклад о внесении изменений в основополагающий стандарт ДСТУ 4219 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии», касающийся показателей защитных покрытий для магистральных трубопроводов. Активное обсуждение вызвал доклад мл. науч. сотр. А. Клименко, в котором рассмотрены методы и способы мониторинга стресс-коррозионного разрушения магистральных газопроводов. Автор награжден грамотой Украинской ассоциации коррозионистов за лучший секционный доклад среди молодых ученых.

На заключительном заседании конференции были отмечены лучшие работы и предложено на последующих конференциях уделить большее внимание электрохимической защите трубопроводов и других металлоконструкций, а также нормативным документам в сфере защиты от коррозии.

Л. И. Ныркова, канд. хим. наук,
С. А. Осадчук, инж.



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ»

4–8 июня 2012 г. в пгт Гаспра, Ялта прошла 12-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий», организованная Ассоциацией технологов-машиностроителей Украины. По результатам конференции издан сборник материалов, в котором представлены 132 сообщения ученых НИИ, вузов, представителей промышленных предприятий, посвященных проблемам создания функциональных покрытий и поверхностей, технологического управления качеством поверхности деталей машин и реновации изделий.

Достижение высокого качества и эксплуатационной надежности машин, а также их более низкой стоимости, являющихся условием обеспечения высокого и устойчивого уровня рыночной конкурентоспособности, возможно лишь на основе реализации новых наукоемких технологий и научно-технических направлений. Одним из таких комплексных направлений решения задачи является инженерия поверхности. Она приобретает все большее значение как эффективное средство достижения экономии материалов и энергии, позволяя одновременно улучшать технико-экономические характеристики машин и создавать принципиально новые изделия.

Международная научно-техническая конференция организована Всеукраинской общественной организацией, Ассоциацией технологов-машиностроителей Украины. В конференции участвовали ученые НИИ и вузов, специалисты промышленных предприятий Украины (Горловка, Днепропетровск, Житомир, Запорожье, Киев, Кировоград, Кривой Рог, Луганск, Мариуполь, Одесса, Харьков, Черкассы), России (Белгород, Благовещенск, Брянск, Ижевск, Москва, Нижний Тагил, Новотроицк, Омск, Пермь, Томск, Санкт-Петербург, Северск, Старый Оскол, Уфа, Хабаровск, Юрга), Беларуси (Минск), Узбекистана (Алмалык, Ташкент, Фергана), Тайваня (Chia-Yi, Kaohsiung), Японии (Tokyo).

На открытии конференции с приветственным словом выступил генеральный директор Ассоциации технологов-машиностроителей Украины, зам. директора Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, академик Академии

технологических наук Украины, д-р техн. наук, проф. С. А. Клименко. В своем выступлении он подчеркнул особое значение инженерии поверхности в создании современной техники и отметил важную роль Ассоциации технологов-машиностроителей Украины в информационном объединении специалистов и ученых-технологов различных стран.

На пленарном заседании были рассмотрены вопросы перехода от государственного регулирования к саморегулированию профессиональной деятельности в сварочной отрасли (А. В. Кондор, НП СРО «Национальное агентство предприятий-производителей сварочной продукции», д-р техн. наук М. Г. Шарапов, ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург), управления инвестициями в модернизацию машиностроительных технологий производства (канд. техн. наук С. В. Ковалев, ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва), промышленной реновации технических изделий (канд. техн. наук Б. В. Намаконов, Горловский АДИ ДонНТУ, г. Горловка), механической обработки деталей с наплавленными и напыленными покрытиями (д-р техн. наук, проф. С. А. Клименко, ИСМ им. В. М. Бакуля НАН Украины, г. Киев), связи состояния поверхностного слоя изделий с их износостойкостью (д-р техн. наук, проф. Ю. М. Лужнов, Ассоциация инженеров-трибологов России, г. Москва).

М. Г. Шарапов представил новую научно-производственную российскую саморегулируемую организацию НП СРО «Национальное агентство предприятий-производителей сварочной продукции», которая предложила ряд программ и проектов развития сварочной отрасли России. Основными, оказывающими непосредственное влияние на планомерное, стабильное и эффективное развитие сварочной отрасли в целом, являются программы «Техническая поддержка сварочных производств», «Межотраслевая интеграция», «Подготовка кадров и специализированного персонала», «Охрана труда и здоровья людей, занятых сварочной профессией». Были также проанонсированы работы по развитию взаимоотношений с зарубежными сварочными сообществами, обеспечению возможности участия предприятий членов СРО в реализации крупных



международных промышленных проектов, гармонизации стандартов с мировыми нормативными документами.

В докладах, представленных на конференции, были обобщены результаты широкого круга исследований, охватывающих важнейшие составляющие понятия инженерии поверхности, показаны современные достижения в создании и совершенствовании технологий управления эксплуатационными свойствами деталей машин и режущих инструментов. Проблемы создания функциональных покрытий и поверхностей, технологического управления качеством поверхности деталей машин рассмотрены в сообщениях В. И. Аверченкова, А. В. Тотая (г. Брянск), Н. С. Сивцева (г. Ижевск), В. С. Антониюка, Г. Г. Влайкова, М. Ю. Копейкиной, В. И. Лавриненко, Б. А. Ляшенко, А. С. Мановицкого, Ю. А. Мельничука, Н. И. Посвятенко, Е. Б. Сороки, (г. Киев), Ю. А. Харламова (г. Луганск), Л. М. Акуловича, П. А. Витязя, А. И. Гарост, И. А. Иванова, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфеца (г. Минск), В. В. Рошупкина, А. С. Тюфтяева, Г. А. Филиппова (г. Москва), Е. Н. Еремина (г. Омск), Л. Г. Вайнера (г. Хабаровск), О. Н. Доронина (Старый Оскол), А. К. Емалетдинова (г. Уфа), В. М. Береснева, Л. А. Тимофеевой, С. В. Сергеева (г. Харьков), И. Г. Шина (г. Ташкент) и других представителей научных организаций и промышленных предприятий.

В докладе И. А. Иванова были представлены разработки белорусских ученых в области вакуумного напыления на детали машин и режущие инструменты, показаны выявленные исследованиями особенности формирования покрытия с учетом требований, предъявляемых к качеству поверхности основы изделия. Результаты оригинальных исследований в направлении применения подходов механики деформируемого твердого тела к решению задач инженерии поверхности представили сотрудники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН С. Е. Александров и Е. А. Лямина.

Большую группу докладов представили ученые Томского региона — сотрудники Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Томского государственного архитектурно-строительного университета, Национального исследовательского Томского политехнического университета, Северского технологического института НИЯУ МИФИ. В работах приведены результаты широкого круга исследований вопросов создания материалов с заданными функциональными свойствами, инженерии поверхности. В своем докладе проф. Ю. Н. Сараев показал преимущества и направления дальнейшего развития электротехнологических процессов сварки и наплавки на основе реализации адаптивных ал-

горитмов импульсного управления электрическими параметрами их режима.

Традиционно в рамках конференции был проведен семинар «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горно-металлургической, машиностроительной промышленности и на транспорте», на котором ученые и специалисты промышленных предприятий на конкретных практических примерах рассказали о своих проблемах и достижениях. Большой интерес вызвали выступления, в которых рассматривался практический опыт дуговой наплавки, формирования упрочняющих покрытий и модификации поверхности деталей машин — ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» (А. А. Голякевич, Л. Н. Орлов, В. Н. Упырь, А. В. Хилько г. Киев), ООО «ТМ. ВЕЛТЕК Россия» (А. А. Кузубов-мл., г. Белгород), Комбинат «Извол» (А. А. Кузубов, г. Белгород), ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (М. Г. Шарапов, г. Санкт-Петербург), Группа компаний «НПП «РЕММАШ» (В. И. Титаренко, г. Днепропетровск), Днепродзержинский МК (О. Н. Рохлин, г. Днепродзержинск), ООО «Композит» (В. А. Коротков, г. Н. Тагил), ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» (Г. А. Филиппов, г. Москва) и др.

В. И. Титаренко представил обзор разработок ООО «НПП «РЕММАШ» по проектированию и эксплуатации оборудования для наплавочных работ. Надежное технологическое оборудование, созданное специалистами ООО «НПП «РЕММАШ», пользуется заслуженным спросом у промышленных предприятий Украины, России, обеспечивая потребителям возможность эффективного применения в производстве новых разработок для технологии наплавки, в частности, продукции ООО «ТМ.ВЕЛТЕК». Информационными спонсорами конференции выступили российские журналы «Упрочняющие технологии и покрытия», «Трение и смазка в машинах и механизмах», «Наукоемкие технологии машиностроения» (издательство «Машиностроение», г. Москва), украинский журнал «Инструментальний світ» (г. Киев).

Тезисы докладов, представленных на конференцию, вошли в изданный сборник материалов.

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины приступила к подготовке очередной 13-й Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», которая состоится в пгт Гаспра, Ялта 03–07 июня 2013 г., и приглашает специалистов, интересующихся проблемами инженерии поверхности, ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин принять в ней участие.

С. А. Клименко, д-р техн. наук,
М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук

Ю. С. БОРИСОВУ — 80



Исполнилось 80 лет со дня рождения заведующему отделом защитных покрытий Института электросварки им. Е. О. Патона, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины Юрию Сергеевичу Борисову.

После окончания в 1955 г. металлургического факультета Уральского политехнического института он начал свою трудовую деятельность в Уральском научно-исследовательском институте черных металлов, где прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя лаборатории разработки процессов защитных покрытий. Занимался разработкой теории и практики применения на металлургических заводах Урала комбинированного дутья в производстве чугуна. В 1963 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию. С 1971 г. Ю. С. Борисов руководил лабораторией разработки процессов нанесения защитных покрытий УралНИИЧермета, где в то время развивались направления разработки материалов и технологии плазменного напыления покрытий, процессов горячего цинкования и алюминирования проката и деталей с коррозионностойкими покрытиями, эмалирования изделий различного назначения.

С 1975 г. его трудовая деятельность связана с Академией наук Украины. В течение десяти лет он работал в Институте проблем материаловедения сначала в должности старшего научного сотрудника, затем руководителя группы и заведующего отделом. С 1985 г. он — заведующий отделом защитных покрытий ИЭС им. Е. О. Патона.

Ю. С. Борисов известный ученый в области материаловедения защитных покрытий и технологии их нанесения. В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований, выполненных им лично и совместно со своими сотрудниками, были развиты такие новые направления в газотермическом напылении, как нанесение покрытий из композиционных порошков, покрытий с аморфной и квазикристаллической структурой. Результаты разработки теоретических и технологических основ получения плазменных покрытий из композиционных порошков стали основой докторской диссертации Ю. С. Борисова, которую он успешно защитил в 1983 г.

Им были разработаны принципиальные основы создания композиционных порошков для газотермического напыления, предложены новые группы

композиционных порошков, газотермическое напыление которых сопровождается синтезом материала покрытий (интерметаллидов, боридов, карбидов, силицидов, нитридов) с экзотермическим эффектом в режиме СВС.

Значительным вкладом Ю. С. Борисова в материаловедение покрытий явилось развитие направления газотермического напыления покрытий, содержащих аморфные и квазикристаллические фазы. Изучение условий деформации и охлаждения материала частиц в контакте с основой и проходящих при этом фазовых превращений в этих материалах позволило Ю. С. Борисову с сотрудниками разработать новые составы материалов для напыления, использование которых позволяет получать покрытия с аморфизированной и квазикристаллической структурой, и основы технологии нанесения таких покрытий. В последние годы под руководством Ю. С. Борисова развиваются такие оригинальные технологии нанесения покрытий, как микроплазменное напыление и гибридный лазерно-плазменный метод. Для реализации указанных процессов с участием Ю. С. Борисова разработано оборудование микроплазменного напыления и интегрированный лазерно-дуговой плазмотрон. В течение последних лет Ю. С. Борисов руководит работами по созданию новых биомедицинских покрытий для эндопротезов, наносимых методом микроплазменного распыления, которые нашли применение при организации впервые в Украине промышленного производства эндопротезов тазобедренного сустава.

Наряду с разнообразными фундаментальными исследованиями под руководством Ю. С. Борисова выполнен ряд важных прикладных разработок. В частности, разработан комплекс руководящих технологических материалов по газотермическому напылению, получивший широкое распространение и послуживший основой для реализации практических технологий на многих предприятиях; освоена в массовом производстве на шести предприятиях СССР технология плазменного напыления нитеводящих деталей машин для производства химволокна, разработаны технологии нанесения износостойких покрытий на детали оборудования теплоэлектростанций, антикавитационных покрытий гильз ДВС, антикоррозионных покрытий металлоконструкций и промышленных емкостей, упрочнение инструмента и прессоштамповой оснастки, восстановление изношенных деталей автотранспорта, насосов и другого оборудования.

Ю. С. Борисов ведет активную научно-педагогическую работу по подготовке специалистов и вос-

питанию научных кадров. В течение десяти лет он читал лекции и вел занятия в Киевском политехническом институте. При его участии написаны 2 учебных пособия и 1 базовый учебник в области инженерии поверхности и нанесения покрытий. Под его руководством подготовлены и успешно защищены 3 докторских и 18 кандидатских диссертаций. По результатам научно-педагогической деятельности Ю. С. Борисову в 1990 г. присвоено ученое звание профессора.

Ю. С. Борисов ведет большую научно-организационную работу, связанную с развитием и распространением технологий нанесения защитных покрытий. Он являлся членом секций покрытий Госкомитета по науке и технике СССР и Научного Совета АН СССР, заместителем председателя секции покрытий ОФТПМ АН Украины. Он — член ученого совета ИЭС им. Е. О. Патона и совета по защитах кандидатских диссертаций при КПИ, член

редколлегии журнала «Автоматическая сварка», член Американского общества материалов и Международного комитета по термическому напылению.

Работы Ю. С. Борисова и его учеников получили широкое международное признание. Он поддерживает активные контакты с учеными из стран СНГ (России, Беларуси, Грузии), США, Канады, Германии, Финляндии, Нидерландов, Франции, Испании, Кореи и др. Под его руководством выполнен ряд международных проектов по европейским программам ИНТАС, КОСТ, КРАФТ и др.

Результаты научной деятельности Ю. С. Борисова отражены в более чем 450 статьях и 70 авторских свидетельствах и патентах, 6 книгах и 12 брошюрах. Он является соавтором энциклопедических изданий «Машиностроение» и «Неорганическое материаловедение».

ХОРУНОВУ В. Ф. — 75



Исполнилось 75 лет Виктору Федоровичу Хорунову — член-корреспонденту Национальной Академии наук Украины, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины, лауреату Государственной премии УССР и Премии имени Е. О. Патона.

После окончания в 1959 г. Киевского политехнического института он поступил на работу в Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Прошел путь от инженера до заведующего отделом физико-химических процессов пайки.

Начало его творческой деятельности связано с изучением особенностей структурных и фазовых превращений в чугунах с различным содержанием элементов-графитизаторов, кристаллизующихся в условиях высоких скоростей охлаждения, которые характерны для сварочных процессов. На этой основе были разработаны составы порошковых проволок и создан способ механизированной дуговой сварки чугуна. Основная научная деятельность В. Ф. Хорунова посвящена исследованию процессов высокотемпературной и низкотемпературной пайки, созданию научной школы в этой области. Исследования охватывают практически все конструкционные материалы, используемые в промышленности. Под его руководством разработаны научные основы, припой и технология вакуумной пайки тонкостенных конструкций из нержавеющей стали различных классов, которые нашли широкое применение в промышленности. За работу в области ракетостроения

ему присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники.

Важным аспектом научной деятельности В. Ф. Хорунова является разработка научных основ, технологических процессов и припоев для пайки жаропрочных никелевых сплавов, интерметаллидных и дисперсно-упрочненных сплавов, углеродных материалов, сплавов на основе титана и алюминия. Впервые изучены фазовый состав и интервалы плавления сплавов систем Ni–Cr–Zr, Ti–Zr–Mn, Ti–Zr–Fe, Ti–Zr–Co в широких пределах концентраций, построены поверхности ликвидуса названных систем. На основе фундаментальных исследований системы KF–AlF₃–K₃SiF₇ создан оригинальный реактивный флюс для пайки алюминия, который позволяет проводить процесс пайки без введения припоя. Для низкотемпературной флюсовой пайки алюминия впервые синтезирован новый класс комплексных тетрафторборатов.

Под руководством В. Ф. Хорунова выполнен ряд специальных проектов. Так, был подготовлен и успешно осуществлен эксперимент по пайке на околоземной орбите. В рамках международного проекта «Токомак» разработаны припой и технология пайки разнородных соединений дивертора установки термоядерного синтеза и исследована работоспособность разнородных паяных соединений в условиях жесткой термической нагрузки и нейтронного облучения.

В. Ф. Хорунов был руководителем (с украинской стороны) нескольких международных проектов: «Коперник» (ЕС) и два проекта под эгидой Министерства энергетики США: с Ливерморской Национальной лабораторией и с Национальной лабораторией «Сандия».

В последние годы В. Ф. Хорунов уделяет большое внимание новому направлению исследований — дуговой пайке различных материалов. Создана, в частности, технология дуговой пайки оцинкованной стали, которая обеспечивает сохранение покрытия и не требует дополнительной обработки соединения после пайки.

Созданы материалы и технология пайки долот для наземного и подземного бурения, что позволило в несколько раз увеличить величину проходки. Созданные долота прошли широкую проверку в реальных условиях эксплуатации.

В. Ф. Хорунов является автором более 380 печатных работ, в том числе трех монографий (одна — без соавторов) и 65 авторских свидетельств и

патентов. Под его руководством защищено 11 кандидатских и одна докторская диссертация, в том числе три российскими и одна китайским специалистами. Он является членом ученого совета Института электросварки им. Е. О. Патона, редакционных коллегий журналов «Автоматическая сварка» и «Адгезия расплавов и пайка материалов», двух спецсоветов по защитах диссертаций. На протяжении ряда лет был председателем I комиссии Национального комитета СССР Международного института сварки. Многократно выступал с лекциями в США и Китае. В настоящее время активно сотрудничает с Китаем и Россией в различных областях пайки.

А. И. ГЕДРОВИЧУ — 70



В августе исполнилось 70 лет доктору технических наук, профессору кафедры обработки металлов давлением и сварки Восточно-украинского государственного университета. В 17 лет А. И. Гедрович начал свою трудовую деятельность электромонтером электроцеха Ждановского завода тяжелого машиностроения. Затем служба в ря-

дах Советской Армии, учеба в Ждановском металлургическом институте. По его окончании работал ассистентом на кафедре сварки Луганского машиностроительного института, учился в заочной аспирантуре Киевского политехнического института (1970–1973). В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1999 г. — докторскую. Его научная специализация: исследование термомеханических процессов при сварке.

С 1975 по 1985 гг. и с 1990 по 1996 гг. работал заведующим кафедрой сварки, с 1983 по 1986 гг. был деканом машиностроительного факультета Восточно-украинского государственного университета.

А. И. Гедрович принимал участие в подготовке более 1000 специалистов для народного хозяйства Украины и ряда зарубежных стран. Он также подготовил 10 кандидатов технических наук, опубликовал свыше 100 научных статей и 7 монографий.

А. И. Гедрович является членом специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций. В течение шести лет был экспертом ВАК Украины секции «Машиностроение».

Внимательное и чуткое отношение к сотрудникам, большая работоспособность и требовательность к себе, порядочность снискали Анатолию Ивановичу заслуженный авторитет и уважение среди студентов, коллег по работе, специалистов-сварщиков.

*Сердечно поздравляем юбиляров, желаем им крепкого здоровья
и всего наилучшего!*

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77;
тел.: 200-54-84

© Автоматическая сварка, 2012

Подписано к печати 10.07.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 8,75. Усл.-отт. 9,04. Уч.-изд. л. 9,64 + 6 цв. вклеек.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

CMT Twin: идеальное сочетание двух сварочных технологий

Компания «Fronius» представляет новую инновационную технологию — CMT Twin. Основой CMT Twin являются те же составляющие компоненты, которые характерны для тандем-процесса TimeTwin, однако она дополняется превосходными сварочными характеристиками CMT. Система CMT Twin выгодно отличается не только высокой скоростью сварки и производительностью наплавки, но и простотой управления процессом и значительной экономичностью.

Новая технология CMT Twin является действительно уникальной. Она представляет собой сочетание двух известных сварочных технологий от «Fronius» — TimeTwin и CMT.

TimeTwin — это высокопроизводительный процесс тандем-сварки, при котором используются два источника питания, устройство для синхронизации их работы, два механизма подачи присадочной проволоки и одна горелка для двух, изолированных друг от друга проволочных электродов.

Технология CMT (Cold Metal Transfer), или же технология «холодного» переноса металла означает наилучшие результаты при работе с широким диапазоном материалов, высокую стабильность и 100 % воспроизводимость результатов. Это возможно благодаря процессу, который в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG является «холодным». Основной особенностью CMT является принцип отделения капли металла от торца электрода и перенос ее в сварочную ванну посредством обратного (реверсивного) движения



Специально разработанные графические характеристики, а также комбинированное применение процесса CMT и режима импульсной сварки позволяют достигать наилучших результатов практически во всех областях применения

сварочной проволоки. Система мгновенно реагирует на короткие замыкания и изменяет направление движения проволоки с частотой до 90 раз в секунду. Это практическое ноу-хау ведет к совершенным результатам и неограниченным возможностям, к которым относятся сварные и паяные швы без образования брызг, разнородные соединения стали и алюминия, сварка тончайших листов толщиной от 0,3 мм, наплавка с минимальным разбавлением основного металла и многое другое.

Кроме очевидных преимуществ каждого из описанных сварочных процессов, система CMT Twin имеет также специально разработанные графические характеристики для различных производственных задач. Для сварки материалов большой толщины рекомендуется использовать графическую характеристику «Heavy Duty». Режим «Speed» является опти-



В основе технологии CMT Twin лежат те же компоненты, которые используются при тандем-сварке TimeTwin: два источника питания, два механизма подачи проволоки, одна сварочная горелка и два изолированных друг от друга контактных накопника, однако они дополняются превосходными сварочными характеристиками CMT

* Статья на правах рекламы.



Пример сварного шва, выполненного методом CMT Twin (угловой шов, сталь толщиной 10 мм, $V_{св} = 150$ см/мин)

мальным выбором при работе с тонкими и особо тонкими листами, а также для сварки с наивысшей скоростью.

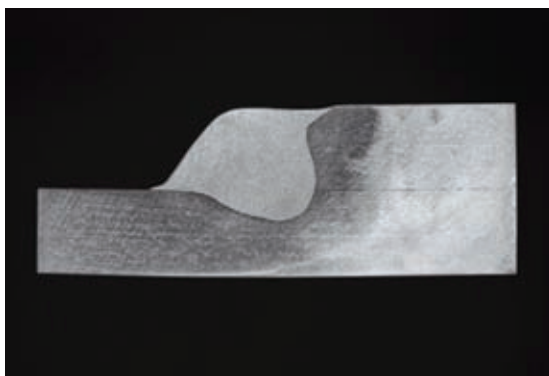
Использование принципа «ведущего» и «ведомого» электрода максимально упрощает процесс управления системой CMT Twin. После задания параметров «ведущего» электрода, «ведомый» электрод автоматически подстраивается соответствующим образом. Система автоматической регулировки, а также комбинированное применение процесса CMT и режима импульсной сварки (Pulse) позволяют достигать наилучших результатов практически во всех областях применения. Например, при работе «ведущего» элект-

рода в импульсном режиме, «ведомый» электрод в режиме CMT осуществляет интенсивное заполнение сварочной ванны, обеспечивая при этом необходимое значение катета сварного шва. Отличительной особенностью данного метода является минимальное взаимное воздействие дуг и высокая стабильность сварочного процесса.

Технология CMT Twin предоставляет широчайшие возможности сварки в среде различных защитных газов и газовых смесей, в том числе в среде традиционного и широко распространенного газа CO_2 . При этом гарантируется не только отсутствие брызг за счет безукоризненного капельного переноса в режиме CMT, но и увеличение скорости сварки и производительности наплавки практически вдвое.

Компактная и прочная высокопроизводительная сварочная горелка Twin Compact Pro обеспечивает хороший доступ к деталям. Кроме того, для каждой сферы использования предлагаются специальные комплекты сварочных горелок с оптимально отрегулированными параметрами.

CMT Twin обеспечивает исключительно стабильную дугу от самого начала процесса до заварки кратера, независимо от особенностей поверхности изделия или же скорости сварки. Преимущества очевидны: высокая скорость сварки и производительность наплавки, а также отсутствие брызг и минимальные деформации металла.



Пример сварного шва, выполненного методом CMT Twin (нахлесточное соединение, угловой шов, сталь толщиной 3 мм, $V_{св} = 300$ см/мин)

«Fronius International» — австрийское предприятие, головной офис которого расположен в Петтенбахе и которое также имеет отделения в Вельсе, Тальхайме и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для заряда батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Штат компании насчитывает 3257 сотрудников. Доля экспорта составляет 93,9 %, что достигается благодаря 19 дочерним компаниям, а также международным партнерам по сбыту и представителям «Fronius» более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 878 действующим патентам «Fronius» является лидером в области технологий на мировом рынке.



ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»

07455, Киевская обл.,

Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24

Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua