

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, Т. В. Юштина.
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова,
И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Походня И. К. Математическое моделирование процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке 3
Лебедев В. К., Письменный А. А. Система питания машин для контактной сварки с транзисторным инвертором 11
Махненко В. И., Королева Т. В., Лавринец И. Г. Компьютерная система выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей 14
Скульский В. Ю., Царюк А. К., Васильев В. Г., Стрижиус Г. Н. Структурные превращения и свариваемость закаливающейся высокопрочной стали 20ХН4ФА 19
Ефименко Н. Г., Нестеренко С. В. Стойкость против межкристаллитной коррозии аустенитного наплавленного металла, микролегированного РЗМ 24
Балицкий А. И., Костюк И. Ф., Крохмальный О. А. Физико-механическая неоднородность сварных соединений высокоазотистых хромомарганцевых сталей и их коррозионная стойкость 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Титов В. А., Данильченко Б. В., Волков А. Н., Брызгалин А. Г., Полищук С. М., Корицкий В. А., Андреев В. В. Опытный завод сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в новых условиях хозяйствования 32
Астахов Е. А. Детонационный комплекс «Перун-С» для нанесения защитных покрытий 38
Кононенко В. Я. Современное состояние подводной сварки и резки в Украине 44
Кривенцов А. Н., Лысак В. И., Кузьмин В. И., Яковлев М. А. Восстановление изношенных замыкающих поверхностей замков автосцепных устройств сваркой взрывом 49

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Киселевский Ф. Н., Бутаков Г. А., Долиненко В. В., Шаповалов Е. В. Оптический сенсор для слежения за стыком при размерах зазора, близких к нулю 51
Гнатенко М. Ф. Прибор ПКР-3 для контроля разнотолщинности покрытия сварочных электродов 53
Разработано в ИЭС: Способ и оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с автоматической стабилизацией процесса 54
Лауреаты Государственной премии Украины 55
Патенты в области сварочного производства 56
По зарубежным журналам 57

ХРОНИКА

Международный семинар «Современные технологии сварки и новые конструкционные материалы в химическом машиностроении и промышленности» 59

РЕКЛАМА 63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Каховский завод электросварочного оборудования
ОАО «Фирма СЭЛМА»
Ново-Краматорский машиностроительный завод

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

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

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

**THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:**

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

Address:

The E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, V. I. Kotiyar,
T. V. Yushtina.
Electron galley:
I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegiryova.

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Pokhodnya I.K. Mathematical modeling of processes of metal inter-
action with gases in arc welding 3
Lebedev V.K., Pismennyi A.A. Supply system of machines for resis-
tance welding with a transistor inverter 11
Makhnenko V.I., Korolyova T.V., Lavrinets I.G. Computer system
of selection of welding consumables for arc welding structural steels 14
Skulsky V.Yu., Tsaryuk A.K., Vasilijev V.G., Strizhius G.N. Struc-
tural transformations and weldability of quenching high-strength steel
20KhN4FA 19
Efimenko N.G., Nesterenko S.V. Resistance against intercrystalline
corrosion of austenitic deposited metal microalloyed with REM 24
Balitsky A.I., Kostyuk I.F., Krokhmalny O.A. Physical-mechanical
heterogeneity of welded joints of high-nitrogen chromium-manganese
steels and their corrosion resistance 28

INDUSTRIAL

**Titov V.A., Danilchenko B.V., Volkov A.N., Bryzgalin A.G., Polish-
chuk S.M., Koritsky V.A., Andreev V.V.** Pilot plant of welding equip-
ment of the E.O.Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine in
the new conditions of management 32
Astakhov E.A. Detonation complex «Perun-S» for deposition of protec-
tive coatings 38
Kononenko V.Ya. State-of-the-art of underwater welding and cutting
in Ukraine 44
Kriventsov A.N., Lysak V.I., Kuzmin V.I., Yakovlev M.A. Restora-
tion of worn-out closed surfaces of locks of automatic coupling de-
vices by explosion welding 49

BRIEF INFORMATION

Kiselevsky F.N., Butakov G.A., Dolinenko V.V., Shapovalov E.V.
Optical sensor for butt tracking at sizes of gaps close to zero 51
Gnatenko M.F. Device PKR-3 for control of difference in thickness of
welding electrode coating 53
Developed at the Paton Institute: Method and equipment for consum-
able-electrode pulsed-arc welding with automatic stabilization of pro-
cess 54
Laureates of State Prize 55
Patents in the field of welding 56
Review of foreign journals 57

NEWS

International seminar «Modern technologies of welding and new struc-
tural materials in chemical machine-building and industry» 59

ADVERTISING 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.*



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛА С ГАЗАМИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты термодинамических исследований взаимодействия расплавленного металла с газом, содержащим водород, кислород и соединения фтора, а также со шлаковой фазой. С учетом нестационарных условий и переменной скорости кристаллизации выводятся закономерности перераспределения водорода в кристаллизующейся сварочной ванне. Основой сформулированных математических моделей является дифференциальное уравнение массопереноса: в частности, уравнение Фика с краевыми условиями типа Стефана на движущейся границе раздела фаз. Исследована кинетика перераспределения водорода вблизи линии сплавления, а также в жидком металле при ячеистой кристаллизации. Описан процесс роста пузырька газа в сварочной ванне.

Ключевые слова: дуговая сварка, абсорбция газов, водород, кристаллизация, сварочная ванна, пористость

Дуговая сварка — высокотемпературный металлургический процесс. На всех его стадиях происходит взаимодействие металла и шлака с водородом, азотом и кислородом. Изучению этих процессов большое внимание уделяли специалисты ИЭС им. Е. О. Патона, результаты некоторых исследований изложены в работах [1–14].

Высокие температуры и скорость реакций, имеющие место при дуговой сварке, малые объемы и большие удельные поверхности реагирующих фаз, а также неравновесные условия различных стадий процесса значительно усложняют проведение экспериментов. Дополнительную информацию дают возможность получить методы физического и математического моделирования с помощью современной вычислительной техники.

В настоящей статье изложены результаты работ по физическому и математическому моделированию поведения газов при дуговой сварке сталей, полученные в основном в ИЭС им. Е. О. Патона.

Испарение металла и абсорбция газов. Расчет растворимости водорода в жидком железе в зависимости от температуры был выполнен И. И. Фруминим [4], а экспериментальные исследования

проведены В. И. Лакомским [5]. Полученные результаты показали, что максимальная растворимость водорода в железе наблюдается при температуре 2700 К и снижается до нуля при температуре кипения металла.

Как следует из результатов исследований [1], теплосодержание каплевого электродного металла зависит от тока и его полярности (рис. 1). Во многих случаях температура каплевого электрода превышает температуру максимальной растворимости газов в железе. Поэтому различие температуры каплевого электрода в интервале 200...300 К в случае сварки плавящимся электродом током прямой и обратной полярности может оказать значительное влияние на абсорбцию газов.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные (кружки) о содержании азота в каплях хромоникелевого электродного металла при сварке током прямой полярности в смеси $Ag + 10\% N_2$ [1]. О. М. Портновым выполнен расчет абсорбции азота каплями электродного металла и его результаты показаны на рис. 2 сплошной линией. Как видно из рисунка, наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Термодинамическая оценка взаимодействия металла со шлаком и газом. Термодинамические

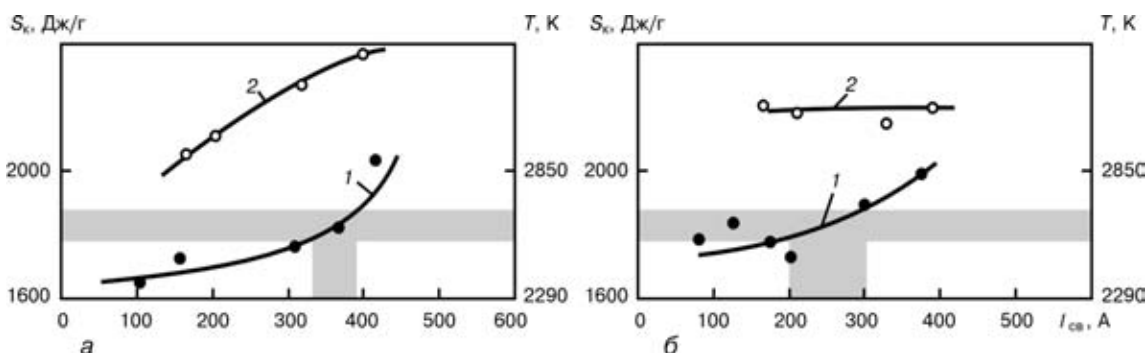


Рис. 1. Влияние сварочного тока $I_{св}$ и его полярности на теплосодержание каплевого электродного металла при сварке низкоуглеродистой стали с использованием проволоки Св-08А диаметром 2 мм в смеси инертных газов $He + N_2$ (а) и $Ag + N_2$ (б): 1, 2 — ток соответственно прямой и обратной полярности (заштрихованы области температур максимальной растворимости азота и токов, при которых достигаются эти температуры)

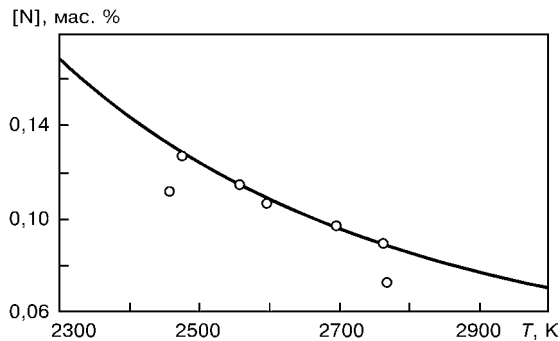


Рис. 2. Влияние температуры капель T на абсорбцию азота каплями электродного металла при сварке током прямой полярности в смеси $Ag + 10\% N_2$

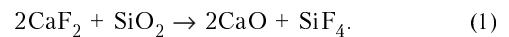
подходы использованы для анализа процесса связывания водорода, находящегося в газовой фазе в виде паров воды, в нерастворимый в жидком железе фтористый водород при температуре $2000...2500\text{ K}$ и давлении $1 \cdot 10^5\text{ Па}$ [6]. Расчеты проводились применительно к сварке порошковой проволокой в углекислом газе. Начальные условия характеризовались образованием фаз следующих составов: газовая — монооксид углерода с небольшим количеством паров воды; металлическая — железо; шлаковая — CaF_2 и SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 и CaO в различных пропорциях. Для создания окислительной атмосферы в расчетный состав шлакового расплава вводили некоторое количество FeO .

Были проанализированы различные шлаковые системы: $SiO_2-CaO-CaF_2$, $TiO_2-CaO-CaF_2$, $Al_2O_3-CaO-CaF_2$. Кроме того, исследовали процесс связывания водорода при различных температурах и содержании паров воды в газовой фазе, а также при дополнительном введении в эту фазу SiF_4 и кислорода.

На рис. 3, *a* показана зависимость массовой доли водорода в жидком металле от начального содержания CaF_2 в шлаковой системе $TiO_2-CaO-CaF_2$, полученная расчетным методом. При отсутствии CaO оптимальной является область, где массовая доля CaF_2 составляет $60...75\%$. С увеличением массовой доли CaO в шлаке область оптимального состава сдвигается в сторону умень-

шения содержания CaF_2 . Однако при этом указанной области соответствует значительное содержание водорода в металле. Аналогичные данные получены и для системы $Al_2O_3-CaO-CaF_2$ (рис. 3, *б*). В системе $SiO_2-CaO-CaF_2$ (рис. 3, *в*) массовая доля CaO не влияет на содержание водорода в жидком металле, которое уменьшается с увеличением массовой доли CaF_2 в шлаке.

При возрастании окислительного потенциала газовой фазы вследствие введения молекулярного кислорода содержание водорода в металле уменьшается незначительно. При добавлении в газовую фазу SiF_4 массовая доля водорода в жидком металле снижается довольно значительно за счет развития реакции взаимодействия водорода со свободными атомами фтора, образующимися при диссоциации SiF_4 (рис. 4). Этот способ уменьшения содержания водорода в жидком металле более эффективен по сравнению с введением в состав шлака значительной массовой доли SiO_2 и CaF_2 в расчете на протекание обменной реакции



Для исследований кинетики развития термодимических реакций в твердых и жидких веществах с участием газовой фазы используется динамическая термогравиметрия, при которой непрерывно регистрируются масса образца и скорость ее изменения в контролируемой атмосфере в зависимости от температуры и времени. С помощью полученных данных можно изучить кинетику процессов выделения газов при высокой скорости нагрева, которая характерна для дуговой сварки. Для этого используют метод расчета, основанный на определении энергии активации реакции термического разложения и других кинетических параметров по данным серий термогравиметрических анализов при различных скоростях нагрева [13, 14]. Результаты термогравиметрического анализа смеси $CaF_2 + SiO_2$, а также порошков Na_2SiF_6 и $BaSiF_6$ приведены на рис. 5. Заметное взаимодействие CaF_2 и SiO_2 начинается при температурах выше $700\text{ }^\circ\text{C}$, а диссоциация Na_2SiF_6 и $BaSiF_6$ происходит соответственно при $500...700$ и

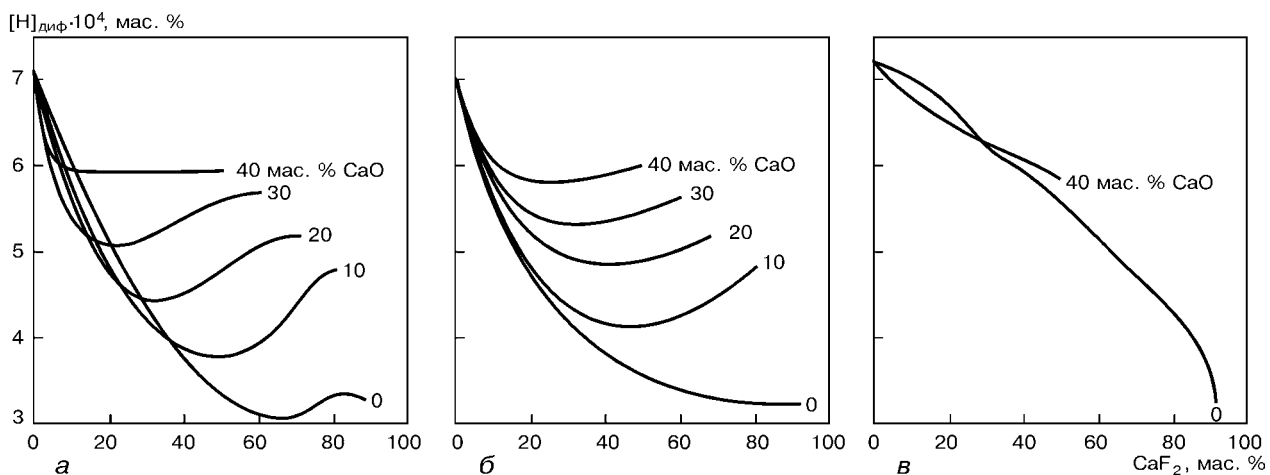


Рис. 3. Изменение содержания водорода в жидком металле в зависимости от массовой доли CaF_2 в различных шлаковых системах: *a* — $TiO_2-CaO-CaF_2$; *б* — $Al_2O_3-CaO-CaF_2$; *в* — $SiO_2-CaO-CaF_2$

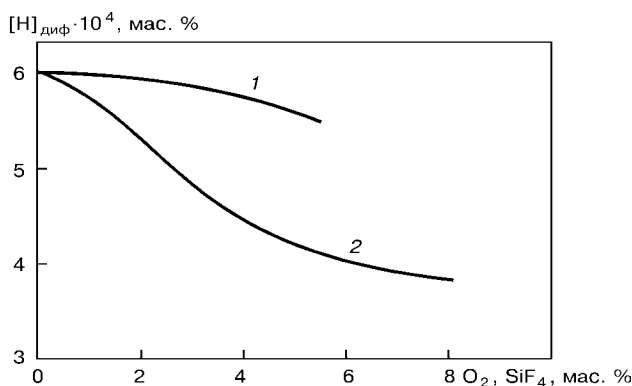


Рис. 4. Влияние массовой доли кислорода и SiF₄ в газовой фазе на содержание водорода в жидком металле (шлак — 45 % SiO₂, 45 % CaF₂ и 10 % FeO, расчетные данные): 1 — O₂; 2 — SiF₄

300... 400 °С. Однако в случае гексафторсиликатов процесс термического разложения имеет сравнительно высокую энергию активации (приблизительно 280... 320 кДж/моль), в то время как энергия активации реакции образования тетрафторида кремния в результате обменной реакции флюорита с кремнеземом отличается более низкими значениями (около 150 кДж/моль), что приводит к зависимости температурного интервала интенсивного газовыделения от скорости нагрева.

Результаты расчета подтверждаются экспериментально при исследовании концентрации диффузионного водорода в металле шва, выполненном порошковыми проволоками с различными фторидами в металле сердечника (рис. 6) [7].

Расчеты парциального давления P_{SiF₄} при массовой доле SiO₂ в электродном покрытии 4 и 11 %, а также экспериментальные данные по концентрации диффузионного водорода в металле шва приведены на рис. 7. На рисунке заметно снижение концентрации диффузионного водорода при повышении массовой доли SiO₂ и CaF₂ в покрытии [8].

Оценка поведения водорода в дуговом разряде. Физической основой для построения расчетной модели служили представления о наличии в столбе дуги локального термодинамического равновесия. Столб дуги характеризуется выпуклой формой радиального распределения температуры. При этом не учитывалось влияние приэлектродных областей. Физическая модель, принятая в расчетах, и ее математическое описание приведены в работе [9].

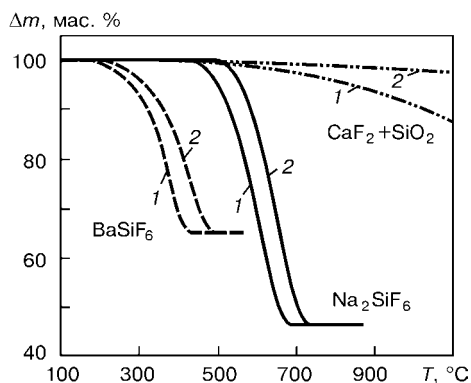


Рис. 5. Результаты термогравиметрического анализа диссоциации фторидов и кремнефторидов при скорости нагрева 10 (1) и 20 °С/мин (2); Δm — изменение массы образца

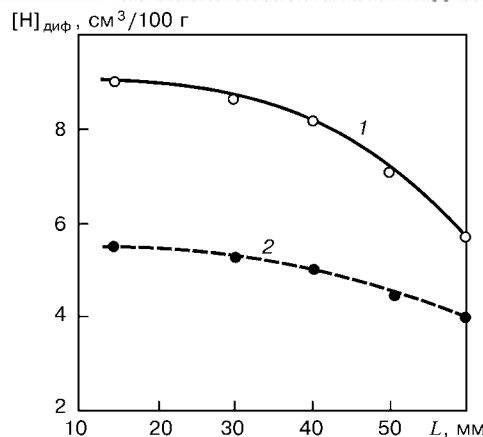


Рис. 6. Изменение концентрации диффузионного водорода в металле шва, выполненном порошковыми проволоками с различными фторидами в металле сердечника [7]: 1 — CaF₂ + SiO₂; 2 — Na₂SiF₆; L — длина вылета проволоки

Водород и кислород в дуге полностью диссоциированы при температуре 4000 К, фтор — уже при температуре 1600 К, поскольку имеет низкую энергию диссоциации (1,38 эВ). В большей части сечения столба дуги HF и OH также полностью диссоциированы (рис. 8, а).

Улучшение эффективности защиты дуги с понижением температуры показано на рис. 8, б. В дугу дополнительно введено по 1 % HF и OH (парциальное давление P_{HF} = P_{OH} = 1000 Па). Из сравнения распределений частиц HF и OH в такой дуге (рис. 8, б) видно, что в случае снижения температуры дуги эффективность связывания водорода в HF и OH возрастает. Ширина зоны, где происходит диссоциация, для HF в 1,5 раза больше, чем для OH. Сравнение кривых на рис. 8 показало, что при равном парциальном давлении HF и OH имеют одинаковую степень диссоциации при температурах, отличающихся примерно на 1000 К.

Эффективное связывание водорода этими соединениями можно обеспечить только при невысоких температурах, которые имеют место на периферии столба дуги и за его пределами, где тем-

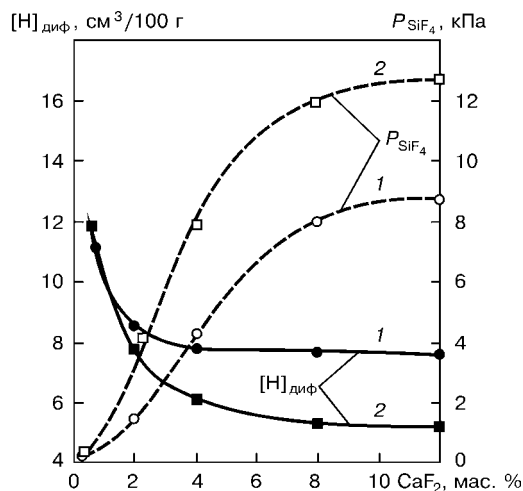


Рис. 7. Влияние CaF₂ и SiO₂ в покрытии на расчетные значения парциального давления тетрафторида кремния P_{SiF₄} в атмосфере дуги и экспериментальные значения концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле [8]: 1 — 4 мас. % SiO₂; 2 — 11 мас. % SiO₂

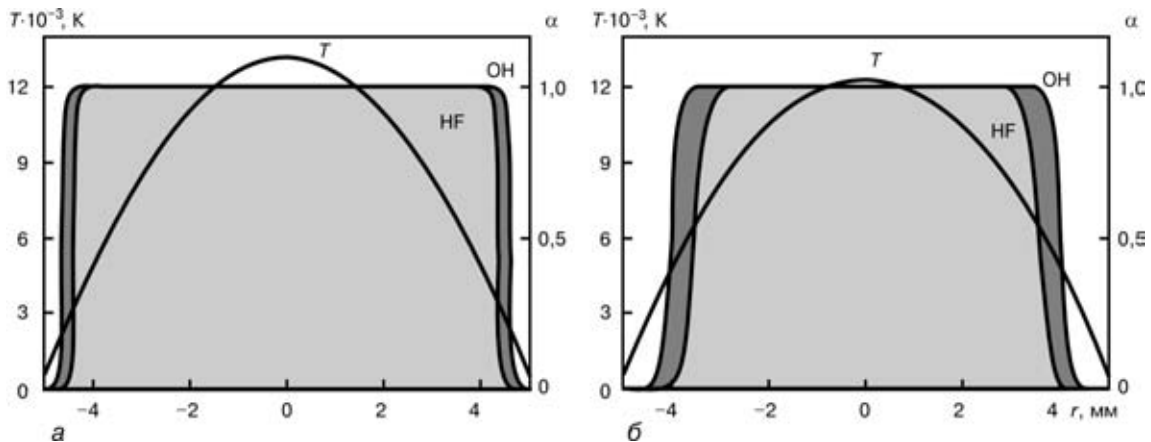


Рис. 8. Зависимость степени диссоциации частиц α HF и OH от радиуса r столба дуги при повышенной (а) и более низкой (б) температуре в зоне оси столба

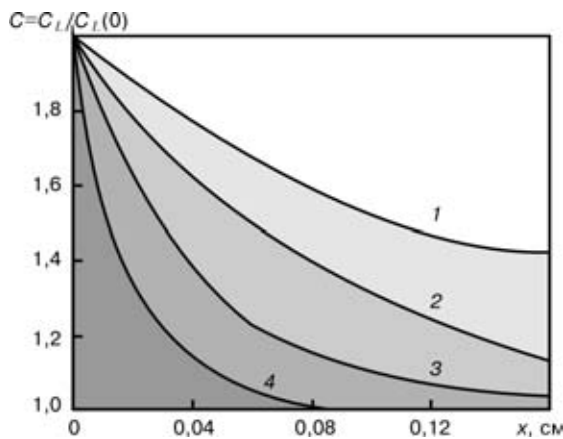


Рис. 9. Распределение концентрации водорода в жидком металле C при движении плоского фронта кристаллизации: 1 — $v_{кр} = 0,01$; 2 — 0,02; 3 — 0,04; 4 — 0,08 см/с; x — координата, отсчитываемая от фронта кристаллизации

пература для HF не превышает 3000, а для OH — 2500 К.

Водород в сварочной ванне. Распределение водорода в процессе кристаллизации сварочной ванны рассмотрим для случая плоского и ячеистого фронта кристаллизации.

Распределение водорода при плоском фронте кристаллизации. Перенос газа осуществляется диффузией; коэффициент диффузии зависит от температуры и скорости кристаллизации. Аналитическое решение задачи дано в работе [10]. На рис. 9 показана типичная картина распределения концентрации водорода при прерывистой кристаллизации сварочной ванны в случае сварки низкоуглеродистой стали. При расчете приняты следующие значения параметров: $D_S = 1 \cdot 10^{-4}$ см²/с; $D_L = 1 \cdot 10^{-3}$ см²/с; $k = 0,53$; $v_{кр} = 0,2$ см/с; $t_{st} = 0,2$ с; $C_L(0) = 5$ см³/100 г; $C_S(0) = 0$; $t_d(i) = 0,05 + di$ (здесь D_S и D_L — коэффициенты диффузии водорода соответственно в твердой и жидкой фазе; k — коэффициент распределения водорода; $v_{кр}$ — скорость кристаллизации; t_d , t_{st} — время процесса соответственно кристаллизации и ее остановка; $C_L(0)$ и $C_S(0)$ — начальная концентрация водорода соответственно в жидкой и твердой фазе; $i = 0, 1, 2, \dots, n$ — номер кристаллизационного слоя, отсчитываемый от линии сплавления).

Анализ расчетных данных показал, что при прерывистой кристаллизации в жидкой фазе наблюдается образование обогащенного водородом диффузионного пограничного слоя — концентрационного уплотнения, стремящегося при $v_{кр} = \text{const}$ выйти на квазистационарный режим. Во время остановки между периодами роста кристаллов происходит распад концентрационного уплотнения под действием следующих факторов: диффузии в жидкой фазе, которая снижает концентрацию водорода непосредственно у фронта кристаллизации и обогащает слой жидкого металла вдали от фронта кристаллизации; уменьшения концентрации водорода в жидкой фазе на межфазной границе, происходящего пропорционально уменьшению содержания водорода в твердой фазе.

При остановке процесса кристаллизации поток диффузионного водорода направлен из твердой фазы в жидкую. В жидкой фазе, обогащенной водородом, при его начальной концентрации 10...12 см³/100 г создаются условия для образования газовых пузырьков. Итоговое распределение газа в металле шва, вызванное слоистой кристаллизацией, характеризуется двумя особенностями: существованием обогащенного водородом слоя, находящегося в закристаллизовавшемся металле, на месте обогащенной в процессе остановки жидкой фазы; наличием обедненного водородом участка на границе кристаллизационного слоя со стороны твердого металла.

При охлаждении металла шва эта неоднородность уменьшается за счет диффузии водорода. Распределение водорода между сварочной ванной и закристаллизовавшимся металлом зависит от скорости кристаллизации. Как показали расчеты, снижение в 10 раз заданного значения коэффициента диффузии водорода в твердой фазе так же, как изменение длительности кристаллизационных пауз в росте твердой фазы, существенного влияния на характер распределения водорода не имеет.

Распределение водорода при ячеистом фронте кристаллизации. Изменение геометрической структуры фронта кристаллизации влечет за собой принципиально иное распределение водорода, растворенного в сварочной ванне. На рис. 10 показано поле концентраций водорода в растущей ячейке и межкристаллитной жидкости. При расчете приняты сле-

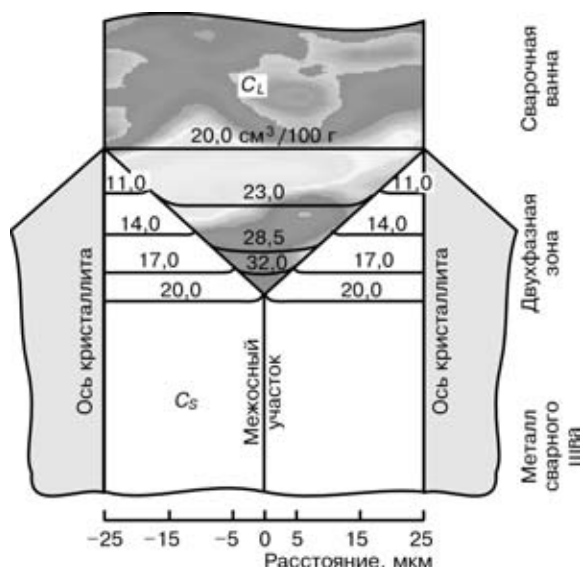


Рис. 10. Поле концентраций водорода в твердой C_S и жидкой C_L фазе при ячеистом фронте кристаллизации

дующие значения параметров: $D_S = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$; $D_L = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$; $v_{кр} = 0,4 \text{ см}/\text{с}$; размер ячейки $l = 25 \text{ мкм}$; скорость охлаждения $v_{охл} = 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$; массовая доля углерода 0,2 %.

Анализ расчетных данных показал следующее: обогащение жидкого металла растворенным водородом главным образом локализуется в межкристаллитной жидкости; в жидкой фазе сварочной ванны наблюдается средняя концентрация газа; в связи с высокой диффузионной подвижностью водорода в твердой фазе неоднородность распределения водорода по сечению полностью затвердевшей ячейки незначительна.

Рост газового пузырька. Фактором, лимитирующим рост пузырька из первоначально образовавшихся зародышей, является процесс транспортировки растворенного в жидком металле газа к границе раздела газ – жидкость. Перенос растворенного газа в металл осуществляется двумя способами: диффузией и конвекцией. В расчетах исходили из представлений о наличии вблизи фронта кристаллизации пограничного слоя жидкого металла, не участвующего в конвективном перемешивании основной массы металла сварочной ванны, и из предположения о том, что образовавшийся зародыш пузырька в течение некоторого времени растет в этом слое. Было принято, что зародыш и растворившийся пузырек имеют сферическую форму. В первоначальных расчетах предполагалось, что площадь поверхности контакта пузырька, растущего на фронте кристаллизации с твердой фазой, значительно меньше, чем с жидкой. Кроме того, допускалось, что неоднородность диффузионного пересыщения впереди фронта кристаллизации невелика. Этим условиям в наибольшей степени соответствует дендритно-ячеистый характер кристаллизации.

Физическая модель и методика ее численной реализации на ЭВМ описаны в работе [10]. Зависимость критического радиуса пузырька от относительной концентрации газа в расплаве представлена на рис. 11. Как показали расчеты, в

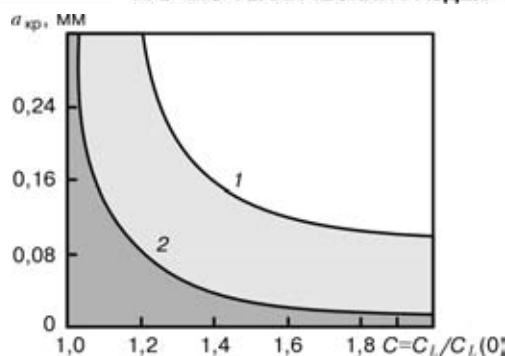


Рис. 11. Зависимость критического радиуса $a_{кр}$ пузырька от относительной концентрации C азота (1) и водорода (2) в расплаве

результате диффузии газа в пузырек в жидком металле образуется обедненный газом слой, движущийся вместе с пузырьком. Скорость роста пузырька зависит от концентрации газа в сварочной ванне впереди фронта кристаллизации. Максимальная скорость наблюдается в начальной стадии роста пузырька (рис. 12).

Скорость роста пузырька также зависит от поверхностного натяжения на границе металл – газ. При увеличении поверхностного натяжения максимальные значения скорости роста уменьшаются и смещаются в сторону больших времен. После достижения максимальной скорости роста наблюдается ее быстрое снижение до значений, соизмеримых со скоростью кристаллизации сварочной ванны. Влияние поверхностного натяжения при такой скорости роста незначительно.

При создании описанной выше модели роста газового пузырька исходили из того, что площадь контакта поверхности растущего пузырька с твердой фазой пренебрежимо мала. Между тем, реально он зарождается именно на фронте кристаллизации. Следовательно, можно ожидать, что уровень диффузии водорода в газовый пузырек из твердой фазы будет существенным.

Л. А. Тараборкин предложил учитывать влияние указанного эффекта следующим образом. Закон сохранения массы записывается в виде граничного условия на поверхности пузырька

$$\frac{dM(t)}{dt} = [P_S \beta(t) + P_L (1 - \beta(t))] \sigma(t), \quad (2)$$

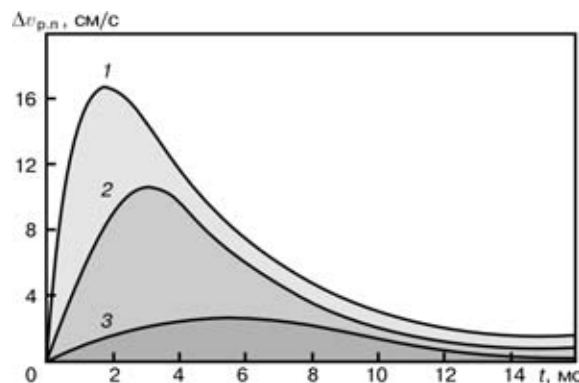


Рис. 12. Изменение скорости роста пузырька $\Delta v_{р.п.}$ водорода во времени t : 1 – $C_L(0) = 42 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, $\sigma = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/\text{см}^2$; 2 – $C_L(0) = 42 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, $\sigma = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/\text{см}^2$; 3 – $C_L(0) = 35 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, $\sigma = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/\text{см}^2$

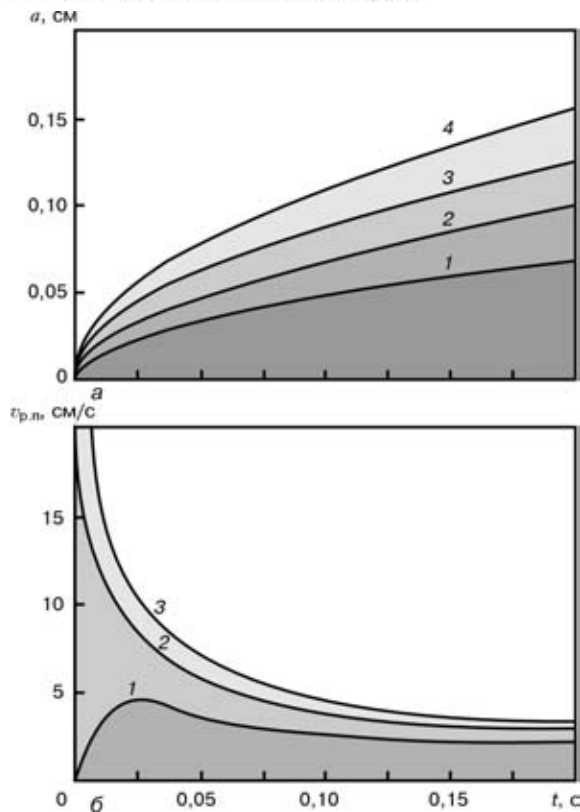


Рис. 13. Кинетика роста газового пузырька (а) и скорость его роста (б) в зависимости от отношения β площади контакта пузырька с расплавом к общей поверхности пузырька: 1 — $\beta = 1$; 2 — 0,9; 3 — 0,8; 4 — 0,7; a — радиус газового пузырька

где M — масса водорода в пузырьке; P_S, P_L — потоки диффундирующего газа соответственно из твердой и жидкой фазы; $\beta(t)$ — доля площади поверхности контакта пузырька с твердой фазой по отношению к общей площади поверхности пузырька в момент времени t ; $\sigma(t)$ — площадь поверхности пузырька в момент времени t .

Поток газа из твердой фазы определяется путем решения нелинейной задачи диффузии с граничным условием, при этом учитывается реакция молизации водорода со скоростью, пропорциональной квадрату концентрации атомов газа во внешнем слое:

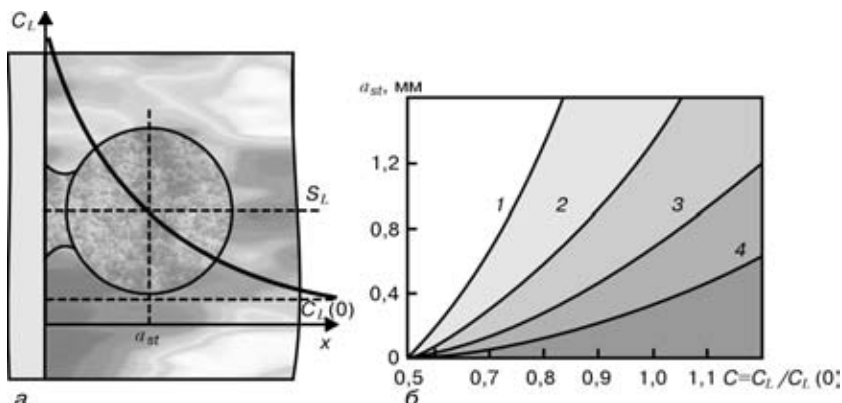


Рис. 14. Схема определения окончательного радиуса пузырька a_{st} (а) и зависимость его значений, при которых происходит прекращение его роста, от концентрации водорода C и скорости кристаллизации (б): 1 — $v_{кр} = 0,01$; 2 — 0,02; 3 — 0,04; 4 — 0,08 см/с

$$P_S = KC_{S_{пов}}^2(t), \quad (3)$$

где K — коэффициент пропорциональности (константа скорости реакции молизации); $C_{S_{пов}}^2$ — поверхностная концентрация атомов газа на границе пузырька. В последнем условии учтено, что химический потенциал газа в пузырьке гораздо выше, чем в твердом металле, так что диффузионный поток из газовой фазы в твердую (в металл) можно считать пренебрежимо малым.

Результаты вычислительных экспериментов (рис. 13) иллюстрируют кинетику роста и скорости роста газового пузырька (пузырька водорода) в кристаллизующемся расплаве с учетом диффузии водорода из твердой фазы.

Образование пор в сварном шве. Результаты численных экспериментов по перераспределению газов при кристаллизации сварочной ванны и росту газовых пузырьков использованы для анализа причин образования пор в сварных швах [10].

Были рассмотрены два случая.

1. Концентрация растворенного газа находится в интервале растворимости его в твердом S_S и жидком S_L металле:

$$S_S < C_L(0) \leq S_L. \quad (4)$$

2. Концентрация растворенного газа превосходит предел его растворимости в жидком металле при тех же условиях:

$$C_L(0) > S_L. \quad (5)$$

Случай 1. При плоском фронте кристаллизации распределение растворенного газа впереди фронта описывается формулой

$$C_L(x) = C_L(0) \left(1 + \frac{1-k}{k} \exp\left(-\frac{v_{кр}x}{D_L}\right) \right), \quad (6)$$

где $C_L = C_L(x)$ — текущая концентрация газа в сварочной ванне; k — коэффициент распределения водорода, равный отношению S_S/S_L .

В соответствии с формулой (6) концентрация газа изменяется от $C_L(0)/k$ (максимальной непосредственно на фронте кристаллизации) до $C_L(0)$ (вдали от него). В участке концентрационного уплотнения, который прилегает к границе раздела фаз, концентрация растворенного газа превосходит его равновесную растворимость S_L в жидком металле, т. е.

$$S_S < C_L < C_L(0)/k. \quad (7)$$

Жидкий металл во втором участке является обедненным по отношению к S_L . В пересыщенном участке возможно образование газовых пузырьков и их рост (рис. 14, а). Последний может происходить и тогда, когда часть его поверхности захватывает обедненный участок. Рост пузырька прекращается, если площадь его

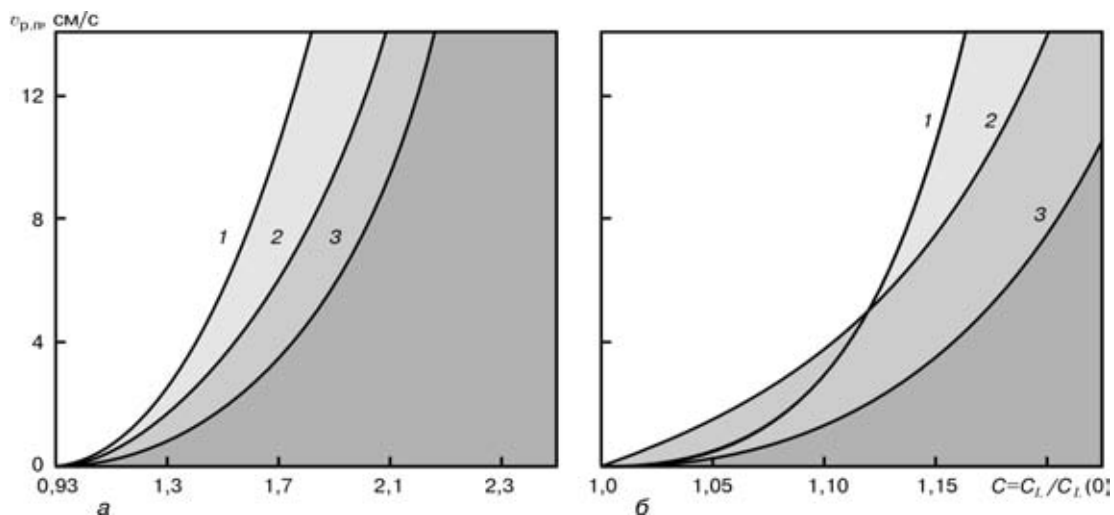


Рис. 15. Зависимость скорости роста пузырька $v_{p,н}$ водорода диаметром $2a$ от концентрации C водорода в жидком металле: $a - 1,3 < C < 2,5$ — большие пересыщения; $b - 1,00 < C < 1,25$ — небольшие пересыщения; 1 — $2a = 0,5$; 2 — $1,0$; 3 — $2,0$ мм

Таблица 1. Изменение относительной степени пересыщения межкристаллитной жидкости C' , критического радиуса пузырька газа $a_{кр}$ и поперечных размеров жидкой фазы ξ по длине двухфазовой зоны

Расстояние от осей первого порядка, мм	$C' = C_L/S_L$	$a_{кр}$, мм	ξ
0,8	1,156	0,104	0,014
0,9	1,225	0,068	0,009
1,1	1,300	0,050	0,008
1,4	1,375	0,038	0,005
1,7	1,450	0,032	0,004

поверхности, которая приходится на обедненный участок, становится больше, чем площадь поверхности пузырька в обогащенном слое.

Принимая $x = a_{st}$, $C_L(x) = S_L$ в уравнении (6), можно определить радиус пузырька a_{st} , при котором происходит остановка его роста. На рис. 14, б приведены результаты расчета a_{st} в зависимости от концентрации водорода и скорости кристаллизации.

При остановке роста пузырька фронт кристаллизации «обходит» пузырек и как бы фиксирует его в затвердевшем металле. Результаты расчета показали, что увеличение скорости кристаллизации приводит к уменьшению толщины диффузионного пограничного слоя. При этом радиус пузырька должен уменьшиться вплоть до значения, меньшего критического радиуса зародыша. В этом случае образовавшийся зародыш пузырька растворяется.

Таблица 2. Содержание газов в металле при сварке различными типами порошковых проволок и наличие пор в шве

Тип сердечника проволоки	Скорость сварки, м/ч	Концентрация $[H]_{диф}$, см ³ /100 г	Массовая доля газов в металле, %		Наличие пор
			N	O	
Карбонатно-флюоритный	16	13,0	0,038	0,054	Есть
	30	14,1	0,032	0,027	Нет
Рутилорганический	12	26,8	0,021	0,08	»

Таким образом, с увеличением скорости сварки вероятность образования пор в сварочной ванне вблизи линии сплавления уменьшается, если концентрация растворенного газа в сварочной ванне $C_L(0)$ находится в пределах $S_S < C_L(0) \leq S_L$.

Если скорости кристаллизации и роста пузырька имеют близкие значения, то образуются поры вытянутой формы. Поступление газа в такие поры может происходить не только со стороны жидкого металла, но и со стороны закристаллизовавшегося, поскольку при снижении температуры в твердом металле образуется пересыщенный раствор газа и в соответствии с законами термодинамики создаются условия для перехода газа из раствора в поры.

При переходе фронта кристаллизации от плоского к ячеисто-дендритному изменяется структура диффузионного пограничного слоя. При температуре выше температуры ликвидуса пересыщение водородом жидкого металла не происходит.

При концентрации водорода $C_L(0)$ в сварочной ванне в пределах $S_S < C_L(0) \leq S_L$ зарождение пузырька газа впереди фронта кристаллизации (точнее, впереди растущих ячеек) маловероятно. При ячеистом и дендритном фронте кристаллизации возникновение зародышей пузырьков газа, способных к дальнейшему росту, возможно лишь в пересыщенных объемах межкристаллитной жидкости.

Расчеты свидетельствовали о том, что при скоростях охлаждения, характерных для дуговой сварки, критический радиус пузырька зародыша оказывается больше поперечных размеров жидкой фазы (табл. 1). Поэтому рост пузырьков газа в межкристаллитных объемах жидкости невозможен, и весь газ из сварочной ванны переходит в закристаллизовавшийся металл, образуя пересыщенный твердый раствор. Вычислительный эксперимент позволяет понять физическую природу процесса пересыщения металла шва водородом, который



ранее наблюдался в экспериментах [11].

Случай 2. Концентрация растворенного газа превосходит предел его растворимости в жидком металле — $C_L(0) > S_L$. Скорость роста пузырьков газа вблизи линии сплавления при плоском фронте кристаллизации значительно выше скорости кристаллизации. Этому способствует более высокая по сравнению с остальным объемом жидкого металла степень пересыщения жидкого металла перед фронтом кристаллизации. Например, для пузырьков, растущих непосредственно у линии сплавления, относительная степень пересыщения водорода на фронте кристаллизации составляет 2,2, а скорость роста пузырька превышает 12 см/с (рис. 15, а).

В этом случае возможно также зарождение и рост пузырьков газа в объеме сварочной ванны.

При небольшом пересыщении газа в сварочной ванне могут возникнуть условия для образования пор при ячеистом и дендритном характере кристаллизации. Это возможно в случае, если скорость кристаллизации больше скорости роста пузырьков газа (рис. 15, б). С увеличением скорости сварки вероятность образования пор по оси шва увеличивается. И наоборот, увеличение степени пересыщения приводит к ускорению роста пузырьков, т. е. способствует уменьшению вероятности появления пористости.

Представления о механизме образования пор, сформулированные на основе физической модели и вычислительных экспериментов, были проверены экспериментально при сварке двумя типами самозащитных порошковых проволок. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными (табл. 2). Как видно из таблицы, образование пор определяется двумя факторами — содержанием газов в сварочной ванне и скоростью ее кристаллизации.

Выводы

1. Моделирование сложных процессов, протекающих при сварке металлов, должно основываться на фундаментальных знаниях из области термодинамики, кинетики металлургических процессов, физики металлов и др.

2. Моделирование особенно целесообразно для изучения процессов, непосредственное экспериментальное исследование которых физико-химическими методами в настоящее время затруднено. Однако наилучшие результаты дает моделирование

именно в сочетании с экспериментальными исследованиями.

3. Использование современной вычислительной техники позволяет создавать динамические трехмерные модели и с их помощью углублять знания о процессах сварки.

1. *Походня И. К.* Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
2. *Pokhodnya I. K.* Hydrogen behavior in welded joints // Proc. of the joint seminar «Hydrogen management in steel weldments» / Ed. I. L. Davidson, D. L. Olson. — Australia: DSTO and WTIA, 1997. — P. 145–181.
3. *Makhnenko V. I.* Computer modeling of welding processes // Advanced material science: 21st century / Ed. I. K. Pokhodnya. — Cambridge: Cambridge Intern. Science publ., 2000. — P. 79–96.
4. *Фрумин И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
5. *Лаконский В. И.* Растворимость водорода в жидком железе до температуры кипения // Докл. АН СССР. — 1962. — **147**, № 3. — С. 628–629.
6. *Походня И. К., Цыбулько И. И., Орлов Л. Н.* Влияние состава шлака на содержание водорода в жидком металле при сварке в CO_2 // Автомат. сварка. — 1993. — № 11. — С. 3–5.
7. *Technology and metallurgy methods for decreasing diffusible hydrogen* / I. K. Pokhodnya, A. P. Paltsevich, V. V. Golovko, A. S. Kotelchouk. — S. l., [1998]. — 14 p. — (Intern. Inst. of Welding.; Doc. II-1335–98).
8. *Оценка термодинамической вероятности образования тетрафторидов титана и кремния в шлаках электродов с основным покрытием* / В. Н. Горпенюк, Л. А. Тараборкин, В. Д. Макаренко, В. Н. Товмаченко // Тез. докл. Всесоюз. конф. по свароч. материалам, г. Череповец, 10–14 окт. 1983 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 11–12.
9. *Походня И. К., Швачко В. И., Уткин С. В.* Расчетная оценка поведения водорода в дуговом разряде // Автомат. сварка. — 1998. — № 9. — С. 4–11.
10. *Походня И. К., Демченко В. Ф., Демченко Л. И.* Математическое моделирование поведения газов в сварных швах. — Киев: Наук. думка, 1979. — 54 с.
11. *Влияние режима сварки и температуры прокали электрода с рутиловым покрытием на пористость швов* / И. К. Походня, А. П. Пальцевич, И. Р. Явдошин, О. Г. Касаткин // Автомат. сварка. — 1975. — № 8. — С. 34–38.
12. *Кинетика диффузионного перераспределения водорода между металлом шва и основным металлом при дуговой сварке* / И. К. Походня, Л. И. Демченко, А. П. Пальцевич, В. Г. Устинов // Там же. — 1976. — № 8. — С. 1–5.
13. *Шлепаков В. Н., Суррун С. А., Котельчук А. С.* Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информ. материалы: СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие науч. основ и разраб. новых технол. процессов сварки, наплавки и терм. резки различных материалов и сплавов для получения свар. конструкций и создания эффективных свароч. материалов и оборудования». — Киев: Наук. думка, 1986. — Вып. 1. — С. 19–28.
14. *Котельчук А. С.* Кинетика термодеструкции порошковых материалов и их смесей // Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже XXI века: Сб. докл. II Междунар. конф. по свароч. материалам стран СНГ, г. Орел, 4–8 июня 2001 г. — Орел, 2001. — С. 68–72.

Results of thermodynamic investigations of interaction of molten metal with a gas, containing hydrogen, oxygen and compounds of fluorine, and also with a slag phase. Taking into account the non-stationary conditions and variable rate of crystallization the laws of redistribution of hydrogen in a crystallizing weld pool are established. The formulated mathematical models are based on a differential equation of mass transfer, in particular the Fick's equation with boundary conditions of Stefan type on the moving phase interface. Kinetics of hydrogen redistribution near the fusion line, and also in molten metal at cellular crystallization was studied. The process of growth of a gas bubble in weld pool is described.

Поступила в редакцию 17.07.2002



СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С ТРАНЗИСТОРНЫМ ИНВЕРТОРОМ

Академик НАН Украины **В. К. ЛЕБЕДЕВ**, **А. А. ПИСЬМЕННЫЙ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассматриваются и сравниваются по своим энергетическим показателям различные системы питания машин для контактной сварки: однофазные промышленной частоты и трехфазные с преобразователями частоты и числа фаз (с инверторами на тиристорах и на биполярных транзисторах). Показано, что система с инверторным преобразователем на силовых транзисторах имеет по сравнению с системой с тиристорным преобразователем преимущество в отношении распределения токов по фазам сети как потребитель электрической энергии. Высокий коэффициент мощности, близкие массогабаритные показатели трансформатора для пониженной частоты к трансформатору промышленной частоты и отсутствие мощных выпрямительных диодов во вторичной цепи говорят о перспективности транзисторного инвертора с настройкой частоты на 30 Гц.

Ключевые слова: контактная сварка, симметричная система питания, транзисторный инвертор, коэффициент мощности

С развитием силовой преобразовательной техники появилась возможность создания новых типов систем питания мощных машин для контактной сварки. Используемые в настоящее время машины с системой питания, состоящей из трехфазного выпрямителя, инвертора повышенной частоты, трансформатора с выпрямителем во вторичной цепи, имеют низкий КПД. Потери энергии в вентилях близки, а в некоторых случаях и больше энергии, затрачиваемой на образование сварного соединения. Единственный путь повышения КПД — отказ от выпрямителей во вторичной цепи машины, т. е. переход на переменный ток. Такие машины производили много лет назад и работали они при частоте порядка 5 Гц. Столь низкая частота была выбрана с целью снижения сопротивления машины, а следовательно, и ее мощности, но при этом многократно возрастала масса трансформатора [1]. Машины с такими трансформаторами нашли ограниченное применение и теперь не используются. Можно было бы повысить частоту, но при этом нагрузка фаз сети становится тем более неравномерной, чем ближе преобразованная частота к частоте питающей сети. Повышение частоты ведет к необходимости увеличения мощности.

В работе [2] описана новая система питания, близкая к упомянутой выше, но отличающаяся тем, что равномерная нагрузка фаз достигается только в течение трех полупериодов преобразованной (низкой) частоты. Систему нельзя считать

симметричной в полном смысле этого термина. Мгновенная мощность не остается постоянной в любой момент (главный признак истинно симметричной системы), но токи в фазах выравниваются в небольшом интервале времени и с этой точки зрения система является симметричной. Система, рассмотренная в работе [2], не идеальна, но во многом превосходит применяемые ныне. Ниже рассматривается аналогичная система, но с транзисторным инвертором (рис. 1). Транзисторы инверторного ключа позволяют производить коммутацию в любой момент времени. В данном случае коммутация производится через время, кратное $1/3$ полупериода питающей сети. В зависимости от числа «макушек синусоид» представленная система может быть настроена на частоты

$$f = \frac{3}{0,02n}.$$

Рассмотрим систему, настроенную на частоту 30 Гц ($n = 5$). Графики напряжения и токов показаны на рис. 2. Сравним основные показатели этой системы питания с распространенной одно- и трехфазной, оснащенной тиристорным инвертором [2]. Схему замещения машины (включая трансформатор, вторичный контур и сварочный контакт) представим в виде последовательно соединенных активного сопротивления r и реактивного (индуктивного) X . В этом случае

$$i = C \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{U}{r},$$

где i — ток; $U = 1,35U_1$ — действующее значение напряжения на входе преобразователя;

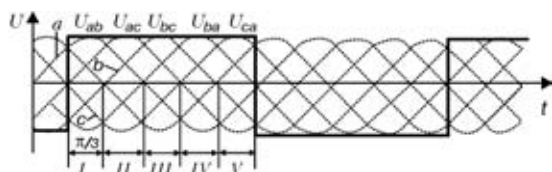


Рис. 1. Система питания машины для контактной сварки с транзисторным инвертором (описание участков I... V см. в тексте)

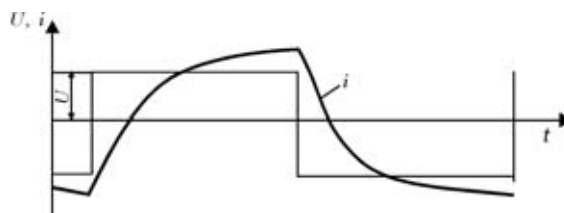


Рис. 2. Графики напряжения и тока на выходе преобразователя

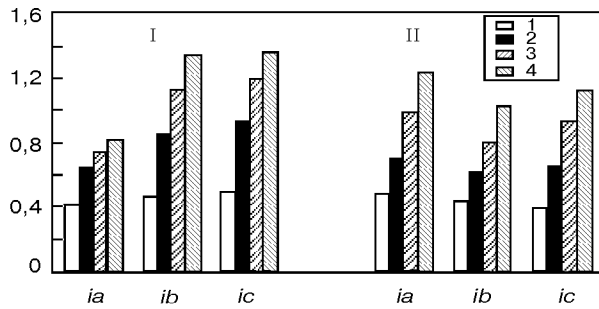


Рис. 3. Сравнение фазных токов тиристорной (I) и транзисторной (II) систем: 1 – $\text{tg } \varphi = 0,5$; 2 – $\text{tg } \varphi = 1$; 3 – $\text{tg } \varphi = 1,5$; 4 – $\text{tg } \varphi = 2$

$\tau = X/\omega r = \text{tg } \varphi/\omega$ – постоянная времени; φ – фазовый сдвиг кривой тока относительно кривой напряжения; t – время; U_1 – действующее значение линейного напряжения; $C = -2\frac{U}{r}\left(1 + \exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right)\right)$ – свободная составляющая тока; $\omega = 2\pi f = 314 \text{ c}^{-1}$ – угловая частота; $t_p = T/2$ – половина периода преобразованной частоты.

Мощные контактные машины для сварки габаритных деталей с большими толщинами обладают значительным индуктивным сопротивлением X , намного превосходящим активное сопротивление r . Поэтому принимаем в качестве базовых величин U , X , а также перейдем от абсолютного времени ко времени, вычисляемому по углу напряжения частоты сети. При этом принимаем, что в рассматриваемом полупериоде преобразованной частоты (30 Гц) ток протекает следующим образом (рис. 1): по фазе a – I, II, IV и V участки, каждый продолжительностью по $\pi/3$; по b – I, III и IV; по c – II, III и V. Обозначим выраженные в относительных единицах действующие значения токов, приведенных к первичной стороне: сварочный – ie и фазные – ia , ib , ic . Интегрирование проведем в пределах одного полупериода низкой частоты ($0 \dots 5\pi/3$). Результаты расчетов сведены в таблицу и показаны на рис. 3.

Как видно из таблицы, фазные токи имеют разные значения, но в течение 1,5 периода значение их усредняется и становится равным

$$ij = \sqrt{[(ia^2 + ib^2 + ic^2)/3]}.$$

На рис. 3 для сравнения показаны те же значения фазных токов для одного полупериода низкой частоты, взятые из работы [2]. Как следует из сопоставленных диаграмм, преимущества транзисторного преобразователя в отношении распределения токов по фазам несомненны. Определим коэффициент мощности трехфазного преобразова-

Относительные значения сварочного и фазных токов в зависимости от $\text{tg } \varphi$

$\text{tg } \varphi$	ia	ib	ic	ie	ij
0,5	0,45	0,409	0,36	0,45	0,367
1,0	0,69	0,601	0,636	0,788	0,644
1,5	0,95	0,799	0,895	1,018	0,831
2,0	1,25	1,045	1,171	1,165	0,951

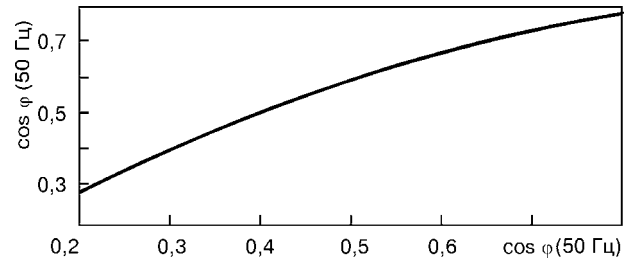


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности трехфазной системы преобразования энергии от коэффициента мощности сварочной цепи при промышленной частоте

теля и сравним его с коэффициентом мощности системы с однофазным питанием. Коэффициент мощности

$$K = \frac{P}{S} = 0,955 \frac{ie}{\text{tg } \varphi}, \quad P = \left(\frac{U}{X}\right)^2 ie^2 r, \quad S = 3U_{cp} \frac{U}{X} ij,$$

где P , S – соответственно активная и кажущаяся мощность; $U_{cp} = \frac{U}{1,73 \cdot 1,35}$.

Зависимость коэффициента мощности преобразователя с трехфазным питанием от коэффициента мощности системы с однофазным питанием (рис. 4) подтверждает преимущества системы с инвертором по сравнению с простейшей однофазной при неизменной нагрузке для обеих систем. Транзисторный инвертор имеет несколько более высокий коэффициент мощности, чем тиристорный. Отношение фазного тока трехфазной сети, питающей через выпрямитель транзисторный инвертор, к преобразованному току такое же, как при использовании обычного мостового выпрямителя и равно 0,816 вне зависимости от коэффициента мощности.

Снижение частоты при заданном значении сварочного тока ведет к увеличению числа потокоцеплений в трансформаторе. При частоте 50 Гц

$$U_{m1} \sin \omega t = \frac{d\Psi_{(1)}}{dt},$$

откуда

$$\Psi_{(1)} = \frac{\sqrt{2} U_{(1)}}{\omega},$$

где U_{m1} – амплитудное значение напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора; $U_{(1)}$ – действующее значение первичного напряжения; $\Psi_{(1)}$ – потокоцепление в трансформаторе промышленной частоты.

В трехфазной системе с инвертором

$$\psi = \int U dt = Ut + C.$$

При $t = 0$

$$\psi = Ut - \Psi_{(3)} = -\Psi_{(3)},$$

где $\Psi_{(3)}$ – потокоцепление в трансформаторе, рассчитанном на частоту 30 Гц.

За полупериод низкой частоты $T/2$

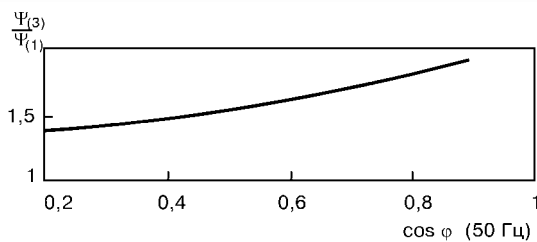


Рис. 5. Зависимость отношения максимального числа потокосцеплений в трансформаторе при частоте 30 Гц к максимальному числу потокосцеплений трансформатора на 50 Гц от коэффициента мощности сварочной цепи при частоте 50 Гц

$$\Psi_{(30)} = U \frac{T}{2} - \Psi_{(30)}$$

откуда

$$\Psi_{(30)} = U \frac{T}{4} = \frac{U}{4f} = \frac{U}{120}$$

где $U = U_{(1)} 1,35/\sqrt{2}$.

Отношение потокосцеплений

$$\frac{\Psi_{(1)}}{\Psi_{(3)}} = \frac{120\sqrt{2} U_{(1)}}{314U}$$

Из условия равенства сварочных токов находим

$$\frac{U_{(1)}}{Z} = \frac{U}{X} ie,$$

где Z — полное сопротивление цепи нагрузки.

The paper analyzes and compares by energy indices different power supply systems for resistance spot welding machines: single-phase commercial frequency and three-phase converters of frequency and number of phases (with thyristor inverters and bipolar transistors). It is shown that the system with inverter converter, based on power transistors has an advantage, compared to thyristorised converter in terms of current distribution by the mains phases, as a power user. A high coefficient of power, weight-dimensional characteristics of the low-frequency transformer close to those of commercial frequency transformer and absence of powerful rectifier diodes in the secondary circuit point to good prospects for application of a transistor inverter with frequency adjustment for 30Hz.

Используя последнее соотношение, получаем выражение для отношения потокосцеплений

$$\frac{\Psi_{(1)}}{\Psi_{(3)}} = 1,77 \frac{\sin \phi}{ie}$$

При высоком коэффициенте мощности потокосцепление в трансформаторе, рассчитанном на пониженную частоту, больше, чем в трансформаторе промышленной частоты (рис. 5). При относительно низком коэффициенте мощности разность чисел потокосцеплений не столь велика. Поэтому размеры трансформатора пониженной частотой близки к размерам трансформатора промышленной частоты, если они рассчитаны на один и тот же сварочный ток и включены на нагрузку с относительно низким коэффициентом мощности.

Рассмотренная транзисторная система имеет преимущества перед тиристорной низкой частотой 30 Гц благодаря более высокому качеству распределения энергии между фазами сети.

Приведенные данные свидетельствуют о перспективности системы преобразования электрической энергии с инвертором на транзисторах, настроенном на частоту 30 Гц, в машинах средней и большой мощности для контактной сварки.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
2. Lebedev V. K., Pismenni A. A. Improvements to the power supply systems of flash-butt welding machines // Welding and related technologies for the 21st century. — Harwood: Acad. publ., 1998. — P. 157–165.

Поступила в редакцию 11.07.2002



Международная выставка-ярмарка
Сварка. Родственные технологии—2003
 20.05–23.05.2003
 «Международный выставочный центр»
 Броварской просп., 15, Киев, Украина

Міжнародна виставка-ярмарок
 «Зварювання. Споріднені технології—2003»
 Київ, 20.05–23.05.2003

International Fair
 «Welding. Related Processes—2003»
 Kyiv, 20.05–23.05.2003

Международная выставка-ярмарка
 «Сварка. Родственные технологии—2003»
 20.05–23.05.2003 г.

Организаторы выставки-ярмарки:



Научно-технический комплекс
 «ИЭС им. Е. О. Патона»



Общество сварщиков Украины



Экспоцентр «Наука»

При поддержке:

Национальной академии наук Украины,
 Министерства промышленной политики,
 Киевской государственной городской
 администрации,
 ЗАО «Международный
 выставочный центр»



При содействии

Программы развития ООН

Ukraine

Дополнительную информацию Вы можете получить в НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»:

Тел: (38-044) 268-1254, 227-1238, 268-3523 Тел./факс: (38-044) 227-6502, 495-2616 expo@paton-expo.kiev.ua www.paton-expo.kiev.ua



КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Т. В. КОРОЛЕВА**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. Г. ЛАВРИНЕЦ, инж. (НПФ «Корба», г. Киев)

Представлена структура компьютерной системы, разработанной авторами для рационального выбора сварочных материалов применительно к электродуговой сварке конструкционных сталей. В основу системы положено математическое моделирование физико-металлургических явлений при дуговой сварке с использованием данных фирм-изготовителей сварочных материалов относительно химического состава наплавляемого металла, режимов и условий сварки, а также коэффициентов наплавки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, зона термического влияния, химический состав, микроструктура, механические свойства, сварочные материалы, компьютерное моделирование

Введение. Традиционно выбор рационального варианта сварочных материалов для дуговой сварки современных конструкционных сталей связан с достаточно большим количеством экспериментов, в ходе которых получают сравнительные результаты по целому ряду параметров: условиям формирования и химическому составу металла шва или зоне проплавления (ЗП), микроструктуре ЗП и зоны термического влияния (ЗТВ), склонности к образованию горячих и холодных трещин, стандартным механическим характеристикам (твердости, пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению или сужению, ударной вязкости) в различных участках сварного соединения, а также специальным функциональным свойствам (длительной прочности при соответствующих температурах, коррозионной стойкости и т. д.). Все это требует для конкретного основного материала проведения соответствующих испытаний каждого альтернативного варианта сварочных материалов и режимов сварки. Учитывая существующий большой ассортимент сварочных электродов, сплошных и порошковых проволок, флюсов, защитных газов для дуговой сварки конструкционных сталей, обоснованный выбор рационального варианта чисто экспериментальным путем требует либо большого опыта, либо многочисленных экспериментов.

Назначение системы и получаемая информация. Разработанная авторами статьи компьютерная система предназначена в значительной степени сократить указанный выше объем экспериментов путем использования средств математического моделирования и соответствующего информационного обеспечения с целью получения технической информации, необходимой для обоснованного выбора сварочных материалов, режима и условий дуговой сварки. В качестве исходной информации в системе

используются паспортные данные фирмы-изготовителя сварочных материалов относительно вариантов сварочных материалов, рекомендуемых для дуговой сварки данного типа конструкционной стали; режимов дуговой сварки; коэффициентов наплавки; химического состава наплавляемого металла. Эти данные вводятся в систему пользователем одновременно с указанием типа свариваемой конструкционной стали (основного материала) и ее химического состава. В обмен система выдает пользователю для каждого альтернативного варианта следующую информацию:

- размер и форму ЗП для корневого шва и последующих проходов (условия формирования сварного шва, риск прожога и пр.);
- химический состав металла ЗП;
- микроструктурный состав металла ЗП и ЗТВ;
- механические свойства (твердость, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость (KCV) при температурах $-30...-70$ °С в ЗП и ЗТВ);
- риск образования горячих и холодных трещин.

Краткое описание системы. Работа с системой начинается с ввода данных об основном материале, для которого выбираются сварочные материалы для дуговой сварки. Система предлагает пользователю 12 групп конструкционных сталей, к одной из которых необходимо причислить свой основной материал (рис. 1). По желанию пользователь может ознакомиться более подробно с характеристиками сталей конкретной группы (рис. 2), примерами химического состава, теплофизическими свойствами и особенностями дуговой сварки. Если пользователя удовлетворяет выбранная группа, то он должен заполнить данные относительно химического состава используемой стали (рис. 2).

Следующий этап работы связан с конкретизацией данных относительно вида сварного соединения. Система предлагает пользователю несколько видов сварных соединений со стыковыми швами, а также тавровое соединение с угловым швом (рис. 3). Возможна одно- и многопроходная (сло-

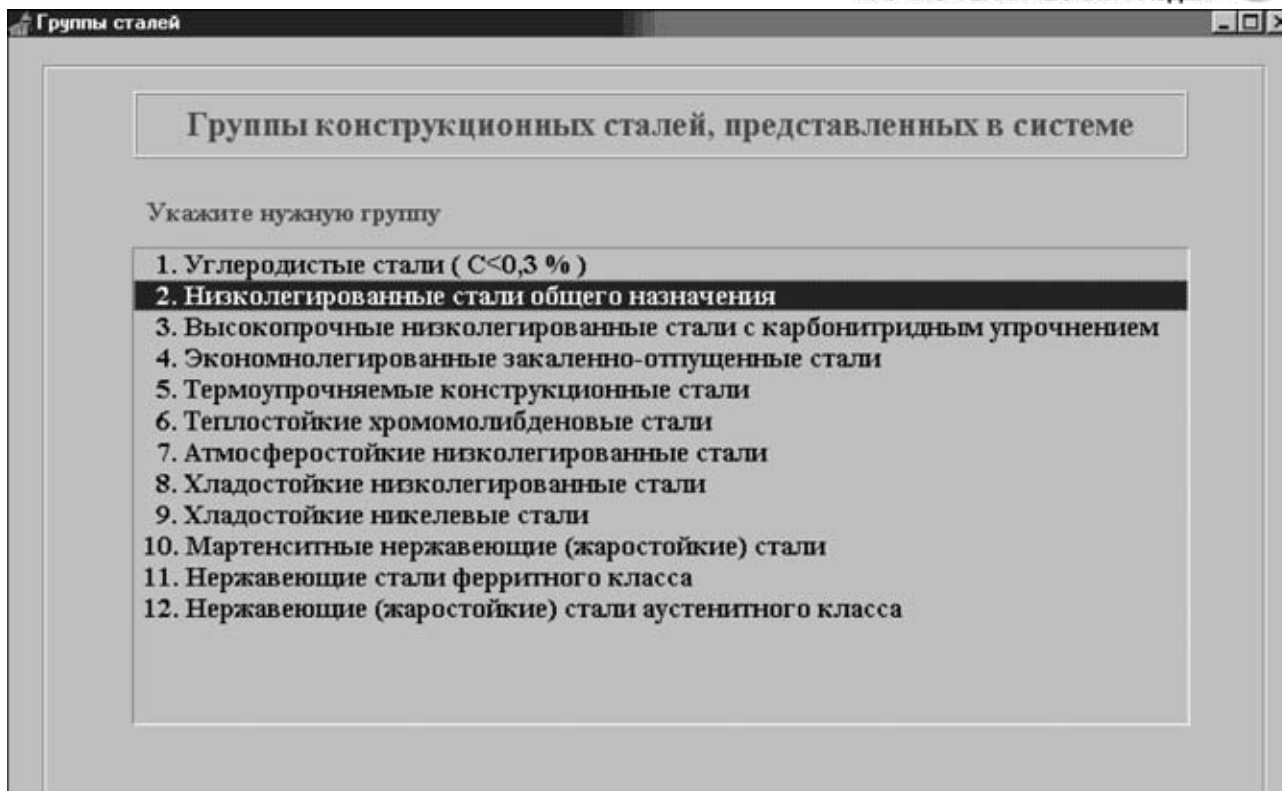


Рис. 1. Список групп конструкционных сталей, предлагаемых пользователю системой

ями либо «ниточными» швами) сварка. Количество проходов и раскладку валиков «ниточных» швов система выполняет самостоятельно. Возможен вариант только одного корневого шва. Во всех вариантах стыковых соединений (рис. 3) для кор-

невого шва при сварке на весу решается вопрос относительно риска прожога на основе оценки равновесия между силами, действующими на объем жидкого металла (поверхностное натяжение, давление дуги, гравитация).

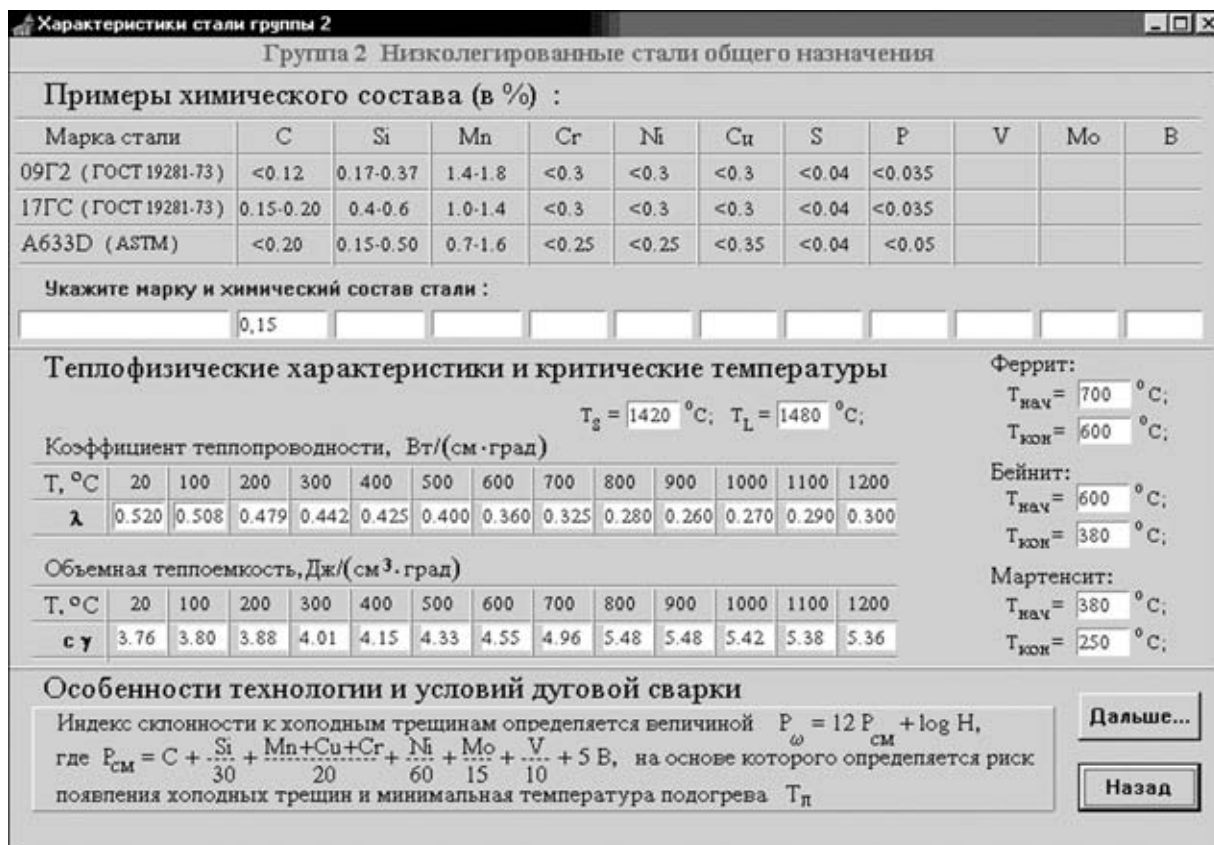


Рис. 2. Пример заполнения данных при выборе конкретной группы стали



Рис. 3. Виды сварных соединений, предлагаемых пользователю

Пользователь должен указать способ дуговой сварки (рис. 4), а также выбрать конкретные варианты сварочных материалов, заполнив соответствующие данные (тип указан на рис. 5) химического состава чисто наплавляемого металла, режимов сварки, коэффициента наплавки (по пас-

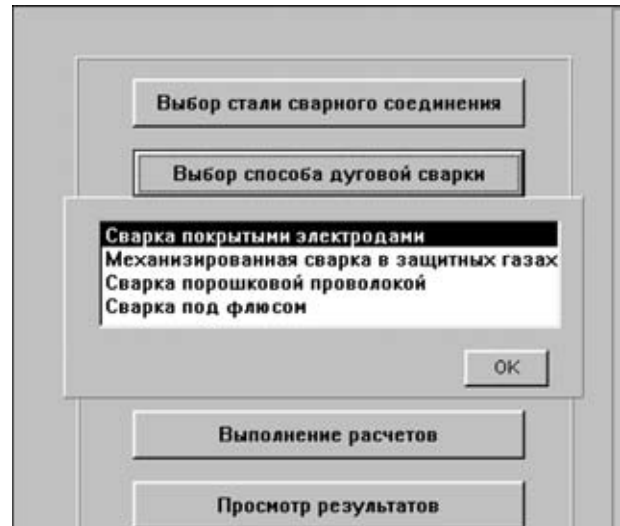


Рис. 4. Способы дуговой сварки, предлагаемые пользователю (портным данным фирмы-изготовителя, либо на основе имеющегося опыта).

С использованием введенных данных в системе выполняется комплекс операций, связанных с выбором скорости сварки на основе имеющихся ограничений относительно толщин отдельных слоев (либо поперечных сечений «ниточных» швов), затем рассчитываются температурные поля в поперечном сечении сварного шва для каждого прохода, начиная с корневого шва. Определяется поле максимальных температур, на основе которого оцениваются объемы, принадлежащие ЗП и ЗТВ. При этом используются исходные данные для основного материала относительно температур плавления $T_{пл}$ и $A_{с3}$ (см. рис. 2), а также соответствующие теплотехнические свойства.

Сварка покрытыми электродами

Марка сварочной проволоки Диаметр проволоки мм

	Корневой шов	Заполняющие слои	Декоративный слой
Режим сварки	$I_{св} = 90$ А; $U_{св} = 24$ В; $v_{св} = 0.3$ см/с;	$I_{св} = 180$ А; $U_{св} = 25$ В; $v_{св} = 0.4$ см/с;	$I_{св} = 145$ А; $U_{св} = 25$ В; $v_{св} = 0.11$ см/с;
Коэффициент наплавки	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)

Химический состав наплавляемого материала :

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	P	S
<input type="text" value="0.13"/>	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="text" value="1.25"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="0.027"/>	<input type="text" value="0.0175"/>
Co	N	V	Nb	W	Ti	Al	B	Fe
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

$T_g = 1420$ °C;
 $T_L = 1480$ °C;

OK

Рис. 5. Пример заполнения данных по режиму сварки и химическому составу наплавляемого материала

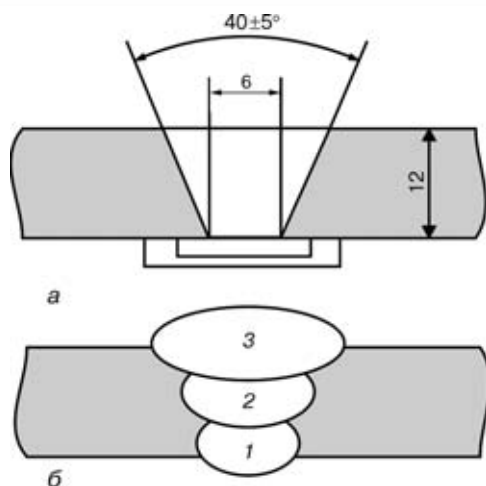


Рис. 6. Схема разделки (а) и заполнения слоев (б)

Для каждого прохода определяется средний химический состав металла ЗП на основе знания размеров и химического состава расплавляемых участков, а также количества и состава наплавляемого присадочного материала.

По химическому составу ЗП определяется принадлежность металла этой зоны к соответствующей группировке конструкционных сталей с позиций оценки микроструктурного состояния после охлаждения.

В системе имеются две группировки сталей (см. на рис. 1). К первой относятся конструкционные углеродистые и низколегированные стали (группы 1–8), микроструктура которых определяется на основе соответствующих диаграмм аннотермического распада аустенита. Вторая группировка конструкционных сталей охватывает легированные стали (группы 9–12), микроструктура которых определяется диаграммой Шеффлера (либо ее модификациями [1]). Для удобства в системе используются параметрические уравнения [2], позволяющие выполнять расчеты ожидаемой микроструктуры в каждой точке ЗП и ЗТВ на основе знания химического состава и параметров термического цикла. Принимается, что повторный нагрев выше A_{c3} способствует образованию новой микроструктуры на основе нового химического состава и новых параметров термического цикла. Повторный нагрев ниже A_{c3} не меняет микроструктуру, но способствует изменению механических свойств по механизму кратковременного отпуска.

Важным этапом работы системы является расчет механических свойств в различных точках ЗП и

ЗТВ. Он выполняется на основе знания микроструктур и химического состава. Для всех характеристик механических свойств $X = \{HV, \sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta_5, \psi\}$ используется представление

$$X = \sum_i x_i V_i \quad (i = a, f, p, b, m), \quad (1)$$

где a — аустенит; f — феррит; p — перлит; b — бейнит; m — мартенсит; V_i — массовая доля i -й микроструктуры в данной точке. Для x_i используются уравнения регрессии, связывающие эти величины с химическим составом сталей данной группы [2]. Для ударной вязкости по Шарпи (KCV) усредненное представление (1) не отражает особенности поведения материала для таких испытаний. Для этих целей в системе используются уравнения регрессии, связывающие KCV с химическим составом, $\Delta t_{8/5}$ и температурой испытания $T_{ис}$. Естественно, что коэффициенты регрессии такой зависимости могут достаточно существенно зависеть от группы конструкционной стали.

Важным элементом работы системы является оценка риска нарушения целостности металла ЗП либо ЗТВ за счет горячих и холодных трещин. Для высоколегированных сталей второй группировки наиболее реально говорить о риске образования горячих трещин. Склонность металла ЗП к горячим трещинам здесь оценивается по отношению $Cr^{экр} / Ni^{экр}$, где $Cr^{экр}$ — эквивалент хрома; $Ni^{экр}$ — эквивалент никеля, определяемые по химическому составу ЗП [1]. Склонность к холодным трещинам и рекомендуемые минимальные температуры подогрева для сталей групп 1–4, 7, 8 определяются индексом

$$P\omega = 12P_{см} + \log N \quad (2)$$

и степенью закрепления свариваемого узла, где $P_{см}$ — эквивалент углерода по [1]; N — содержание диффузионного водорода в ЗТВ. Для сталей групп 5, 6 минимальная температура подогрева указывается индивидуально.

Примеры применения. Рассмотрим два варианта сварки одностороннего стыкового соединения листов из судостроительной стали ДН32 (0,18С–1,3Мn–0,4Si–0,3Ni–0,01Al) толщиной 12 мм в нижнем положении на керамической подкладке (рис. 6, а); $P_{см} = 0,2633$. Предварительный подогрев не требуется при содержании диффузионного водорода менее $3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ при жестком закреплении и $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ в случае сварки в свободных условиях.

Таблица 1. Исходные данные для двух вариантов сварки соединения, изображенного на рис. 6, б

№ варианта	Марка проволоки и химический состав наплавляемого металла	Режим сварки											
		1-й проход			2-й проход			3-й проход			4-й проход		
		$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$
1	OK-Tubrod 15.14 0,05C–0,5Si–1,3Mn	170	21	0,25	205	24,5	0,20	205	24,5	0,32	—	—	—
2	JS-10 0,09C–0,5Si–1,5Mn	160	21	0,30	220	25	0,25	220	25	0,25	255	31	0,42

Примечание. Коэффициент наплавки $\alpha_n = 16 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч})$.



Таблица 2. Результаты расчета параметров формирования ЗП для вариантов № 1 и 2 из табл. 1

№ варианта	№ прохода	$q_{п}$, Дж/см	F , мм	Химический состав, %
1	1	9996	60	0,08C-1,3Mn-0,477Si-0,068Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,162$
	2	17787	80	0,059C-1,3Mn-0,493Si-0,021Ni-0,002Al; $P_{см} = 0,140$
	3	10865	64	0,05C-1,3Mn-0,50Si-0,0Ni-0,001Al; $P_{см} = 0,132$
	4	—	—	—
2	1	7910	47	0,013C-1,448Mn-0,77Si-0,077Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,22$
	2	15400	75	0,111C-1,453Mn-0,784Si-0,07Ni-0,002Al; $P_{см} = 0,200$
	3	15400	79	0,113C-1,45Mn-0,77Si-0,076Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,212$
	4	13247	59	0,102C-1,52Mn-0,87Si-0,03Ni-0,001Al; $P_{см} = 0,207$

Таблица 3. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных

Величина, участок соединения	Вариант № 1	Вариант № 2
HV, ЗП	200...220	195...208
	170...200	180...220
HV, ЗТВ	198...230	196...220
	200...240	220...240
KCV ₋₂₀ МДж/м ² , ЗП	1,2...2,3	1,4...2,9
	1,5...2,6	1,2...2,0
KCV ₋₂₀ МДж/м ² , ЗТВ	—	—
	1,2...1,5	1,0...1,4

Примечание. В числителе приведены экспериментальные данные, в знаменателе — расчетные.

Первый вариант — дуговая механизированная сварка в CO₂ проволокой диаметром 1,2 мм ОК-Tubrod 15.14 фирмы ESAB. Второй вариант — сварка проволокой диаметром 1,2 мм JS-10 (Италия) в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂.

Паспортные данные относительно рекомендуемых режимов сварки и химического состава наплавляемого металла (без участия основного) приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены результаты расчета параметров формирования ЗП (погонная энергия $q_{п}$, площадь сечения F , химический состав), а на рис. 7–9 (см. вклейку между с. 18–19) — расчетные значения микроструктур и механические свойства в ЗП и ЗТВ. Сравнение расчета и эксперимента дано в табл. 3.

Авторы располагали экспериментальными данными относительно твердости HV и вязкости разрушения KCV₋₂₀ металла ЗП и ЗТВ, полученными при стандартной процедуре сварки образцов данной стали, на режимах из табл. 1.

Из табл. 3 видно хорошее согласование расчета и экспериментов по твердости и ударной вязкости

Structure of a computer system developed by the authors for a rational selection of welding consumables for electric arc welding of structural steel is presented. The system was based on mathematical modeling of physical-metallurgical phenomena in arc welding using data of companies-manufacturers of welding consumables, including chemical composition of the metal deposited, welding conditions, and also coefficients of deposition.

для металла шва, т. е. ЗП. Для металла ЗТВ, имеющего ширину порядка 1 мм, экспериментальные данные по KCV достаточно чувствительны к позиционированию надреза. При аккуратно выполненном эксперименте они обычно ниже, чем для ЗП. Расчетные данные в табл. 3 не противоречат этому положению.

Сопоставив расчетные результаты для рассматриваемых двух вариантов, можно сделать следующие выводы. Вариант № 1 позволяет получить металл в ЗП с меньшим содержанием углерода и соответственно с более низким $P_{см} = 0,132...0,162$ (для варианта № 2 в ЗП $P_{см} = 0,201...0,212$, что однако ниже, чем в основном металле), что приводит к более низкому содержанию закалочных микроструктур в ЗП (для варианта № 1

на рис. 7, а-с микроструктура в ЗП следующая: $V_b = 0,40...0,65$, $V_m < 0,12$, остальное — ферритно-перлитная смесь; для варианта № 2 (рис. 7, d-f) $V_b = 0,4...0,45$, $V_m < 0,25$). Более высокое содержание бейнита приводит к более высоким прочностным характеристикам. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B для варианта № 1 (рис. 8, c, b) равны в ЗП: $\sigma_{0,2} = 380...440$ МПа, $\sigma_B = 540...720$ МПа, а для варианта № 2 (рис. 8, g, f): $\sigma_{0,2} = 420...500$ МПа, $\sigma_B = 620...720$ МПа.

Соответственно вариант № 1 имеет более высокие пластические свойства в ЗП: относительное удлинение $\delta = 18...26$ % и относительное сужение $\psi = 44...52$ % (рис. 8, a, d). Для варианта № 2 эти характеристики в ЗП следующие: $\delta = 16...22$ %, $\psi = 40...46$ % (рис. 8, e, h). Ударная вязкость KCV₋₂₀ в рассматриваемых вариантах в ЗП (рис. 9, b, e) выше в варианте № 1 (см. табл. 3).

Таким образом, с помощью расчетной системы получен достаточно представительный материал, на основе которого можно сделать обоснованное предпочтение варианту № 1 по требованиям пластичности и ударной вязкости, а варианту № 2 — по величинам $\sigma_{0,2}$ и σ_B .

Из изложенного и приведенных расчетных данных следует, что обоснованный выбор сварочных материалов для дуговой сварки конкретных конструкционных сталей можно проводить с помощью предлагаемой компьютерной системы, оставляя эксперименту получение данных для окончательного решения.

1. *Welding handbook*. English edition. Vol. 4: Materials and applications. Pt. 2. 8-th ed. — AWS, 1998. — 620 p.
2. *Касаткин О. Г.* Математическое моделирование зависимостей «состав — свойства» сварных соединений и создание расчетно-экспериментальной системы для оптимизации основных технологических факторов сварки низколегированных конструкционных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1990. — 32 с.

Поступила в редакцию 26.11.2002



СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВАРИВАЕМОСТЬ ЗАКАЛИВАЮЩЕЙСЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ 20ХН4ФА

В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, А. К. ЦАРЮК, В. Г. ВАСИЛЬЕВ, кандидаты техн. наук, **Г. Н. СТРИЖИУС**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано превращение аустенита в стали 20ХН4ФА (ГОСТ 4543-71) в условиях непрерывного охлаждения. При скорости охлаждения более 20 °С/с происходит закалка стали с образованием полностью мартенситной структуры, при меньших скоростях имеет место частичный бейнитный распад. Предварительный подогрев до температуры 250...300 °С приводит к резкому повышению стойкости против образования холодных трещин, что, по-видимому, связано с обеспечением достаточных условий для протекания γ-бейнитного превращения, которое сопровождается частичным самоотпуском и повышением пластичности металла зоны термического влияния сварного соединения. Рассмотрены также вопросы выбора температуры предварительного подогрева.

Ключевые слова: дуговая сварка, закаливающаяся сталь, структурные превращения, холодные трещины, метод Имплант, предварительный подогрев

Сталь 20ХН4ФА применяется для изготовления ответственных изделий, работающих в условиях повышенных нагрузений, в том числе при высоких (300...400 °С) температурах [1, 2]. Система легирования и содержание легирующих элементов влияют на склонность стали к образованию неравновесных упрочняющих (закалочных) структур при охлаждении от температур аустенитной области, что обуславливает возможность получения высоких показателей физико-механических свойств при соответствующих режимах термической обработки. Так, после закалки и низкотемпературного отпуска предел текучести стали может достигать 1200 МПа.

Согласно [1], сталь 20ХН4ФА находит применение только в виде готовой катаной, ковальной и обработанной механическим способом продукции, а не в виде сварных конструкций. Тем не менее, в отдельных случаях возникают вопросы о возможности использования сварки этой стали, например, для герметизации завальцованных горячей прокаткой соединений в корпусных изделиях, работающих при повышенных давлениях. Однако сведения о свариваемости этой стали в литературе практически отсутствуют.

При сварке высокопрочных закаливающих сталей основной является проблема образования холодных трещин. Холодные трещины чаще всего зарождаются и развиваются на участках перегрева металла зоны термического влияния (ЗТВ), имеющего структуру крупноигльчатого мартенсита, который образуется в процессе превращения аустенита. Считается, что возникновению такого вида дефектов в той или иной степени подвержены сварные соединения сталей с массовой долей более 0,15 % С и более 3,00 % легирующих элементов [3].

Влияние химического состава стали на склонность к образованию холодных трещин принято

оценивать с помощью расчетного критерия — эквивалента углерода $C_э$. Для его определения применяются различные выражения, в том числе с учетом размерного фактора (см., например, работы [3-5] и др.). С использованием зависимости, предложенной Международным институтом сварки (МИС) [3], рассчитан эквивалент углерода

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\text{мас. \%}). \quad (1)$$

Для стали 20ХН4ФА он составляет 0,64...0,89 при следующем содержании в ней легирующих и примесных элементов (по ГОСТ 4543-71), мас. %: С 0,17...0,24; Мп 0,25...0,55; Si 0,17...0,37; Cr 0,7...1,10; Ni 3,75...4,15; V 0,10...0,18; P ≤ 0,025; S ≤ 0,025; Cu ≤ 0,30. Согласно [3], сталь со значением $C_э$, превышающим 0,42...0,45, следует отнести к группе трудносвариваемых материалов, склонных к образованию холодных трещин.

Как известно, одним из основных технологических приемов, повышающим трещиностойкость сварных соединений закаливающих сталей, является предварительный и сопутствующий подогрев, с помощью которого можно воздействовать на факторы, способствующие зарождению холодных трещин — структурные изменения (определяют предрасположенность к хрупкому разрушению), содержание диффузионного водорода и уровень временных и остаточных напряжений. При этом на основании данных о кинетике превращения аустенита и особенностях фазообразования в условиях различных скоростей охлаждения можно сделать выбор теплового режима при сварке.

Целью настоящей работы являлось определение оптимальной температуры предварительного подогрева при сварке стали 20ХН4ФА, обеспечивающей стойкость сварных соединений против образования холодных трещин.

В качестве основного материала для изготовления образцов использовали сталь 20ХН4ФА промышленного производства в виде горячедеформированной.

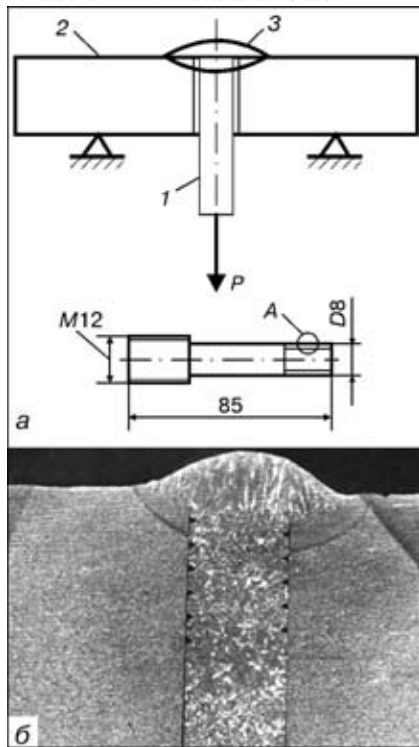


Рис. 1. Схема испытания по методу Имплант и вид образца (а): 1 – образец; 2 – пластина; 3 – шов; P – нагрузка, а также макрошлиф соединения (б)

рованной трубы толщиной стенки 9 мм. Образцы для испытаний вырезали вдоль продольной оси трубы. Особенности протекания фазовых превращений выявляли с помощью дилатометрических исследований [6], в основе которых лежит явление изменения объема материала в процессе полиморфного превращения. Определение критических точек A_{c1} и A_{c3} в условиях непрерывного охлаждения

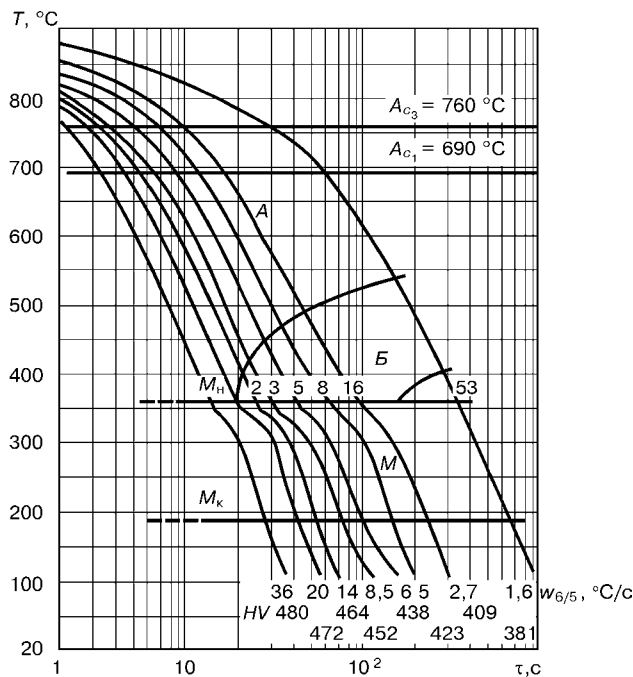


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма распада аустенита в стали 20ХН4ФА: А – аустенит; Б – бейнит; М – мартенсит; M_n и M_k – соответственно начало и конец мартенситного превращения

от 1300 °С проводили в камере, заполненной аргоном. Скорость естественного охлаждения регулировали с помощью образцов, имеющих различное поперечное сечение. Для определения температур, соответствующих точкам A_{c1} и A_{c3} , использовали дилатометр Шевенара с воссозданием печных условий при нагреве образцов со скоростью 150 °С/ч. Металлографические исследования проводили с использованием светового микроскопа «Неофот-32». Выявление микроструктуры на отполированных шлифах проводили путем химического травления в 2,5%-м спиртовом растворе азотной кислоты с добавлением пикриновой кислоты. Для оценки склонности к образованию холодных трещин был применен метод Имплант [7, 8] (называемый в отечественной литературе методом вставок) с использованием разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона специальной установки [9]. Испытания по этому методу проводили следующим образом. Цилиндрический образец (вставку) из стали 20ХН4ФА со спиральной V-образной нарезкой помещали в просверленное отверстие в пластине, установленной на опоры и нагретой до определенной температуры (рис. 1). Затем образец-вставку приваривали к пластине ручной дуговой сваркой покрытыми электродами и нагружали до заданных значений внутренних напряжений в образце путем приложения растягивающего усилия к его свободному концу. Образец прикрепляли к нагружаемому узлу с помощью резьбового соединения. Для изменения условий охлаждения применяли предварительный подогрев до 150, 200, 250 и 300 °С. Нагружение сварных соединений происходило после сварки через 3,0...5,0 мин, при этом температура в области сварного соединения уменьшалась приблизительно до уровня температуры предварительного подогрева. Температуру фиксировали с помощью приваренной к образцу хромель-алюмелевой термопары, подключенной к проградуированному для работы с этим типом термопар потенциометру КСП-4. В качестве опорной использовали пластину из стали 20 толщиной 20 мм. Пластина может быть изготовлена из любой стали. Она служит для отвода тепла из зоны сварки и нагрева образца при испытаниях с предварительным подогревом [7].

Нагружающие напряжения устанавливали в определенном отношении к пределу текучести исследуемой стали 20ХН4ФА, для чего определяли ее прочностные свойства по ГОСТ 6996–66: для гладких образцов $\sigma_B = 1018,7$ МПа, $\sigma_{0,2} = 775$ МПа, для образцов с кольцевым нарезом $\sigma_B = 1291,3$ МПа (профиль и размеры надреза такие же, как у образцов для испытаний по методу Имплант). В зависимости от условий испытания образец либо разрушался, либо выдерживал нагрузку без разрушения. На основании собственных экспериментальных данных и опыта других исследователей [8–10] установлено, что при указанном методе испытаний время до разрушения может составлять от нескольких минут до нескольких часов (не более 24 ч), поэтому выдержка под нагрузкой не разрушившихся образцов составляла



24 ч. В результате были определены максимальные (критические) напряжения, ниже которых разрушение не происходило в течение указанного периода испытаний. Для сварки использовали электроды ТМУ-21У диаметром 3 мм. Сварку выполняли на следующем режиме: сварочный ток — 120...130 А; напряжение на дуге — 24 В; скорость сварки — 7,8...9,5 м/ч. Концентрация диффузионного водорода в наплавленном металле (спиртовая проба) составляла 3,48 см³ на 100 г металла.

На рис. 2 представлена термокINETическая диаграмма распада аустенита, полученная в результате проведенных исследований. В ней отсутствует участок равновесного распада во всем диапазоне значений скорости охлаждения, а имеется только мартенситная и мартенситно-бейнитная области. Так, при скорости охлаждения в интервале температуры 600...500 °С $w_{6/5} > 20$ °С/с в стали 20ХН4ФА образуется мартенсит. При меньших значениях скорости охлаждения в структуре стали, помимо мартенсита, появляются продукты промежуточного превращения, количество которых возрастает по мере уменьшения скорости охлаждения (рис. 3).

Из результатов дилатометрических исследований следует, что в условиях замедленного охлаждения ($w_{6/5} < 20$ °С/с) при сварке стали 20ХН4ФА в участках ЗТВ вблизи линии сплавления наряду с образованием мартенсита будут происходить также аустенитные превращения по бейнитному механизму с характерным для этого процесса частичным самоотпуском продуктов превращения [11] и снижением уровня упрочнения металла, что должно положительно сказаться на стойкости сварных соединений против образования холодных трещин.

Данные о влиянии температуры предварительного подогрева $T_{п}$ и уровня растягивающих напряжений на трещиностойкость сварных соединений при испытании по методу Имплант представлены в табл. 1. Полученные результаты показали, что при $T_{п} > 200$ °С резко возрастает уровень растягивающих напряжений, при которых не происходит разрушения сварных соединений. Причем, как установлено при проведении экспериментов, в процессе нагружения в интервале температуры подогрева 250...300 °С свариваемый материал спо-

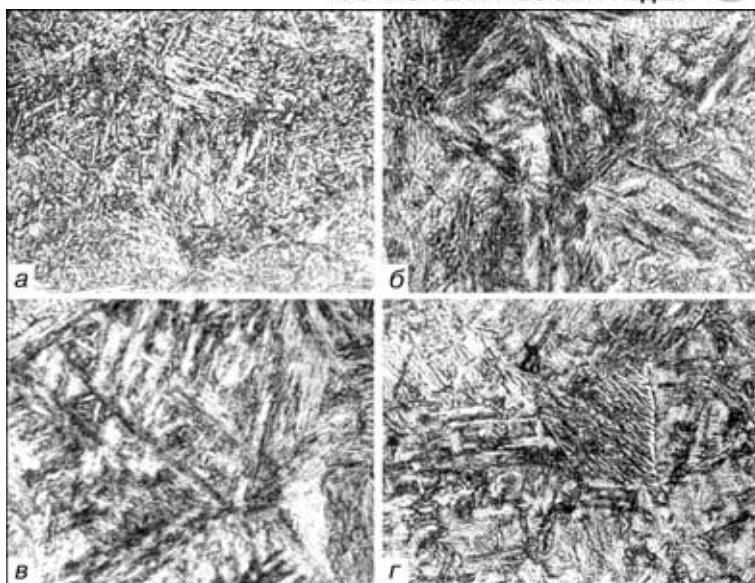


Рис. 3. Микроструктура (Х200) стали 20ХН4ФА в исходном состоянии (а) и после охлаждения в дилатометре с различной скоростью: б — $w_{6/5} = 20,0$; в — 8,5; г — 1,6 °С/с

собен претерпевать частичную пластическую деформацию, при этом в дальнейшем склонность к зарождению трещин и замедленному хрупкому разрушению не наблюдается.

Для количественной оценки влияния температуры предварительного подогрева на склонность к образованию холодных трещин удобно воспользоваться расчетным критерием I [8]:

$$I = \frac{NTS - LTS}{NTS}, \quad (2)$$

где NTS — прочность образца с надрезом; LTS — критическое напряжение, определяемое в процессе испытаний.

Увеличению стойкости против образования холодных трещин соответствует уменьшение значений коэффициента I . В свою очередь, его значения, близкие к единице, характеризуют высокую хрупкость и низкую трещиностойкость материала. Так, для критических условий испытаний с подогревом до 200, 250 и 300 °С значения I составляют соответственно 0,61, 0,28 и 0,24.

Как следует из результатов расчетов, при переходе от температуры 200 к 250 °С значения I резко снижаются, при этом стойкость против образования холодных трещин возрастает почти в 2,2 раза. При подогреве до 300 °С трещиностойкость по сравнению со сваркой с подогревом до 200 °С увеличивается более чем в 2,5 раза. Тем не менее, нельзя однозначно утверждать, что по-

Таблица 1. Результаты испытаний на трещиностойкость по методу Имплант

$T_{п}, °С$	Растягивающие напряжения при нагружении							
	$0,47\sigma_{0,2}$	$0,65\sigma_{0,2}$	$0,79\sigma_{0,2}$	$0,94\sigma_{0,2}$	$1,023\sigma_{0,2}$	$1,1\sigma_{0,2}$	$1,19\sigma_{0,2}$	$1,26\sigma_{0,2}$
150	О	Х	Х		Х			
200	О	О	Х					
250			О	О		О	О	Х
300								О

Примечание: Х — разрушение образца; О — разрушение отсутствует.



Таблица 2. Влияние теплового режима на скорость охлаждения металла ЗТВ при ручной дуговой сварке плавлением

№ опыта	$T_{п}, ^\circ\text{C}$	Условия выполнения сварки и наплавки	Удаление термопары от линии сплавления, мм	$w_{6/5}, ^\circ\text{C}/\text{с}$
1	100	Сварка однопроходная	1,5	12,3
2	150	»»	2,0	8,6
3	250	»»	3,0	6,7
4	230	Сварка с выполнением двух параллельных валиков	2,0	6,7
5	250	Наплавка участка размером около 20×60 мм за несколько проходов	2,0	3,3
6	300	Сварка однопроходная	4,0	5,5

догрев до температур на уровне 200 °С будет неэффективным, поскольку в общем случае на температурный режим сварного соединения, кроме температуры предварительного подогрева, оказывают влияние количество тепла, внесенного при сварке, которое определяется погонной энергией q/v , и условия теплоотвода. Вывод о зависимости трещиностойкости только от температуры предварительного подогрева будет не совсем точным, и, очевидно, правомерен только для случая сварки стали одной толщины и одним конкретным способом. Для более полной оценки температурного режима в ЗТВ следует использовать скорость охлаждения свариваемого металла — обобщенную характеристику, учитывающую совместное действие указанных факторов.

В табл. 2 представлены результаты определения скорости охлаждения металла ЗТВ при наплавке на пластину толщиной 20 мм валиков ручной дуговой сваркой с погонной энергией $q/v = 10000$ Дж/см. Расчет был проведен для средних значений сварочного тока $I_{св} = 125$ А и скорости сварки $v_{св} = 8,6$ м/ч по известной формуле из [12, 13] с КПД источника нагрева $\eta = 0,8$. Так, при подогреве до температур 250 и 300 °С, обеспечивающих максимальную трещиностойкость, скорость охлаждения металла на участке наиболее вероятного хрупкого разрушения составляет соответственно 6,7 и 5,5 °С/с. В таких условиях,

как следует из экспериментально построенной кривой, определяющей зависимость содержания бейнита от скорости охлаждения (рис. 4), в структуре металла образуется приблизительно от 4,5 до 6,0 % бейнитом составляющей.

Таким образом, критерием оптимального теплового режима при сварке стали 20ХН4ФА можно считать максимально допустимую скорость охлаждения металла ЗТВ, равную приблизительно 6,7 °С/с. При охлаждении со скоростью ниже указанной обеспечивается высокая сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин. Такая скорость может быть достигнута при различных

сочетаниях температур предварительного (сопутствующего) подогрева, погонной энергии сварки, толщины металла и конфигурации изделия. Следовательно, выбор температуры подогрева будет зависеть от конкретного случая сварки.

Как следует из литературных данных, взятых, например, из работ [13–18], при выборе температуры предварительного подогрева наиболее предпочтительным является низкотемпературный подогрев (в некоторых случаях до 180 °С). Это обосновывается возможным развитием явлений, вызывающих охрупчивание металла при повышении температуры предварительного подогрева до 350...400 °С. Выказано также мнение [16], что завышение температуры предварительного подогрева способствует развитию в металле ЗТВ более высоких остаточных напряжений. Кроме того, как свидетельствуют работы [15, 17], при сварке сталей, имеющих структурные превращение в промежуточной области, пониженный предварительный подогрев способствует более быстрому остыванию металла и распаду аустенита с образованием преимущественно нижнего бейнита, являющегося более прочным и более пластичным и вязким, чем верхний бейнит.

Для получения высокого комплекса физико-механических свойств сварных соединений закаляющихся сталей рекомендуется уровень температуры предварительного подогрева поддерживать как можно ближе к температуре наиболее полного распада аустенита [14]. В случае стали 20ХН4ФА температура конца мартенситного превращения составляет $M_k \approx 190$ °С.

Указанный принцип низкотемпературного подогрева, по-видимому, положен в основу расчетной методики определения температуры предварительного подогрева $T_{п}$, разработанной МИС [19] и усовершенствованной авторами работы [20] для более широкого диапазона значений параметра P_c :

$$T_{п} = 350\{1 - \exp[-5(P_c - 0,27)]\}, \quad (3)$$

где P_c — обобщенный показатель склонности к трещинообразованию, определяемый из соотношения $P_c = P_{см} + [H]_{диф}/60 + S/600$, он применим для расчетов по формуле (3) в диапазоне значений 0,27 до 0,50 (здесь $P_{см}$ — эквивалент углерода, равный $C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$; $[H]_{диф}$ — концентрация диффузионного водорода в металле шва, $\text{см}^3/100$ г; S — толщина стали, мм).

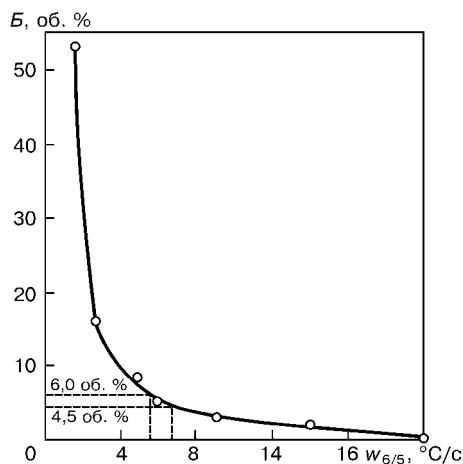


Рис. 4. Влияние скорости охлаждения $w_{6/5}$ стали 20ХН4ФА на содержание бейнита B , образующегося при термодинамическом превращении аустенита



При сварке стали 20ХН4ФА толщиной 18 мм с разбросом содержания химических элементов от нижнего уровня (см. выше) до уровня, соответствующего значению показателя P_c , равного 0,50 (при химическом составе, соответствующем верхнему пределу концентраций, $P_c = 0,52$), по указанной формуле определяем диапазон температуры предварительного подогрева. Он составляет приблизительно 165...240 °С.

Таким образом, на основании результатов, полученных экспериментальным и расчетным путем, а также анализа подходов к выбору температур подогрева при разработке технологии сварки стали 20ХН4ФА можно рекомендовать предварительный (сопутствующий) подогрев до температуры 200...300 °С. Окончательный выбор температуры подогрева целесообразно проводить на основании проведения сварки технологических проб с контролем скорости охлаждения металла в области ЗТВ. Следует учитывать, что при регулировании теплового режима в условиях замедленного теплоотвода вносимое в зону сварного соединения тепло при многопроходной сварке (автоподогреве) приводит к уменьшению скорости охлаждения (см. табл. 2, опыты № 4 и 5) и к постепенному повышению температуры металла ЗТВ выше первоначальной температуры подогрева [14].

Выводы

1. На основании анализа построенной термодинамической диаграммы распада аустенита в стали 20ХН4ФА установлено, что при скоростях охлаждения $\omega_{6/5} < 20$ °С/с имеет место структурное превращение с образованием бейнита, при $\omega_{6/5} > 20$ °С/с аустенит претерпевает закалку на мартенсит. В этом случае наличие области превращения с образованием равновесной ферритно-перлитной смеси не выявлено.

2. Установлено, что высокая стойкость сварных соединений стали 20ХН4ФА против образования холодных трещин достигается при тепловых режимах сварки, обеспечивающих скорость охлаждения металла ЗТВ вблизи шва не более 6,7 °С/с, что связано с созданием наиболее эффективных условий для формирования бейнитной составляющей в структуре металла и частичного самоотпуска продуктов закалки.

3. При разработке технологии сварки стали 20ХН4ФА рекомендуется применять предварительный подогрев в диапазоне температур 200...300 °С.

Выбор конкретной температуры предварительного (сопутствующего) подогрева следует проводить на основании результатов исследований температурных режимов, изменение скорости охлаждения металла в ЗТВ и корректировки параметров режимов сварки и нагрева применительно к конкретному изделию.

1. *Марочник* сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 639 с.
2. *Бейлинова Т. А., Янковский В. М., Гордеева Л. И.* Структура и свойства стали 20ХН4ФА после отпуска // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* — 1971. — № 10. — С. 56–58.
3. *Гривняк И.* Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
4. *Yorioka N.* Welding of TMCP steels // *J. Japan Weld. Soc.* — 1992. — **61**, № 4. — P. 50–66.
5. *Зак А. И.* Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справоч. пособие. — СПб.: Welcome, 1996. — 384 с.
6. *Геллер Ю. А., Рахматдт А. Г.* Металловедение. — М.: Металлургия, 1989. — 456 с.
7. *Granjon H.* The «Implant» method for studying the weldability of high strength steels // *Metal Constr. and British Weld. J.* — 1969. — **1**, № 11. — P. 509–515.
8. *Sawhill J. M., Dix A. W., Savage W. F.* Modified implant test for studying delayed cracking // *Ibid.* — 1974. — **35**, № 12. — P. 554–560.
9. *Касаткин Б. С., Бреднев В. И., Волков В. В.* Методика определения деформаций при замедленном разрушении // *Автомат. сварка.* — 1981. — № 11. — С. 1–3, 11.
10. *Yoshinori I., Masakiniko I., Mutsuo N.* Study on estimation of lower critical stress for cold cracking at welds by implant test method // *J. Japan Weld. Soc.* — 1976. — **45**, № 12. — P. 51–58.
11. *Гуляев А. П.* Термическая обработка стали. — М.: Машгиз, 1960. — 496 с.
12. *Петров Г. А., Тумарев А. С.* Теория сварочных процессов. — М.: Высш. шк., 1977. — 392 с.
13. *Справочник сварщика* / Под ред. В. В. Степанова. — М.: Машиностроение, 1982. — 560 с.
14. *Бураченко И. А., Звездин Ю. И., Цуканов В. В.* Обоснование температуры подогрева при сварке хромоникель-молибденванадиевых сталей мартенситного класса // *Автомат. сварка.* — 1981. — № 11. — С. 16–20.
15. *Новиков И. И.* Теория термической обработки. — М.: Металлургия, 1974. — 400 с.
16. *Влияние особенностей технологии сварки под флюсом на напряженное состояние сварных соединений высокопрочной стали* / Л. М. Лобанов, Л. И. Михолуй, В. А. Пивторак и др. // *Автомат. сварка.* — 1995. — № 9. — С. 21–23.
17. *Влияние охлаждения и деформации на ударную вязкость металла шва при сварке низколегированной стали* / Д. П. Новикова, Ю. Л. Богачек, С. Е. Семенов и др. // *Там же.* — 1976. — № 10. — С. 21–23.
18. *Козлов Р. А.* Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 161 с.
19. *Земзин В. Н., Шрон Р. З.* Термическая обработка и свойства сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1978. — 368 с.
20. *Касаткин О. Г., Мусяиченко В. Ф.* Расчет режима сварки высокопрочной низколегированной стали // *Автомат. сварка.* — 1977. — № 10. — С. 1–5.

Transformation of austenite in steel 20KhN4FA (GOST 4543-71) under continuous cooling conditions has been studied. Hardening of steel to form fully austenitic structure takes place at cooling rates of more than 20 °С, while partially bainitic decomposition occurs at lower cooling rates. Preheating to a temperature of 250...300 °С leads to a dramatic increase in cold crack resistance, which seems to be associated with sufficient conditions ensured for the γ -bainite transformation to take place. The latter is accompanied by partial self-tempering and increase in ductility of the HAZ metal of a welded joint. Issues related to selection of the preheating temperature are also considered.

Поступила в редакцию 24.02.2002



СТОЙКОСТЬ ПРОТИВ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ АУСТЕНИТНОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА, МИКРОЛЕГИРОВАННОГО РЗМ

Н. Г. ЕФИМЕНКО, канд. техн. наук (Укр. инж.-пед. академия, г. Харьков),
С. В. НЕСТЕРЕНКО, инж. (Харьк. гос. акад. город. хоз-ва, г. Харьков)

Изучено влияние микролегирования хромоникелевого наплавленного металла типа 18-10 иттрием и оксидом церия на его сопротивляемость межкристаллитной коррозии. Показана положительная роль модифицирования благодаря очищению границ кристаллитов и более благоприятному распределению неметаллических включений.

Ключевые слова: хромоникельмолибденовый аустенитный наплавленный металл, редкоземельные металлы, микролегирование, коррозионная стойкость, диффузия углерода, межкристаллитная коррозия, неметаллические включения, границы зерен, химическая микронеоднородность, термообработка, карбиды хрома

Диффузия углерода на границы и в пограничные области зерен и кристаллитов в процессе нагрева при сварке в интервале температур его максимальной подвижности является определяющим фактором стойкости аустенитного металла Cr-Ni-Mo против межкристаллитной коррозии (МКК). При этом термоциклирование, связанное с увеличением длительности пребывания металла в условиях высоких температур, при многослойном выполнении сварных швов ускоряет процесс карбидообразования на границах и обеднения приграничных областей хромом.

В работах [1, 2] показано, что микролегирование аустенитного хромоникельмолибденового металла редкоземельными металлами (РЗМ) повышает коррозионную стойкость, однако механизм этого влияния на процесс МКК не рассмотрен. Установлено также [3, 4], что иттрий задерживает диффузию углерода в металле сварных швов низкоуглеродистых и аустенитных сталей Cr-Ni. Можно предположить, что причиной повышения стойкости против МКК микролегированных металлов Cr-Ni-Mo является задержка выхода углерода на границы зерен и кристаллитов и обеднение приграничных участков хромом.

Целью данной работы было изучение влияния микролегирования РЗМ на сопротивляемость металла сварного шва МКК.

Исследованию подвергали металл, наплавленный электродуговым способом электродами, содержащими 0,5 % Y + 0,8 % CeO₂, введенными

через покрытие [2]. Образцы для исследования получали путем многослойной наплавки на торец пластины из стали 08X19H11M2 толщиной 20 мм и длиной 150 мм в соответствии с ГОСТ 6996-78. Наплавку выполняли электродами диаметром 4 мм на токах 130...140 А. Химический состав наплавленного металла, содержащего РЗМ, приведен в табл. 1.

Образцы наплавленного металла подвергали нагреву в аргоне при температуре 660 °С с выдержкой 0,2; 10; 100 ч.

Склонность наплавленного металла к МКК оценивали электрохимическим способом с использованием ячейки с отдельными электродными пространствами [5]. Поляризацию образцов осуществляли с помощью потенциостата П5727-М. В качестве электрода для сравнения использовали стандартный хлорсеребряный электрод. Экспериментально полученные значения потенциалов приведены по водородной шкале.

Исследования химической микронеоднородности и распределения элементов на границах зерен, а также состава неметаллических включений (НВ) проводили с помощью электронных микроскопов «Сомебах» и «Сомскап-4» с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа «Link System 860». Образцы для растровой электронной микроскопии готовили по общепринятой методике с использованием известных травителей.

Глубину проникновения МКК измеряли в соответствии с ГОСТ 6032-89 (метод АМ) с помощью металлографического микроскопа.

Анодные потенциодинамические кривые металлов, исследуемых в растворе 1М HClO₄ + 0,1м NaCl, приведены на рис. 1. Указанный электролит отличается высоким избирательным действием на пограничные области зерен, кри-

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла, мас. %

Образец	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	S	Y	Ce
Исходный	0,060...0,075	18,2...19,0	10,1,10	0,80...0,95	0,45...0,60	2,0...2,3	0,016	—	—
Опытный	0,065...0,075	18,0...19,1	10,15	0,80...0,90	0,40...0,60	2,1...2,3	0,015	0,019	0,021

Примечание. В состав наплавленного металла обоих вариантов входит по 0,014 мас. % фосфора.

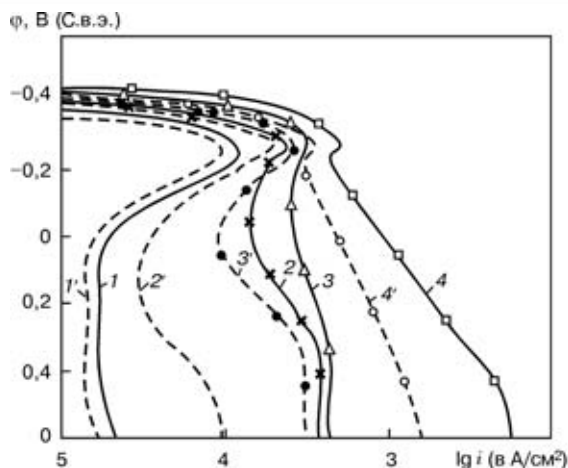


Рис. 1. Анодные потенциодинамические кривые наплавленного металла (1-4 — без РЗМ; 1'-4' — с РЗМ) в растворе 1М НСlO₄ + 0,1м NaCl при температуре 650 °С с различной длительностью термообработки: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 10; 4 — 100 ч

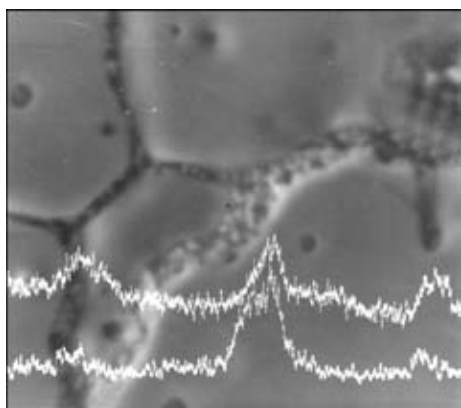


Рис. 2. Выделение карбидов хрома на границах зерен наплавленного металла исходного варианта при термообработке 100 ч, X4000

таллитов, обедненных хромом. Прямой ход анодных потенциодинамических кривых получали после снятия катодной кривой от $i_k = 10 \text{ мА/см}^2$, начиная с потенциала коррозии ϕ_k .

Анализ поляризационных измерений для образцов наплавленных металлов показывает, что при термообработке в диапазоне значений анодных потенциалов 0,15...0,4 В (рис. 1, кривые 2', 2, 3', 3, 4', 4) появляются активационные участки. При этом на кривых для образцов без термообработки таких участков нет (рис. 1, кривые 1', 1).

Степень склонности наплавленного металла к МКК, согласно работе [5], определяется током

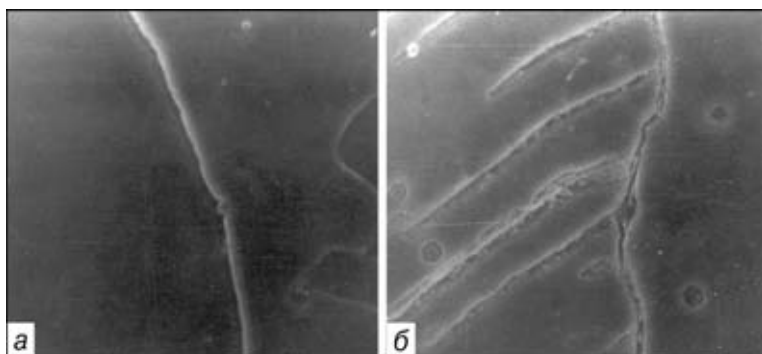


Рис. 3. Границы зерен наплавленного металла (термообработка 100 ч) исходного варианта (а) и с РЗМ (б)

Таблица 2. Коррозионная стойкость и глубина проникновения МКК

Объект исследования	№ варианта	Длительность термообработки, ч	Глубина проникновения МКК, мкм	Скорость коррозии в 1М Н ₂ SO ₄ при 60 °С, мм/год
Металл без РЗМ	1	0	45...57	0,18
	2	2	130...145	—
	3	10	215...226	—
	4	100	355...370	0,32
Металл с РЗМ	5	0	18...24	0,06
	6	2	38...56	—
	7	10	105...115	—
	8	100	145...155	0,12

Таблица 3. Химическая микронеоднородность наплавленного металла (термообработка 100 ч), мас. %

№ варианта	Содержание					
	среднее		на границе зерна		в непосредственной близости от границы зерна (10 мкм)	
	Ni	Cr	Ni	Cr	Ni	Cr
4	9,228	19,209	8,562	21,756	9,246	19,246
8	9,872	19,810	10,250	20,201	10,382	20,208

активации i_a при $\phi_a = 0,3 \text{ В}$. Экспериментально установлено, что токи i_a для микролегированных образцов (рис. 1, кривые 1'-4') значительно меньше, чем для исходного металла (рис 1, кривые 1-4). Кроме того, значение i_a возрастает с увеличением длительности термообработки, причем для микролегированного металла этот рост выражен меньше, чем для металла исходного варианта. Стойкость против МКК оценивали по глубине ее проникновения. Параллельно были проведены гравиметрические коррозионные испытания образцов в растворе 1М Н₂SO₄ при температуре 60 °С. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Данные табл. 2, как и электрохимические измерения, свидетельствуют о более высокой стойкости против МКК и замедлении общей коррозии микролегированного металла в растворах Н₂SO₄.

Установлено, что в металле без РЗМ, подвергнутом 100-часовой термообработке, зафиксирована более значительная сегрегация хрома на границах зерен (0,8...2,0 мас. %) по сравнению со средним содержанием, а также уменьшение количества никеля на 0,90...0,96 мас. % (табл. 3, вариант № 4).

В металле с РЗМ, подвергнутом такой же термообработке, подобно не зафиксировано (табл. 3, вариант № 8). На образцах металлов, подвергнутых термообработке менее 10 ч, существенной сегрегации элементов не выявлено.

Микроструктура металла с РЗМ измельчена в отличие от металла исходного варианта. Установлено также, что границы зерен при термообработке металла исходного варианта значительно утолща-



Таблица 4. Типичный химический состав неметаллических включений

Остаточное содержание РЗМ в металле, мас. %	Свечение в отраженных электронах	Массовая доля элементов, %								
		Si	Mn	Cr	Mo	Ti	S	Ca	Y	Ce
Нет	Светлое	3,02	3,18	—	—	0,405	0,65	—	—	—
»»	»»	3,05	3,60	—	—	0,30	0,350	—	—	—
»»	»»	—	1,38	35,66	6,10	0,18	0,086	—	—	—
»»	»»	—	1,20	25,84	2,23	0,12	0,054	—	—	—
»»	Темное	17,46	32,10	—	—	0,252	1,69	0,082	—	—
»»	»»	13,78	16,01	—	—	0,458	0,082	0,011	—	—
»»	»»	7,30	14,07	—	—	0,66	1,016	0,050	—	—
»»	»»	6,82	10,83	—	—	0,802	1,14	0,071	—	—
»»	»»	6,256	13,849	—	—	1,45	0,711	0,070	—	—
0,0019Y + 0,0021Ce	»»	20,54	34,60	—	—	15,19	0,67	0,770	0,870	4,160
0,0019Y + 0,0021Ce	Светлое	1,50	2,80	26,059	—	0,128	1,80	0,258	—	0,60
0,0019Y + 0,0021Ce	»»	6,82	10,81	—	—	0,80	1,14	1,080	—	0,187
0,0019Y + 0,0021Ce	»»	6,25	13,80	—	—	1,46	0,711	0,451	0,623	0,519
0,0019Y + 0,0021Ce	Темное	11,39	20,95	—	—	1,24	1,38	0,220	0,210	1,110
0,0019Y + 0,0021Ce	»»	24,76	26,76	—	—	3,55	1,33	6,690	—	1,010
0,0019Y + 0,0021Ce	»»	19,046	25,38	—	—	2,30	1,80	1,980	0,469	0,924

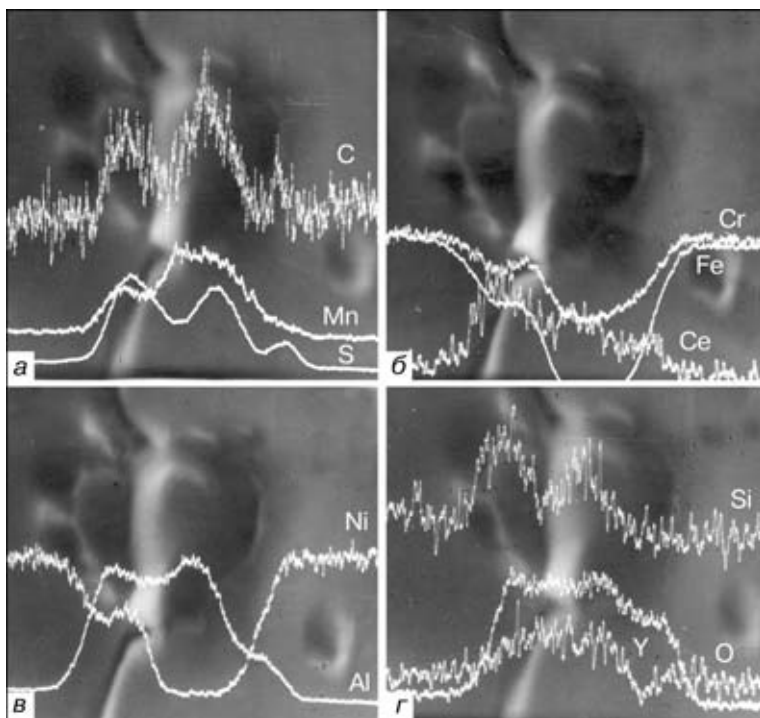


Рис. 4. Распределение химических элементов в НВ, расположенном на границе зерна (металл с РЗМ, термообработка 100 ч)

ются из-за выделений карбида хрома (рис. 2).

Выявлен интенсивный рост игольчатой фазы (рис. 3, а, табл. 3, вариант № 4), которая берет начало у границ зерен. Причем количество игл углеродсодержащей фазы зависит от продолжительности термообработки. Появление видимого количества этой фазы для микролегированных образцов не было отмечено даже при термообработке 100 ч (рис. 3, б, табл. 3, вариант № 8). Кроме того, в аналогичных условиях для микролегированных образцов на границах зерен выделений карбидов и утолщения границ не обнаружено (рис. 3, б, табл. 3, вариант № 8).

При исследовании НВ установлено, что в исходном металле они располагаются преимущественно на границах зерен. В металле с РЗМ НВ измельчаются (0,8... 1,0 мкм), распределяются равномерно в матрице, форма их приближается к шаровидной. Изредка встречаются НВ размером 3... 8 мкм, часть из них расположена на границах зерен.

В отраженных электронах НВ имеют различный цвет — светлые, темные, иногда светло-серые. Их цвет, как установлено при анализе, зависит от содержания в них того или иного химического элемента. Химический состав НВ сложный. В НВ темного цвета в металле с РЗМ преобладают марганец, кремний, сера. Здесь также содержится значительное количество кислорода и углерода (рис. 4). Светлые включения идентифицированы как окисульфиды и окискарбосульфиды РЗМ. НВ металла исходного варианта являются темными (силикаты, оксиды кремния, марганца, сульфиды марганца) и светлыми (в основном оксиды марганца и сернистые соединения). Химический состав типичных НВ приведен в табл. 4.

Положительное влияние РЗМ на сопротивляемость металла МКК можно представить, исходя из полученных экспериментальных данных и результатов работ [3, 4, 6, 7]. Высокое сродство РЗМ к кислороду и сере способствует образованию высокотемпературных НВ [4, 6] в предкристаллизационный период. При этом меняется характер распределения НВ в закристаллизованном металле. Они обнаруживаются преимущественно в теле зерен и кристаллитов [7]. Междендритные и межзеренные границы становятся чище, утоняются. Происходит модификация структурных составля-



ющих [4]. Образовавшиеся НВ, содержащие РЗМ, имеют сложный химический состав, в них наряду с кислородом, серой присутствует углерод, т. е. образуются карбиды [4]. Происходит задержка диффузии углерода в интервале температур его максимальной диффузионной подвижности [3, 4]. Снижается химическая микронеоднородность в пограничных областях [3, 6]. Задержка диффузии углерода уменьшает вероятность образования карбидов хрома на границах. Изменение характера процессов структурообразования способствует уменьшению интенсивности коррозионных процессов в пограничных областях.

Выводы

1. Высокотемпературная обработка металла исходного варианта способствует появлению карбидной фазы на границах зерен и игольчатой фазы, содержащей углерод. Количество этих фаз зависит от продолжительности выдержки металла при температуре максимальной подвижности углерода. В металле, содержащем РЗМ, таких фаз не обнаружено, что объясняется снижением диффузионной активности углерода, т. е. стабилизацией структуры.

2. Введение РЗМ в наплавленный металл снижает химическую микронеоднородность, приводит к модификации структурных составляющих, очищению границ зерен и кристаллитов.

3. В металле с РЗМ образовавшиеся НВ имеют сложный химический состав, распределены преимущественно в теле зерен и кристаллитов, содержат значительное количество серы и кислорода, а также углерод.

4. Электрохимические исследования и измерения глубины проникновения МКК свидетельствуют о более высокой стойкости металла с РЗМ против МКК.

1. Лазебнов П. П., Александров А. Г. Влияние модифицирования на структуру и свойства металла сварных соединений стали 12Х18Н10Т // Свароч. пр-во. — 1988. — № 6. — С. 33–36.
2. Нестеренко С. В., Ефименко И. Г. Повышение коррозионной стойкости в кислых средах аустенитного наплавленного металла путем комплексного легирования РЗМ // Там же. — 1990. — № 10. — С. 19–21.
3. Ефименко Н. Г., Балаи Л. Н. Влияние иттрия на диффузию углерода в сварных соединениях // Там же. — 1988. — № 7. — С. 32–36.
4. Ефименко Н. Г. О механизме влияния РЗМ на процесс кристаллизации и формирование первичной структуры шва при сварке стали // Там же. — 1990. — № 7. — С. 38–34.
5. Электрохимический способ количественного определения склонности нержавеющей сталей к межкристаллитной коррозии / П. А. Медведева, В. М. Княжева, Я. М. Колотыркин, С. Т. Бабич // Защита металлов. — 1975. — 11, № 6. — С. 699–705.
6. Solidification microstructure of ingot and continuously cast slabs treated with rare earth metal / Y. Nuzi, T. Ohashi, T. Hiromoto, O. Kitamuza // Tetsu-To-Hagane = Iron and Steel Inst. Japan. — 1980. — 66, № 6. — P. 618–627.
7. Ефименко Н. Г., Балаи Л. Н., Бакакин Г. Н. Влияние иттрия на структуру металла шва при сварке плавлением // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 19–21.

Investigations were performed of the influence of microalloying chromium-nickel deposited metal of 18-10 type with yttrium and cerium oxide on its intercrystalline corrosion resistance. A positive role of modifying by cleaning the crystal boundaries and more favorable distribution of intermetallic inclusions is demonstrated.

Поступила в редакцию 13.03.2002,
в окончательном варианте 25.07.2002

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!
ИЭС им. Е. О. Патона в 2003 г.
проводит международные конференции при
информационной поддержке журнала "Автоматическая сварка"

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ
И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**
19–23 мая 2003 г.
Украина, Крым, пос. Кацивели

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
СВАРКИ И РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ**
24–26 ноября 2003 г.
Украина, г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ

Адрес оргкомитета:
Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел: (380-44) 261-53-49, 269-26-23
Факс: (380-44) 268-0486, 274-0277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
E-mail: kovinst@sovamua.com
http://www.nas.gov.ua/pwj




**ПРОИЗВОДСТВО
ПРОДАЖА
СЕРВИСНОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ**

Малогабаритное, высокоэффективное энергосберегающее сварочное оборудование на токи 110–300 А с ограничением холостого хода до 12 В

Автономные мобильные сварочные комплексы на базе резонансных преобразователей

Сварочные инверторы для MMA и TIG сварки на токи 80–300А

Украина, 03150, г. Киев, ул. Горького, 94-96, к. 14,
тел./факс: (044) 261 51 02, 261 58 44
"ИЭС - ЭЛС" Специализированный магазин: "ИНПАТ-СЕРВИС",
тел.: (044) 220 92 89







ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ХРОМОМАНГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ И ИХ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

А. И. БАЛИЦКИЙ, д-р техн. наук, **И. Ф. КОСТЮК**, инж., **О. А. КРОХМАЛЬНЫЙ**, канд. техн. наук
(Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины)

Рассмотрено формирование физико-механической неоднородности в металле сварных соединений в зависимости от легирования металла шва. Легирование швов азотом обеспечивает более высокую электрохимическую однородность соединений.

Ключевые слова: сварное соединение, высокоазотистые хромоманганцевые стали, неоднородность свойств, межкристаллитная коррозия, твердость, механические испытания

Высокоазотистые хромоманганцевые стали типа 18–18 находят все более широкое применение в энергетике [1–3], в том числе на электростанциях Украины. Сегодня для изготовления бандажей роторов современных турбогенераторов, достигающих единичной мощности 1000...1200 МВт, используют аустенитную хромоманганцевую сталь Р900 (12Х18АГ18Ш) со сверхравновесной концентрацией азота. Высокое содержание азота достигается шлаковым переплавом отливки в среде высокоазотистой шихты. Этой технологии посвящен ряд работ как применительно к новой бандажной хромоманганцевой стали типа 18–18 [4–13], так и традиционным сталям 60ХЗГ8Н8В и 40Х4Г18 [14,15]. Новая сталь имеет высокие значения прочности и вязкости разрушения, стойкостью к локальной коррозии и коррозионному растрескиванию [1]. Сведения о коррозионной стойкости хромоманганцевых сталей типа 18–18 весьма ограничены [16–20]. Разрушения бандажей, изготовленных из стали Р900, на сегодня не зарегистрировано, однако известны случаи их коррозионно-механических повреждений.

Технология сварки хромоманганцевых сталей типа 18–18 аналогична технологии сварки других аустенитных сталей. Однако без соблюдения определенной технологии (низкая мощность сварочной дуги, малые размеры жидкой ванны) могут возникнуть проблемы с образованием пор, сни-

жением прочности, вязкости, а также коррозионной стойкости. Содержание углерода, кремния и никеля в присадочном металле должно быть минимальным, поскольку эти элементы снижают растворимость азота в сварном шве (СШ). Кроме того, высокие концентрации никеля определяют химическую и структурную микрон неоднородность и связанную с ней низкую коррозионную стойкость сварных соединений (СС). Используя проволоку с 0,4...0,8 % N и защитный газ, содержащий азот до 4 %, можно получить бездефектные СС. Поэтому широко ведутся работы по созданию новых, более эффективных присадок и технологий сварки высокоазотистых аустенитных сталей [18, 19].

Исследовали физико-механическую и электрохимическую неоднородность СС двух близких по составу высокоазотистых аустенитных сталей и их коррозионную стойкость в растворах хлорида натрия, соляной кислоты и солей меди. Изучали свойства двухсторонних стыковых соединений, изготовленных из сталей 12Х18АГ18Ш и 08Х19АГ10Ш в состоянии поставки. В табл. 1 приведен химический состав основного и присадочных материалов.

Сварные соединения № 1 образцов из стали 12Х18АГ18Ш выполняли ручной аргодуговой сваркой вольфрамовым электродом с использованием присадочной проволоки Св-01Х19Н9. Сварные соединения № 2 образцов из стали 08Х19АГ10Ш выполнены автоматической дуговой сваркой в специальной защитной атмосфере, содержащей 4 % N₂. Присадочным материалом служила разработанная для сварки высокоазотис-

Таблица 1. Химический состав основного материала сварных соединений и присадочных проволок

Материал	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
Сталь 12Х18АГ18Ш	0,12	0,36	18,7	19,19	0,16	0,01	0,05	0,64
Сталь 08Х19АГ10Ш	<0,08	<0,5	10	19	<1,0	<0,5	–	0,5
Проволока № 1	0,04	0,7	5,5	25	21	3,6	–	0,38
Проволока Св-01Х19Н9	0,08	1,0	2,0	19	9	–	–	–
Проволока Св-07Х25Н13	0,09	0,8	1...2	25	13	–	–	–

Таблица 2. Глубинные показатели коррозии (*I*, мм/год) СС и ОМ в агрессивных средах

Среда	СС № 1	СС № 2	ОМ № 1	ОМ № 2
3-й % NaCl	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
5-й % HCl	3,51	2,63	1,56	1,70
22-й % CuSO ₄	0,09	0,07	0,1	0,06
22-й % CuCl ₂	3,11	3,03	2,78	2,99

Таблица 3. Коррозионные потенциалы (*E_K*, мВ) в различных участках СС

Сварное соединение	Участок СС	3-й % NaCl	5-й % HCl	22-й % CuSO ₄	22-й % CuCl ₂
№ 1	ОМ	348	-272	416	-68
	ЗТВ	334	-254	407	-82
	СШ	415	-33	507	248
	СС	360	-263	438	-71
№ 2	ОМ	329	-283	358	-57
	ЗТВ	303	-285	361	-39
	СШ	368	-238	442	166
	СС	343	-256	401	-36

тых аустенитных сталей специальная проволока № 1 (табл. 1). Благодаря повышенному содержанию в ней хрома достигается получение беспористых швов с высоким уровнем механических характеристик.

Вследствие развития химической и структурной неоднородности в различных зонах СС высоколегированных сталей и прежде всего в металле шва и металле ЗТВ СС в целом следует рассматривать как сложную короткозамкнутую многоэлектродную коррозионную систему. В растворе электролита поверхность СС можно считать эк-

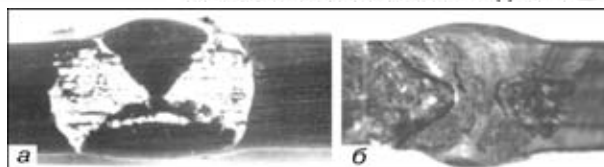


Рис. 1. Образцы СС № 1 после 240 ч выдержки в растворах 5 %-м HCl (а) и 22 %-м CuCl₂ (б)

випотенциальной, а каждый из его участков — поляризованным по отношению к компромиссному потенциалу коррозионной системы. Высокоазотистые стали имеют узкий диапазон пассивности в горячих растворах хлоридов, поэтому следует ожидать, что присадки с более высоким потенциалом будут предопределять их контактную коррозию. Образцы испытывали в растворах: 3 %-м NaCl, 5 %-м HCl, 22 %-м CuSO₄ и 22 %-м CuCl₂ в течение 720 ч. Глубинные показатели коррозии СС основного металла (ОМ) определяли по потерям массы, приведенным к площади коррозионного повреждения, взвешивая образцы на весах ВЛР-20. В ходе исследования потерь массы образцов (табл. 2) установлена высокая коррозионная стойкость СС высокоазотистых аустенитных сталей в растворах: 3 %-м NaCl и 22 %-м CuSO₄ (соответственно 2 и 5 баллов по ГОСТ 13819-68). Можно отметить, что более однородный по химическому составу образец СС № 2 имеет высокую коррозионную стойкость в 3 %-м растворе NaCl (в 1,5 раза). В 22 %-м растворе CuCl₂ скорости коррозии обоих образцов почти одинаковы и достаточно высоки. Это свидетельствует о том, что в среде хлоридов СС имеют низкую коррозионную стойкость (6 баллов). Причем более неоднородный металл СС № 1 имеет скорость коррозии в 1,5... 2,4 раза выше, чем ОМ, что является косвенным свидетельством его высокой электрохимической неоднородности.

Исследование макроструктуры околошовной зоны показало отсутствие пор или других крупных дефектов. Визуальным обследованием образцов обнаружено их неравномерную коррозию в зоне ОМ — металл ЗТВ в растворах 5 %-м HCl и 22 %-м CuCl₂ (рис. 1). Коррозии СШ практически не наблюдали. Вследствие образования гальванопары на СС № 1 в 22 %-м растворе CuCl₂ отмечено интенсивное катодное осаждение меди с одновременным образованием глубоких питтингов и язв в зоне сплавления и металле ЗТВ. В зоне сплавления наблюдается склонность к локальному коррозионному разрушению в виде подреза (щели). Скорость коррозии СС № 2 повышается незначительно (в 1,01... 1,34 раза) по сравнению с ОМ.

Вывод о более высокой электрохимической однородности СС № 2 подтверждают результаты измерений стационарных потенциалов коррозии участков СС (табл. 3). Для обоих СС наиболее высокими являются потенциалы зоны СШ. Для СС № 1 в растворах 3 %-м

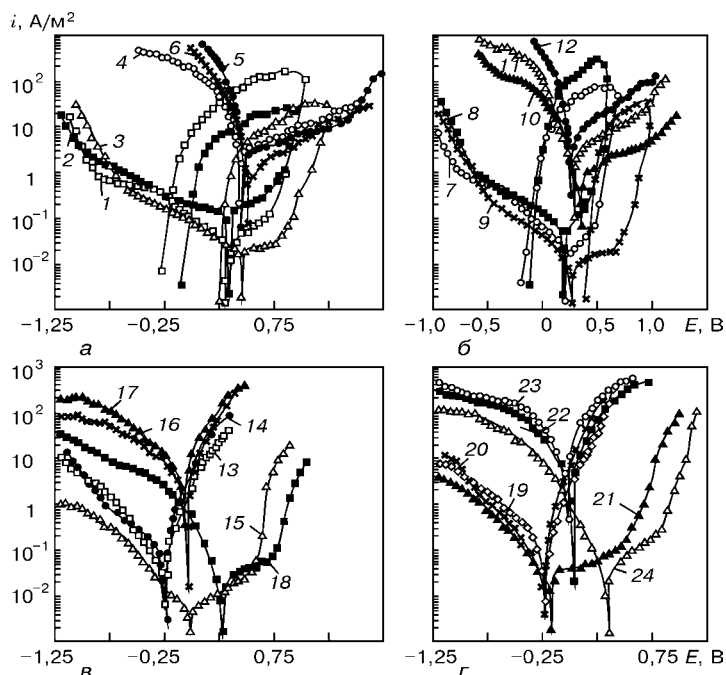


Рис. 2. Поляризационные кривые участков СС № 1 (а, б) и № 2 (в, г) в 3 %-м NaCl (1-3, 7-9); 22 %-м CuSO₄ (4-6, 10-12); 5 %-м HCl (13-15, 19-21) и 22 %-м CuCl₂ (16-18, 22-24): 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 — ОМ; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 — металл ЗТВ; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 — СШ

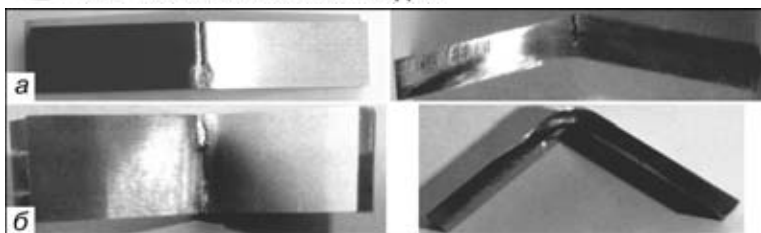


Рис. 3. Вид образцов после испытания на межкристаллитную коррозию: а — угол загиба 11°; б — 83

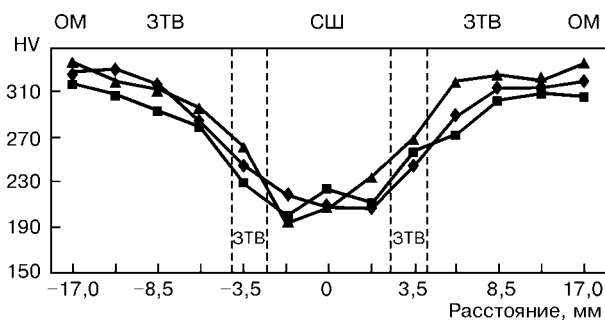


Рис. 4. Значения твердости трех образцов СС № 3

NaCl, 22 %-м CuSO₄ и 22 %-м CuCl₂ коррозионное растворение материала сосредоточено по металлу ЗТВ, а в 5 %-м HCl — по OM, поскольку эти участки имеют наиболее низкие потенциалы коррозии. Для СС № 2 в растворах 3 %-м NaCl и 5 %-м HCl наиболее низким является потенциал металла ЗТВ, а в растворах солей меди — OM. Разница между потенциалами определенных выше участков СС № 1 в 5 %-м HCl и 22 %-м CuCl₂ растворах составляет соответственно 239 и 330 мВ, тогда как СС № 2 — 47 и 223 мВ. В 3 %-м растворе NaCl анодная поляризация OM и металла ЗТВ, обусловленная контактом с более благородным металлом СШ, несущественно ускоряет коррозию СС в результате низкой эффективности катодного процесса (см. рис. 2, а, кривые 1–3 и 2, б, кривые 7–9). При компромиссном потенциале данной коррозионной системы, которым является потенциал СС (см. табл. 3), эти участки находятся в стойком пассивном состоянии, а скорость их анодного растворения является низкой (до 0,2 А/м²). В 22 %-м растворе CuSO₄ коррозия СС ускоряется на 1...2 порядка вследствие существенного повышения эффективности катодного процесса (см. рис. 2, а, кривые 4–6 и 2, б, кривые 10–12). Однако из-за отсутствия хлорид-ионов в растворе это не вызывает депассивации ни одного из участков СС. Коррозионный процесс протекает под катодным контролем.

Наличие хлорид-ионов и низкие значения рН определяют активацию материала OM и металла ЗТВ СС в 5 %-м растворе HCl, а материал СШ остается пассивным (см. рис. 2, в, з). Коррозионный процесс протекает под смешанным анодно-катодным контролем с высокой скоростью. Компромиссные потенциалы коррозионных систем СС — 22 %-й раствор CuCl₂ смещаются в область питтинговой коррозии участков OM и металла ЗТВ, а материал СШ находится в пассивном состоянии. Высокая скорость коррозии СС в этой среде определяется эффективностью катодных и

низкой поляризованностью анодных электродных процессов. Возникновение дополнительного электрода в результате катодного осаждения меди усложняет анализ такой многоэлектродной коррозионной системы. Поляризационные кривые с обратным ходом позволили установить потенциалы репассивации питтинга.

Сварные соединения № 2 исследовали также и на склонность к межкристаллитной коррозии. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 6032–89 по методу АМ. Образцы исследовали в водном растворе меди сернистой и серной кислоты с добавлением медной стружки. Перед испытаниями образцы обезжирили. После непрерывного кипячения (24 ч) промыли водой и просушили. Образцы загибали на угол до 90° по металлу шва. На рис. 3 показаны образцы после испытаний. На поверхности металла шва изогнутых образцов отмечены трещины. Характерно, что угол загиба составил: для образца 1 — 83, 2 — 11°. Опыты прекратили после появления трещин.

Образцы СС № 3 из стали 12X18AG18Ш сваривали проволокой Св-07X25H13, которая не содержит азот (см. табл. 1, 2). Измерения твердости проводили перпендикулярно шву. Определили, что значения твердости более низкие на СШ и зоне сплавления. Это объясняется отсутствием азота и различным химическим составом шва и OM. Характерно, что микротвердость металла СШ практически одинакова на всех образцах.

Выводы

1. В зоне сварного шва наблюдается неоднородность основных механических свойств в связи с уменьшением содержания азота в материале шва.
2. Исследование склонности сварных соединений хромомарганцевой стали 18–18 в насыщенном растворе CuCl₂ к коррозионно-механическому разрушению позволяет обнаружить наиболее ослабленные зоны сварного шва.
3. Сварные соединения, выполненные дуговой сваркой с использованием азотсодержащих присадок и защитной среды, характеризуются более высокой электрохимической однородностью, чем полученные с применением электрода Св-01X19H9. Такие сварные соединения отличаются высокой коррозионной стойкостью в 3 %-м NaCl и 22 %-м CuSO₄. Результаты испытаний дают основания рекомендовать азотсодержащие присадки для сварки высокоазотистых хромомарганцевых сталей.

1. Балущкий О. І. Сучасні матеріали для потужних турбогенераторів. — Львів: Фізико-механічний ін-т НАН України, 1999. — 284 с.
2. Speidel M. O. Nichtmagnetisierbare Stähle für Generator-Kappenringe, ihr Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprodnung // VGB Kraftwerttechnik. — 1981. — 61, № 5. — S. 417–427.
3. Stein G. Kappenringe-ein Krupp-Produkt mit Tradition und Zukunft // Techn. Mitt. Krupp. Werksbericht. — 1980. — 38, № 2. — S. 69–72.
4. Технология ЭШП высокоазотистой стали 12X18AG18 в слитки массой 18 т / Г. Г. Куткин, Л. М. Васильев, И. М. Зуев и др. // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по вы-



- сокозотистым сталям (Киев, 18–20 апр. 1990 г.). — Киев, 1990. — С. 8.
5. Stein G., Menzel J., Kirschner W. Manufacturing and operation of retaining rings made out of stress corrosion resistant steels // MaTeh' 1996: Proc. 1-st Intern. conf. «Development, testing and application of materials» (Opatija, Croatia, 2–5 Oct., 1996). — P. 203–208.
 6. Stein G., Menzel J., Chondhury A. Industrial manufacturing of massively nitrogen-alloyed steels in a pressure ESR furnace // Steel Times. — 1989. — 217, № 3. — P. 146.
 7. Stein G., Menzel J., Dorr H. Möglichkeiten zur Herstellung von Smiedestücken mit hohen Stickstoffgehalten in der DESU-Anlage // Ergebnisse der Werkstoff-Forschung. B. 1: Moderne Stähle / Thubal-Kain, 1987. — S. 181–193.
 8. Arc-slag remelting of steel and alloys / B. I. Medovar, V. Ja. Saenko, G. M. Grigorenko et al. — Cambridge: Cambridge Intern. Sci. publ., 1996. — 160 p.
 9. New multilayer steel in welded structures / B. I. Medovar, V. Ja. Saenko, L. B. Medovar, V. I. Us. — New York: Harwood: Acad. publ., 1992. — Vol. 2, pt 2. — 128 p.
 10. Особенности электрошлакового переплава и свойства высокопрочной бандажной стали / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, А. С. Волков и др. // Проблемы коррозии и протикоррозийного захисту матеріалів: Матеріали 4-ї міжнарод. конф.-виставки «Корозія-98» (Львів, 9–11 черв. 1998 р.). — Львів, 1998. — С. 151–154.
 11. Retaining rings: Product literature // Krupp Metal- und Schmiedewerke. — Essen, 1990. — 54 p.
 12. Электрошлаковый металл / Б. И. Медовар, Л. М. Ступак, Г. А. Бойко и др. / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
 13. Влияние состава флюсов и газовой атмосферы на поглощение азота сталями и сплавами при индукционном и дуговом плавлении / Б. И. Медовар, Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 3. — С. 6–14.
 14. Пахуридзе В. Н., Чекотило Л. В. Методы изготовления бандажных колец роторов турбогенераторов (краткий обзор) // Спец. электрометаллургия. — 1974. — 27. — С. 51–58.
 15. Пахуридзе В. Н., Чекотило Л. В. Легирование аустенитных сталей 60X3Г8Н8В и 40X4Г18 азотом в процессе ЭШП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — 1. — С. 40–45.
 16. Балицкий О. И. Оцінка схильності до корозійного розтріскування при зварюванні та різанні високоазотних хромомарганцевих сталей, отриманих електрошлаковим переплавом // Зварювання та споріднені технології — в XXI століття: 36. пр. міжнар. конф. (Київ, 24–27 лист., 1998). — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона. — 1998. — С. 10.
 17. Balitskii A. I., Krokchmalny O. O., Kostyuk I. F. Corrosion-mechanical strength of welded joints of high-nitrogen steels // Abstracts of poster papers of Intern. conf. «Welded structures» (Kyiv, Ukraine, Oct., 2000). — Kyiv, 2000. — P. 37.
 18. Harzenmozer M., Diener M. Suitable filler material for welding high nitrogen stainless steels // Proc. 18th Intern. SAMPE Europe conf. of the society for the advancement of material and process engineering (Paris, La Defense, 23–25 Apr., 1997). — Paris, 1997. — P. 123–133.
 19. Coetzee M., Pistorius P. G. H. Elevated temperature phase transformations and weldability of experimental Cr–Mn–Ni stainless steels // Duplex stainless steels (Glasgow, 13–16 Nov., 1994). — Glasgow, 1994. — Paper 48. — 11 p.
 20. Костюк І. Ф. Неоднорідність фізико-механічних властивостей зварних з'єднань високоазотних хромомарганцевих сталей та їх корозійна стійкість // Матеріали для енергетики. — 2001. — 1. — С. 55–58.

The paper deals with development of physico-mechanical inhomogeneity in the metal of welded joints, depending on weld metal alloying. Weld alloying with nitrogen provides higher electrochemical homogeneity of the joints.

Поступила в редакцію 20.02.2002

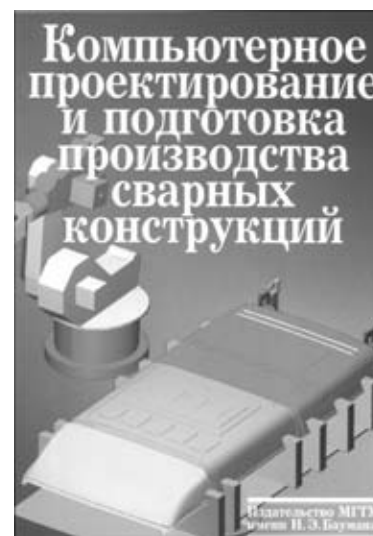
Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов / С. А. Куркин, В. М. Ховов, Ю. Н. Аксенов и др.; Под ред. С. А. Куркина, В. М. Ховова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 464 с.

Рассмотрены примеры эффективного использования компьютерных технологий на всех этапах подготовки производства сварных конструкций, начиная от расчета и проектирования самих конструкций до моделирования работы сварочных роботизированных технологических комплексов.

Содержание учебного пособия соответствует программам курсов лекций по компьютерным технологиям сварочного производства, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана и других вузах.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Машиностроительные технологии и оборудование» по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Может быть полезно руководителям подразделений промышленных предприятий.

Более подробно с книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона.





ОПЫТНЫЙ ЗАВОД СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ В НОВЫХ УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ

В. А. ТИТОВ, канд. техн. наук, **Б. В. ДАНИЛЬЧЕНКО**, д-р техн. наук, **А. Н. ВОЛКОВ**,
А. Г. БРЫЗГАЛИН, **С. М. ПОЛИЩУК**, инженеры (ОЗСО Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. А. КОРИЦКИЙ, **В. В. АНДРЕЕВ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности развития Опытного завода сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона в условиях налаживания рыночных отношений в экономике Украины. Представлены системный и номенклатурный ряд выпускаемого в настоящее время сварочного оборудования.

Ключевые слова: опытный завод сварочного оборудования, источники питания, серийное сварочное оборудование, трансформаторы, выпрямители, полуавтоматы, модернизация оборудования

Плановая экономика довольно узко специализировала изготовителей сварочного оборудования, классифицируя их по назначению, видам, типам, мощности, областям применения, массе и габаритам продукции. Например, производители источников питания сварочной дуги специализировались по видам оборудования (трансформаторы или выпрямители), назначению (сварка черных или цветных и легких металлов), мощности (малые, средние и большие токи сварки). Этот принцип имел определенное достоинство, связанные с возможностью производить большое количество однотипного оборудования по сравнительно низким ценам и поставлять его на большие расстояния различным потребителям, не особо считаясь с тарифами на перевозки (которые, следует отдать должное, были незначительными). Система успешно функционировала в пределах одного большого государства с практически никогда ненасыщаемым рынком и поэтому изначально не была рассчитана и приспособлена к гибкому реагированию на постоянно изменяющуюся конъюнктуру, запросы потребителей и, наконец, техническому прогрессу и различным новациям. На общем фоне малочувствительного к новациям производства тридцати заводов-изготовителей сварочного оборудования выделялись: завод «Электрик» (Ленинград), Каховский завод электросварочного оборудования Вильнюсский завод электросварочного оборудования и Опытный завод электросварочного оборудования (Киев), находившиеся в постоянном контакте с собственными КБ или опирающиеся на КБ исследовательских институтов. Продукция этих заводов превосходила, как правило, изделия других предприятий по качеству и разнообразию номенклатуры.

Перестройка, образование СНГ, переход к новым условиям хозяйствования привели к возник-

новению таможенных барьеров, расчетам по бартеру и в конвертируемой валюте, существенному росту тарифов на перевозки, что обусловило объективную необходимость резкого увеличения номенклатуры выпускаемой продукции каждым из заводов-изготовителей с целью максимально возможного насыщения собственного рынка и реализации ее партнерам из других стран СНГ. Необходимость расчетов по кооперационным поставкам за материалы и комплектующие изделия, возникновение конкуренции, превышение предложения над спросом, наконец, общая ситуация в странах СНГ, характеризующаяся спадом экономической активности, побудили изготовителей сварочного оборудования не только расширить номенклатуру, но и повысить технический уровень продукции, выйдя на новые рубежи надежности, качества и дизайна.

Новые условия хозяйствования потребовали соответственного организационного и финансового реагирования, что выразилось для ряда заводов поисками и обретением инвестиций финансового, научного и технического характера, а в ряде случаев привело и к изменению организационных форм — созданию акционерных обществ и совместных предприятий (завод «Факел», Бровары, Вильнюсский завод электросварочного оборудования, Электромашиностроительный завод, Симферополь и др.). В этих условиях положение ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона на рынке электросварочного оборудования было неоднозначным: с одной стороны, завод оставался под методическим, научным и организационным патронатом ИЭС им. Е. О. Патона, использовал и реализовывал разработки его ОКБ, с другой — становился рядовым субъектом хозяйственной деятельности, вынужденным функционировать далеко за пределами сферы научного обслуживания. На ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона впредь уже не распространялась своеобразная бюджетная поддержка в виде выполнения заказов в рамках Госпрограмм, заказов министерств и договорных работ по научной тематике ИЭС им. Е. О. Патона. Ситуация усугублялась также

Таблица 1. Системный ряд номенклатуры сварочного оборудования, выпускаемого ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона

Тип	Диапазон сварочного тока, А									
	0...100	100...140	70...250	200...250	250...315	315...400	400...500	500...630	630...1000	1000...2000
РДС	ТДС-125, ТДС-140		СТШ-250, СТШ-251, СТШ-252, ПВС-250		ВД-308, ВД-309	СТШ-500 СГД				
МАГ	ПС-100	БП-200		ПС-250.1, ПС-250.2, ПС-250ВПР6, ПС-315		Не производится		БП-600		
МИГ	СТШ-252			Не производится			А-500УП	Не производится		
АС	Не производится									АД-381

Ручная дуговая сварка (РДС)

Назначение сварки	Бытовая	Промышленная		
		Монтажная	Стационарные посты	Стационарные посты для сварки высокопроизводительными электродами и резки электродами
Диапазон тока, А	0...140	70...250	70...315	70...500
Наименование оборудования	ТДС-125, ТДС-140	СТШ-250, СТШ-251, СТШ-252, ПВС-250	ВД-308, ВД-309	СТШ-500 СГД
Максимальная толщина, свариваемая за один проход без разделки кромок, мм	3	5	8	12

Полуавтоматическая сварка в среде активных защитных газов плавящимся электродом (МАГ)

Диаметр проволоки, мм	0,6; 0,8	1,0; 1,2	1,4	1,6	1,8; 2,0	2,0
Максимальный сварочный ток, А	100	200	315	400	500	630
Наименование оборудования	ПС-100	БП-200	ПС-250.1, ПС-250.2, ПС-250ВПР6, ПС-315	Не производится		БП-600
Максимальная толщина, свариваемая за один проход без разделки кромок, мм	4	6	8	10	12	14

Сварка в среде инертных газов неплавящимся электродом (МИГ)

Диаметр электрода, мм	3...4	4...6	6...7	8	
Максимальный сварочный ток, А	200	315	400	500	630
Наименование оборудования	СТШ-252	Не производится		А-500УП	Не производится

Автоматическая сварка (АС)

Назначение сварки	Сварка малых и средних толщин, оборудование специального назначения	Однодуговая сварка средних и больших толщин	Сварка больших толщин, в т. ч. многодуговая
Сварочный ток, А	< 500	500...1000	1000...2000
Наименование оборудования	Не производится		АД-381

тем, что государственная форма собственности предприятия была зафиксирована соответствующим Указом Президента Украины, что не могло не повлиять отрицательно на приток частного капитала и инвестиций со стороны.

Новые времена настоятельно требовали разработки концепции адаптации к изменившимся условиям экономической среды. В основу концепции была положена целесообразность перехода к производству серийного сварочного оборудования повышенного спроса с явным превалированием объема производства этой продукции над объемами выпуска опытных образцов техники и объемами услуг научно-технического характера. Одним из

ключевых положений концепции стала необходимость разработки и изготовления оборудования нового поколения во всем спектре потребностей экономики в видах, типах, назначении и мощности средств сварочного производства. В качестве обязательного условия успешного выполнения этой работы ставилось требование создания оборудования на единых принципах разработки, проектирования и испытаний с целью безусловного обеспечения высокой надежности и качества всего номенклатурного ряда.

Отличительными признаками продукции ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона от оборудования других производителей были выбраны:



Рис. 1. Оборудование серии «Патон»

надежность;
 обеспечение оптимальной продолжительности нагрузки в зависимости от назначения оборудования;
 облегченное возбуждение дуги;
 приборное обеспечение изделий;
 отказ от избыточных устройств (например, от датчиков и реле перегрева);
 оптимальное соотношение цены и качества продукции.

Концепция основывалась на необходимости содействия сохранению и развитию школы исследователей-разработчиков и конструкторов, придерживающихся единых взглядов на принципы выработанного базового построения конструкций, оснащения и перехода на компьютерное проектирование техники, приближения к производству, гибкой связи с производственными процессами и требованиями рынка авторов разработок. В качестве обязательного рассматривалось стремление к созданию всего ряда оборудования в едином дизайне,

Таблица 2. Основные характеристики трансформаторов для ручной, полуавтоматической и автоматической дуговой сварки серии «Патон»

Параметры	Марка							
	ТДС-125	ТДС-140	СТШ-250	СТШ-251	СТШ-252	СТШ-500 СГД	ТДФП-1250	
Напряжение сети, В	220	220	220/380	220/380	220/380	380	380	
Сварочный ток, А	80, 125	90, 120, 140	70...250	70...250	70...250	25...125, 125...600	1250 Прямоугольный	1600 Синусоидальный
Продолжительность нагрузки, %	20	20	20	40	40	60	100	
Напряжение холостого хода, В	63	64	65	65	65	63	112	
Потребляемая мощность, кВт	7,8	8	16,3	16,3	16,3	32,5	125	
Охлаждение	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Естественное	Принудительное	
Масса, кг	19	25	49	58	65	200	1500	
Примечания					Блок стабилизации горения дуги	Блок стабилизации горения дуги	Блок фазового регулирования	

Таблица 3. Основные характеристики выпрямителей для ручной и полуавтоматической дуговой сварки серии «Патон»

Параметры	Марка							
	ПС-100	ПВС-250	ПС-250	ПС-250ВР6	ПС-315	ВД-308	ВД-309	ВМГ-5000
Напряжение сети, В	220	75	380	380	380	380	380	380
Сварочный ток, А	40...100	70...210	50...320	50...320	50...100	45...125, 125...315	45...125, 125...315	50...5000
Продолжительность нагрузки, %	60	50	60	60	60	60	60	100
Напряжение холостого хода, В	40	100	40	40	40	70	96	60
Потребляемая мощность, кВт	3,3	—	16,5	16,5	15	24	24	317
Охлаждение	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Принудительное	Водяное
Масса, кг	35	12	110	115	180	170	185	1900
Вид вольт-амперной характеристики	Пологопадающая	Крутопадающая	Пологопадающая	Пологопадающая	Пологопадающая	Крутопадающая	Крутопадающая	Жесткая
Примечания		Приставка к трансформатору		Воздушно-плазменная резка до 6 мм				Обеспечивает работу до 30 постов РДС

Таблица 4. Основные характеристики полуавтоматов (п/а) и блоков подачи (б/п) для дуговой сварки серии «Патон»

Параметры	Марка					
	ПС-100	БП-200	ПС-250	ПС-250.1	ПС-315	БП-600
Максимальный сварочный ток, А	100	200	320	320	400	600
Количество роликов, шт.	2	4	4	4	4	4
Скорость подачи проволоки, м/мин	0,8...5	2...12	1...16	1...16	2...20	2...25
Диаметр сварочной проволоки, мм	0,8	0,8...1,2	0,8...1,4	0,8...1,4	0,8...1,6	1...2,5
Масса проволоки на катушке, кг	5	5	15	15	15	15
Возможность сварки порошковой проволокой	—	—	+	+	+	+
Масса, кг	8	12	22,6	125	200	21,6
Примечания	б/п	б/п	б/п	п/а	п/а	б/п

Таблица 5. Основные характеристики установки аргонодуговой сварки неплавящимся электродом

Параметры	Марка	
	СТШ-252	А-500 УП
Напряжение сети, В	220 и 380	380
Сварочный ток, А	70...260	50...500
Продолжительность нагрузки, %	40	60
Напряжение холостого хода, В	65	80
Потребляемая мощность, кВт	16,3	40
Масса, кг	65	50 (без источника)
Сварка алюминия и его сплавов	+	+
Примечания	Блок стабилизации горения дуги	Качественная сварка алюминия без травления

что должно было в итоге привести к формированию у потребителя соответствующего имиджа предприятия и способствовать закреплению его положительной репутации. Весьма существенным было решение о включении в наименование оборудования фамилии основателя института, что наряду с рекламной привлекательностью приносило и дополнительные требования к качеству, тщательности изготовления и надежности продукции.

Реализация концепции упорядочила параметрический ряд оборудования разработки ИЭС им. Е. О. Патона (табл. 1), созданного для основных

видов дуговой сварки плавлением. При этом некоторые модели не претерпели серьезных изменений (например, ВМГ-5000), часть изделий была модернизирована (СТШ-250 и ПС-250), некоторые аппараты были разработаны и освоены впервые.

К числу наиболее типичных представителей источников питания нового поколения относится выпрямитель ВД-309, в котором за счет сочетания двух крутопадающих характеристик (рис. 2) обеспечивается надежное возбуждение дуги, стабильный процесс сварки и плавная заварка кратера шва в конце процесса. ВД-309 успешно прошел



Таблица 6. Основные характеристики аппаратов для воздушно-плазменной резки

Параметры	Марка			
	«Киев-1»	«Патон ППР-200»	«Киев-3»	«Киев-4»
Напряжение сети, В	380	380	380	380
Рабочий ток, А	45	200	300	315
Продолжительность нагрузки, %	25	60	100	100
Напряжение холостого хода, В	140	280	300	320
Потребляемая мощность, кВт	10	60	75	77
Охлаждение плазматрона	Воздух	Вода	Вода	Вода
Масса, кг	45	300	800	900
Толщина разрезаемого металла, мм:				
сталь	6	60	80	90
медь	2	25	45	50
алюминий	5	50	60	70

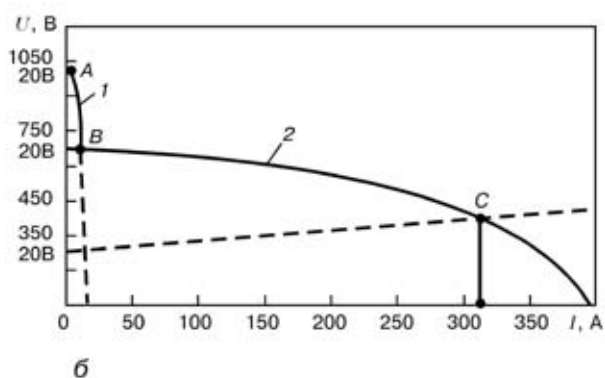


Рис. 2. Внешний вид выпрямителя ВД-309 (а); вольт-амперная характеристика вспомогательного (1) и рабочего (2) выпрямителя (б)

все испытания в экстремальных условиях металлургического производства, на монтаже трубопроводов в полевых условиях, при ответственных ремонтных работах. Характеристики оборудования, выпускаемого серийно ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона, приведены в табл. 2–6.

В последнее время завод освоил производство линий для непрерывного производства спиральношовных полимерных труб диаметром 500... 1100 мм, толщиной стенки 2... 10 мм, производительность линии до 30 м/ч. Освоено также производство

трех типов оборудования для сварки полимерных труб в полевых и цеховых условиях: установки САТ-110Р (диаметры свариваемых труб 32... 110 мм), САТ-180Г (32... 180 мм) и САТ-315Г (80... 315 мм). Выпускаются также разъемные нагревательные элементы для сварки тонкостенных полиэтиленовых оболочек и ручные экструзионные аппараты различных модификаций, применяющиеся при изготовлении фасонных элементов полимерных труб и других изделий из полимерных материалов. Достаточно емкое представление о

Таблица 7. Динамика освоения производства нового оборудования

Наименование изделия	Количество моделей				
	До 1998 г.	1998–2000 гг.		2001 г.	
		всего	в т. ч. новых моделей по сравнению с 1998 г.	всего	в т. ч. новых моделей по сравнению с 2000 г.
Трансформаторы	2	4	2	7	3
Выпрямители	6	7	3	8	2
Полуавтоматы	4	5	3	6	1
Аппараты для воздушно-плазменной резки	3	4	1	4	0
Установки аргодуговой сварки	0	1	1	2	1
Плазменные резаки	3	4	1	4	0
Газовые горелки	2	2	0	4	4
Блоки автономного охлаждения	0	1	1	2	1
Всего моделей	20	28	12	37	12
в т. ч. основного сварочного оборудования	15	21	10	27	7

проделанной на ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона работе по адаптации к новым условиям хозяйствования дает табл. 7.

В настоящее время ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона производит и реализует:

трансформаторы и выпрямители для ручной и автоматической дуговой сварки (125...5000 А);
полуавтоматы сварочные (100...600 А) для сварки сплошной и порошковой проволокой;

аппараты для воздушно-плазменной резки, упрочнения, напыления, наплавки (45...350 А);

установки аргодуговой сварки (250...600 А), блоки автономного охлаждения;

сложное электромеханическое оборудование, в том числе оборудование для многодуговой сварки труб большого диаметра с трансформаторами на 1250 А с прямоугольной формой сварочного тока (см. www.paton-ozso.kiev.ua);

сварочные агрегаты (250...500 А), в том числе на базе автомобилей, тракторов и т. д.;

полные комплекты линий по производству сварочных электродов (1...5 т в смену);

сложные работы по механической обработке габаритных деталей (на сайте Интернет);

сварочные электроды, проволоки, материалы для наплавки (проволоки, ленты, карбид вольфрама и т. д.);

оборудование для сварки полимеров: экструдеры (до 2,5 кг/ч, масса аппарата 4,8 кг), установки стыковой и угловой сварки труб (диаметр 630 мм), установки для изготовления полимерных оболочек большого диаметра (до 1200 мм), стыковой сварки листов, нагревательные элементы (разъемные) и др.;

сварочные аксессуары: сварочные горелки — ТИГ, МИГ/МАГ, ЭД, клеммы, спецодежда и т. д.;
сварочные трактора (500...2000 А) с источниками питания;

изготовление сварных металлоконструкций любых категорий сложности и любых габаритов;

оборудование для электрошлаковых технологий (в том числе источники питания до 10000 А);

инверторная сварочная техника (включая силовую электронику и пульсирующие системы).

В ближайшее время ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона начнет выпуск чопперных приставок и инверторных источников.

Номенклатура выпускаемой продукции, объемы ее производства и реализации в 2000–2002 гг. позволяют сделать вывод о преодолении заводом кризисной ситуации.

Peculiarities of development of the Pilot Plant of the E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine under conditions of transition to the market economy in Ukraine are considered. Systems and ranges of welding equipment pieces manufactured currently are presented.

«Сварочные чтения. Теория и практика.»

17–19 июня 2003 г.

Конференция посвящена 300-летию Санкт-Петербурга
и 50-летию Института сварки России (ВНИИЭСО)

На конференции будут представлены доклады, посвященные юбилейным датам, а также отражающие современное состояние и перспективы развития сварочного производства по следующим основным темам:

- традиционные и новые технологические процессы сварки
- сварочное оборудование
- сварочные материалы
- сертификация и стандартизация в области сварки
- контроль качества сварных конструкций. Диагностика ресурса
- экология сварочного производства
- аттестация сварщиков
- информационное обеспечение потребителей

Материалы конференции будут изданы в виде юбилейного сборника. Доклады и публикации в сборник просьба представлять до 1 апреля 2003 г. (объемом не более 3-х страниц). Приглашенный билет на конференцию будет выслан на основании заявки или представленных материалов для доклада или публикации.

Материалы следует направлять по адресу:

194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 10
Институт сварки России,
ученому секретарю — Тихоновой Ларисе Борисовне.
Факс/тел.: (812) 394-14-61, 245-40-95, тел.: (812) 245-03-08.
E-mail: science@rusweld.spb.ru



ДЕТОНАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС «ПЕРУН-С» ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

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

Разработаны основные узлы и создан промышленный образец автоматического детонационного комплекса для нанесения покрытий с расширенными технологическими возможностями, которые позволяют его успешно использовать для решения как научно-исследовательских, так и производственных задач.

Ключевые слова: детонационное оборудование, технология нанесения, стволы, дозаторы, порошкообразный материал, системы контроля, энергетические параметры, импульсные потоки, свойства покрытия

В настоящее время наметилась тенденция к возобновлению работы промышленных отраслей Украины и стран СНГ и постепенному наращиванию их производственных мощностей. Это, безусловно, повлечет за собой практическое применение различных способов нанесения покрытий для защиты поверхностей деталей, работающих в жестких условиях интенсивного износа и коррозии.

В этом аспекте детонационное нанесение покрытий остается одним из наиболее эффективных способов газотермического напыления [1–5]. С целью обеспечения высокого качества получаемых покрытий для него требуется соответствующее высокопроизводительное оборудование.

В настоящей статье освещены конструкторские решения по созданию основных узлов детонационного оборудования «Перун-С» и комплекса в целом, способствующие не только улучшению свойств напыляемых покрытий, но и расширению технологических возможностей процесса.

Автоматический детонационный комплекс «Перун-С» является совместной разработкой сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона и Института сверхтвердых материалов (ИСМ) НАН Украины. В ней учтен научный и практический опыт создания и использования детонационных комплексов «АДК-1» и «Прометей», реализованы новые научно-технические решения. По разработанной конструкторской документации организован их опытно-промышленный выпуск на НПО «Оргтехавтоматизация» (г. Симферополь)*.

Техническая характеристика АДК «Перун-С»

Скорострельность (частота следования рабочих циклов), Гц	3,3; 6,6
Длина основного ствола, мм	590
Длина дополнительной секции, мм	500
Площадь покрытия за цикл, мм ²	320
Толщина покрытия за цикл, мкм	3... 12

* Автор выражает признательность сотрудникам, участвовавшим в создании АДК «Перун-С», В. С. Клименко, В. С. Скадину, А. И. Кильдию, А. А. Полонскому, В. Н. Колесниченко, Ю. Н. Ильченко, А. А. Мозжухину, а также руководству Института электросварки им. Е. О. Патона, Института сверхтвердых материалов и НПО «Оргтехавтоматизация» за оказанную помощь в организации работ по выпуску опытно-промышленного оборудования и внедрению процесса в производство.

Коэффициент использования порошка, %	40... 60
Расход рабочих газов, м ³ /ч:	
ацетилен	1,0... 1,2
пропан-бутан	0,9... 1,1
водород	3,2... 3,6
кислород	2,0... 2,4
азот	4,6... 8,2
сжатый воздух	4,6... 5,2
Пределы перемещения устройства нанесения покрытий, м:	
вправо-влево	1,5
вперед-назад	0,85
вверх-вниз	0,20
Потребляемая мощность, кВт	2
Напряжение питания, В	220; 380
Частота, Гц	50

Внешний вид комплекса «Перун-С» показан на рис. 1.

В состав комплекса входят устройство для абразивной обработки и нанесения покрытий (пушка), газораспределительный пульт, устройство перемещения (манипулятор) пушки, блоки управления пушкой и манипулятором, устройство контроля нанесения покрытий. Для размещения указанного оборудования с целью его промышленной эксплуатации необходим звукоизолированный бокс (площадь не менее 15 м²), снабженный средствами принудительной вентиляции, и операторская (8 м²), сообщающаяся с боксом и имеющая смотровое окно в него. Управление технологическим процессом осуществляется дистанционно из операторской.

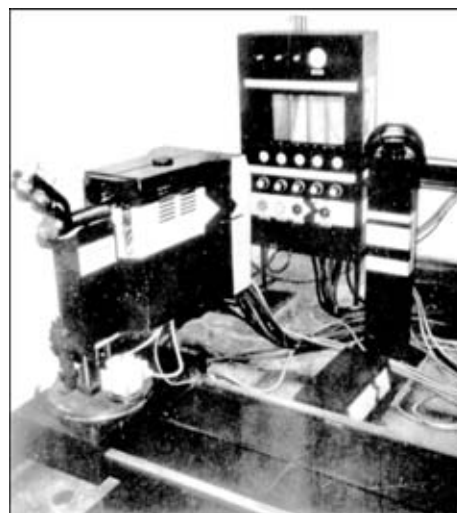


Рис. 1. Внешний вид АДК «Перун-С»

Работа устройства нанесения покрытий осуществляется по способу, отличающемуся от ранее используемого тем, что рабочие газы, например, кислород и ацетилен, подаются в камеру сгорания в виде смеси непрерывно в стационарном режиме истечения, а периодичность процесса с отсутствием контакта горючей газовой смеси с продуктами детонации достигают посредством периодической подачи нейтрального газа (азота, воздуха) в промежутках между подачей порошкообразного материала и воспламенением газовой смеси. При этом в результате превышения в 2,5... 3,0 раза давления азота продувки по сравнению с давлением подачи рабочих газов происходит запираание последних.

В этом случае хотя и сохраняется цикличность процесса, но на каждый цикл поступает уже готовая порция взрывчатой смеси с заданной концентрацией ингредиентов, что позволяет повысить качество покрытий за счет однородности газовой смеси по объему [5].

Ствол. Одним из основных и наиболее важных элементов детонационных установок является ствол (взрывная камера) [3, 5], в котором осуществляется перемешивание взрывчатой смеси с порошком напыляемого материала, протекает процесс детонации и формируется высокоскоростной поток продуктов взрыва со взвешенными в них частицами напыляемого материала.

Ствол должен обеспечивать требуемый уровень энергетических параметров импульсного потока продуктов сгорания, достаточный для нагрева и ускорения оптимальной дозы порошка при наиболее эффективном использовании выделяемой при сгорании горючей смеси энергии.

Ранее применяемые стволы имели длину 1300... 2500 мм [3, 6, 7]. Впервые в практике использования детонационного напыления длина ствола была уменьшена до 590 мм. Это позволило снизить расход рабочих компонентов и при неизменном начальном давлении подачи их в ствол увеличить скорострельность, тем самым повысив производительность процесса напыления.

Для управления степенью нагрева частиц ствола сделан секционным. Удлинение основного ствола до 1100 мм происходит посредством установки добавочной секции.

Дозирующее устройство. В установке использован дозатор с импульсной осевой подачей напыляемого материала. Дозаторы такого типа, как правило, имеют ограниченный объем бункера, поскольку вдуваемая доза порошка в ствол находится в прямой зависимости от уровня порошка в бункере. С его понижением уменьшается и вдуваемая доза порошка [8]. Это требует постоянной досыпки порошка в дозатор. Разработанная система поддува (увеличение давления азота на транспортировку порошка по мере выработки его из бункера) позволила несколько стабилизировать дозу и увеличить продолжительность работы установки до дозаправки дозатора, но повлекла за собой частичное увеличение расхода азота и, как следствие, ухудшение свойств покрытий.

В конструкции дозатора, используемого в АДК «Перун-С» (рис. 2), удалось устранить указанный недостаток.

Разработанный дозатор состоит из цилиндрического стакана 1, который закрывается крышкой 2, связанной с внутренним стаканом 7. Две скрепленные резиновые прокладки 8, 9 образуют подвижное днище корпуса. Снизу дозатор прижимается пневмоцилиндром к крышке 3 узла установки питателей. В крышке имеется три штуцера 4–6. Через штуцер 6 подается транспортирующий газ, который захватывает порошок, через штуцер 5 — газопорошковая смесь поступает в ствол. Для поддержания постоянного уровня порошка в дозаторе с целью обеспечения стабильной плотности газопорошковой смеси в процессе напыления предусмотрен подъем днища корпуса по мере расхода порошка. Это достигается путем подачи сжатого воздуха через штуцер 4 в полость между наружным стаканом и днищем. Давление воздуха регулируется распределителями пневмоблока, который управляется от системы контроля наличия порошка в продуктах детонации.

Объем одного дозатора обеспечивает стабильную подачу порошка ВК15, например, в течение 2 ч непрерывной работы установки со скорострельностью 3,3 Гц.

Системы оперативной диагностики технологического процесса. Оценка качества покрытий, получаемых способами высокотемпературного напыления, в настоящее время осуществляется путем испытания таких же покрытий на образцах-свидетелях. Надежные средства неразрушающего контроля качества покрытий, нанесенных на натурные изделия, пока отсутствуют. Поэтому к детонацион-

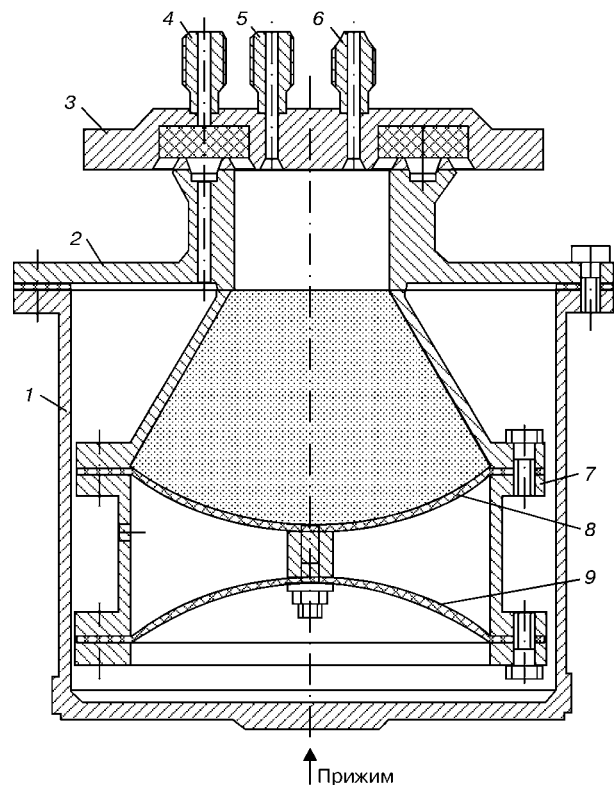


Рис. 2. Конструкция дозатора с подвижным днищем корпуса (обозначения 1–9 см. в тексте)



ным установкам предъявляются повышенные требования в отношении стабильности их работы для гарантирования идентичности свойств покрытий на изделиях. Под стабильностью работы установки подразумевается постоянство энергетических характеристик частиц напыляемого материала при формировании слоев покрытия.

Опыт эксплуатации детонационного оборудования свидетельствует о том, что возможны случаи, когда показания контрольных приборов, установленных в газовых магистралях, изменяются в допустимых пределах, а технология процесса и условия формирования покрытий резко нарушаются. Чаще всего причиной таких нарушений является изменение дозы порошка, подаваемого в ствол перед взрывом газовой смеси. Это происходит либо в связи с уменьшением сечения канала магистрали, соединяющей дозатор со стволом (из-за налипания на стенках канала спекшихся частиц порошка), либо по причине нарушения герметичности этой магистрали, либо в связи с уменьшением количества порошка в бункере дозатора.

Для быстрого и своевременного выявления нарушений технологии напыления покрытий создано устройство, контролирующее параметры импульсного металлизационного потока [9].

Устройство контроля предназначено для визуальной регистрации (на основании показаний измерительного прибора) наличия или отсутствия порошка напыляемого материала в продуктах детонации, истекающих из ствола установки после инициирования взрыва. Оно позволяет также (после его предварительной тарировки) определить количество порошка, содержащегося в продуктах детонации. Для этого измерительный прибор тарируется либо в массовых долях порошка, либо по толщине покрытия, формируемого за один цикл.

Принцип действия устройства основан на явлении увеличения интенсивности светового излучения от высокотемпературного потока продуктов детонации при наличии в нем нагретых частиц порошка напыляемого материала. Установлено, что интенсивность светового излучения возрастает пропорционально количеству содержащегося в продуктах детонации порошка.

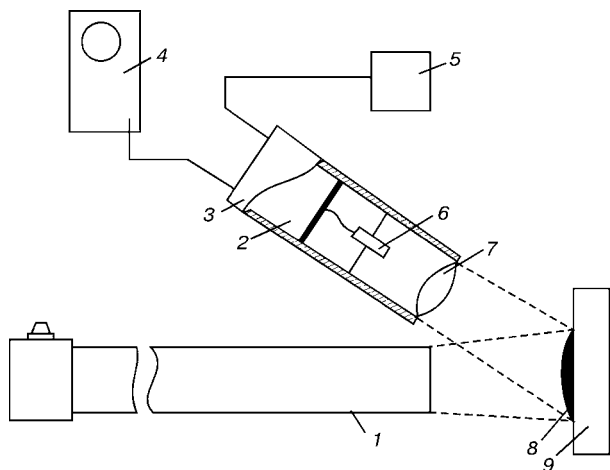


Рис. 3. Схема прибора для обнаружения скрытых дефектов в слое покрытия при напылении (обозначения 1–9 см. в тексте)

Устройство контроля наличия порошка в продуктах сгорания через свою систему управления может влиять на работу исполнительных органов детонационной установки.

В случае отсутствия частиц порошка в продуктах детонации, а также при «осечке», т. е. пропуске выстрела из-за невоспламенения взрывчатой смеси в камере, датчик цепи обратной связи подает сигнал на блок управления, и установка выключается.

Установка при единичном пропуске может и не выключаться, а следующий непосредственно за пропуском выстрел, содержащий увеличенную дозу порошка, попадает в защитную шторку, перекрывающую в этот момент поверхность напыляемого изделия, что обеспечивает стабильное качество напыляемого покрытия.

Однако возможность контроля интенсивности излучения металлизационного потока не всегда является гарантией формирования качественного покрытия. Например, вследствие некачественных очистки или абразивной обработки участка поверхности основы на нем может произойти отслоение напыленного покрытия. Данный дефект может быть обнаружен сразу после нанесения покрытий путем внешнего осмотра с применением лупы или при шлифовке.

В процессе разработки комплекса «Перун-С» предложен способ и разработано устройство для обнаружения скрытых дефектов площадью более $0,2 \text{ см}^2$ непосредственно в процессе нанесения детонационных покрытий.

При ударе о подложку нагретых до температуры плавления частиц порошка напыляемого материала происходит их быстрая деформация (в течение $0,1 \dots 0,3 \text{ мкс}$) и охлаждение [6, 7]. Одновременно протекают физико-химические процессы, способствующие сцеплению отдельных частиц между собой и подложкой. Скрытые макродефекты (типа отслоений) образуются сразу после формирования покрытия и его охлаждения. В связи с изменением в зоне дефекта условий передачи в подложку тепла при воздействии на покрытие высокотемпературного газового или металлизационного потока могут обнаруживаться эффекты, регистрация которых позволяет выявить в нем отслоения и крупные поры. Теоретическое описание этих эффектов базируется на результатах расчетов температуры поверхности $T_{\text{п}}$, деформируемых частиц, закрепляющихся на подложке в процессе напыления.

Анализ результатов расчетов $T_{\text{п}}$ при напылении никеля и оксида алюминия позволил сделать следующие выводы [10]:

при наличии макродефекта между верхним слоем покрытия и деталью (с покрытием или без него) температура поверхности нового напыленного слоя сразу после его формирования гораздо выше температуры на поверхности бездефектного участка покрытия;

по мере наращивания толщины покрытия над макродефектом температура его поверхности после напыления новых слоев уменьшается.

Схема работы прибора, осуществляющего такой контроль, изображена на рис. 3. Перед срезом

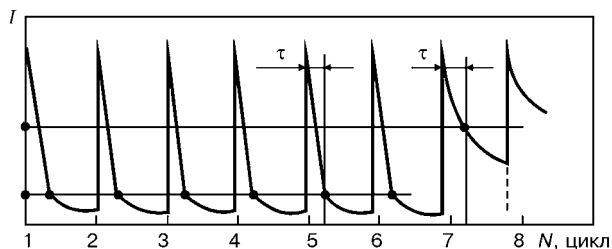


Рис. 4. График изменения интенсивности излучения I поверхности слоя покрытия в случае наличия и отсутствия в нем дефектов; N — количество циклов

ствола 1 детонационной установки помещают деталь 9, на поверхность которой необходимо нанести покрытие 8. На стволе 1 закрепляют фотодатчик 3, содержащий оптическую систему 7, фотоэлемент 6 и электрически связанный с ним предварительный усилитель 2. Фотодатчик 3 располагают таким образом, чтобы его оптическая ось была направлена в середину пятна покрытия 8. Предварительный усилитель 2 подключают к источнику 5 постоянного напряжения, а выход усилителя 2 — к входу осциллографа 4.

При работе детонационной установки из ствола 1 периодически истекает высокотемпературный поток продуктов детонации, в котором содержатся разогретые (в оптимальном случае до предплавильной температуры) частицы порошка напыляемого материала. В момент формирования слоя детонационного покрытия 8 вследствие удара нагретых частиц порошка о поверхность детали 9 интенсивность лучеиспускания или яркость пятна формируемого покрытия 8 сначала велика. Об этом свидетельствуют пики (рис. 4) сигналов от фотодатчика 3, посредством которых на осциллографе оценивают температуру поверхности пятна покрытия 8.

За время между двумя очередными выстрелами детонационной установки (300...600 мс) температура поверхности покрытия 8 снижается практически до температуры детали 9, что также регистрируется на экране осциллографа 4 благодаря сигналам от фотодатчика 3, амплитуды которых уменьшаются за это время фактически до нуля. Быстрое снижение температуры поверхности происходит вследствие интенсивной передачи тепла в объем детали 9 благодаря хорошему контакту с ней всей плоскости напыленного слоя покрытия 8.

В случае образования под напыленным слоем макродефекта (например, трещины) скорость охлаждения поверхности покрытия 8 резко падает, т. е. покрытие над дефектом гораздо дольше остается нагретым из-за плохой передачи тепла через трещину, факт появления микродефекта регистрируется на осциллографе 4 по относительноному увеличению амплитуды сигнала, поступающего от фотодатчика 3 через 20...40 мс после выстрела, которым было нанесено дефектное покрытие. Уровень этого сигнала уже не уменьшается до нуля, как в случае формирования бездефектных слоев покрытия при предыдущих выстрелах, а падает гораздо медленнее. Это происходит потому, что покрытие, под которым имеется трещина, значительно дольше излучает свет.

Система управления и регулирования технологическим процессом напыления. Пульт управления АДК «Перун-С» состоит из трех независимых блоков, собранных в одном корпусе:

устройства позиционирования установки, в котором размещены все элементы управления и контроля перемещения на манипуляторе, задания режима и скорости перемещения;

блока управления, где размещаются все элементы управления работой установки; с его помощью задаются цикличность работы исполнительных механизмов устройства и режим работы питателей, поддерживается уровень порошка в них в процессе напыления, фиксируется количество рабочих циклов при подаче порошка из первого и второго питателей;

блока контроля за качеством и составом металлургического потока, его массой и качеством контроля, а также температурой ствола.

Для выдачи сигналов на срабатывание исполнительных органов установки использован момент замыкания соответствующего геркона вращающимся магнитом. Такое конструкторское решение позволило устранить недостатки электромеханического командоаппарата [6] и обеспечить гибкую систему изменения временных интервалов их срабатывания относительно друг друга.

Газораспределительный пульт подачи рабочих сред. Характерной особенностью многоканального пульта является наличие в каждой из магистралей рабочих сред высокоточных регуляторов перепада давления, стабилизирующих выходные параметры газовых потоков независимо от изменения таковых на их входе и падение давления в баллонах.

Использование фторопластового поплавка в ротаметре для подачи газа в дозатор и прямое дросселирование его потока обеспечивают высокую степень точности подачи напыляемого порошкового материала (даже для плохосыпучих). При этом повышается надежность работы всего комплекса в целом.

Манипулятор перемещения установки. Трехординатный манипулятор перемещения устройства напыления позволяет напылять плоские поверхности любого размера. Для напыления тел вращения необходима доукомплектация вращателем. Удачным для практического использования является вращатель сварочный универсальный модели 1111020 [11] с плавной бесступенчатой регулировкой частоты вращения в пределах 0,1...5,0 об/мин. Его максимальная грузоподъемность составляет 100 кг.

Принципиальные технологические возможности АДК «Перун-С». Эксплуатация разработанного оборудования возможна при использовании различных рабочих газов (в качестве горючего, кроме ацетилена, может применяться пропан-бутан либо водород, а для транспортирования порошка, продувки змеевика и ствола, разбавления взрывчатой смеси допустимо использование как азота, так и сжатого воздуха).

Классический вариант работы детонационных установок основан на применении в качестве горючего газа ацетилена, поскольку его смеси с кис-



Наименование деталей	Место проведения напыления
Магнитозаписывающие устройства	НПО «Маяк», г. Киев, Украина
Штоки гидроцилиндров, подшипниковые узлы, поршневые пальцы, несущие шейки вала, коленчатые валы судовых двигателей	ПСО «Югрыбсудоремонт», г. Севастополь, Украина
Ножи промышленных швейных машин, высоковольтные вводы источников, торцевые уплотнения электроклапанов	НПО «Оргтехавтоматизация», г. Симферополь, Украина
Контактные поверхности деталей и узлов авиационной техники (бандажные полки компрессорных лопаток, сегменты туннельного вентилятора ГТД, топливные форсунки)	Казанский филиал НИИД, г. Казань, РФ
Пильные диски для резки горячего проката, гидроштоки, пресс-формы для литья под давлением	Витковицкий металлургический комбинат, г. Острава, Словакия
Узлы нефтеперекачивающих насосов (эмпиерные втулки, подшипники скольжения, лабиринтные уплотнения)	Управление нефтепровода «Дружба», г. Ровно, Украина
Детали сельскохозяйственной техники	Сельхозакадемия, г. Каунас, Литва
Корпуса и роторы водородного насоса, плиты рассеивочной машины, валы насосов	Фирма «СУКТЕК», г. Куопио, Финляндия

лородом отличаются высокой скоростью детонации, сильным динамическим напором газового потока и его температуры за фронтом детонационной волны. Кроме этого, в них практически отсутствует преддетонационный участок.

При использовании ацетилено-кислородных смесей необходимо соблюдение повышенных требований техники безопасности как к работе на оборудовании, так и к производственному участку напыления в целом. Все это усложняет конструкции из-за необходимости введения в их состав систем и узлов защиты от обратных ударов.

Анализ литературных данных [12] и выполненные расчеты свидетельствуют о том, что динамические характеристики газового потока за фронтом детонации в стехиометрических ацетиленово-кислородных, пропан-бутановых и метан-кислородных смесях практически одинаковы, а у пропан-бутана с кислородом даже выше на 5... 10%. Достижение практических результатов и создание соответствующего оборудования Институтом проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, ИЭС, ИСМ НАН Украины и Политехническим институтом (г. Калинин, РФ) стало возможным благодаря теоретическим расчетам сотрудников Института гидродинамики им. М. А. Лавреньева СО РАН (г. Новосибирск) под руководством Т. П. Гавриленко [13].

При решении вопроса об использовании в качестве горючего газа водорода внимание разработчиков было сосредоточено на замене газобаллонного обеспечения газообеспечением от электролизера. По этому принципу разработана малогабаритная установка повышенной автономности — «Перун-М». В ее общем корпусе собраны воедино устройство для абразивной обработки и нанесения покрытий, звукоизолирующая камера, устройство перемещения обрабатываемых изделий, газогенератор (электролизер), блок управления и контроля. Площадь, требуемая для ее размещения, составляет около 5 м², для функционирования необходима только электроэнергия. Организация промышленного выпуска электролизеров с повышенной производительностью в сочетании с применением компрессора позволит решить проблему газообеспечения водородом и кислородом детона-

ционной установки «Перун-С» и ее нормального функционирования в производственных условиях, где затруднено газобаллонное обеспечение.

Блок управления работой установки позволяет производить напыление при скорострельности 6,6 и 3,3 Гц и изменять местонахождение частиц напыляемого материала в канале ствола относительно момента инициирования рабочей смеси. Это дает возможность варьировать в широких пределах их скорость и степень нагрева в момент формирования слоя покрытия; влиять на степень их окисления и изменение химического и фазового составов.

Оснащение установки двумя независимо управляемыми порошковыми дозаторами позволяет переходить с режима детонационно-абразивной обработки на режим нанесения покрытий без выключения установки; осуществлять абразивную обработку и напыление в одном цикле; напылять двухкомпонентное покрытие без предварительного приготовления смесей и регулирования их процентного содержания; изменять состав рабочей смеси по длине ствола (один из дозаторов подает газ без порошка); напылять размерное покрытие или покрытия с минимальным припуском на обработку на больших поверхностях благодаря стабильной работе дозатора (изменение дозы вдуваемого порошка в процессе работы составляет не более 8 %).

Конструкция секционного ствола позволяет устанавливать специальные насадки для изменения профиля пятна напыления, перераспределения концентрации напыляемых частиц в потоке по сечению ствола, напыления на внутренние поверхности труб.

В таблице приведен перечень основной номенклатуры изделий, упрочненных детонационным напылением, а также организаций, создавших для этих целей производственные участки с использованием АДК «Перун-С».

Разработанное оборудование используется при выполнении научно-исследовательских работ в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев), ИСМ НАН Украины (г. Киев), Институте термоэлектрики НАН Украины (г. Черновцы), Техническом университете (г. Таллинн, Эстония), Университете технологии (г. Тампере, Финляндия).

Специалисты ИЭС и ИСМ оказывали техническую помощь в создании производственного участка для напыления, монтаже и наладке оборудования, обучении персонала работе на оборудовании, разработке и освоении технологии напыления.

Эксплуатация данного оборудования в течение десяти лет подтвердила эффективность реализованных конструкторских и технологических решений (особенно это касается систем контроля и дозирующего устройства).

Благодаря нанесению износостойких и коррозионностойких покрытий срок службы изделий увеличивается в 2,5...10,0 раз.

Перечень основных материалов, применяемых для детонационного напыления, и свойства покрытий из них подробно освещены в работах [1, 5, 6, 14].

Выводы

1. Доказана возможность использования при детонационном напылении покрытий в качестве горючего газа пропан-бутана, что упростило конструкцию установок и снизило требования техники безопасности к производственному участку.

2. Использование устройства контроля технологического процесса позволило объективно оценивать стабильность работы порошкового дозатора путем регистрации количества порошка в высокотемпературном импульсном потоке, прогнозировать толщину или массу нанесенного покрытия, а также контролировать качество формируемых слоев, выявляя скрытые макродефекты.

3. Впервые предложен способ и разработано устройство для проведения в одном цикле одновременно абразивной обработки напыляемой поверхности и напыления на нее слоя покрытия, что повысило производительность процесса и снизило себестоимость.

4. Использование манипулятора перемещения установки в сочетании с вращателем дало возможность напылять изделия практически любых размеров с простым и сложным профилем.

5. Длительная эксплуатация автоматического детонационного комплекса «Перун-С» в различных производственных условиях подтвердила, что он является высокопроизводительным стационарным оборудованием. Промышленное использование особенно эффективно при массовом или крупносерий-

ном производстве изделий с покрытиями, разнообразном перечне номенклатуры деталей. Технологические возможности комплекса обеспечили широкие перспективы для проведения научно-исследовательских работ по дальнейшему совершенствованию детонационного оборудования и технологии; нанесению различных композиций; исследованию способа их подготовки и характера распределения в них компонентов на свойства композитного покрытия.

1. *Тюрин Ю. Н.* Совершенствование оборудования и технологий детонационного нанесения покрытий // Автомат. сварка. — 1999. — № 5. — С. 13–18.
2. *Астахов Е. А., Борисов Ю. С., Кильдий А. И.* Промышленная технология и оборудование для детонационного нанесения покрытий: Тез. междунар. конф. «Сварка и родственные технологии в XXI век». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 7.
3. *Харламов Ю. А.* Стволы установок для детонационного напыления покрытий // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 17–21.
4. *Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю.* Новые материалы и технологии // Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных условиях. — Новосибирск: Наука, 1992. — С. 2–15.
5. *Детонационное* напыление упрочняющих покрытий и пути его развития / К. А. Ющенко, Е. А. Астахов, В. С. Клименко, Ю. С. Борисов // Новые процессы и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 26–32.
6. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
7. *Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.* Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
8. *Дозирующие* устройства для детонационного напыления / Е. А. Астахов, А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, В. И. Пашенко // Порошк. металлургия. — 1979. — № 3. — С. 75–78.
9. *Рефлексные* детонационные установки / В. С. Клименко, В. Г. Скадин, Е. А. Астахов, И. А. Зверев // Детонационные покрытия. — Калинин, 1980. — С. 35–42.
10. *Клименко В. С., Борисова А. Л., Скадин В. Г.* Технология детонационного напыления покрытий / АН УССР. Ин-т пробл. материаловедения. — Препр. — Киев, 1983. — 61 с.
11. *Каталог* механического сварочного оборудования. — М.: Изд. ВНИИТЭМР, 1986. — 62 с.
12. *Двукрав* Б. Н. Термогазодинамические параметры детонационного напыления // Порошк. металлургия. — 1976. — № 2. — С. 62–65.
13. *Вопросы* использования детонации в технологических процессах // Сб. науч. тр. Института гидродинамики СО АН СССР. — Новосибирск, 1986. — 141 с.
14. *Астахов Е. А., Филитов Д. Т.* Детонационное напыление для восстановления и упрочнения деталей судоремонтного производства. — Киев: О-во «Знания» УССР, 1988. — 19 с.

Main sub-assemblies are designed and an industrial prototype of automatic detonation complex was manufactured for coating deposition with wide technological capabilities, which allow its successful use for the solution both of research and production problems.

Поступила в редакцию 17.07.2002,
в окончательном варианте 08.11.2002



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ В УКРАИНЕ

В. Я. КОНОНЕНКО, канд. техн. наук («Экотехнология», г. Киев)

Проведен анализ состояния подводной сварки и резки в Украине. Установлено, что основным способом подводной сварки в настоящее время является мокрая сварка покрытыми электродами. Практически все металлоконструкции под водой в Украине разрезаются с применением электрокислородной резки трубчатыми электродами. Другие способы подводной резки за последнее время не использовались.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, резка порошковой проволокой, электрокислородная резка, покрытые электроды, порошковая проволока, экзотермические электроды

Подводную сварку и резку в бывшем СССР начали применять с середины 1930-х гг. [1] при ремонте подводных трубопроводов, а также при подъеме и восстановлении кораблей, получивших боевые и навигационные повреждения. Основным заказчиком на разработку этих технологических процессов и оборудования являлось Министерство обороны бывшего СССР. Работами в этом направлении занимались несколько организаций. В 1967 г. на базе ИЭС им. Е. О. Патона была сформирована группа, трансформировавшаяся затем в специализированную лабораторию по исследованию и разработке электродных материалов, технологических процессов и оборудования для различных способов сварки и резки под водой.

Сварка под водой покрытыми электродами.

В Украине сварку под водой длительное время выполняли с использованием покрытых электродов марок ЛПС-4, ЛПС-5, ЛПС-5, ЭПС-5, ЭПС-35, ЭПО-55, ЭПС-52, ЭПС-А и др. [2-4], разработанных в 1940-1950-е гг. Основным изготовителем был «28 военный завод» в г. Ломоносове. Ряд электродов изготавливали сами исполнители подводно-технических работ. Сварка под водой указанными электродами характеризовалась неустойчивым горением дуги. Валики получались высокими с крупночешуйчатой поверхностью, отделимость шлаковой корки затруднялась. При сварке многопроходного сварного соединения установлено ухудшение формирования второго и последующих швов.

Наиболее удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами отличались электроды марки ЭПС-52. Механические свойства соединений, полученных при сварке под водой этими электродами, соответствовали таковым, выполненным на воздухе электродами типа ЭЗ4. В настоящее время выпуск электродов ЭПС-52 на предприятии «28 военный завод» возобновлен. Электроды марки ЭПС-А предназначены для сварки под водой корпусных сталей повышенной прочности типа АК. Удовлетворительные сварочно-технологические свойства швов обеспечивались только при выполнении сварки в нижнем и вертикальном положениях. Металл, наплавленный этими электродами, имел глубоководноаустенитную структуру. Однако электроды ЭПС-А не выпускаются уже более десяти лет.

Мокрая сварка под водой покрытыми электродами имеет свои положительные и отрицательные стороны. К положительным можно отнести следующее:

- высокую мобильность процесса;
 - возможность использования широко распространенных передвижных сварочных агрегатов с автономным приводом;
 - небольшую массу и размеры оборудования, идущего под воду;
 - большую защищенность капли расплавленного металла за счет козырька, образующегося на торце электрода, чем при сварке самозащитными порошковыми проволоками;
 - возможность получения корневого шва с обратным формированием валика.
- Отрицательным является следующее:
- низкая производительность процесса;

Марка электродного материала	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ_5 , %	$KCV_{-20^\circ C}$, Дж/см ²	Угол загиба, град, по классу В AWS D3.6M:1999
ЭПС-52	340...400	Не нормирован	≤ 6	Не опр.	Не опр.
ЭПС-АН1	420...460	320...350	≥ 10	≥ 25	180
ЭЗ8-ЛКИ-1П	400	Не нормирован	≤ 8	Не опр.	Не опр.
ППС-АН1	400...430	300...320	14...18	≥ 10	180
ППС-АН2	400...440	300...340	13...18	≥ 25	180
ППС-АН5	420...460	320...360	13...17	≥ 25	180
ППС-ЭК1	400...460	300...360	14...18	≥ 25	180

большое количество газовой фазы и механической взвеси в реакционной зоне, затрудняющей визуальный контроль горения дуги и формирование шва;

значительный разброс прочностных и пластических показателей металла сварных соединений в зависимости от глубины выполнения работ и квалификации водолаза-сварщика.

В настоящее время на рынке сварочных материалов в Украине появились предложения о возможной поставке электродов типа Э38-ЛКИ-1П для подводной сварки углеродистых и некоторых низколегированных сталей, разработанных в Санкт-Петербургском морском техническом университете совместно с АО «Электродный завод» [5]. Они выпускаются под заказ в АО «Электродный завод». Для проведения сварочных работ в Украине эти электроды пока не применялись.

В ИЭС им. Е. О. Патона в результате многочисленных систематических исследований была создана газшлаковая композиция, позволившая разработать новый покрытый электрод для мокрой сварки под водой во всех пространственных положениях [6, 7]. Электроды типа ЭПС-АН1 отличаются хорошими сварочно-технологическими характеристиками и предназначены для сварки под водой на глубине до 20 м ряда углеродистых и низколегированных сталей. Они обеспечивают механические свойства металла шва на уровне свойств электродного металла Э-42. По сварочно-технологическим и механическим свойствам они превосходят электроды типа Э38-ЛКИ-1П.

С помощью электродов марки ЭПС-АН1 в г. Киеве был выполнен ремонт пульпопровода под водой. Они применялись также при монтаже металлоконструкций подземных сооружений, имеющих слой воды на поверхности. С помощью этих электродов в 2001 г. была приварена протекторная защита на причальном основании для приемки нефти в районе г. Одесса. В настоящее время они выпускаются мелкими партиями под заказ в лабораторных условиях.

Следует отметить, что ряд фирм, торгующих водолазным снаряжением в Украине, предлагают электроды для сварки под водой, выпущенные различными компаниями. Эти электроды сертифицированы согласно международным стандартам. Их стоимость в 3...5 раз выше аналогичных отечественных электродов.

Мокрая механизированная подводная сварка.

В рамках работ с ВМФ была создана уникальная технология мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками [8–11]. Основным элементом технологического процесса являлась самозащитная порошковая проволока типа ППС-АН1. Ее конструкция и технологические особенности изготовления позволяли поместить проволоку в полость подающего механизма полуавтомата, заполненного водой. При этом отпала необходимость в подаче в зону горения дуги и внутреннюю полость полуавтомата защитного газа. За счет уменьшения объема газовой фазы и взвесей в реакционной зоне повысилась возможность визуально контролировать процесс горения дуги и

формирование металла шва. Такие технологические особенности позволили ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона разработать удачную конструкцию специализированного полуавтомата для работы на значительных глубинах. Две его модификации А1450 и ПШ141 прошли государственные испытания и были приняты для оснащения поисково-спасательной службы ВМФ. Их серийный выпуск был организован на Опытном заводе сварочного оборудования (ОЗСО) ИЭС им. Е. О. Патона. Кроме полуавтоматов, принятых на снабжение ВМФ, для нужд народного хозяйства выпускались полуавтоматы марки А1660 и ПШ146.

Порошковые проволоки марки ППС-АН1 и ППС-АН5 (проволока для сварки в соленой воде) для подводной сварки серийно изготавливались экспериментальным производством (ЭП) и ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона. При сварке порошковыми проволоками конструкций из сталей марок ВСтЗсп, 09Г2, 09Г2С, и 19Г в пресной и морской воде на глубине до 20 м обеспечивались механические свойства сварных соединений на уровне свойств соединений, выполненных на воздухе электродами Э-42. При сварке на больших глубинах сварочно-технологические характеристики и механические свойства металла ухудшались. С 1994 г. серийный выпуск этих проволок на ОЗСМ и в ЭП ИЭС им. Е. О. Патона был приостановлен.

С 1991 г. в лабораторных условиях ИЭС им. Е. О. Патона по техническим условиям выпускается порошковая проволока марки ППС-АН2 (модификация ППС-АН1), которая обеспечивает хорошие сварочно-технологические свойства при сварке на глубине до 20 м. Испытания проволоки ППС-АН2, проведенные в 1992 г. в США, показали, что вода, в которой происходит сварка, ухудшает пластические свойства металла сварного соединения. Механические свойства сварных соединений, получаемых при использовании этой проволоки в пресной воде, приведены в таблице.

В 1997 г. предприятие «Экотехнология» разработало самозащитную порошковую проволоку марки ППС-ЭК1 для механизированной подводной сварки на глубине до 20 м конструкций из углеродистых и низколегированных сталей типа ВСтЗсп, 09Г2 и др. Проволока серийно производится по ТУУ 14288312.003–97, имеет сертификацию УкрСЕПРО и поставляется для выполнения подводных технических работ при ремонте портовых сооружений и судов на плаву в Балтийском море и нефтедобывающих платформ в Каспийском море. Механические свойства сварных соединений приведены в таблице. Проволоку ППС-ЭК1 взамен проволоки ППС-АН1, ППС-АН5 и ППС-АН2 можно применять совместно с полуавтоматами типа А1660, А1450, ПШ141 или ПШ146 для подводной сварки.

С 1981 г. в ИЭС им. Е. О. Патона был разработан ряд макетных образцов порошковых проволок для мокрой сварки под водой низколегированных сталей повышенной прочности. В качестве оболочки использовали ленты из нержавеющей сталей с различным содержанием никеля и никелевую ленту. Макетные образцы проволок обеспечивали мокрую сварку сталей с углеродным



эквивалентом более 0,4 во всех пространственных положениях. Для автоматической сварки на больших глубинах разработаны порошковые проволоки аустенитного класса. Эксперименты, выполненные в имитационной камере, показали возможность сварки углеродистых и низколегированных сталей, а также корпусных сталей типа АК на глубине до 1000 м.

По заказу ВМФ в 1985 г. был разработан макетный образец уникальной установки А1802 для автоматической приварки судоподъемных проушин на глубоководных объектах и проведены его натурные испытания. Установка обеспечивала выполнение двусторонних многопроходных швов одновременно двумя дугами в нижнем положении. Удаление шлаковой корки после каждого прохода осуществляли многобойковым зачистным инструментом оригинальной конструкции. Для обеспечения работы установки был разработан макет глубоководного погружного источника питания УСИП. Его натурные испытания проведены с использованием установки А1802. Источник имел жесткую и падающую внешние вольт-амперные характеристики, что давало возможность выполнять автоматическую сварку порошковыми проволоками и покрытыми электродами. Оборудование и электродные материалы (порошковые проволоки аустенитного класса) были приняты государственной комиссией и одобрены к последующему внедрению. Однако отсутствие финансирования не позволило проводить дальнейшие работы в этом направлении.

Технология мокрой механизированной сварки является чрезвычайно удачным технологическим решением применительно к восстановлению практически всех видов металлоконструкций под водой. Незначительная масса оборудования, его компактность и надежность, быстрое освоение пользователями позволили выполнить большое количество работ как на территории Украины, так и за ее пределами [12–14]. В Украине с помощью механизированной подводной сварки отремонтированы подводные переходы трубопроводов через реки Днепр, Северский Донец, озеро Дондузлав, водоводы и пульпопроводы, гидротехнические сооружения при реконструкции глубоководных водозаборов в Кривом Роге (СевГОК), подняты затонувшие суда. Осуществлен уникальный ремонт подводного перехода газопровода через р. Днепр. Трубопровод был изготовлен из стали типа Х60 с толщиной стенки 22 мм, его рабочее давление составляло 7 МПа. Сварку осуществляли с использованием порошковой проволоки, обеспечивающей глубокоаустенитную структуру металла шва. В больших объемах подводную механизированную сварку применяли в 1974 г. при подъеме теплохода «Моздок», затонувшего в районе г. Одесса.

В настоящее время рынок услуг, связанных с использованием подводной механизированной сварки, сократился. С 1992 г. прекратилось финансирование работ ВМФ России. Уменьшилось количество водолазов, обучавшихся на базе ИЭС им. Е. О. Патона. Серийный выпуск полуавтоматов для подводной сварки прекращен с 1993 г. Не

выпускаются и комплектующие к ним. Новая модификация полуавтомата для подводной сварки с механическим переключением скорости подачи в настоящее время находится на стадии испытаний. Широкое внедрение этого полуавтомата маловероятно из-за его ограниченных технологических возможностей.

Механизированная подводная сварка с локальным осушением рабочей зоны. В Украине одним частным предпринимателем ведутся работы по совершенствованию технологии и оборудования для механизированной подводной сварки с местным осушением рабочей зоны. Основным элементом комплекта оборудования является закрытый газонаполненный подающий механизм с запасом проволоки для сварки и мини-камера, в которой непосредственно осуществляется дуговой процесс и формируется сварной шов. Мини-камера прижимается к свариваемому объекту самим водолазом-сварщиком. Он же включает и выключает подачу проволоки. Остальные параметры процесса регулирует оператор, располагающийся на поверхности. Оттеснение воды из реакционной зоны осуществляется углекислым газом или аргоном в смеси с кислородом. Сварку выполняют проволокой типа Св-08Г2С. Согласно информации, которой располагает автор, испытания, проведенные в г.г. Черноморское, показали достаточно высокие эксплуатационные возможности данного комплекта оборудования. Дальнейшие испытания проходили в США. При сварке под водой на глубине до 20 м ряда образцов низколегированных сталей были получены высокие механические свойства соединений, соответствующие классу А AWS D3.6M: 1999.

Механизированная подводная резка. В процессе создания порошковых проволок для сварки под водой было установлено, что ряд компонентов, вводимых в ее состав, обеспечивает более глубокое проплавление основного металла. Полученные результаты исследований легли в основу разработок специализированных порошковых проволок для разделительной подводной резки [13–16]. Эти проволоки обеспечивают эффективное плавление и окисление разрезаемого металла. Продувку полости реза для эвакуации расплавленного металла выполняли путем введения в состав шихты сердечника газообразующих компонентов. При разделительной резке порошковой проволокой возможно использование полуавтоматов для подводной сварки типа А1660 или А1450 («Нептун») и источников питания дуги, применяемых в этом же случае. Резку осуществляли на токах 300... 600 А металла толщиной до 20 мм. В случае увеличения толщины разрезаемого металла необходимо использовать проволоку большего диаметра и применить источник питания, обеспечивающий рабочий ток 900... 1000 А. Эксперименты по резке, выполненные в имитационной камере, показали, что процесс возможен и на глубине более 600 м. С увеличением глубины эффективность процесса резки несколько возрастает.

По заказу ВМФ в 1979 г. был разработан специализированный полуавтомат и палубный источник питания для резки под водой металла толщиной

до 50 мм, однако в процессе его испытаний было установлено, что водолаз быстро устает, поскольку держатель, рассчитанный на ток 1000 А, имеет значительную массу, порошковая проволока диаметром 3 мм является жесткой, а масса погружного механизма с проволокой превышает 50 кг. Широкого распространения этот комплект оборудования не нашел, но с его помощью была выполнена уникальная работа по вырезке отверстия в корпусе реакторного отсека подводной лодки [17].

Учитывая высокую эффективность процесса разделительной резки под водой порошковой проволокой и исключение применения в технологической цепочке кислорода, совершенствование оборудования продолжилось. Был разработан специализированный облегченный полуавтомат ПШ131, изготовление которого освоено ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона. Порошковые проволоки для резки выпускал серийно ОЗСМ и ЭП ИЭС им. Е. О. Патона. В настоящее время выпуск проволок для резки под водой приостановлен из-за отсутствия заказов. С помощью этой технологии был выполнен ряд работ по разделительной резке под водой судов и других металлоконструкций [15, 17–19]. Порошковые проволоки для резки также применялись при подготовке подводных металлоконструкций под сварку.

Резка под водой покрытыми электродами. Ряд работ по электродуговой резке под водой (ЭДР) выполняли с использованием покрытых электродов для сварки типа ЭПС-52. С помощью этого способа возможна резка металлов толщиной 5... 10 мм [2, 3]. Однако несмотря на низкую производительность этот процесс часто применяется благодаря простоте, дешевизне и отсутствию необходимости использовать в технологическом процессе кислород. С целью повышения производительности резки в ИЭС им. Е. О. Патона были разработаны специализированные покрытые электроды для подводной резки марки АНР-5П [20]. Для гидроизоляции электрода на поверхность обмазки нанесли слой полиэтилена. Одним электродом диаметром 4 мм можно выполнить рез длиной 120 мм на стали толщиной 10 мм. Эти показатели существенно выше, чем при использовании электродов ЭПС-52. Электроды выпускаются в лабораторных условиях ИЭС им. Е. О. Патона мелкими партиями под заказ.

Электрокислородная резка под водой. Наряду с ЭДР покрытыми электродами широкое распространение нашла электрокислородная резка (ЭКР) под водой электродами марки ЭПР-1 [2, 3], разработанными в 1950-е гг. Серийный выпуск электродов был освоен на предприятии «28 военный завод». Электроды пользовались постоянным спросом у потребителей, однако сравнительные испытания электродов ЭПР-1 и их зарубежных аналогов, проведенные в конце 1980 г., показали, что скорость резки первыми ниже. В ИЭС им. Е. О. Патона был разработан новый электрод марки АНР-Т8 и держатель для ЭКР. Гидроизоляцию обмазки осуществляют термоусадочной трубкой. Длина реза, выполняемая одним электродом на стали толщиной 20 мм, достигает 400 мм. Элек-

троды изготавливаются в лабораторных условиях ИЭС им. Е. О. Патона.

Резка под водой экзотермическими электродами. По заказу ВМФ в ИЭС им. Е. О. Патона были разработаны образцы электродов для подводной экзотермической резки. В 1991 г. электроды прошли натурные испытания в условиях Балтийского флота. Поскольку с 1992 г. работы по заказам ВМФ бывшего СССР были прекращены, организация серийного производства этих электродов не проводилась. В настоящее время в Украине эти электроды не производятся.

На основании результатов, полученных при проведении НИР совместно с ВМФ бывшего СССР, в Санкт-Петербурге было создано специализированное оборудование и организован участок по изготовлению экзотермических электродов. В настоящее время электроды выпускаются под заказ. Одновременно на предприятии «28 военный завод» организован выпуск специализированных держателей для этих электродов. Электроды и держатели пользуются ограниченным спросом у потребителей. В Украине они до настоящего времени не применяются.

В заключение следует отметить, что в настоящее время в Украине сварка под водой покрытыми электродами превалирует из-за прекращения выпуска полуавтоматов и комплектующих к ним для подводной механизированной сварки. При отсутствии капиталовложений в разработку и выпуск нового полуавтомата, спроектированного на современной элементной базе, технология мокрой механизированной сварки в ближайшее время может быть полностью утеряна для пользователя.

Основным способом разделительной резки под водой в Украине опять становится ЭКР. Этот способ полностью обеспечен электродными материалами и оборудованием отечественного производства. Способ ЭДР под водой востребован мало из-за своей низкой производительности. Способ дуговой резки под водой порошковой проволокой не применяется в связи с отсутствием специализированного оборудования.

1. Хренов К. К. Электрическая сварка и резка под водой // Сборник, посвященный семидесятилетию со дня рождения и пятидесятилетию научной деятельности Е. О. Патона. — Киев, 1946. — С. 191–225.
2. Мадатов Н. М. Подводный ремонт кораблей и судов. — М.: Воен. изд-во МО СССР, 1965. — 280 с.
3. Мадатов Н. М. Подводная сварка и резка металлов. — Л.: Судостроение, 1967. — 164 с.
4. Авилев Т. И. Некоторые вопросы металлургии сварки в воде качественными электродами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1957. — 9 с.
5. АО «Электродный завод» // Электроды сварочные (каталог). — Санкт-Петербург, 1997. — С. 24–25.
6. Грецкий Ю. Я., Максимов С. Ю. Влияние компонентов электродного покрытия на формирование металла шва при ручной сварке под водой // Автомат. сварка. — СПб, 1994. — № 7/8. — С. 15–17.
7. Грецкий Ю. Я., Максимов С. Ю. Структура и свойства соединенной низколегированных сталей при подводной мокрой сварке покрытыми электродами // Там же. — 1995. — № 5. — С. 7–11.
8. Савич И. М. Подводная сварка порошковой проволокой // Там же. — 1969. — № 19. — С. 70.
9. Савич И. М., Смолярко В. Б., Камышев М. А. Технология и оборудование для полуавтоматической подводной



- сварки металлоконструкций // Нефтепром. стр-во. — 1976. — № 1. — С. 10–11.
10. Физико-механические свойства сварных соединений, выполненных порошковой проволокой под водой / А. Е. Аснис, И. М. Савич, А. А. Гришанов, Е. В. Глухова // Автомат. сварка. — 1978. — № 5. — С. 48–51.
 11. Патон Б. Е., Савич И. М. К 100-летию сварки под водой // Там же. — 1987. — № 12. — С. 1–2.
 12. Конопенко В. Я., Грицай П. М. Мокрая механизированная сварка при ремонте корпусов судов // Морской флот. — 1994. — № 11–12. — С. 21–22.
 13. Конопенко В. Я., Рыбченков А. Г. Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов // Автомат. сварка. — 1994. — № 9/10. — С. 29–32.
 14. Конопенко В. Я., Грицай П. М., Семенкин В. И. Применение мокрой механизированной сварки при ремонте корпусов судов // Там же. — 1994. — № 12. — С. 35–38.
 15. Данченко М. Е., Савич И. М., Нефедов Ю. Н. Подводная дуговая резка порошковой проволокой // Там же. — 1988. — № 4. — С. 59–61.
 16. Данченко М. Е., Савич И. М., Нефедов Ю. Н. Влияние гидростатического давления на технологические параметры подводной дуговой резки порошковой проволокой // Там же. — 1989. — № 1. — С. 48–49.
 17. Савич И. М., Максимов С. Ю. Применение механизированной резки при подъеме подводной лодки // Там же. — 2001. — № 2. — С. 59–60.
 18. Данченко М. Е., Нефедов Ю. Н. Выбор оптимальных параметров процесса подводной резки порошковой проволокой // Там же. — 1991. — № 11. — С. 61–65.
 19. Данченко М. Е., Нефедов Ю. Н. Подводная резка порошковой проволокой с использованием сварочного полуавтомата // Там же. — 1990. — № 1. — С. 70–71.
 20. Данченко М. Е., Лаппа А. В. Подводная резка штучными электродами (Обзор) // Там же. — 1993. — № 8. — С. 35–37.

Analysis of the state-of-the-art in underwater welding and cutting in Ukraine has been conducted. As established, the main method of underwater welding now is wet welding using covered electrode. Almost all underwater structures in Ukraine are cut by oxy-electric cutting using tubular electrodes. No other underwater cutting methods have been employed lately.

Поступила в редакцию 19.07.2002



2-я Международная специализированная выставка-конгресс «Электротехнологии - 2003» (ЭЛТЕХ-2003)

Специальный раздел «Сварка и родственные технологии»
19–22 марта 2003, Санкт-Петербург

Тематические направления выставки-конгресса

Электрометаллургическое производство
Сварка, электротермия и родственные технологии
Применение газового разряда в электротехнологии
Электротехнологические установки экологического назначения
Энергосбережение при использовании электротехнологий
Порошковая металлургия
Научное и информационное обеспечение, подготовка кадров

В рамках выставки пройдет Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы и достижения в области электротехнологий»

ОАО «Ленэкспо»

199106, С.-Петербург, В.О., Большой пр. 103, 10
Тел.: (812) 321 26 31; факс (812) 321 27 22
E-mail: averkina@mail.lenexpo.ru

ООО «Элтех-Экспо»

194100, С.-Петербург, ул. Литовская
Тел./факс: (812) 245 01 02, 245 83 12
E-mail: office@rusweld.spb.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ЗАМЫКАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАМКОВ АВТОСЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

А. Н. КРИВЕНЦОВ, канд. техн. наук, **В. И. ЛЫСАК**, д-р техн. наук, **В. И. КУЗЬМИН**, канд. техн. наук,
М. А. ЯКОВЛЕВ, инж. (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Описана технология восстановления изношенных замыкающих поверхностей замков автосцепных устройств сваркой взрывом. Приведены параметры процесса сварки взрывом плакирующих пластин с замком и результаты механических и натурных испытаний отремонтированных замков.

Ключевые слова: замыкающая поверхность замка, плакирующая пластина, сварка взрывом, мягкая прослойка, контактное упрочнение, краевые несправы

Замыкающие поверхности замков, являющиеся ответственными за надежность замыкания автосцепных устройств, наиболее быстро изнашиваются. При глубине износа, достигшей предельно допустимого значения, замки ремонтируются или снимаются с эксплуатации. Согласно инструкции, утвержденной Главным управлением вагонного хозяйства МПС и Главным управлением по ремонту подвижного состава и производству запасных частей [1], разрешается лишь один способ восстановления таких поверхностей — электродуговая наплавка. К сожалению, это не всегда выполнимо, поскольку требует наличия специального оборудования, соответствующих наплавочных материалов и строгого соблюдения технологии, разработанной ВНИИЖТом. В то же время известно, что сварка взрывом может успешно конкурировать с наплавкой при восстановлении (упрочнении) частей механизмов и машин (штулок цилиндров, поршней, лемехов, различного рода направляющих и других деталей), предназначенных для работы не только в условиях высоких давлений, температур, но и в абразивной среде. Так, доказано, что при восстановлении сваркой взрывом рабочих поверхностей стальных цилиндрических и плоских деталей различного назначения сокращается цикл восстановления, расход материалов, уменьшается механическая обработка, увеличивается износостойкость [2]. В связи с этим по заказу вагонного депо Волгоградского отделения Нижне-Волжской железной дороги на кафедре сварки Волгоградского государственного технического университета были выполнены исследования по разработке технологии восстановления (плакирования) изношенных замыкающих поверхностей замков износостойкими сталями с помощью сварки взрывом. Разрабатываемая технология должна отвечать следующим требованиям:

1) гарантировать сохранность формы и восстановление геометрических размеров ремонтируемых замков автосцепок до заданных документацией, утвержденной Главным управлением вагон-

ного хозяйства МПС и Главным управлением по ремонту подвижного состава и производству запасных частей;

2) обеспечивать возможность применения при ремонте замков традиционных и композиционных износостойких материалов, способных увеличить срок их безаварийной службы в 2...3 раза по сравнению с аналогичными замками, восстановленными электродуговой наплавкой;

3) гарантировать получение надежного сварного соединения плакирующего слоя с ремонтируемым замком по всей восстанавливаемой поверхности;

4) полностью исключать возможность разрушения замков или появления в них каких-либо опасных дефектов (скрытых микротрещин, трещин, выходящих на поверхность, отколов и др.) в процессе их восстановления сваркой взрывом.

Для восстановления изношенных замыкающих поверхностей замков в качестве плакирующих элементов использовали полосы из стали 65ГС (с исходной твердостью по Бринеллю $HV\ 180$) размером 70×350 мм и толщиной от 2 до 4 мм (в зависимости от степени износа). Известно, что диапазон параметров сварки взрывом, гарантирующий получение прочного соединения стали 65ГС с другими сталями, в том числе и с теми, из которых изготавливаются замки (20ФЛ, 20ГЛ, 20ГФЛ, ГОСТ 977-75), достаточно широк. Поэтому требование 3 представлялось легко выполнимым. Сам замок устанавливался на основание из металлической дробы, которая, как известно [3], способна существенно погасить энергию, накопленную в свариваемой системе, и тем самым свести к минимуму искажение формы замка и вероятность образования в нем трещин и отколов, т.е. обеспечить выполнение требований 1 и 4. Над замыкающей поверхностью замка устанавливалась с некоторым зазором плакирующая (метаемая) пластина таким образом, когда одна из ее боковых кромок оказывалась расположенной над внутренней границей контура замыкающей поверхности замка, а другая, как и две концевые ее кромки, находилась за пределами внешней границы контура этой поверхности замка.

Это должно было способствовать значительному уменьшению (если не полному устранению) так



называемых краевых непроваров, т. е. одного из характерных дефектов сварки взрывом [3]. В первых опытах, что, впрочем, и следовало ожидать, такие дефекты на внешней границе контура замыкающей поверхности замка не наблюдались. Однако каждый раз от опыта к опыту обнаруживались неглубокие краевые непровары на внутренней границе контура замыкающей поверхности замка, что и заставило в дальнейшем внести некоторые изменения в подготовку плакирующих пластин под сварку и саму схему сварки, которые заключались в следующем. Во-первых, на одной из боковых кромок плакирующей пластины, которая при сборке системы под сварку должна была находиться над внутренней границей контура замыкающей поверхности замка, выполнялась фаска, т. е. плавно уменьшалась толщина плакирующей пластины. Это должно было компенсировать неизбежное снижение импульса давления на ее крае, обусловленное проникновением в зону образовавшихся продуктов детонации волны разгрузки со стороны боковой грани прореагировавшего заряда взрывчатого вещества (ВВ), приводящее к падению скорости метания. Во-вторых, при сборке системы под сварку в зазоре между замком и плакирующей пластиной помещалась тонкая прослойка из третьего металла — меди, позволявшей выполнять сварку на так называемом мягком режиме, поскольку диапазон параметров сварки взрывом, гарантирующий получение прочного соединения меди с любой из сталей, шире такового для пары «сталь + сталь» и к тому же смещен в сторону более низких значений v_c и v_k , где v_c — скорость соударения; v_k — скорость точки контакта. Таким образом, и это изменение в схеме сварки должно было работать на ликвидацию краевого непровара. При этом важно отметить и то, что введение медной прослойки, у которой $R_{Cu} \cong R_{Ст}$ (здесь $R_{Cu} = \rho_{Cu}c_{Cu}$, $R_{Ст} = \rho_{Ст}c_{Ст}$ — акустическая жесткость соответственно меди и стали; ρ_{Cu} , $\rho_{Ст}$ — плотность меди и стали; c_{Cu} , $c_{Ст}$ — скорость звука в меди и стали) качественно не изменяло картину ударно-волнового взаимодействия, всегда благоприятную (с позиций сохранения формирующегося соединения) при сварке материалов с одинаковыми или близкими акустическими жесткостями и не снижало зональную прочность механически неоднородного сварного соединения (см. ниже), так как принятая толщина (~ 1 мм) «мягкой» прослойки попадает в тот диапазон толщин, когда начинает действовать фактор контактного упрочнения [4]. Для сварки по этой схеме использовалось бризантное ВВ пониженной мощности со скоростью детонации $\Delta = 2500$ м/с и насыпной плотностью $\rho_0 \approx 0,9$ г/см³.

Все отремонтированные замки подвергали ультразвуковому и параметрическому контролю. Ни в одном из них не было обнаружено несплошностей в заплакированной зоне, а также искажения формы и заметных отклонений их геометрических раз-

Technology for repair of worn out closing surfaces of coupler locks by explosion welding is described. Parameters of the process of explosion welding of cladding plates to the locks and results of mechanical and full-scale tests of repaired locks are given.



Отремонтированный замок и образцы для механических испытаний, изготовленные из вырезанных частей его заплакированной зоны

меров от регламентированных упомянутой выше документацией. Помимо этого из каждой партии отремонтированных замков один отбирался для проведения механических испытаний по оценке зональной прочности плакирующего слоя (сталь 65ГС) и сварного соединения [3], которая осуществлялась путем определения сопротивляемости вдавливанию. Установлено, что твердость этого слоя, т. е. замыкающей поверхности, возросла со 180 до 250...260 НВ. Оценка прочности сварного соединения на отрыв слоев осуществлялась по результатам механических испытаний специальных образцов, которые изготавливались из элементов, вырезанных из заплакированной зоны отремонтированного замка (рисунок). Установлено, что прочность сварного соединения превосходит исходные прочностные свойства материалов замка и плакирующего слоев и составляет не менее 400 МПа.

Положительные результаты лабораторных испытаний явились основанием для проведения натурных испытаний восстановленных замков в реальных условиях их эксплуатации на железнодорожном участке Волгоград–Москва. Анализ результатов этих испытаний и их сравнение с базовыми данными позволяют предположить, что разработанная технология восстановления замыкающих поверхностей замков автосцепных устройств подвижного железнодорожного транспорта позволит увеличить сроки безаварийной службы этих узлов как минимум в 2...3 раза, а также снизить трудо- и энергозатраты на их восстановление — ремонт. Кроме того, благодаря разработанной технологии для восстановления быстроизнашивающихся поверхностей можно использовать не только традиционные, но и новые композиционные износостойкие материалы, склонные к упрочнению, что, вероятно, обеспечит еще более высокие результаты.

1. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте вагонов и контейнеров РТМ 32 ЦВ, 201-88. — М.: Транспорт, 1989. — 214 с.
2. Иवानютенко А. Эффективность наплавки и сварки взрывом. — Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1979. — 80 с.
3. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудиновский А. Д. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
4. Бакуш О. А., Шахматов М. В., Ерофеев В. В. Влияние внутренних дефектов на статическую прочность механически неоднородных сварных соединений // Автомат. сварка. — 1984. — № 11. — С. 7–11.

Поступила в редакцию 15.07.2002



УДК 621.791:658.011.54

ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ ПРИ РАЗМЕРАХ ЗАЗОРА, БЛИЗКИХ К НУЛЮ

Ф. Н. КИСЕЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, Г. А. БУТАКОВ, В. В. ДОЛИНЕНКО, кандидаты техн. наук, Е. В. ШАПОВАЛОВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен подход к построению оптической сенсорной системы для определения траектории стыка, выполняемого без разделки кромок с размером зазора, близким к нулю. Сенсор позволяет устранить ряд недостатков метода светового сечения и может служить полезным дополнением к нему.

Ключевые слова: оптический сенсор, цифровая фильтрация, отношение сигнал/шум, шероховатость поверхности, световое сечение, инфракрасный осветитель

Для решения задачи слежения за стыком при автоматической дуговой сварке разработан ряд сенсоров (электродуговые, индуктивные, тактильные, оптические и др.), принцип действия которых основан на использовании явлений различной физической природы.

Требования, предъявляемые к сенсорам в системах управления дуговой сваркой, достаточно высоки в отношении устойчивости к механическим, термическим и электромагнитным воздействиям при приемлемой цене [1].

Общая тенденция в развитии работ в области создания сенсорных систем для сварочного производства связана с построением оптических датчиков, что обусловлено их преимуществами по сравнению с другими системами с точки зрения информационной полноты [2, 3]. Оптические датчики, помимо данных о положении стыка, позволяют получить информацию о его геометрических размерах (зазор, изменение формы разделки и т. п.), а в ряде случаев измерить размеры формируемого шва и/или сварочной ванны.

Среди оптических систем, применяемых в автоматической дуговой сварке, наибольшее распространение получили сенсоры, работающие на основе метода светового сечения.

К сожалению, использование метода светового сечения при сварке хорошо подогнанных деталей без разделки кромок сильно затруднено или даже невозможно, поскольку при этом существенно возрастает вероятность ошибочного определения положения стыка, особенно если свариваемые поверхности обработаны грубо или имеют дефекты. При слежении за стыком с V-образной разделкой кромок в процессе сварки деталей из материала с высоким коэффициентом отражения (нержавеющие стали, сплавы алюминия) могут возникать паразитные переотражения на гранях разделки, что влияет на правильность определения его положения.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана оптическая система слежения за стыком в поперечном направлении для случая, когда размер зазора близок к нулю. Принцип работы системы показан на рис. 1.

Основным элементом системы является цифровая видеокамера, содержащая прибор с зарядовой связью (ПЗС-камера), обработка данных которой выполняется с помощью персонального компьютера.

Для увеличения отношения сигнал/шум в условиях сильного светового излучения дуги применен интерференционный инфракрасный фильтр, рабочая длина волны которого выбирается из следующих условий:

ПЗС-камера должна отличаться достаточной чувствительностью в диапазоне длин волн, пропускаемых инфракрасным интерференционным фильтром;

световое излучение дуги при сварке должно быть по возможности минимальным в рабочем диапазоне интерференционного инфракрасного фильтра.

Чтобы обеспечить стабильные условия для работы ПЗС-камеры достаточно осветителя, собранного из нескольких инфракрасных светодиодов (5...6 шт.). Корпус осветителя одновременно служит радиатором для охлаждения. Рассеянность освещения достигается в результате взаимного пересечения ди-

аграмм направленности излучения светодиодов, когда расстояние от осветителя до свариваемых поверхностей намного превышает размеры светодиодов. Прием информации выполняется в реальном масштабе времени. Скорость обработки изображений составляет пять кадров в секунду.

Исходное изображение, представленное массивом чисел, обрабатывается с использованием линейной или нелинейной фильтрации с тем, чтобы усилить перепады яркости. Резкие изменения (разрывы) яркости являются простейшими признаками при определении очертаний объектов. На выбор алгоритма фильтрации влияют оптические свойства поверхности деталей — шероховатость, наличие дефектов на поверхности (оксиды, царапины), коэффициент отражения и т. д.

Один из наиболее простых методов линейной фильтрации заключается в вычислении дискретных разностей, что аналогично непрерывному пространственному дифференцированию. Подчеркивание вертикальных перепадов осуществляется горизонтальным (построчным) дискретным дифференцированием. В результате формируется массив элементов

$$G(j, k) = F(j, k) - F(j, k + 1),$$

где j, k — координаты точки на изображении; $F(j, k)$ — яркость этой точки. Аналогично осуществляется подчеркивание

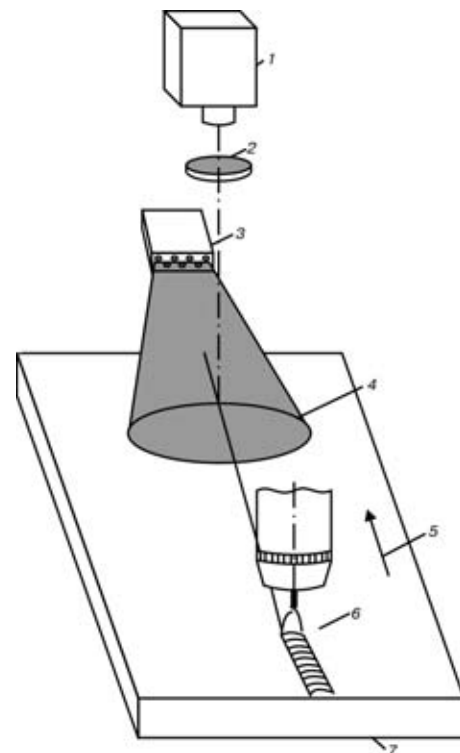


Рис. 1. Принцип работы системы слежения за стыком с зазором, близким к нулю: 1 — ПЗС-камера; 2 — интерференционный фильтр; 3 — осветитель; 4 — рассеянный свет; 5 — направление сварки; 6 — зона сварки; 7 — изделие

© Ф. Н. Киселевский, Г. А. Бутаков, В. В. Долинченко, Е. В. Шаповалов, 2003

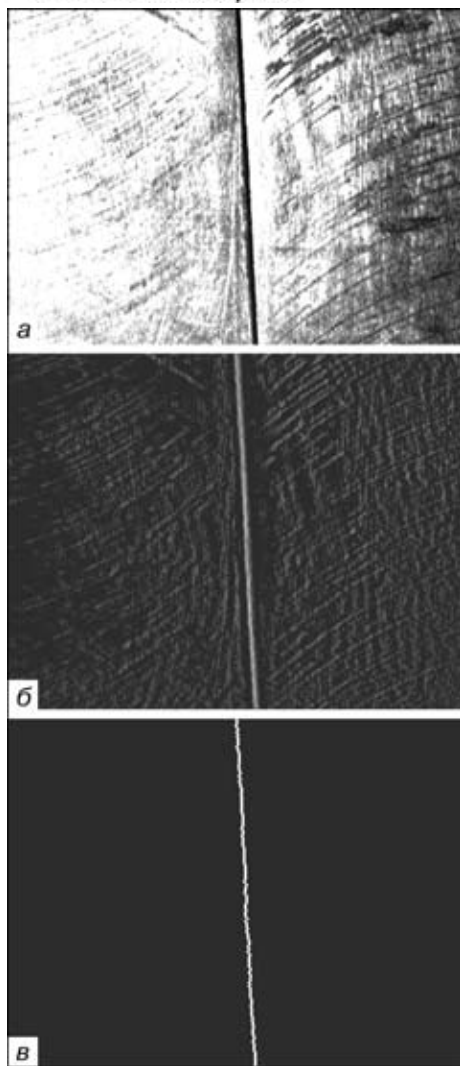


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью программы обработки изображений: *a* — исходное; *б* — после фильтрации; *в* — поиск и выделение стыка

горизонтальных перепадов. В результате получается массив элементов

$$G(j, k) = F(j, k) - F(j + 1, k).$$

Диагональное подчеркивание можно получить путем вычисления разностей уровней диагональных пар элементов изображения.

В нелинейных системах обнаружения перепадов для контрастирования перед пороговым ограничением используют нелинейные комбинации значений яркости элементов изображения. В большинстве методов ограничиваются обработкой окон 2Х2 или 3Х3 пикселя.

Для контрастирования и выделения перепадов часто используют следующую нелинейную операцию двумерного дискретного дифференцирования, предложенную в работе [4]:

$$G_R(j, k) = ([F(j, k) - F(j + 1, k + 1)]^2 + [F(j, k + 1) - F(j + 1, k)]^2)^{1/2}.$$

Часто применяют также нелинейный метод обнаружения перепадов, основанный на гомоморфной обработке изображения

[5]. Согласно этому методу, точка находится на перепаде, если логарифм от яркости этой точки превосходит среднее значение логарифмов яркостей четырех ближайших соседних элементов на некоторое фиксированное значение. Элемент контрастированного изображения определяется как

$$G(j, k) = \log |F(j, k)| - \frac{1}{4} \log(A_1) - \frac{1}{4} \log(A_3) - \frac{1}{4} \log(A_5) - \frac{1}{4} \log(A_7),$$

где A_1, A_3, A_5, A_7 — яркости четырех соседних точек относительно точки с координатами (j, k) или

$$G(j, k) = \frac{1}{4} \log \left[\frac{[F(j, k)]^4}{A_1 A_3 A_5 A_7} \right].$$

Сравнение $G(j, k)$ с верхним и нижним пороговыми значениями эквивалентно сравнению дроби в скобках выражения с видеоизмененным порогом. Поэтому не требуется точно вычислять значения логарифмов. Основное преимущество логарифмического детектора перепадов, кроме простоты вычисления, состоит в том, что он не чувствителен к мультипликативным изменениям уровня яркости [6].

Логарифмический метод контрастирования можно рассматривать как линейное контрастирование с помощью оператора Лапласа, уровни элементов которого равны логарифмам яркостей. Другие методы контрастирования также можно легко представить в виде последовательности нелинейных поэлементных операций с дальнейшим линейным контрастированием перепадов и пороговым ограничением.

Исходное изображение свариваемых поверхностей в рассеянном свете, полученное с помощью ПЗС-камеры в процессе работы сенсора, приведено на рис. 2, *a*. Изображение после предварительной фильтрации показано на рис. 2, *б*. Следующий шаг в алгоритме обработки заключается в поиске и выделении стыка. На рис. 2, *в* показан результат работы подпрограммы поиска и определения траектории стыка.

Описанный оптический сенсор, к сожалению, не позволяет получать информацию о превышении кромок или глубины разделки и точно определять расстояние от горелки до стыка. В связи с этим метод целесообразно применять как дополнение к сенсору светового сечения.

Описанный метод слежения за стыком в рассеянном свете представляется достаточно перспективным. В дополнение к другим оптическим методам он дает наилучшие результаты, особенно при слежении за стыком с зазором, близким к нулю.

1. Кёльбль В. Оптическая система направления по шву и различные примеры ее применения // Vortrag DER. — Fel-lbach, 1989. — S. 139–142.
2. The-state-of-the-art of ars welding in vessel and pipe / M. Ushio, K. Oshima, S. Asain et al. — S.l., S. a. — 16 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1585–99).
3. Lee C. W., Na S. J. A study on the influence of reflected ARC light on vision sensors for welding automation // Welding J. — 1996. — № 11. — P. 379–387.
4. Дьяконов В., Абраменкова И. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2002. — 350 с.
5. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — В 2 т. — М.: Мир, 1982. — Т. 2. — 400 с.
6. Повышение качества слежения за стыком на основе технического зрения / Ф. Н. Киселевский, Г. А. Бутаков, В. В. Долиненко, Е. В. Шаповалов // Проблемы обеспечения качества в сварочном производстве: Материалы междунар. науч.-практ. конф. и выставки (Киев, 3–6 апр. 2001 г.). — Киев, 2001. — С. 20–21.

A new approach is proposed to construction of an optical sensor system to determine the trajectory of a butt joint, welded without edge preparation with a gap close to zero. The sensor allows eliminating several disadvantages of the light section methods and may serve as a beneficial addition to it.

Поступила в редакцию 26.07.2002,
в окончательном варианте 05.08.2002



УДК 621.791.75.042

ПРИБОР ПКР-3 ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОКРЫТИЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

М. Ф. ГНАТЕНКО, канд. техн. наук (Фирма «Велма», г. Киев)

Рассмотрены способы оценки разнотолщинности покрытия электродов. Приведены технические характеристики нового прибора ПКР-3.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, разнотолщинность покрытия, методы определения, электромагнитные приборы

Анализ развития экономики стран СНГ показывает, что ручная дуговая сварка покрытыми электродами будет занимать доминирующее место в сварке еще несколько десятков лет, поэтому производство электродов должно развиваться и совершенствоваться. Неотъемлемой частью успешного использования и получения требуемых эксплуатационных свойств сварных соединений и конструкций является качество электродов. Основные показатели качества регламентируются ГОСТом 9466-75 «Электроды металлические для ручной дуговой сварки и наплавки». Одним из важнейших показателей качества является разнотолщинность покрытия электродов. Этот показатель определяет эксцентricность расположения оси покрытия по отношению к оси стержня. От разнотолщинности в значительной мере зависят равномерность плавления покрытия электродов («козырек»), стабильность горения дуги и сварочно-технологические свойства электродов и, как результат, качество сварного соединения, его эксплуатационные свойства.

Требования к допустимой разнотолщинности достаточно жесткие: не более 5 % диаметра электрода. На практике этот допуск стараются ужесточать в 2 раза, т. е. не более 2,5 %. Лучшие производители электродов изготавливают электроды с разнотолщинностью около 1 % диаметра электрода или не более 0,05 мм. Методика замера разнотолщинности покрытия электродов предусмотрена ГОСТом 9466-67. Однако она трудоемка, неоперативна и недостаточно точна. Согласно ей «Разность толщины покрытия e определяют в трех местах электрода, смещенных относительно друг друга на 50...100 мм по длине и на $120 \pm 15^\circ$ по окружности. Измерения в каждом месте проводят микрометром в соответствии со схемой (рис. 1) с точностью до 0,01 мм.

Величину e в миллиметрах вычисляют по формуле

$$e = S - S_1.$$

Допускается проверка разности толщины покрытия другими методами и специальными приборами (магнитными, емкостными и др.), обеспечивающими требуемую точность измерения». В новой редакции ГОСТа, которая будет принята в текущем году, предлагается записать: «Базовым методом определения разнотолщинности покрытия электродов e является метод, основанный на прокручивании электрода на двух угловых ножевых опорах (для оголенных участков стержня) с размещенной между ножами измерительной головкой (под покрытие электрода) (рис. 2). Перед измерением электрод в местах под ножевые опоры очищается от покрытия с тщательной зачисткой стержня и без нарушения его поверхности, укладывается на опоры приспособления и с поджатием в углы ножевых

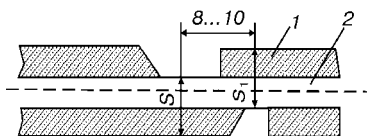


Рис. 1. Схема замера разнотолщинности покрытия электрода: 1 — покрытие, 2 — стержень

© М. Ф. Гнатенко, 2003

опор прокручивается не менее, чем на один оборот с регистрацией крайних показаний индикатора с точностью 0,01 мм. Разность между этими показателями будет соответствовать величине разнотолщинности покрытия электрода. Замер на одном электроде осуществляется в трех местах: в начале, середине и конце с установлением максимального значения. Проверка разнотолщинности покрытия e может также проводиться специальными приборами, обеспечивающими высокую оперативность контроля без разрушения покрытия (магнитными, емкостными, рентгеновскими и др.). Именно электромагнитные приборы для определения разнотолщинности покрытия электродов нашли широкое применение. Фирмой «Велма» разработан, изготавливается и поставляется соответствующий прибор ПКР-3 (рис. 3). Он предназначен для неразрушающего контроля разности толщины покрытия сварочных электродов по ГОСТ 9466-75 всех марок с ферро- и неферромагнитными стержнями.

Технические характеристики ПКР-3

Размеры контролируемых электродов, мм	
диаметр стержня	2... 5
толщина покрытия	0,35... 2
Диапазон измерения разности толщины покрытия, мм	0,01... 0,25
Дискретность отчета, мм	0,01
Время измерения, с	≤ 3
Напряжение питания, В	220
Потребляемая мощность, В·А	5
Габаритные размеры, мм	250×170×80
Масса, кг	2,7

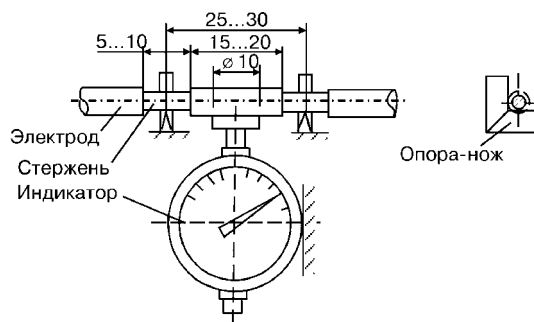


Рис. 2. Схема замера разнотолщинности покрытия электрода (новая редакция ГОСТа)

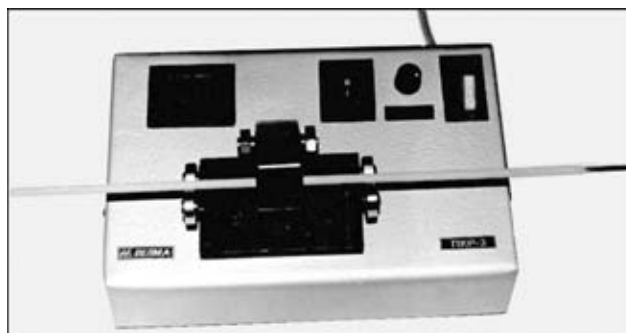


Рис. 3. Прибор ПКР-3 для контроля разнотолщинности покрытия электродов



Отличительные особенности прибора: контроль разнотолщинности покрытия электродов может проводиться в двух режимах с цифровой индикацией:

- а) текущее значение;
 - б) с фиксацией максимального значения;
- возможность определения плоскости, в которой разность толщины покрытия максимальна, и установления направления регулирования положения формирующей втулки;
- наличие лишь одного измерительного датчика с расположением его сверху или снизу размещенного на роликоопоры электрода;

Methods of evaluation of difference in thickness of electrode coatings are considered. Technical data of the new PKR-3 type device are given.

простота калибровки прибора на разные типоразмеры электродов с помощью эталонной пленки;

высокая оперативность и точность контроля разности толщины;

наджность в работе.

Использование прибора ПКР-3 позволяет поштучно, в максимальной степени оперативно контролировать разнотолщинность покрытия электродов и предотвращать выпуск бракованных электродов по этому показателю. Эффективность использования прибора с учетом его простоты, надежности в работе и низкой стоимости очень высокая.

Поступила в редакцию 11.09.2002

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

СПОСОБ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПРОЦЕССА

Разработаны способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с автоматическим регулированием и стабилизацией энергетических параметров процесса, а также оборудование для него, преимущества которых заключаются в следующем:

- эффективном управлении переносом металла, которое позволяет производить сварку в различных пространственных положениях;
- снижении критического тока сварки, что способствует обеспечению расширения технологического диапазона рабочих токов и уменьшению разбрызгивания металла;
- сварке различных сталей (от низколегированных до нержавеющей), многих цветных металлов таких, как сплавы алюминия, меди, титана.

По сравнению со сваркой неплавящимся электродом, новый способ позволяет существенно снизить уровень сварочных напряжений и деформаций в изделиях; увеличить точность геометрических размеров сварных конструкций; повысить скорость сварки и производительность процесса в 2...3 раза; снизить расход защитных газов в 3...4 раза.

Кроме того, применение систем автоматической стабилизации регулирования средних значений сварочного тока и напряжения дает возможность уменьшить влияние сопутствующих процессу сварки возмущающих факторов (изменений зазоров, превышений кромок, колебаний вылета электрода, скоростей подачи проволоки и перемещения горелки, напряжений питающей сети, длины дуги на отклонения геометрических размеров сварных швов от требуемых значений); снизить вероятность появления дефектов типа оксидных пленок, несплавлений, пор; исключить влияние субъективных факторов в работе оператора-сварщика на конечный результат процесса, снизить требования к его квалификации, времени обучения, а также облегчить условия работы сварщиков; запрограммировать режимы при орбитальной сварке.

Разработчики: П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимаповский.

За дополнительной информацией обращаться по тел. (044) 227-44-78, 261-52-31.



ЛАУРЕАТЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ УКРАИНЫ



СЕРГЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ ПОЛЯКОВ окончил Московский государственный университет. Работал во Всесоюзном научно-исследовательском институте нефтехимии в г. Киеве. С 1986 г. работает в ИЭС им. Е.О. Патона. Ныне — доктор технических наук, заведующий лабораторией коррозии. Автор более 200 статей, 20 изобретений и патентов. За разработку и внедрение в народное хозяйство методов и аппаратуры коррозионного мониторинга награжден медалями и грамотами.

Указом Президента Украины Л. Д. Кучмы № 1171/2002 от 16 декабря 2002 г. группе авторов в составе В. И. Похмурского, С. Г. Полякова, А. А. Рыбакова, Ю. С. Герасименко, В. П. Чвирука, В. С. Новицкого, В. И. Сморгочова, А. А. Рудника присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники 2002 г. за работу «Научные основы и технические средства электрохимических систем контроля экологической безопасности и коррозионной активности техногенных сред».

Сотрудниками ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины С. Г. Поляковым и А. А. Рыбаковым выполнены обширные исследования в области создания теории электрохимических методов мониторинга коррозионных процессов, протекающих в тонких

АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ РЫБАКОВ окончил Киевский политехнический институт. С 1963 г. работает в ИЭС им. Е.О. Патона. Ныне — кандидат технических наук, заведующий отделом. Автор более 150 работ и 30 изобретений. Является членом Координационного совета Межгосударственной российско-украинской ассоциации «Высоконадежный трубопроводный транспорт» и Научно-координационного совета по вопросам ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин при Президиуме НАНУ.

пленках электролитов, под слоями защитных покрытий, в почве, атмосфере, в углеводородах и ряде других условий. Выполненные исследования процессов протекания наиболее опасных видов коррозии таких, как коррозионное растрескивание под напряжением, питтинговая, межкристаллитная, язвенная коррозия трубных сталей позволили авторам разработать системы коррозионного контроля. Исследования в области металловедения и сварки нового класса низколегированных трубных сталей позволили значительно улучшить экологическую ситуацию в районах прокладки нефтегазопроводов. Созданные авторами методики и аппаратура нашли широкое применение для оценки надежности и безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта, машин и металлоконструкций.

— ◆ ◆ ◆ —



Указом Президента Украины № 1171/2002 от 16 декабря 2002 г. группе авторов в составе Е. В. Горохова, Е. В. Шевченко, В. Н. Василева, В. А. Пермякова, Э. Ф. Гарфа, С. А. Кудри, В. А. Чевичелова, Н. П. Сытника, В. А. Лучникова, В. В. Семенова была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники 2002 г. за работу «Разработка научных основ и принципов строительства эксплуатационно надежных конструкций магистральных электросетей, освоение их производства и внедрение».

Сотрудником ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Э. Ф. Гарфом выполнены исследования в области уточнения нагруженности электросетевых конструкций для различных регионов Украины, определения действительного напряженно-деформированного состояния конструкций с эксплуатационными повреждениями, прочности узловых соединений линий элект-

ЭДУАРД ФЕОФИЛОВИЧ ГАРФ окончил Киевский инженерно-строительный институт по специальности промышленное и гражданское строительство. С 1962 г. работает в ИЭС им. Е.О.Патона. Ныне — доктор технических наук, заведующий отделом новых конструктивных форм сварных сооружений и конструкций. Автор двух монографий и более 100 научных публикаций и изобретений.

ропередач и порталов открытых распределительных устройств, разработки научных основ проектирования опор линий электропередач и открытых распределительных устройств в сварном и болтовом вариантах.

Поздравляем Сергея Георгиевича Полякова, Анатолия Александровича Рыбакова и Эдуарда Феофиловича Гарфа с высокой оценкой их работы и желаем им дальнейших творческих успехов.

Ученый совет ИЭС им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»
Коллеги



ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Способ прессовой сварки дугой, управляемой магнитным полем, отличающийся тем, что в процессе нагрева деталей задают эталонную величину напряжения на сварочной дуге между торцами свариваемых деталей, соответствующую оптимальную выдержку, измеряют напряжение в процессе сварки и в случае несогласованности напряжения на сварочной дуге и эталонной величины напряжения по величине и знаку согласование осуществляют перемещением одной из свариваемых деталей для сохранения оптимального дугового промежутка, а момент достижения необходимой температуры нагрева на торцах деталей определяют по достижению заданной величины перемещения одной из свариваемых деталей относительно другой. Патент Украины 46036. С. И. Кучук-Яценко, В. Ю. Игнатенко, В. С. Качинский, М. П. Коваль (ИЭС им. Е. О. Патона) [5].

Мобильный сварочный генератор содержит генератор переменного тока, систему самовозбуждения генератора и систему регулирования. Приведены отличительные признаки генератора. Патент Украины 45992. И. К. Зайнашев, В. А. Жемчугов, Я. Г. Ячарков (АОЗТ «Укрсварка») [5].

Устройство для центровки двух профильных заготовок, в частности рельсов, в машине для контактной стыковой сварки, отличающееся тем, что устройство дополнительно содержит тиристорный реверсивный пускатель с двумя дискретными входами, а формирователь сигнала несогласования содержит два компаратора, общие входы которых соединены с выходом дифференциального усилителя, а отдельные входы — с разнополярными задавателями зоны нечувствительности соответственно. Приведены и другие отличительные признаки. Патент Украины 46040. С. И. Кучук-Яценко, В. П. Кривonos, Б. Л. Грабчев, М. В. Богорский (ИЭС им. Е. О. Патона) [5].

Способ изготовления электрода для установок сварки давлением, отличающийся тем, что водоохлаждаемые каналы электрода образуют с помощью, по крайней мере, одной трубки, которой придают криволинейную конфигурацию и размещают в пустотелой модели для заливки расплавленным материалом электрода, причем перед трубкой прикрепляют определяющие ее месторасположение индикаторы, концы которых выводят на внешнюю поверхность материала электрода, который застывает. Патент Украины 46050. О. Н. Корсун, И. В. Якутин, Л. М. Малахова [5].

Способ электронно-лучевой наплавки, отличающийся тем, что наплавляемый материал присаживают на поверхность изделия при достижении температуры поверхности 0,9...0,95 температуры плавления материала изделия и уплотняют прокаткой с последующим проплавлением на всю его толщину, при этом изделие после наплавки перемещают между вальцами. Патент Украины 46128. Б. Е. Патон, С. И. Кучук-Яценко, Н. П. Тригуб, А. Я. Дереза (ИЭС им. Е. О. Патона) [5].

Сварочный аппарат, отличающийся тем, что он оснащен регулятором мощности, соединенным с множителем, входы которого соединены с датчиком тока и датчиком напряжения, и задатчиком мощности, соединенным с выходом сумматора, входы которого соединены с датчиками скоростей подачи сварочной проволоки и изделия относительно зоны сварки. Патент Украины 46364А. В. М. Титиевский, В. И. Литвинов, Н. В. Жукова и др. (ОАО «Завод «Универсальное оборудование») [5].

Способ сварки трением и машина для его реализации, отличающийся тем, что после отключения привода вращения машины определяют момент трения в зоне контакта, принудительное торможение и проковку начинают при достижении максимального момента трения и проковку выполняют

одновременно с торможением. Патент Украины 46460А. С. И. Кучук-Яценко, И. В. Зяхор (ИЭС им. Е. О. Патона) [5].

Способ пайки металлических конструкций, например, тонкостенных труб и фланцев, преимущественно стальных, отличающийся тем, что пластическое деформирование соединяемых кромок осуществляют с помощью формообразующего инструмента, при этом поверхности паяного соединения придают форму, соответствующую форме деформирующего инструмента. Патент Украины 28675. А. С. Письменный, А. С. Прокофьев, М. Е. Шинлов, В. А. Бондарев (ИЭС им. Е. О. Патона) [6].

Способ контактно-стыковой сварки оплавлением, при котором изменяют (по заданным программам) скорость подачи подвижной плиты машины, сварочное напряжение и влияют на скорость подачи негативной обратной связью по сварочному току. Приведены отличительные признаки способа. Патент Украины 46820. С. И. Кучук-Яценко, А. В. Дидковский, М. В. Богорский и др. (ИЭС им. Е. О. Патона) [6].

Способ кислородно-флюсовой резки металла, отличающийся тем, что в зону резания металла дополнительно вводят порошок в смеси с железным и алюминиевым порошком при следующем соотношении, мас. %: 60...85 железного порошка, 11...15 алюминиевого порошка, 4...5 магниевого порошка. Патент Украины 47138А. В. П. Карпов, Ю. А. Анохин, Д. А. Романов, В. М. Соколов (ОАО «Константиновский завод «Втормет») [6].

Способ исправления дефектов в металле большой толщины, при котором дефект, подлежащий исправлению, и часть окружающего основного металла удаляется, а полученное углубление заполняется дополнительным металлом с использованием дуговой сварки. Приведены отличительные признаки способа. Патент Украины 47321А. И. А. Тарарычкин, Д. А. Оселедько [6].

Электрод для дуговых процессов в окислительных средах, состоящий из электропроводной оболочки и активной вставки, отличающийся тем, что активная вставка имеет неравномерную концентрацию эмиссионно-активных веществ по объему, которая находится в пределах от 3 до 7 % в общей массе активной вставки и изменяется ступенчато. Приведены отличительные признаки электрода. Патент Украины 47175А. В. А. Лазорин, Ю. Ф. Терновой, Ю. В. Артамонов и др. (Украинский государственный НИИ специальных сталей, сплавов и ферросплавов) [6].

Способ дуговой сварки в среде защитного газа стальных железнодорожных рельсов (варианты), отличающийся тем, что при заполнении промежутка в зоне между головками рельсов электрод беспрерывно последовательно перемещают в попеременно-противоположных направлениях в промежутке между торцевыми гранями вдоль траекторий, которые имеют начальный и конечный концы к соответствующему одному из указанных противоположных направлений, и накладывают валики из присадочного металла вдоль указанных траекторий, с поддержкой электрода на выходном конце каждой траектории на заранее выбранный период времени. Патент 47437. М. Дж. Морлок (The Lincoln Electric Company, США) [7].

Сварочный аппарат для сварки в стык (торец к торцу) одной продолговатой детали (такой как рельс) к другой продолговатой детали (второй рельс) с помощью стыковой сварки, в частности, стыковой сварки оплавлением. Приведены отличительные признаки аппарата. Патент Украины 47466. Р. Ларссон (ESAB, Швеция) [7].

Способ электрошлаковой наплавки, отличающийся тем, что подачу присадочного материала осуществляют постоянно или

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украины «Промислова власність» за 2002 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



периодически в зону, ограниченную стенками кристаллизатора и расстоянием, которое составляет не более $2/3$ ширины шлаковой ванны в участке формирования наплавленного металла. Патент Украины 47495. Ю. М. Кусков, В. Л. Шевцов, В. Я. Майданник [7].

Способ пайки алюминия, флюс, не содержащий припоя, го-товая смесь для флюса, отличающийся тем, что работу проводят без добавления припоя и используют флюс, который содержит, мас. % 6...50 K_2SiF_6 и 50...94 фторалюминита калия. Патент Украины 48257. Т. Борн, Х.-Й. Белт (Солвей флуор

инд деривате ГмбХ, Германия) [8].

Установка для плазменной сварки и наплавки содержит плазмотрон с плазмообразующим соплом, неплавящийся электрод в виде внутреннего сопла и муфштук для подачи плавящегося электрода с системами управления технологическим процессом, механизмов подачи электродной проволоки и источника питания, включающего трансформатор, выпрямители и конденсаторы. Приведены отличительные признаки. Патент Украины 48383А. В. В. Чигарев, А. Н. Корниенко, Н. А. Макаренко и др. (Приазовский ГТУ) [8].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*



(Польша), 2002. —
Рос. 46, № 1
(пол. яз.)

Slania J. Исследование влияния потенциала ионизации защитной газовой смеси, погонной энергии и условий отвода тепла на содержание феррита в шве аустенитной стали, с. 44–48.

Klimpel A., Lisiecki A., Oledzki A. Сварка диодным лазером стыковых соединений термопластов, с. 48–53.

Mazur M., Grela P. Сравнительные исследования содержания в наплавленном металле диффузионного водорода определенного глицериновым и ртутным методом, с. 54–55.

Holborn M. A., Kohler H. Обеспечение возможности идентификации трубных систем из полиэтилена, предназначенных для подачи воды и газа, с. 56–60.

Jaworski P., Skulimowski P. Сварка алюминий-никелевых бронз на примере сварки корабельного винта из бронзы Cu3, с. 63–65.

Stachurski M. Контроль качества сварных соединений методом вихревых токов 9ЕТ в соответствии с европейским стандартом, с. 66–70.

(Польша), 2002. —
Рос. 46, № 2 (пол. яз.)

Pfeifer T. Плазменная резка металла толщиной свыше 50 мм, с. 28–33.

Banasik M., Dworak J. Резка лазерами CO_2 на установках с цифровым управлением, с. 33–37.

Riabcew I. A., Kuskow J. M. Электрошлаковая наплавка, с. 38–45.

Biernadskij W. N., Zeman W. Промышленные роботы в сварочном производстве в мире и Польше, с. 46–51.

(Польша), 2002. —
Рос. 46, № 3 (пол. яз.)

Szubryt M. Анализ напряженного состояния и его влияние на усталостную прочность сварных соединений на базе так называемого локального подхода, с. 39–48.

Winiowski A. Легкоплавкий бескадмовый серебряный припой в виде покрытого стержня, с. 49–53.

Klimpel A., Jarosinski J., Stano S., Janicki D. Сварка диодным лазером большой мощности (HPDL) алюминиевого сплава EN AW-1050 А, с. 54–59.

Juskiw W. M., Dziubyk A. R. Определение остаточных напряжений в сварных стыковых трубных соединениях, с. 60–64.

(Польша), 2002. —
Рос. 46, № 4 (пол. яз.)

Turyk E., Pilarczyk A. Компьютерные программы в области сварки в среде защитных газов — новые разработки, с. 42–47.

Kubiszyn I., Slania J. Моделирование физических явлений, протекающих в процессе сварки, с. 48–51.

Mikno Z., Wecel M. Машина для микроточечной сварки с внутренним изменением частоты, с. 52, 55.

Klimpel A., Mazur M., Bulski Z. Влияние циркония на склонность к образованию трещин в швах при сварке отливок из магниевого сплава типа GA8, с. 56, 59–61.

Neessen F., Bandsma P. Использование нержавеющей сталей типа duplex при строительстве танкеров, с. 61–63.



(Англия), 2002. —
May/June (англ. яз.)

Schneider C., Sonderson R., Muhammed A. Прогнозирование остаточного ресурса эксплуатирующихся трубопроводов, с. 3–5.

Tavakoli M. Клеи и герметизирующие составы для медицины, стоматологии и фармакологии — обзор материалов и областей применения. Ч. 2, с. 7–8, 13, 14.

Smith N. Процессы сравнения — модель программного обеспечения для выполнения работы, с. 15–18.

(Англия), 2002. —
July/August (англ. яз.)

Dourton M., Wiktorowicz R. Разработка и применение пакетов программного обеспечения в области изготовления металлоконструкций, с. 3–5.

Kallee S., Nichalas D., Thomas W. Сварка трением с перемешиванием в авиации — промышленное применение, с. 13–16.

JOURNAL OF THE JAPAN
WELDING SOCIETY (Япония),
2002. — Vol. 71, № 3 (яп. яз.)

Прочность швов, выполненных дуговой сваркой на тонких листах, с. 3–4.

Hattori T. Применение излучения для нано- и микрообработки, с. 5–14.

Utsumi Y., Hattori T. Применение радиационной химической реакции для эпитаксиального выращивания на наноуровне, с. 15–19.

Kitadani T., Utsumi Y., Hattori T. Применение радиационного литографического формования (процесса LIGA) для производства микротиглей, с. 20–23.

Katon T. Применение радиационного сухого травления для микрообработки тефлона, с. 24–26.

Zhang Y. Получение высококачественных органических пленок методом прямого радиационного облучения, с. 27–29.

Saida K. Применение импульсного спекания для соединения поверхностей раздела. Ч. 2, с. 30–34.

Fujwara A., Sasabe S. Прочность соединения алюминиевых тонколистовых конструкций, с. 35–41.

Hamada K., Takeichi S. Разработка вспомогательных систем расчета соединений, с. 42–47.

Kataoka H. Составление англоязычной технической документации. Ч. 2, с. 48–53.

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

*(Германия), 2002. —
№ 6 (нем. яз.)*

Schuster J., Nauhauser M. Немножко металловедения для домашнего пользования, с. 190, 192–193.

Matthes K.-J., Kolbe G. Защита от износа захватов транспортных средств, с. 194–196.

Mussmann J. Термообработка при сварке в строительстве трубопроводов, с. 198, 200, 202, 204.

Maurer M., Zhao L., Lugscheider E. Износостойкие элементы легких конструкций из пеноалюминия, с. 206–209.

*(Германия), 2002. —
№ 7 (нем. яз.)*

Vollrath K. Склеивание в производстве легких транспортных средств, с. 222, 224–226.

Greitmann M.J., Wiesner P. Применение специальных способов сварки, с. 228–230.

Tatter U. Ремонт труб и емкостей, с. 232–235.

Fricke B. Примеры конструкций, удобных для применения лазера, с. 238–240.

Drossert P., Fidora C. Заочные курсы обучения специалистов по надзору за сваркой, с. 244–249.

**SCHWEISS- &
PRÜFTECHNIK***(Австрия), 2002. —
№ 6 (нем. яз.)*

Juno K., Stockinger M., Cerjak H., Buchmayr B. 7-я конференция в университете г. Грац «Современные направления развития сварки МАГ», с. 82–87.

Cerjak H. Проблемы неразрушающего контроля на пороге 21 века, с. 88–93.

Susa F. Современные программируемые микропроцессорные источники тока — свойства и области применения, с. 94–95.

Гибридная лазерная сварка является новинкой, с. 100.

*(Австрия), 2002. —
№ 7 (нем. яз.)*

Sierlinger R., Rauch R., Tischler G. Тонкий лист LASER-ALFORM фирмы «Фест-Альпине» — преимущества травления при лазерной сварке, с. 116–120.

Vanschen W. Сверление и перфорирование лазерным лучом, с. 122–125.

*QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2002. — Vol. 20, № 1
(яп. яз.)*

Fujii N. et al. Изучение характеристик расплавления и режима сварки чистого титана. Ч. 1. Сварка и свойства соединений чистого титана, с. 20–25.

Fujii N. et al. Контроль зоны шва и свойств соединений. Ч. 2. Сварка и свойства соединений чистого титана, с. 26–31.

Ukita S. et al. Влияние формы рабочей части электрода и угла наклона горелки на характеристики высокоскоростной сварки ТИГ на постоянном токе с минусом на электроде, с. 32–37.

Matsuda J. et al. Оптимальность положения зоны облучения лазером с точки зрения поведения дуги ТИГ. Ч. 5. Изучение комбинированных лазерно-дуговых способов высокоскоростной поверхностной обработки, с. 38–46.

Yoshida K. et al. Теоретические исследования сварки дугой с полого катода, с. 47–52.

Nakamura T. et al. Анализ нестационарной теплопроводности зоны вылета проволоки при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе (GMA). Ч. 2. Разработка способа сварки GMA в сверхзукую разделку, с. 53–62.

Yuan X. et al. Изучение проблем, связанных с применением метода модифицированных вложенных атомов (МИАМ) для димерных систем. Ч. 1. Теоретические исследования применимости МИАМ для решения проблем соединения и адгезии, с. 63–67.

Yasuda K. et al. Прогнозирование структуры металла швов на двухфазной нержавеющей стали, с. 68–77.

Nishimoto K. et al. Влияние добавки редкоземельных металлов на чувствительность к растрескиванию ЗТВ. Ч. 7. Изучение свариваемости литого сплава инконель 718, с. 78–86.

Nishimoto K. et al. Механизм снижения чувствительности ЗТВ к растрескиванию при добавке редкоземельных металлов. Ч. 8. Изучение свариваемости литого сплава инконель 718, с. 87–95.

Ogawa M. et al. Оценка коррозионной стойкости и режима затвердевания при подавлении образования газовых пор в металле шва на нержавеющей стали с высоким содержанием азота. Ч. 1. Изучение свойств сварных соединений нержавеющей стали с высоким содержанием азота, с. 96–105.

Ogawa M. et al. Коррозионная стойкость и поведение выделений нитридов в ЗТВ на нержавеющей стали с высоким содержанием азота. Ч. 2. Изучение свойств сварных соединений нержавеющей стали с высоким содержанием азота, с. 106–113.

Otani T. et al. Оценка свойств швов на листовой высокопрочной стали со сверхмелкозернистой микроструктурой методом точечного нагрева сопротивлением, с. 114–119.

Nishio K. et al. Влияние содержания алюминия и ванадия в титановом сплаве на свариваемость молибдена с титаном при диффузионной сварке. Ч. 2. Диффузионная сварка молибдена с титаном, с. 120–127.

Shimura J. et al. Применение метода конечных элементов для анализа напряженного состояния клеевых соединений разнородных материалов с косыми стыками под ударной растягивающей нагрузкой, с. 128–135.

Terasaki T. et al. Изучение продольной усадки валиковых проб, с. 136–142.

Kuroda T. et al. Разработка систем восстановления объемных изображений поверхности излома нержавеющей стали, с. 143–151.

Jung Y-g. et al. Изучение микроструктуры фотокатализаторных TiO₂ покрытий термического напыления и улучшение их свойств путем добавки адсорбентов, с. 152–157.

Fujita K. et al. Использование вспомогательных систем, разработанных для виртуальных фабрик, с. 159–165.

Takano Y. et al. Эксперименты с виртуальными заводами в машиностроении, с. 166–172.

Kita Y. et al. Вспомогательные сварочные системы на базе информационных технологий для машиностроительных заводов, с. 173–178.

Okamoto T. et al. Сварочный тренажер WELDSIM для выполнения различных типов сварных соединений, с. 179–184.

Asai S. et al. Расширение применения цифровых технологий с целью повышения квалификации сварщиков и разработки вспомогательных сварочных систем, с. 185–190.

Yamamoto T. et al. Разработка системы моделирования сварки МАГ, с. 191–196.