



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, А. Т. Зельниченко,
А. Я. Ищенко, И. В. Кривцун,
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,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина

Электронная верстка:

И. С. Баташева, А. И. Сулима,
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

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

- Горынин И. В., Карзов Г. П., Тимофеев Б. Т., Галаткин С. Н.**
Совершенствование материалов и технологии сварки для
повышения безопасности и ресурса АЭС с реакторами ВВЭР 3
- Кучук-Яценко С. И., Письменный А. С., Шинлов М. Е.,
Казымов Б. И., Загадарчук В. Ф.** Ускоренная индукционная
термообработка сварных швов труб из сталей контролируемой
прокатки 9
- Оджи Т., Миясака Ф., Ямамото Т., Тсуджи И.** Математическая
модель процесса сварки МАГ 14
- Палани П. К., Муруган Н.** Влияние параметров процесса
наплавки на содержание δ -феррита в коррозионностойком слое 19
- Паламарчук Б. И., Пашин Н. А., Малахов А. Т., Черкашин
А. В., Манченко А. Н., Чайка А. А.** Моделирование ударно-
волнового процесса при локальной импульсной обработке
плоских образцов кольцевыми зарядами 25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Мазур А. А.** 5 лет Технологическому парку «Институт
электросварки им. Е. О. Патона» 30
- Павлюк С. П., Кутлин Г. Н., Кислицын В. М., Мусин А. Г.**
Газопламенная пайка при монтаже микроэлементов на печатные
платы 34
- Савицкий А. М., Ващенко В. Н., Бобров И. В.** Особенности
сварки изделий с защитным эмалевым покрытием 37
- Юхимец П. С., Кобельский С. В., Кравченко В. И., Клименко
И. А., Лесовец В. П.** Продление ресурса трубопровода с
дефектами на внутренней поверхности 40

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Цыбульский Г. А.** Алгоритм автоматической ориентации
манипуляционного робота относительно тестируемых
поверхностей 43
- Жук Г. В., Лукьянец В. М., Мазур С. В.** Новая установка для
ошиповки поверхностей нагрева 46
- Черный О. М.** Влияние эффекта Рамзауэра на параметры
катодной области аргоновой дуги с неплавящимся электродом 47
- Новости 49
- Диссертация на соискание ученой степени 54
- Патенты в области сварочного производства 54
- По зарубежным журналам 56
- Новые книги 58

ХРОНИКА

- Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины —
Национальный орган по сертификации производств сварных
конструкций в системе Европейской сварочной федерации 61
- И. В. Горынину — 80 62
- А. И. Акулову — 80 63
- А. А. Бондареву — 70 64
- К 100-летию со дня рождения Е. В. Соколова 65
- К 90-летию Б. И. Медовара 65

ИНФОРМАЦИЯ 68

Разработано в ИЭС 8, 13, 18, 33

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 3 (635)

March 2006

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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, A. T. Zelnichenko,
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,
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,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
B. Braithwaite (UK)
C. Boucher (France)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
Zhang Yanmin (China)
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) 287 63 02, 529 26 23
Fax: (38044) 528 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushkina
Electron galley:
I. S. Batasheva, A. I. Sulima,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov

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

- Gorynin I. V., Karzov G. P., Timofeev B. T., Galyatkin S. N.** Improvement of materials and technology of welding to increase safety and service life of NPS with WWER-reactors 3
- Kuchuk-Yatsenko S. I., Pismennyi A. S., Shinlov M. E., Kazymov B. I., Zagadarchuk V. F.** Accelerated induction heat treatment of welds of pipes made of steels of a controllable rolling 9
- Ohji T., Miyasaka F., Yamamoto T., Tsuji Y.** Mathematical model of MAG welding process 14
- Palani P. K., Murugan N.** Effect of parameters of surfacing process on δ -ferrite content in a corrosion-resistant layer 19
- Palamarchuk B. I., Pashchin N. A., Malakhov A. T., Cherkashin A. V., Manchenko A. N., Chaika A. A.** Modeling of impact-wave process in local pulsed treatment of flat samples with circular charges 25

INDUSTRIAL

- Mazur A. A.** 5 years of Technopark «The E. O. Paton Electric Welding Institute» 30
- Pavlyuk S. P., Kutlin G. N., Kislitsyn V. M., Musin A. G.** Flame soldering in assembly of microelements on printed boards 34
- Savitsky A. M., Vashchenko V. N., Bobrov I. V.** Specifics of welding products with a protective enamel coating 37
- Yukhimets P. S., Kobelsky S. V., Kravchenko V. I., Klimenko I. A., Lesovets V. P.** Extension of service life of pipeline with pit defects on inner surface 40

BRIEF INFORMATION

- Tsybulkin G. A.** Algorithm of automatic orientation of a manipulation robot with respect to test surfaces 43
- Zhuk G. V., Lukianets V. M., Mazur C. V.** New installation for stud-ding of heat surfaces 46
- Chernyi O. M.** Influence of Ramsauer effect on parameters of cathode region of argon arc with a non-consumable cathode 47
- News 49
- Thesis for scientific degree 54
- Patents in the field of welding 54
- Review of foreign journals 56
- New books 58

News

- The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine is the National Body of Certification of welded structure manufacturing in the system of European Welding Federation 61
- I. V. Gorynin is 80 62
- A. I. Akulov is 80 63
- A. A. Bondarev is 70 64
- The 100th anniversary of E. V. Sokolov 65
- The 90th birthday anniversary of B. I. Medovar 65

INFORMATION

- Developed at the PWI 8, 13, 18, 33

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.



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

Академик РАН **И. В. ГОРЫНИН**, **Г. П. КАРЗОВ**, д-р техн. наук,
Б. Т. ТИМОФЕЕВ, **С. Н. ГАЛЯТКИН**, кандидаты техн. наук
(ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», г. С.-Петербург, РФ)

Приведены результаты накопленного опыта по совершенствованию сталей и сварочных материалов, используемых при изготовлении реакторов ВВЭР атомных электростанций. Особое внимание уделено вопросам радиационного и теплового охрупчивания соединений, влияющих на безопасность реакторов при длительной эксплуатации.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированные стали, реакторы ВВЭР, атомная станция, радиационное и тепловое охрупчивание, металл шва, безопасность, ресурс, совершенствование материалов

В настоящее время в России, Украине, Армении, в других странах ближнего зарубежья, а также в Финляндии находится в эксплуатации более 50 реакторов типа ВВЭР мощностью 440 и 1000 МВт, из которых 9 реакторов типа ВВЭР-440 первого поколения (для четырех из них проектный срок службы 30 лет продлен на 10–15 лет), 18 реакторов этого же типа второго поколения и 24 реактора типа ВВЭР-1000. Все они сконструированы из теплоустойчивых сталей марок 15Х2МФА и 15Х2НМФА с использованием сварочных материалов, разработанных в ЦНИИ КМ «Прометей» и ЦНИИТмаш. Корпуса реакторов обоих типов состоят из семи обечаек из сталей указанных выше марок. Обечайки соединены между собой автоматической дуговой сваркой (АДС) под слоем флюса с использованием различных сварочных материалов (проволоки и флюсов).

При сварке кольцевых швов реакторов ВВЭР-440, изготовленных из стали 15Х2МФА (обечайки

активной зоны имеют толщину 140 мм, обечайки зоны патрубков — 240 мм), используют сварочную проволоку марки Св-10ХМФТ и флюс АН-42. Первоначально сварку выполняли при высокой (до 350 °С) температуре нагрева, затем сварное соединение подвергали немедленному отпуску. По такой технологии изготовлены все корпуса реакторов первого поколения ВВЭР-440/230. В 1975 г. при сварке кольцевых швов обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР-440/213 второго поколения для АЭС «Ловииса» (Финляндия) применяли более чистую по содержанию вредных примесей проволоку марки Св-10ХМФТУ и флюс АН-42М (табл. 1).

Использование указанных сварочных материалов позволило получить металл шва с содержанием фосфора до 0,012 мас. % и меди до 0,10 мас. %, что заметно повысило его радиационную стойкость. С момента изготовления реактора типа ВВЭР-440 для АЭС «Ловииса» к металлу шва, а также к основному металлу стали предъявляться более высокие требования к обеспечению высокого сопротивления хрупкому разрушению. С этой целью определили критическую температуру хрупкости

Таблица 1. Требования к химическому составу (мас. %) основного металла и металла шва реакторов ВВЭР-440 при АДС по различным технологическим вариантам

Сталь/проволока, нормативный документ, флюс	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
15Х2МФА (ТУ 5.961.1106–77)	0,13...0,18	0,17...0,37	0,3...0,6	2,5...3,0	0,6...0,8	0,25...0,35
15Х2МФА-А (Извещение № 4.80)	0,13...0,18	0,17...0,37	0,3...0,6	2,5...3,0	0,6...0,8	0,25...0,35
Св-10ХМФТ (ГОСТ 2246–70), флюс АН-42	0,07...0,12	≤ 0,35	0,4...0,7	1,4...1,8	0,4...0,6	0,20...0,35
Св-10ХМФТУ (ТУ 14-1-3034–80), флюс АН-42М	0,07...0,12	≤ 0,35	0,4...0,7	1,4...1,8	0,4...0,6	0,20...0,35

Окончание табл. 1

Сталь/проволока, нормативный документ, флюс	S	P	Cu	As	Ni	Прочие
	не более					
15Х2МФА (ТУ 5.961.1106–77)	0,025	0,025	0,30	0,08	0,4	0,025 Со
15Х2МФА-А (Извещение № 4.80)	0,015	0,012	0,10	0,01	0,4	0,025 Со
Св-10ХМФТ (ГОСТ 2246–70), флюс АН-42	0,030	0,030	0,25	—	0,3	0,05...0,12 Ti
Св-10ХМФТУ (ТУ 14-1-3034–80), флюс АН-42М	0,012	0,010	0,10	—	0,3	0,05...0,12 Ti



$T_{КО}$, для чего при испытании на ударной изгиб вместо образцов Менаже использовали образцы Шарпи.

Дальнейшее совершенствование технологии сварки кольцевых швов корпусов реакторов типа ВВЭР-440/213 было направлено на снижение температуры предварительного и сопутствующего подогрева с 350 до 150...200 °С. Усовершенствованную технологию широко использовали при изготовлении корпусов реакторов ВВЭР-440 на Ижорском заводе в бывшем СССР и заводе «Шкода» в ЧССР.

Сварку кольцевых швов реакторов типа ВВЭР-1000 из стали марки 15Х2НМФА-А (обечайки активной зоны толщиной 190 мм) и 15Х2НМФА (обечайки зоны патрубков толщиной 290 мм) первоначально осуществляли по двум технологическим вариантам, а именно АДС с использованием сварочной проволоки марки Св-10ХГНМА-А и флюса ФЦ-16 (или АН-17М), а также сварочной проволоки Св-08ХГНМТА и флюса НФ-18М. Оба технологических варианта в течение ряда лет применяли для сварки кольцевых швов промышленных реакторов этой модификации, поскольку они обеспечивали свойства и стабильный уровень содержания примесей (фосфор, сера, медь) и безопасную эксплуатацию в течение проектного срока его службы. На период изготовления реактора требования по прочностным характеристикам металла шва, выполненного способом АДС, составляли не менее 422 и 392 МПа (предел текучести) соответственно при температуре 20 и 350 °С, предела прочности — 539 и 490 МПа при тех же температурах, а критическая температура хрупкости должна быть не выше нуля. Содержание вредных примесей в металле шва первоначально ограничивали следующими значениями, мас. %: 0,15 Cu, 0,020 S, 0,025 P. После выполнения более 20 кольцевых швов по каждому из технологических вариантов был проведен статистический анализ рас-

пределения механических свойств [1], результаты которого показали преимущество сварочной проволоки Св-08ХГНМТА как по прочностным и пластическим характеристикам, так и по значению критической температуры хрупкости. Следует отметить, что при сварке по этому варианту содержание никеля в металле шва не превышало 1,5 мас. %, в то время как при другом варианте оно достигало 1,8 мас. %. Известно [2, 3], что более высокое содержание этого элемента отрицательно сказывается на радиационной стойкости материала и приводит к уменьшению ресурса корпуса реактора.

Учитывая, что при использовании сварочной проволоки Св-10ХГНМА-А уровень механических свойств металла был невысоким, ЦНИИТмаш для сварки кольцевых швов предложил сварочную проволоку марки Св-12Х2Н2МА-А в сочетании с флюсом ФЦ-16А (табл. 2). За счет увеличения содержания углерода и никеля в составе проволоки удалось обеспечить повышение прочностных свойств металла шва и обеспечить стабильно низкое значение $T_{КО}$. Это позволило использовать указанный вариант технологического процесса при изготовлении реакторов типа ВВЭР-1000 на Ижорском заводе и Атоммаше. Результаты исследований, выполненных в РНЦ «Курчатовский институт» [4], НИИАР [5] и ЦНИИ КМ «Прометей» [6] во время эксплуатации этих реакторов, показали, что коэффициент радиационного охрупчивания металла сварного шва при использовании новых сварочных материалов существенно выше, чем у основного металла — $A_F = 23$ при температуре 290 °С. При первоначальных вариантах с использованием проволоки Св-10ХГНМА-А и Св-08ХГНМТА в тех же условиях при той же температуре у металла шва $A_F = 20$. В связи с этим было решено отказаться от использования сварочной проволоки Св-12Х2Н2МА-А при сварке кольцевых швов обечайки активной зоны корпуса реактора.

Таблица 2. Требуемый химический состав (мас. %) стали и металла сварных швов реактора ВВЭР-1000

Сталь/сварочная проволока	Флюс	Нормативный документ	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti
15X2HMFА	—	ТУ 108.765–78	0,13...0,18	0,17...0,37	0,30...0,60	1,7...2,4	1,0...1,5	0,50...0,70	≤ 0,12 (расч.)	—
15X2HMFА			0,13...0,16	0,17...0,37	0,30...0,60	1,8...2,3	1,0...1,5	0,50...0,70	0,10...0,12	—
15X2HMFА-А			0,13...0,16	0,17...0,37	0,30...0,60	1,8...2,3	1,0...1,3	0,50...0,70	0,10...0,12	—
Св-08ХГНМТА Св-08ХГНМТА-ВИ	НФ-18М	ПНАЭ Г-7-010–89	0,06...0,10	0,15...0,45	0,45...1,10	1,2...2,0	1,0...1,5	0,40...0,70	—	0,01...0,06
Св10ХГНМА-А	ФЦ-16		0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,2...2,0	1,2...1,8	0,40...0,70	—	—
Св-12Х2Н2МА	ФЦ-16А		0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,2...2,0	1,2...1,9	0,40...0,70	—	—
Св-12Х2Н2МА-А			0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,4...2,1	1,2...1,9	0,45...0,75	—	—
Св-08ХГНМТА-А	—	ТУ 14-1-1275–75	0,05...0,10	0,22...0,37	0,70...1,10	1,55...1,85	1,1...1,4	0,50...0,70	0,03	0,03...0,10
Св-09ХГНМТА	—	ТУ 14-1-3675–01	0,07...0,11	0,17...0,30	0,80...1,05	1,60...1,90	1,0...1,3	0,50...0,70	0,03	0,05...0,11
Св-09ХГНМТА-ВИ	—	ТУ 14-1-3675–01	0,07...0,11	0,17...0,30	0,80...1,05	1,60...1,90	1,0...1,3	0,50...0,70	0,03	0,05...0,11
Св-09ХГНМТА	48НФ-18М	ТУ 5.965-11175–02	0,09	0,40	0,4...1,0	1,10...1,80	0,9...1,3	0,40...0,75	—	0,01...0,06



Сталь/сварочная проволока	Флюс	Сертификат	Cu	S	P	As	Co	Sb	Sn	P+Sb+Sn
			не более							
15Х2НМФА	—	ТУ 108.765–78	0,30	0,020	0,020	0,040	0,03	—	—	—
15Х2НМФА			0,08	0,012	0,010	0,010	0,03	0,005	0,005	0,015
15Х2НМФА-А			0,08	0,012	0,010	0,010	0,03	0,005	0,005	0,015
Св-08ХГНМТА Св-08ХГНМТА-ВИ	НФ-18М	ПНАЭ Г-7-010–89	0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св10ХГНМА-А	ФЦ-16		0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св-12Х2Н2МА			0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св-12Х2Н2МА-А	ФЦ-16А		0,08	0,015	0,012	—	—	—	—	—
Св-08ХГНМТА-А	—	ТУ 14-1-1275–75	0,10	—	—	—	—	—	—	—
Св-09ХГНМТА	—	ТУ 14-1-3675–01	0,10	0,012	0,012	0,010	0,03	0,008	0,001	—
Св-09ХГНМТА-ВИ	—	ТУ 14-1-3675–01	0,06	0,006	0,006	0,010	0,02	—	—	—
Св-09ХГНМТА	48НФ-18М	ТУ 5.965-11175–02	0,10	0,015	0,012	—	—	—	—	—

К настоящему времени накоплены обширные данные [7] о механических свойствах металла швов, полученные в ходе испытаний образцов при изготовлении корпусов реакторов. После соответствующей статистической обработки этих данных можно судить о преимуществах того или иного сочетания сварочных материалов, а на основе полученных характеристик конструктивной прочности — о работоспособности и надежности оборудования в целом. В работе [1] проведена статистическая обработка результатов механических испытаний металла швов, выполненных при использовании первых двух технологических вариантов. Для описания результатов в этой работе применен закон нормального распределения случайной величины и приведены значения математического ожидания и дисперсии для каждого из параметров механической характеристики (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ), полученных при сварке различными сварочными материалами при 20 и 350 °С. В работе [8] выполнена статистическая обработка данных о механических свойствах металла шва при автоматической сварке проволокой Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А.

Сравнение математических ожиданий по t -критерию (критерию Стьюдента) показало, что при сварке проволокой Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М имеет место существенное повышение оценки относительного сужения при температуре 20 °С, а при использовании проволоки Св-12Х2Н2МА-А и флюса ФЦ-16А — повышение значений σ_b и $\sigma_{0,2}$ при 350 °С. Результаты статистической обработки механических свойств металла швов, выполненных по трем технологическим вариантам, представлены на рис. 1 и 2.

Испытания на растяжение пятикратных образцов (рис. 1 и 2) проводили при 20 и 350 °С (штриховыми линиями показан требуемый уровень механических свойств согласно ПНАЭ Г-7-010–89 [9]). Преимущество сварки проволокой Св-12Х2Н2МА-А по сравнению с двумя остальными

вариантами при сопоставлении значений ударной вязкости по результатам испытаний образцов Ме-наже (KCU) и Шарпи (KCV) очевидно. Требуемое по нормативным материалам [10] значение критической температуры хрупкости ($T_{KO} = 0$) для металла сварного шва обеспечивается при указанном технологическом варианте сварки с погрешностью 0,95. Исходя из такой важной характеристики, как сопротивление материала хрупкому разрушению, очевидно, что преимущество имеет сварка проволокой Св-12Х2Н2МА-А. Однако согласно данным работ [4, 6] повышенное содержание никеля в металле шва, полученном при сварке этой проволокой, приводит к более интенсивному его охрупчиванию в процессе эксплуатации реактора под действием нейтронного облучения.

В работе [6] с целью исследования влияния никеля на радиационное охрупчивание металла сварного шва рассмотрены две группы материалов, обеспечивающие различное содержание никеля в металле шва — от 1,1 до 1,36 и от 1,6 до 1,8 %. Первую группу сварных швов [6] выполняли автоматической сваркой проволоками Св-08ХГНМТА и Св-09ХГНМТА-ВИ под флюсами марок НФ-18М и КФ-30. При этом содержание никеля в наплавленном металле несущественно отличалось от допустимого для стали марки 15Х2НМФА-А (1,0...1,3 мас. %) по ТУ 108.765–98, хотя в стали с более высоким содержанием примесных элементов, а именно марки 15Х2НМФА, содержание никеля может изменяться в более широких пределах (1,0...1,5 мас. %). При выполнении сварных швов второй группы использовали сварочные материалы разработки ЦНИИТмаш (проволока Св-10ХГНМА-А под флюсом ФЦ-16 и Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А). В обоих случаях радиационное охрупчивание металла сварных швов оценивали по изменению критической температуры хрупкости и уровню энергии удара $E = 47$ Дж при испытании стандартных образцов Шарпи. Облучение образцов осуществляли в исследователь-

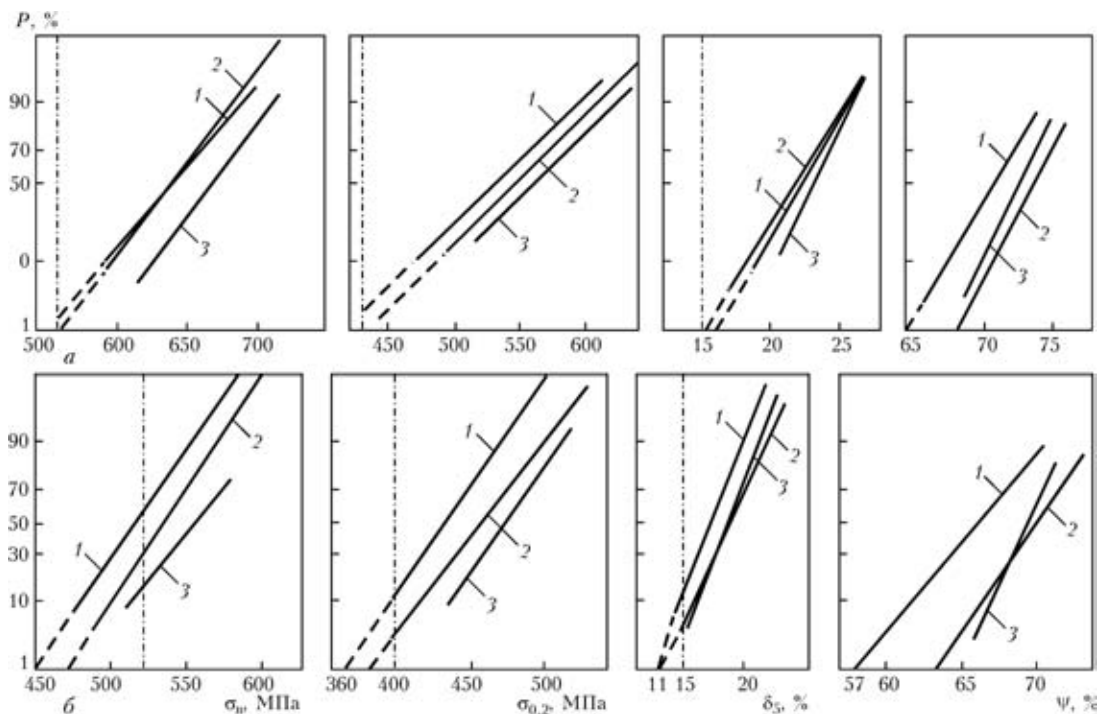


Рис. 1. Интегральные кривые распределения механических свойств металла швов при 20 (а) и 350 °С (б), полученных при сварке по различным технологическим вариантам: 1 – Св-10ХГНМА-А, флюсы АН-17М и ФЦ-16; 2 – Св-08ХГНМТА, флюс НФ-18М; 3 – Св-12Х2Н2МА-А, флюс ФЦ-16А (P – интегральная вероятность события)

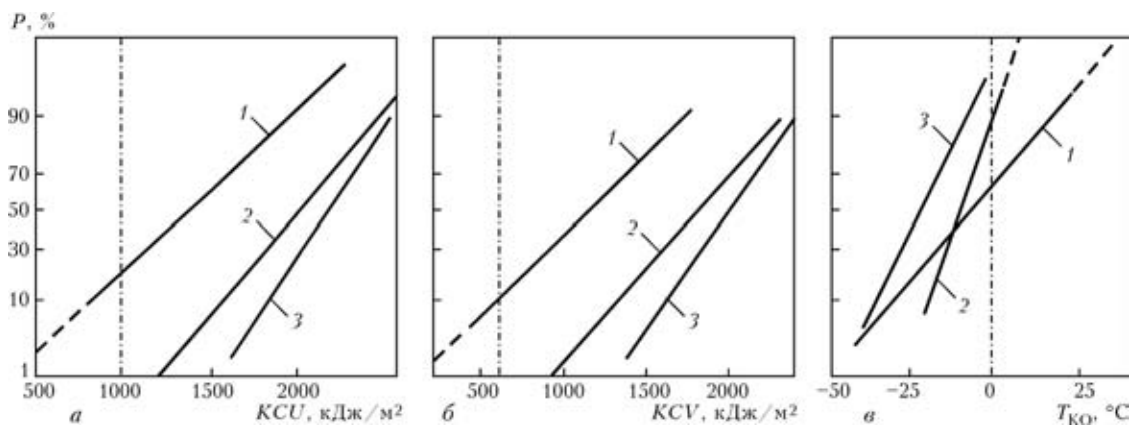


Рис. 2. Интегральные кривые распределения ударной вязкости по результатам испытаний образцов Менаже (а) и Шарпи (б), а также критической температуры хрупкости $T_{КО}$ (в) в металле швов в исходном состоянии, полученных при сварке по различным технологическим вариантам

ских и промышленных реакторах до флюенса нейтронов $3 \cdot 10^{20}$ нейтр./см².

Результаты испытаний показали, что сдвиг критической температуры хрупкости за счет облучения для металла шва, в котором содержание никеля составляет не более 1,36 мас. %, а флюенс нейтронов не превышает проектный за полный срок службы 30 лет ($4,7 \cdot 10^{19}$ нейтр./см²), можно достаточно точно прогнозировать в соответствии с зависимостью (1.1), предложенной в «Нормах расчета на прочность» [10], при значении коэффициента радиационного охрупчивания $A_F = 20$. При более высоких значениях флюенса нейтронов экспериментальные значения ΔT_F больше расчетных, определенных по указанной зависимости. Так, при флюенсе нейтронов $1,7 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² это различие достигает 90 °С у металла сварных швов с довольно низким (до 1,36 мас. %) содержанием

никеля [6]. У металла швов с повышенным содержанием никеля (1,6... 1,8 мас. %) нормативная зависимость оказалась справедливой только до флюенса $2 \cdot 10^{19}$ нейтр./см². При большем флюенсе нейтронов характер зависимости (1.1) из работы [10] значительно отличается от полученной по экспериментальным данным для таких же материалов [6], поэтому исследователи нашли пути ее корректировки. Так, в работе [6] предлагается в уравнении (1.1) заменить показатель степени $1/3$ на $1/2$ и ввести дополнительные параметры, учитывающие в металле шва содержание не только никеля, но и примесных элементов.

Таким образом, несмотря на несколько большую прочность и более низкую критическую температуру хрупкости в исходном состоянии металла швов, выполненных АДС проволокой Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А, для кольцевых



швов, соединяющих обечайки активной зоны корпуса реактора, предпочтительнее использовать сварочные материалы, разработанные в ЦНИИ КМ «Прометей». Так, металл шва, выполненного проволокой Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М, отличается повышенной стойкостью к радиационному охрупчиванию.

Несмотря на то, что в настоящее время при проектировании новых энергетических установок с реакторами типа ВВЭР намечается тенденция к снижению максимального суммарного нейтронного потока на стенку реактора в течение проектного срока службы за счет использования прогрессивных конструктивных решений, проблема радиационного охрупчивания металла остается по-прежнему актуальной. Это связано с появившимися в последние годы сведениями о возможности значительного снижения сопротивления хрупкому разрушению сталей при облучении в течение длительного времени нейтронными потоками низкой плотности. Так, благодаря экспериментам, проведенным в России и за рубежом, установлено отрицательное влияние никеля в случае его содержания в металле более 1 мас. % на радиационную стойкость последней. Кроме того, в связи с увеличением проектного срока службы реактора с 30 до 60 лет одной из наиболее важных стала задача обеспечения тепловой хрупкости материала. Накопленный опыт показал, что тепловое охрупчивание даже при относительно низкой (до 350 °С) температуре может существенно влиять на безопасность при длительной эксплуатации. Так, с целью предотвращения охрупчивания теплоустойчивых хромомолибденовых сталей при отпуске и в процессе эксплуатации в материале должно быть ограничено содержание фосфора, олова, сурьмы, кремния и марганца. Ограничения этих примесей в металле шва учитываются критерием Брускато X:

$$X = (10P + 4Sn + 5Sb + As) / 100 \leq 15 \cdot 10^{-6},$$

а для основного металла — критерием Ватанабэ I:

$$I = (Mn + Si)(P + Sn) \cdot 10^4 \leq 150.$$

Для получения металла шва, отвечающего всем указанным выше требованиям, следовало разработать новые сварочные материалы. В связи с этим ЦНИИ КМ «Прометей» в конце 1990-х годов для автоматической сварки стали 15Х2МФА разработал сварочную проволоку марки Св-10ХЗГМФТА-ВП и флюс ФП-33, а для ручной электродуговой сварки той же стали — электроды марки ЭП-35 (на базе проволоки Св-10ХЗГМФТА-ВП). По сравнению с используемой ранее проволокой Св-10ХМФТУ в проволоке новой марки содержание молибдена увеличено с 0,4...0,6 до 0,6...0,8 мас. %, что позволило получить металл сварного шва равнопрочным основному металлу. Увеличение содержания хрома с 1,6...1,8 до 2,1...2,5 мас. % обеспечило получение металла литого шва с более вязкой структурой. Кроме того, для проволоки новой марки введены дополнительные ограничения по элементам, отрицательно влияющим на тепловое и нейтронное охрупчивание. Это дало возможность

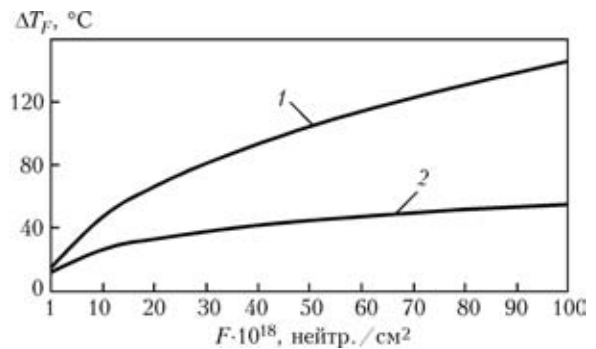


Рис. 3. Изменение расчетного значения сдвига коэффициента радиационного охрупчивания ΔT_F металла сварных швов с разной композицией легирования в зависимости от нейтронного облучения: 1 — проволока Св-09ХГНМТА-ВИ, флюс НФ-18М; 2 — проволока Св-10ХЗГМФТА-ВП, флюс ФП-33

получить металл сварного шва с ограниченным содержанием примесных элементов, а именно, мас. %: $S \leq 0,010$, $P \leq 0,010$, $Sb \leq 0,008$, $Sn \leq 0,0010$, $As \leq 0,0010$, $Cu \leq 0,08$. Отсюда расчетное значение коэффициента радиационного охрупчивания металла шва при температуре облучения 270 °С не превышает 12 (рис. 3). Изготовление проволоки марки Св-10ХЗГМФТА-ВП освоено промышленностью, она выплавляется на особо чистой шихте с применением вакуумно-индукционного и вакуумно-плазменного переплава.

Отличительной особенностью флюса марки ФП-33 является меньшее содержание в нем таких активных оксидов, каким являются диоксид кремния и закись марганца, а также наличие диоксида титана. Это позволяет при сварке снизить интенсивность восстановления кремния и марганца в металле шва из флюса, что способствует повышению сопротивления тепловому охрупчиванию. Флюс указанной марки также освоен промышленностью и поставляется в соответствии с ТУ 5.965-11671-98. Высокие сварочно-технологические свойства флюса позволяют использовать его при сварке в узкую разделку с углом раскрытия свариваемых кромок 2°.

Результаты исследований сварных швов, выполненных указанными сварочными материалами как в лабораторных, так и промышленных условиях, показали, что металл шва после окончательной термической обработки по режиму высокого отпуска имеет высокий уровень прочностных и пластических характеристик. Так, гарантированное значение предела текучести при температуре 350 °С составляет не менее 420 МПа, а критическая температура хрупкости не превышает -20 °С. Исследование склонности к тепловому охрупчиванию металла шва данной композиции показало, что металл шва отличается низкой чувствительностью к тепловому охрупчиванию в случае длительной выдержки при температуре старения 350...550 °С. Это свидетельствует о высоком запасе его стабильности при длительном воздействии эксплуатационных температур. Изменения критической температуры хрупкости после длительных тепловых выдержек (до 20 тыс. ч) при температуре 350...450 °С практически не наблюдалось.



Из изложенного выше следует, что сварку кольцевых швов, расположенных в активной зоне корпуса реактора ВВЭР-1000, рекомендуется выполнять проволокой марки Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М, поскольку при этом металл шва отличается наибольшей радиационной стойкостью. С целью увеличения расчетного и фактического срока службы корпуса реактора ВВЭР-1000 с 1995 г. введены дополнительные ограничения на содержание в проволоке Св-09ХГНМТА-ВИ никеля (1,3 мас. %) и следующих вредных примесей, мас. %: $S \leq 0,006$, $P \leq 0,006$, $Sb \leq 0,008$, $Sn \leq 0,0010$, $As \leq 0,0010$, $Cu \leq 0,06$. Содержание серы и фосфора во флюсе НФ-18М также снижено до 0,012 %. Кроме того, для сварки швов активной зоны предложено применять проволоку диаметром не более 4 мм при узкой разделке кромок свариваемых обечаек.

Для создания корпусов реакторов перспективных установок с более высокими показателями эксплуатационной безопасности, мощности и увеличенным в 1,5...2,0 раза ресурсом (до 60 лет и более) наиболее целесообразным представляется применение разработанной институтом в сотрудничестве с ОКБ «Гидропресс» и Ижорским заводом стали усовершенствованного состава марки 15Х2НМФА класса 0 и сварочных материалов проволоки Св-10ХЗГМФТА-ВП и флюса ФП-33. Эта марка стали является модификацией стали 15Х2МФА и содержит в своем составе не более 0,8 мас. % Ni.

1. Применение новых сварочных материалов для кольцевых швов на корпусах реакторов АЭС повышенной мощности

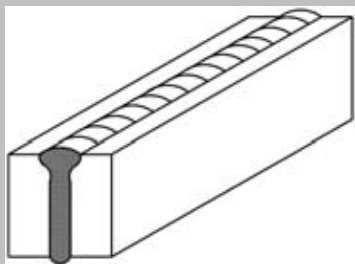
Results of the gained experience on improvement of steels and welding consumables, used in fabrication of WWER reactors of nuclear power stations are presented. Special attention is given to the problems of radiation and thermal embrittlement of the joints, influencing the safety of reactors at long-term operation

- / И. В. Горынин, В. А. Игнатов, Б. Т. Тимофеев, Ю. И. Шкатов // Автомат. сварка. — 1983. — № 10. — С. 38–42.
2. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов / Н. Н. Алексеев, А. Д. Амаев, И. В. Горынин, В. А. Николаев / Под ред. И. В. Горынина. — М.: Энергоиздат, 1981. — 192 с.
3. Конструкционные материалы АЭС / Ю. Ф. Баландин, И. В. Горынин, Ю. И. Звездин, В. Г. Марков. — М.: Энергоиздат, 1984. — 280 с.
4. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / Под ред. А. М. Паршина, П. А. Платонова. — СПб.: Политехника, 1997. — 312 с.
5. Влияние никеля на радиационное охрупчивание стали 15Х2НМФАА / В. А. Цыканов, В. К. Шамардин, А. М. Печерин, Т. Н. Колесова // Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Сб. аннотаций 5-й Междунар. конф., С.-Петербург–Пушкин, 7–14 июня 1998 г. — СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 1988. — С. 50–51.
6. Влияние никеля на радиационное охрупчивание основного металла и металла швов стали 15Х2НМФА-А / А. М. Морозов, В. А. Николаев, Е. В. Юрченко, В. Г. Васильев // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Тр. 6-й Междунар. конф., г. С.-Петербург, 19–23 июня 2000 г. — СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2000. — Т. 2. — С. 372–396.
7. Анализ механических свойств сварных соединений корпусов водо-водяных аппаратов / А. С. Жеребенков, Ю. В. Соболев, Б. Т. Тимофеев, Т. А. Чернаенко // Вопр. судостроения. Сер. Сварка. — 1983. — Вып. 35. — С. 76–83.
8. Данаузов А. В., Тимофеев Б. Т. Сопоставление механических свойств металла кольцевых швов эксплуатирующихся реакторов ВВЭР-1000, выполненных по различным технологическим вариантам // Вопр. материаловедения. — 2000. — № 3. — С. 96–103.
9. ПНАЭ Г-7-010–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки: Правила контроля. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 135 с.
10. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.

Поступила в редакцию 03.11.2005

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРОГРАММИРОВАНИЕМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

Разработана технология сварки новых конструкционных материалов, удовлетворяющая высоким требованиям к качеству и прочности сварных соединений при использовании их в летательных аппаратах, криогенных установках или других высоконагруженных конструкциях.



Среди разнообразных технологических приемов электронно-лучевой сварки таких, как сварка сканирующим пучком, tandemная или с двойным преломлением пучка, сварка с программированием тепловложения в пределах контура развертки пучка занимает особое место. Она открывает перед исследователями или технологами принципиально новые возможности активного управления размерами и формой зоны проплавления, предотвращения образования корневых дефектов или структурной неоднородности, повышения стойкости к образованию горячих трещин и пор в металле шва, обеспечения стабильных показателей прочности как в пределах сварного соединения, так и в сечении при сварке заготовок большой толщины.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7
Тел.: (38044) 287-44-06; факс: (38044) 287-12-83; 287-46-30



УСКОРЕННАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ

Академик НАН Украины **С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, **М. Е. ШИНЛОВ**,
Б. И. КАЗЫМОВ, кандидаты техн. наук, **В. Ф. ЗАГАДАРЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован процесс термообработки (ТО) при сравнительно кратковременном интенсивном воздействии электромагнитного поля на сварные швы, выполненные контактной стыковой сваркой. Рассмотрены режимы ТО и механические свойства обработанных и контрольных сварных швов. Установлено, что применение ускоренной интенсивной индукционной ТО, предусматривающей кратковременное превышение температуры шва выше точки $A_{с3}$, приводит к повышению ударной вязкости сварных швов, уменьшению ширины зоны нагрева, а также экономии энергии, расходуемой на ТО. При продолжительности ТО сварного шва 90...180 с для сталей классов прочности Х65 и Х80 значения ударной вязкости металла сварного шва повышаются до требуемого уровня, при этом прочность металла шва понижается не более чем на 3,6 и 7 % соответственно. Ускоренную индукционную ТО можно использовать для повышения ударной вязкости металла шва соединений труб большого диаметра.

Ключевые слова: индукционная термообработка, магистральные трубопроводы, стали контролируемой прокатки, сварной шов, ударная вязкость, ускоренная обработка

К механическим свойствам стенок труб и сварных стыков трубопроводов предъявляются повышенные требования, особенно, если трубопроводы эксплуатируются в экстремальных условиях (высокое давление перекачиваемого продукта, низкая температура эксплуатации).

В настоящее время для сооружения магистральных трубопроводов широко применяют трубы из листовых сталей с повышенной механической прочностью, которые производят с использованием технологии контролируемой прокатки [1]. Сварку стыковых швов при монтаже магистральных трубопроводов выполняют с помощью высокомеханизированных и автоматизированных сварочных комплексов, например, типа «Север», предназначенного для автоматической контактной стыковой сварки [2].

Среди требований, предъявляемых к механическим свойствам материала трубопроводов, работающих при отрицательных температурах, особое место занимают требования к ударной вязкости сварных швов [3]. Известно [4], что термическая обработка (ТО) сварных швов и околосшовной зоны является одним из способов увеличения этого показателя.

Применение традиционных способов ТО (нагрев поясами электросопротивления за счет выделяемого в них тепла Джоуля–Ленца [5, 6]; радиационный нагрев инфракрасными излучателями) и оборудования для обработки кольцевых сварных швов труб большого диаметра либо невозможно в монтажных полевых условиях (требуется печной нагрев [7]), либо недостаточно эффективно. При этих способах ТО тепло распространяется от источника нагрева к поверхности стенки трубы, а затем за счет теплопроводности — внутрь стенки.

Ширина зоны нагрева при этом очень большая, что может привести к разупрочнению металла шва и повреждению наружной изоляции труб. Для достижения достаточно высокой температуры ТО и заданного равномерного распределения температурного поля по толщине сварного шва требуется значительное время.

При сварке в полевых условиях продолжительность нагрева при ТО существенно влияет как на механические свойства соединений, так и на производительность сварочного комплекса в целом. Известно, что при увеличении продолжительности ТО снижается мощность источника нагрева, что имеет значение в случае ТО с использованием автономного источника энергоснабжения. Как показал опыт, увеличение продолжительности нагрева приводит к возрастанию степени разупрочнения, что проявляется при сварке труб повышенной прочности, изготовленных из сталей класса прочности Х65–Х80 и выше.

Целью проведенных исследований являлось определение возможностей интенсификации процесса ТО с достижением эффекта улучшения прочностных показателей швов свариваемых труб.

Наиболее эффективные возможности сокращения продолжительности ТО появляются при применении индукционного нагрева токами повышенной частоты. При этом выделение тепла происходит непосредственно в нагреваемой стенке трубы в узкой зоне, формирование которой обусловлено геометрическими размерами индукционной системы и частотой тока в индукторе. При соответствующей частоте тока нагрев сварного шва может происходить практически одновременно по всей его толщине [8]. Так, например, для существующего диапазона толщин стенок труб большого диаметра (14...20 мм), применяемых для сооружения магистральных трубопроводов, приемлемый для ТО



Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей, мас. %

Класс прочности стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Nb
X65	0,136	0,307	1,58	0,009	0,014	0,08	0,010	0,046
X80	0,062	0,461	2,04	0,004	0,016	0,05	0,027	0,042

Примечание. Массовая доля никеля, ванадия и меди составляет менее 0,05 %, молибдена — менее 0,03 %.

диапазон значений частоты тока составляет 1,0...2,5 кГц.

В ходе исследований оценивали также влияние интенсивности индукционной ТО и продолжительности нагрева на ударную вязкость KCV и временное сопротивление σ_B металла сварного шва при температуре $T_{исп} = -20...+20$ °С.

Как известно, особенностью технологии производства сталей с контролируемой прокаткой является обжатие валками стального листа при температуре нагрева ниже температуры точки превращения A_{c3} , что аналогично процессу наклепа (нагартовки). Поэтому для таких сталей особенно важно исследовать влияние ТО вблизи точки A_{c3} на показатели прочности (особенно, ударной вязкости).

Предпосылкой для применения ТО при воздействии кратковременного цикла интенсивного индукционного нагрева, при котором температура нагрева сварных швов превышает температуру точки превращения A_{c3} , явились данные о сдвиге $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при ускоренном нагреве в область повышенных температур [9] и ограниченном росте зерен аустенита [10]. Благодаря этому создаются условия, при которых возможно лишь незначительное снижение прочности металла сварных швов при существенном повышении ударной вязкости.

Для сталей контролируемой прокатки нормируется предел текучести и временное сопротивление, при этом химический состав не регламентирован. Так, например, стали одного и того же класса прочности, но различных производителей обычно отличаются химическим составом, причем перечень марок таких сталей довольно большой.

В данной работе исследуется ТО сварных стыковых швов труб, изготовленных из широко распространенных в настоящее время трубных сталей класса прочности X65 толщиной 15,7 мм и X80

толщиной 18,7 мм. Результаты спектрального анализа их химического состава приведены в табл. 1.

Поскольку для каждой марки стали значение температуры точки A_{c3} различно, проведены dilatометрические исследования на дифференциальном вакуумном dilatометре «Шевенар» (производство Швейцарии) образцов МИ-102 типа 1 (ГОСТ 6996-66), изготовленных из сталей классов прочности X65 и X80, для которых A_{c3} составляет соответственно 850 и 880 °С.

ТО подвергали сварные соединения, выполненные контактной стыковой сваркой. Образцы для сварки вырезали из труб диаметром 1420 мм в форме секторов со свариваемым сечением $s \times X200$ мм (здесь s — толщина стенки) трубы. Сварку выполняли на универсальной сварочной машине в соответствии с требованиями ВСН-006-89 [11].

Для осуществления индукционной ТО сварных швов создана лабораторная установка, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 1.

В качестве источника питания тока повышенной частоты применяли электромашинные преобразователи типа ПБВ-100-2,5 мощностью 100 кВт с частотой тока 2,5 кГц. Для согласования источника питания и нагрузки использовали силовой трансформатор типа ТЗ-3-800. Батарея косинусных конденсаторов служила для компенсации реактивной мощности индуктора. Нагрев плит со сварным швом осуществляли с одной стороны. Таким образом, с помощью охватывающего трубу индуктора имитировали условия нагрева сварного кольцевого шва труб большого диаметра в трассовых условиях.

В измерительную часть установки входят датчики электрических параметров и температуры. Датчиком напряжения является стандартный измерительный трансформатор напряжения типа ВОС-8. Датчик тока выполнен по принципу пояса Роговского. Для измерения угла сдвига фаз между током и напряжением индуктора применяли фазометр типа Ф2-1. Электрические измерения осуществляли с использованием электронных вольтметров типов ВУ-15 и ВК 7-9, что позволило определить мощность, затраченную на нагрев сварных швов в образцах и оценить требуемую мощность источника питания для выполнения ТО с аналогичным термическим циклом для труб большого диаметра.

Образцы сварных соединений сталей рассматриваемых классов прочности подвергли ТО с тремя вариантами продолжительности нагрева, при которых металл сварного шва находился при температуре выше точки A_{c3} в течение 90...180 с (табл. 2). В таблице приведены усредненные зна-

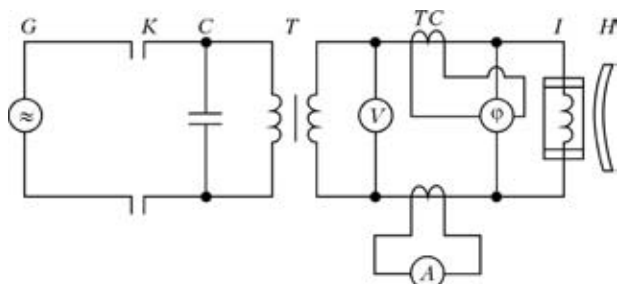


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки: G — источник питания (преобразователь тока высокой частоты); K — контактор; C — батарея косинусных конденсаторов; T — силовой согласующий трансформатор; V — вольтметр; A — амперметр; Φ — фазометр; I — индуктор; H — нагрузка индуктора (нагреваемый образец); TC — трансформатор тока



Таблица 2. Параметры режимов ТО

Класс прочности стали	№ режима	τ , с	T , °C
X65	1	110	950
	2	130	980
	3	150	1030
X80	1	90	970
	2	135	1020
	3	180	1060

Примечание. τ — продолжительность пребывания металла сварного шва при температуре выше точки A_{c3} ; T — температура ТО, усредненная по толщине стенки трубы.

чения температуры по толщине стенки плиты, которые достигаются при указанных режимах ТО. В качестве датчиков температуры использовали хромель-алюмелевые термопары, спаи которых приваривали на половине толщины плиты конденсаторной сваркой в отверстиях, выполненных в каждом сварном стыке. Термический цикл регистрировался самописцем типа КСП. Оперативный контроль температуры нагрева трубы осуществляли с использованием оптического пирометра типа «Промінь».

Методика оценки влияния параметров цикла ТО на механические свойства металла сварных швов заключалась в сравнении временного сопротивления прочности и ударной вязкости сварных образцов, подвергнутых ТО, с базовыми, в качестве которых приняты соответствующие результаты испытаний сварных образцов без ТО. В лаборатории механических испытаний ИЭС им. Е. О. Патона испытаниям подвергали образцы по ГОСТ 6996–66, которые вырезаны механическим способом из швов, выполненных стыковой контактной сваркой оплавлением.

Зависимости построены по точкам, являющимся средними арифметическими результатами испытаний образцов, прошедших ТО по трем вариантам режимов (табл. 2). Надрез выполняли по центру сварного шва таким образом, чтобы направление удара маятникового копра приходилось в тангенциальном направлении к оси трубы, из которой вырезали плиты для сварки. Место нанесения надреза определяли путем химического травления шлифованной поверхности образца в 10%-м растворе надсернистого аммония.

Для стали класса прочности X65 (рис. 2, а) во всем диапазоне температур испытаний можно отметить существенное увеличение ударной вязкости. Так, при температуре испытаний образцов -20°C , подвергнутых ТО при температуре выше точки A_{c3} с выдержкой в течение 100...150 с, значения ударной вязкости возросли в 5,2...8,8 раза; при $T_{\text{исп}} = 0$ — в 7,7...13,0 раз; при $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$ — в 9,3...12,8 раза.

Для стали класса прочности X80 (рис. 2, б) во всем диапазоне температур испытаний также отмечается существенное увеличение ударной вязкости. При температуре испытаний образцов 20°C , прошедших ТО при температуре выше точки A_{c3} с выдержкой в течение 90...180 с, имеет место

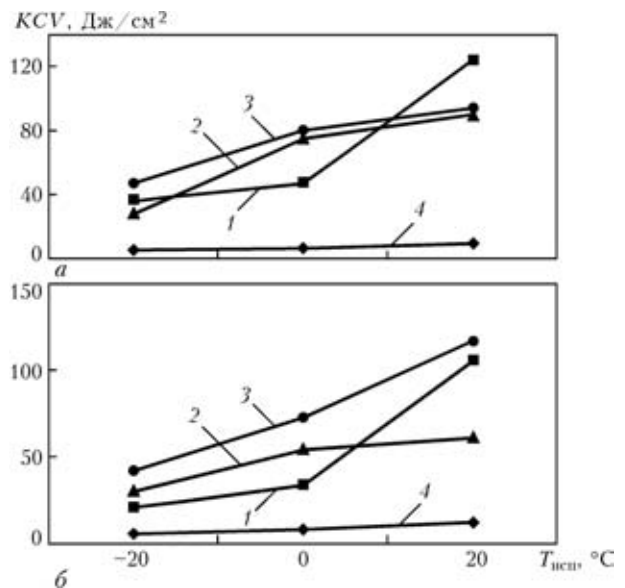


Рис. 2. Изменение ударной вязкости KCV образцов из стали класса прочности X65 (а) и X80 (б) в зависимости от температуры испытаний $T_{\text{исп}}$ при различных режимах ТО (1–3) и без ТО (4)

увеличение ударной вязкости в 3,3...6,7 раза; при $T_{\text{исп}} = 0$ — в 4,0...8,7 раза, при $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$ — в 5,0...9,6 раза.

Таким образом, можно отметить тенденцию к возрастанию ударной вязкости металла сварного шва, подвергнутого ускоренной индукционной ТО, во всем диапазоне температур испытаний. При этом наблюдается некоторый разброс значений ударной вязкости, что является характерным для соединений, выполненных сваркой давлением.

Металлографические исследования сварных соединений до и после ТО по предложенной технологии подтвердили результаты механических испытаний. В структуре металла образцов сварных стыков из сталей обеих марок не было обнаружено крупных зерен, являющихся причиной низкой ударной вязкости. Структура металла в зоне сварки соединений после ТО более однородная и мелкозернистая (рис. 3).

На рис. 4 представлены результаты испытаний на растяжение образцов сварного шва со снятым усилением (гратом) полной толщины типа МИ-18 по ГОСТ 6996–66.

Прочность сварных соединений после ТО по предложенной технологии по сравнению с применяемой ранее имеет более высокие значения в связи со сравнительно малой продолжительностью термического цикла. Однако и в этом случае показатели прочности снижаются.

Для сталей класса прочности X65 характерно снижение прочности на разрыв после интенсивной ТО по сравнению с основным металлом не более чем на 3,6 % (рис. 4, а), а у сталей класса прочности X80 данный показатель составляет 7,0 % (рис. 4, б). Из-за того, что при испытаниях на растяжение использовали образцы малой ширины, полученные выше значения прочности занижены по сравнению с реальными соединениями труб. В силу проявления эффекта контактного упрочнения действительные значения прочности на разрыв сварного

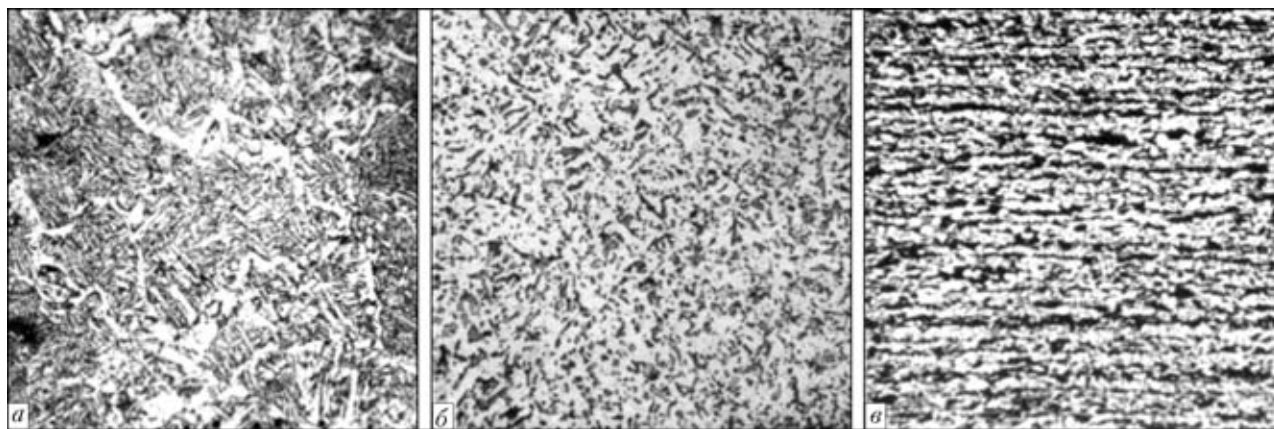


Рис. 3. Характерная микроструктура ($\times 100$) металла в зоне стыка трубных сталей класса прочности X65, X80 в состоянии после сварки (а) и после ТО (б), а также основного металла (в)

соединения полного сечения труб будут выше [12], что подтверждается экспериментальными и расчетными данными [13].

Результаты механических испытаний показали, что наиболее высокие показатели ударной вязкости сварных соединений достигаются при более высоких параметрах режима ТО. При испытаниях на прочность наблюдается обратная зависимость, однако для указанных сталей она выражена менее заметно.

При разработке оборудования для данного вида ТО сварных кольцевых швов труб большого диаметра значительный интерес представляет оценка электрической мощности, расходуемой на выполнение индукционной ТО рассматриваемого вида.

Как показали измерения, значения активной мощности индуктора должны составлять около 85 кВт на 1 м погонной длины сварного шва при толщине стенки труб 16...19 мм.

На рис. 5 (кривая 1) показана зависимость мощности специально разработанных индукторов от диаметра труб, полученная на основании экспериментальных данных.

Например, при ТО труб диаметром 820, 1020, 1220 и 1420 мм с толщиной стенки 16...19 мм необходимо обеспечить мощность индукционного на-

грева соответственно около 220, 280, 330 и 380 кВт, что ниже мощности (рис. 5, кривая 2), потребляемой индуктором при ТО труб большого диаметра, осуществляемой на ранее предложенном режиме [14].

Потребляемая при ТО мощность является особо важным показателем в случае выполнения работ в полевых условиях, когда мощность передвижной электростанции ограничена. Одной из схем организации работ предусматривается питание высокочастотного преобразователя от той электростанции, которую использует сварочная машина. ТО осуществляют сразу же после сварки и удаления внутреннего и наружного грата. В данном случае индуктор и наружный гратосниматель могут быть объединены в единый агрегат, для которого используется один механизм перемещения вдоль трубопровода (либо трубоукладчик, либо автономная система перемещения). Во время работы индуктора сварочная машина перемещается в конец трубопровода, где выполняются подготовительные работы для приварки следующей трубы.

В зависимости от условий строительства удаление наружного грата можно выполнять независимо от сварки. Такую схему применяют, если все производственные средства необходимо сосредоточить на выполнении главной технологической операции, например сварке в период наиболее благоприятных климатических условиях. В этом случае для удаления грата и ТО используют отдельную электростанцию.

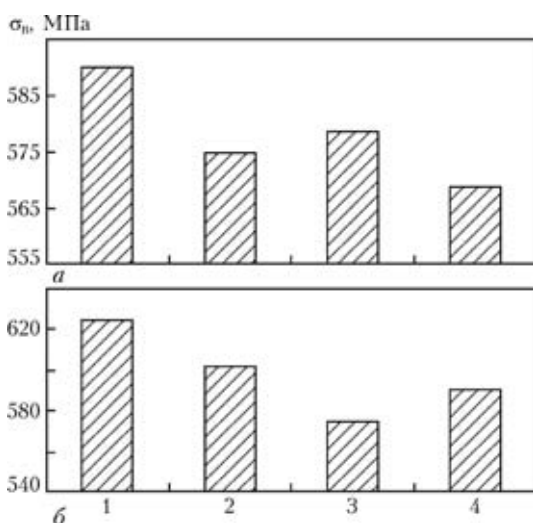


Рис. 4. Временное сопротивление σ_n образцов из стали класса прочности X65 (а) и X80 (б): 1 — без ТО; 2–4 — с ТО (соответственно режимы 1–3 по табл. 2)

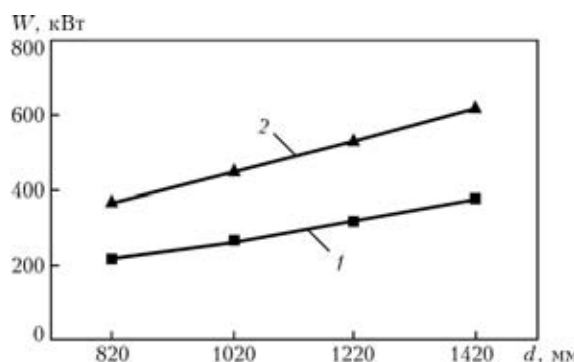


Рис. 5. Зависимость мощности индуктора от диаметра труб: 1, 2 — см. объяснения в тексте



В промежутке между сварочными работами для выполнения ТО сварных швов целесообразно пользоваться электростанцией сварочной установки.

Выводы

1. Применение ускоренной интенсивной индукционной ТО, предусматривающей кратковременное превышение температуры металла шва выше точки превращения A_{c3} , приводит к увеличению ударной вязкости сварных швов, уменьшению ширины зоны нагрева и экономии энергии, затрачиваемой при ТО.

2. При осуществлении ТО сварного шва в течение 90...180 с для сталей классов прочности Х65 и Х80 (соответствующих химических составов) значения ударной вязкости металла сварного шва повышаются до требуемого уровня, при этом прочность стандартных образцов сварного шва понижается не более чем на 3,6 и 7,0 % соответственно.

3. Исходя из результатов механических испытаний сварных швов труб из сталей классов прочности Х65 и Х80 можно рекомендовать ускоренную индукционную ТО для повышения ударной вязкости металла сварного шва труб большого диаметра.

1. Погоржельский В. И. Технология контролируемой прокатки низколегированных сталей // Производство высококачественного проката. — М.: Металлургия, 1979. — С. 10–20.
2. Контактная стыковая сварка трубопроводов / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. А. Сахарнов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 208 с.

The process of heat treatment (HT) at a comparatively short-term intensive action of the electromagnetic field on the welds made by flash-butt welding was studied. HT modes and mechanical properties of the treated and control welds are considered. It is established that application of accelerated intensive induction HT, envisaging a short-term increase in weld temperature above A_{c3} point, leads to an increase in the index of impact toughness of welds, narrowing of the heating zone, as well as saving of the energy consumed in HT. At weld HT duration of 90 to 180 s for steels of Х65 and Х80 steel grades, values of weld metal impact toughness are increased up to the required level, while the weld metal strength decreases by not more than 3, 6 and 7 %, respectively. Accelerated induction HT can be used for improvement of impact toughness of the metal of welds of large diameter pipes

3. СП 105-34-96. Свод правил сооружения магистральных газопроводов. — М.: РАО «Газпром», 1996. — 42 с. — Введ. 01.10.96.
4. Местная термообработка сварных стыковых соединений газопроводных труб диаметром 1420 мм / В. К. Лебедев, Ю. В. Скульский, С. И. Кучук-Яценко и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 10. — С. 38–40.
5. Корольков П. М. Местная термическая обработка сварных тройников и тройниковых соединений // Стр-во трубопроводов. — 1987. — № 7. — С. 24–25.
6. Корольков П. М. Термообработка сварных соединений трубопроводов в полевых условиях // Монтажные и спец. работы в строительстве. — 1996. — № 11/12. — С. 21–24.
7. Хромченко Ф. А., Корольков П. М. Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.
8. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 552 с.
9. Гринев В. Н., Ошкадеров С. П., Телевин Р. В. К вопросу об $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращениях в деформируемых углеродистых сталях при скоростном нагреве // Металлофизика. — 1970. — Вып. 9. — С. 107–109.
10. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — 120 с.
11. ВСН 006-89. Инструкция по технологии стыковой электроконтактной сварке оплавлением магистральных трубопроводов из сталей с пределом прочности до 60 кгс/мм². — М.: ВНИИСТ, 1989. — 48 с.
12. Бакиш О. А. Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение // Свароч. пр-во. — 1985. — № 7. — С. 20–21.
13. Контактная стыковая сварка высокопрочных труб большого диаметра / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Махненко, Б. И. Казымов и др. // Стр-во трубопроводов. — 1987. — № 7. — С. 21–25.
14. Исследование режимов работы индукторов для термообработки стыков труб при строительстве трубопроводов / А. Г. Шварцман, Г. В. Будкин, И. Н. Бриельков и др. // Свароч. пр-во. — 1990. — № 6. — С. 20–21.

Поступила в редакцию 06.05.2005

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ УГЛОВЫХ ШВОВ ВО ВСЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

Автоматическая сварка угловых швов во всех пространственных положениях выполняется в CO_2 со свободным формированием металла на сварочном токе 180...300 А; скорость сварки составляет 0,08...0,10 м/мин.

Технология позволяет в потолочном положении выполнить сварку угловых швов с катетом 8...12 мм за один проход. Швы формируются без подрезов и наплывов с плавным переходом к основному металлу.

При этом достигаются более высокие пластические свойства сварных соединений по сравнению с известными технологиями. Малогабаритное сварочное оборудование имеет соответствующий уровень автоматизации и обеспечивает высокое качество сварных швов при их выполнении операторами невысокой квалификации. Производительность по сравнению с ручной сваркой увеличивается в 2–2,5 раза.

Предлагаемая технология сварки не имеет аналогов в мировой практике.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 48
Тел./факс: (38044) 287-62-13, 529-06-07; E-mail: paton48@paton.kiev.ua



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ МАГ*

Т. ОДЖИ, Ф. МИЯСАКА, Т. ЯМАМОТО, И. ТСУДЖИ (Университет Осаки, Япония)

Проведен анализ технической применимости математических моделей для численного моделирования сварки МАГ в условиях производства. Рассмотрена трехмерная нестационарная тепловая модель сварки. Проведен численный анализ распределения переходной температуры по основному металлу для оценки размера сварочной ванны с использованием метода конечных разностей на основе уравнения теплового потока, а также расчет теоретической конфигурации жидкого металла с учетом равновесия силы тяжести, поверхностного натяжения и давления дуги. Разработанная модель использовалась для моделирования различных процессов сварки таких, как многопроходная сварка и сварка угловых и стыковых швов с поперечными колебаниями горелки. Установлено, что с помощью данной модели можно прогнозировать процесс сварки МАГ и профиль получаемого в результате данного процесса шва в производственных условиях.

Ключевые слова: дуговая сварка, математическая модель, тепловая модель, распределение температуры, размер сварочной ванны, прогноз процесса, производство

Одной из важных проблем в сварочной технике является построение математической модели для компьютерного моделирования процесса сварки в условиях производства. Было предпринято много попыток разработки математических моделей для сварки ТИГ и МАГ [1–8]. Так, Дилтай и Рузен [6] разработали трехмерную квазистационарную тепловую модель для сварки МАГ, которая учитывает влияние таких параметров процесса, как диаметр проволоки и химический состав защитного газа на профиль шва. Ким и На [7] предложили модель для сварки МАГ, учитывающую влияние конвекции сварочной ванны. Пардо и Векман [8] разработали модель для прогнозирования размеров сварочной ванны и усиления швов, выполненных МАГ, с использованием метода конечных элементов для системы перемещающихся координат. Несмотря на эти усилия некоторые проблемы все еще предстоит решить ввиду сложности процессов дуговой сварки. При сварке МАГ электродная проволока расплавляется и подается в расплавленную ванну периодически, а процесс сварки является довольно динамичным и неравномерным. Поэтому перечисленные модели, которые являются квазистационарными, имеют ограниченное применение, и их нельзя использовать к типичным процессам сварки МАГ таким, как подрезание, сварка с ко-

лебательными движениями горелки и многопроходная сварка.

Целью данной работы является разработка трехмерной нестационарной тепловой модели для процессов МАГ сварки в условиях производства.

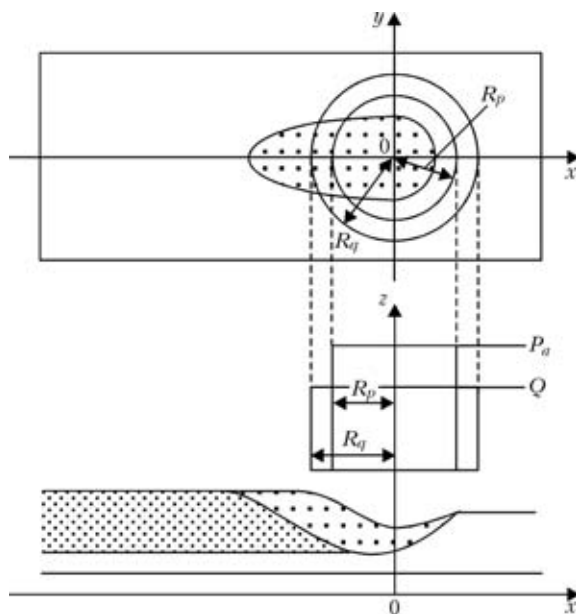


Рис. 1. Схематическое изображение тепловложения и давления дуги на сварочную ванну (обозначения см. в тексте)

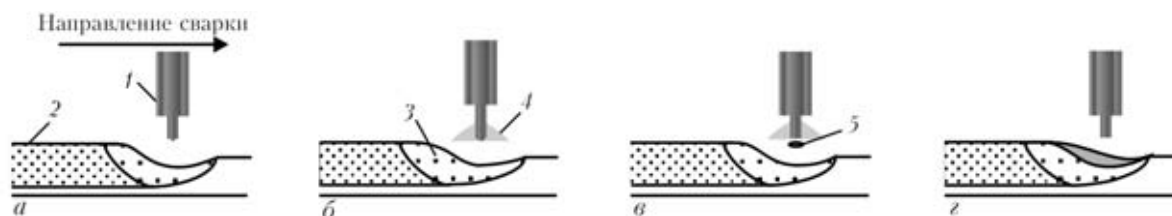


Рис. 2. Схема модели процесса сварки МАГ: 1 — электродная проволока; 2 — металл шва; 3 — расплавленная ванна; 4 — дуга; 5 — перенос металла

*По материалам Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым, Украина).

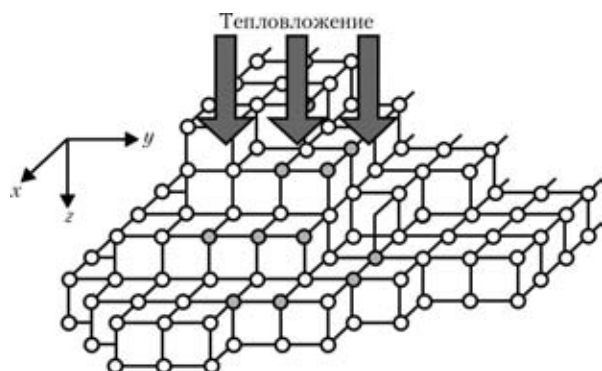


Рис. 3. Схема тепловложения в расплавленную ванну

Для упрощения математической модели процессов сварки МАГ в данной работе введены следующие допущения

- тепловой поток в сварочной ванне принимается проводящим, т. е. влиянием потока металла в сварочной ванне на тепловой поток игнорируется

- сварочная ванна находится в состоянии статического равновесия под действием сил гравитации, поверхностного натяжения и давления дуги.

Исходя из приведенных выше допущений определяющие уравнения имеют следующий вид [1, 9–12]:

$$\rho(T) \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right\} + \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial Y} \right\} + \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma \left[\frac{(1 + \varphi_y^2) \varphi_{xx} - 2\varphi_x \varphi_y \varphi_{xy} + (1 + \varphi_x^2) \varphi_{yy}}{1 + \varphi_x^2 + \varphi_y^2} \right] = \rho g \varphi + P_a - \lambda, \quad (2)$$

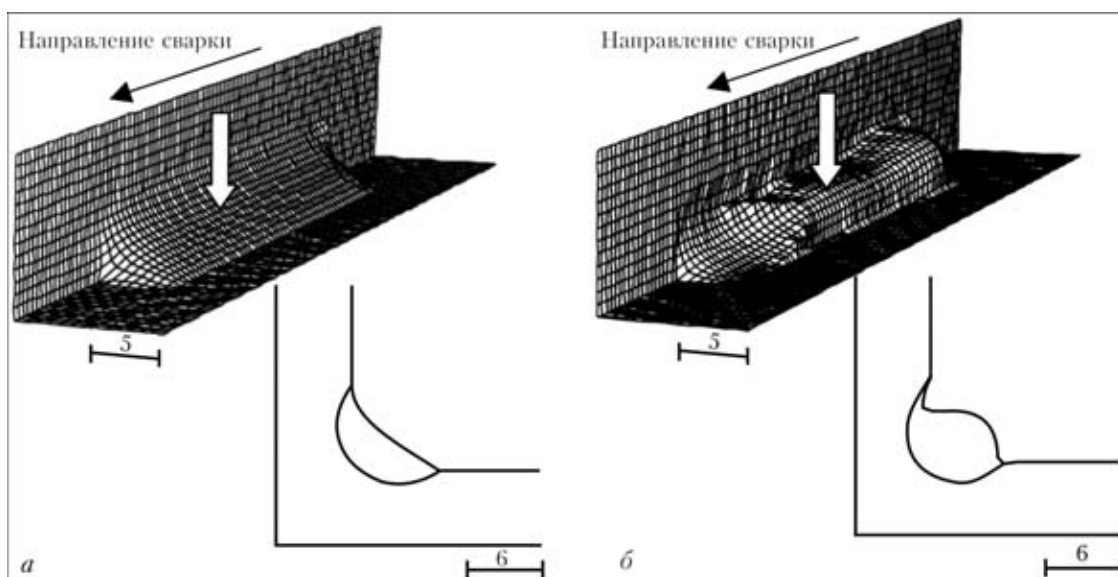


Рис. 4. Влияние давления дуги $P_a = 0$ (а) и 1000 (б) Па на профиль шва при сварке горизонтальных угловых швов ($I_{св} = 230$ А, $U = 25$ В, $v = 40$ см/мин, $R_q = 4$ мм, $R_p = 9$ мм)

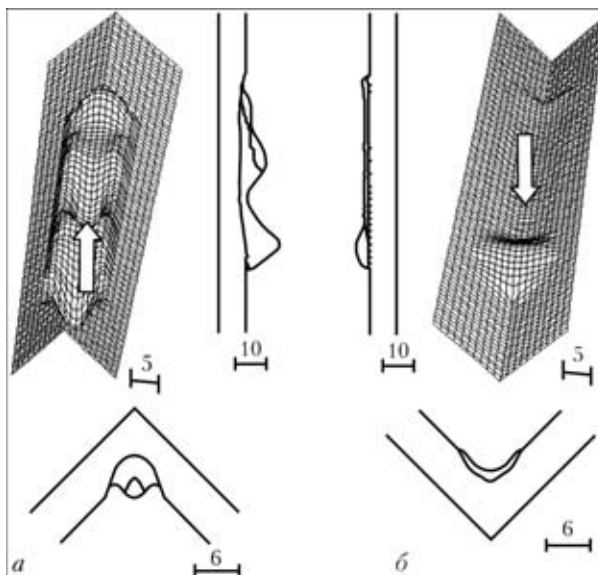


Рис. 5. Результаты сварки снизу вверх (а) и сверху вниз (б) при $I_{св} = 200$ А, $U = 30$ В, $v = 80$ см/мин, $P_a = 500$ Па, $R_q = 4$ мм, $R_p = 4$ мм

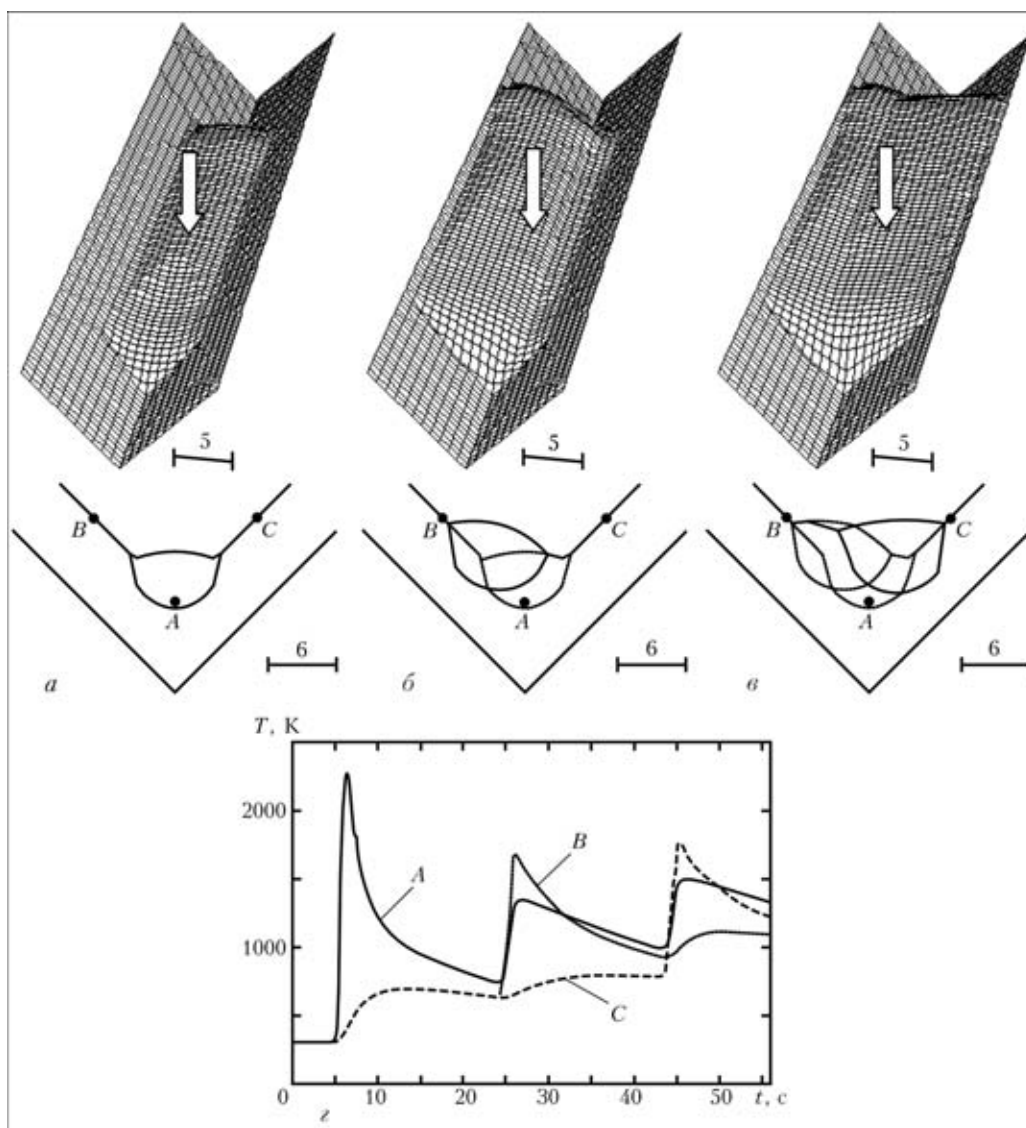


Рис. 6. Пример расчета трехпроходной сварки для первого (а), второго (б) и третьего (в) проходов и расчетный температурный цикл (z) при $I_{св} = 230$ А, $U = 25$ В, $v = 40$ см/мин, $P_a = 800$ Па, $R_q = 4$ мм, $R_p = 4$ мм

где ρ — плотность; H — энтальпия; K — теплопроводность; T — температура; ϕ — смещение поверхности; σ — поверхностное натяжение; g — сила тяжести; P_a — давление дуги; λ — множитель Лагранжа.

В разработанной модели дуга находится на поверхности расплавленной ванны, численно выражается уравнением равновесия расплавленной ванны (2), а тепловложение от дуги принимается рас-

пределенным в кольцевой зоне с радиусом R_q на поверхности расплавленной ванны в качестве граничного условия уравнения теплового баланса (1), как показано на рис. 1.

Соответственно тепловложение от дуги выражается следующим уравнением:

$$q = \frac{Q}{S} = -K \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

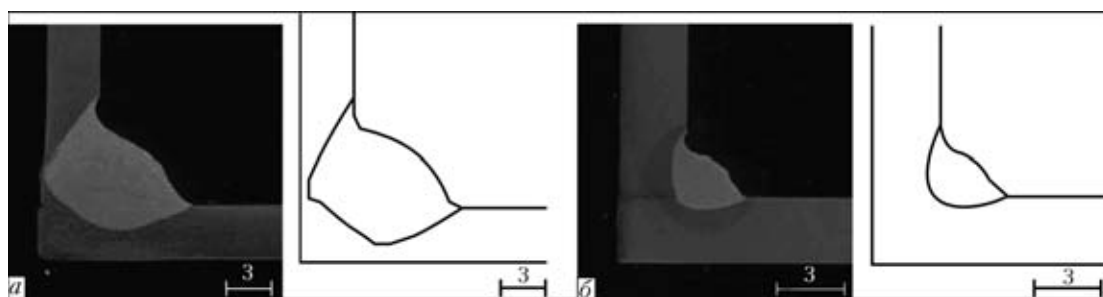


Рис. 7. Сравнение расчета и эксперимента для толщины листа 3 (а) и 6 (б) мм при $I_{св} = 230$ А, $U = 24$ В, $v = 40$ см/мин



где Q — общая тепловая энергия, приложенная к основному металлу за единицу времени; S — площадь источника тепла; q — тепловая энергия, приложенная к основному металлу за единицу времени и на единицу площади.

Ход расчетов за единичный временной шаг в модели приведен на рис. 2 [10, 11]. В течение шага времени горелка зафиксирована (рис. 2, а), а затем тепловая энергия передается основному металлу от дуги (рис. 2, б). На конечной стадии временного шага (рис. 2, в, г) количество проволоки, расплавляемой за единицу времени, передается расплавленной ванне, а профиль поверхности рассчитывается с помощью уравнения (2). После завершения вычисления в течение временного шага по этому методу горелка перемещается, а расчет повторяется в следующем временном шаге. Затем к расчетной поверхности валика прикладывается определенное количество тепловой энергии, как показано на рис. 3 (стрелки).

На рис. 4, а показан расчетный профиль поверхности валика при горизонтальной сварке МАГ угловых швов, а на рис. 4, б четко видно образование валика шва с глубоким проплавлением с подрезом в результате прогиба ванны под давлением дуги.

Еще один пример расчета вертикальной сварки угловых швов приведен на рис. 5, где показано продольное сечение по оси, а также поперечное сечение валика. Расплавленная ванна провисает под влиянием силы тяжести при вертикальной сварке таким образом, что образуется глубокое (рис. 5, а) и неглубокое (рис. 5, б) проплавление.

Пример расчета многопроходной сварки показан на рис. 6. Время охлаждения между проходами составляло 10 с. В результате тепловложения в первых двух проходах проплавление в третьем становится глубже и шире, чем в первом. Влияние трех нагревов на температурный режим четко видно на рисунке, а температурный режим сильно зависит от положения на изделии. Для оценки достоверности экспериментальной модели результат вычислений сравнивали со швом, выполненным экспериментальной сваркой МАГ ($Ar + 20\% CO_2$), на листах мягкой стали.

Как видно из рис. 7 и 8, получено хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными.

В данной работе была предпринята разработка системы объединения моделей, в которой ранее описанная модель связывается с металлургической и/или механической моделью для комплексного моделирования дуговой сварки.

На рис. 9, а приведен пример объединения моделей, где модель процесса связывается с механической моделью. На рисунке показано, что изделие с тавровым соединением сложно деформируется в результате тепловых напряжений при сварке МАГ. Другими словами, система показывает, что продольный изгиб, видимо, будет зна-

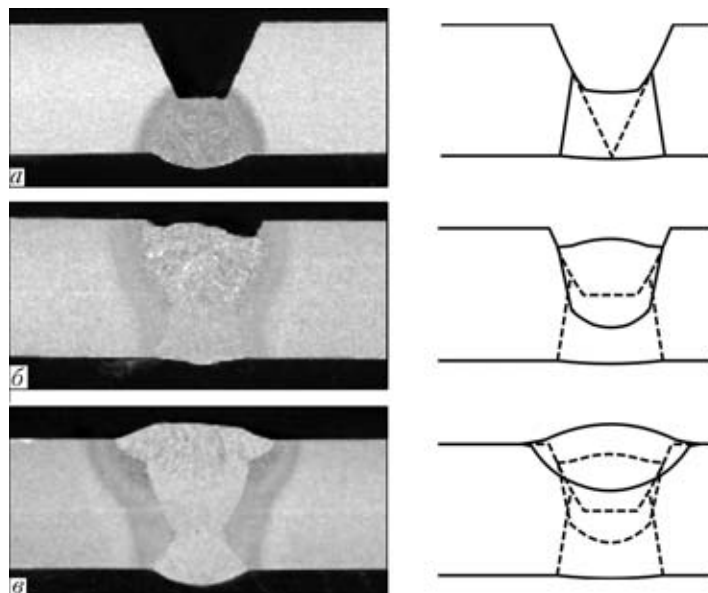


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчетных сечений первого (а), второго (б) и третьего (в) проходов: а — $I_{св} = 210$ А; $U = 26$ В, $v = 40$ см/мин; б — $I_{св} = 195$ А, $U = 26,0$ В, $v = 22$ см/мин; в — $I_{св} = 190$ А, $U = 26$ В, $v = 22$ см/мин

чительным в дополнение к угловой деформации при введенном режиме сварки.

На рис. 9, б приведен еще один пример, полученный с помощью системы объединения моделей, который показывает деформацию шва при стыковой сварке стальных листов толщиной 6 мм. Установлено, что сварка приводит к значительной поперечной усадке изделия.

Таким образом, разработанную модель процесса сварки МАГ можно легко применить для многоп-

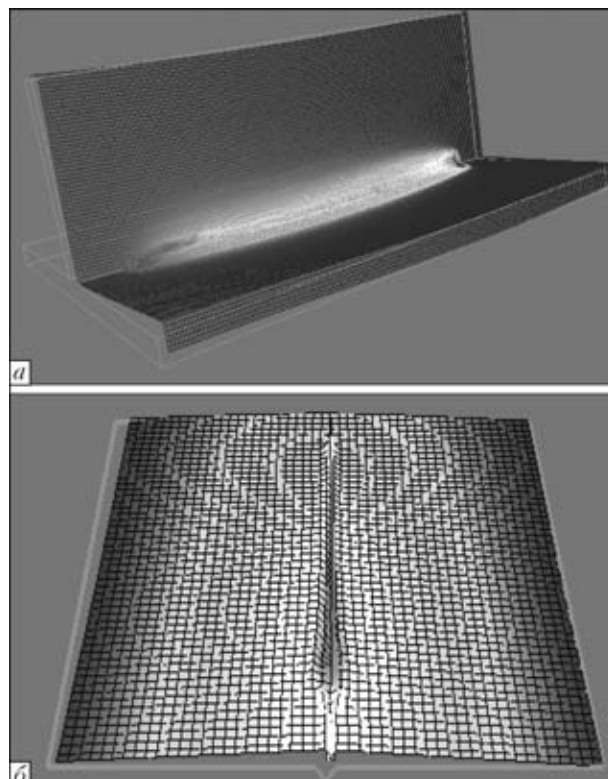


Рис. 9. Расчетная деформация в тавровых (а) и стыковых соединениях (б) тонкого листа, сваренного сваркой МАГ



роходной дуговой сварки с колебательными движениями горелка, которые широко используются на производстве. Профиль шва, полученный с помощью этой модели, сравнивали с экспериментальным (сварка в тавровых или стыковых соединений) и было продемонстрировано хорошее согласие данных расчетов и эксперимента. Поэтому разработанная модель является полезной в качестве инженерного метода для моделирования сварки в производственной среде.

1. Ohji T., Nishiguchi K. // Technol. Rep. of Osaka Univ. — 1983. — **33**. — P. 35–43.
2. Zacharia T., Eraslan A. H., Aidun D. A. // Weld. J. — 1988. — **67**. — P. 18–27.
3. Zacharia T., David S. A., Vitek J. M. et al. // Ibid. — 1995. — **74**. — P. 353–362.

4. Nishiguchi K., Ohji T., Yoshida H. et al. // JWS. — 1986. — **4**(4). P. 673–677.
5. Kondoh K., Ohji T. // Science and Technology of Welding and Joining. — 1998. — **3**(3). — P. 127–134.
6. Diltthey U., Roosen S. // Proc. of Intern. symp. on theoretical prediction in joining & welding JWRI. — 1996. — P. 133–154.
7. Kim J. W., Na S. // J. Transact. of ASME. J. Eng. for Industry. — 1994. — **166**. — P. 78–85.
8. Pardo E., Weckman D. C. // Metallurg. Transact. B. — 1989. — **20**. — P. 937–947.
9. Ohji T. Ph. D. Thesis. Osaka Univ., 1978.
10. Tsuji Y., Yamamoto T., Miyasaka F. et al. // Quart. J. JWS. — 2000. — **18**(4). — P. 572–533.
11. Ohji T., Tsuji Y., Miyasaka F. et al. // Materials Science & Technology. — 2001. — **17**. — P. 167–168.
12. Yamamoto T., Ohji T., Miyasaka F. et al. // Science and Technology of Welding and Joining. — 2002. — **7**. — P. 260–264.

Analysis has been performed of engineering applicability of mathematical models for numerical simulation of MAG welding under the production conditions. A three-dimensional non-stationary thermal model of welding is considered. Numerical analysis of interpass temperature distribution through the base metal is performed for evaluation of weld pool dimensions, using the method of finite differences based on the heat flow equation, as well as analysis of theoretical configuration of liquid metal, taking into account the equilibrium of the force of gravity, surface tension and arc pressure. The developed model was used for simulation of various welding processes, such as multipass welding and welding of fillet and butt welds with transverse oscillations of the torch. It is established that this model can be used to predict the MAG welding process and the profile of the weld obtained by this process in production.

Поступила в редакцию 15.01.2005

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ЕМКОСТЕЙ И ДРУГИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ С ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДО 150 ММ

Разработана комплексная технология изготовления с применением электронно-лучевой сварки цилиндрических или конических оболочек и емкостей диаметром от 300 до 8000 мм, используемых в качестве корпусов ракетно-космических аппаратов, топливных систем, сосудов давления или криогенных емкостей, из алюминиевых и магниевых сплавов.



Кроме операций сварки, технология решает проблемы конструктивного исполнения свариваемых кромок различных типов соединений, подготовки поверхности изделий и кромок перед сваркой, выполнения требований к точности сборки и выбору пространственного положения соединений, а также выбора рациональных способов контроля качества и прочностных испытаний сварных соединений при криогенных температурах включительно.

Технология обеспечивает повышение на 15...25 % временного сопротивления соединений термически упрочняемых и усиленно нагартованных алюминиевых сплавов, уменьшение в 4–5 раз остаточных сварочных деформаций и в 5–7 раз ширины зоны термического влияния по сравнению с дуговыми способами сварки.



Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7
Тел.: (38044) 287-44-06; факс: (38044) 287-12-83; 287-46-30



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ НА СОДЕРЖАНИЕ δ -ФЕРРИТА В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ СЛОЕ

П. К. ПАЛАНИ, Н. МУРУГАН (Гос. технол. ин-т, г. Коимбатор, Индия)

Качество наплавленных деталей зависит от количества остаточного δ -феррита в наплавленном металле, что, в свою очередь, определяется параметрами процесса наплавки. Управление процессом образования феррита при наплавке можно легко обеспечить с помощью уравнений, позволяющих прогнозировать число феррита (FN) на основе таких параметров процесса, как величина тока и скорость сварки, а также расстояние между горелкой и изделием. Установлено, что изменение расстояния между горелкой и изделием оказывает наибольшее влияние на величину FN по сравнению с другими параметрами процесса.

Ключевые слова: дуговая наплавка, коррозионно-стойкий слой, параметры процесса, δ -феррит, анализ чувствительности, уравнение регрессии

Коррозия металла, ослабляя конструкцию, может привести к ее разрушению. Хотя полностью исключить коррозию невозможно, ее можно снизить до определенной степени. Для этого на менее коррозионностойкую подложку наносят защитный слой с помощью процесса наплавки [1–5] (нанесение относительно толстого слоя коррозионностойкого материала на основу из углеродистой или низколегированной стали [6–10]). Среди различных способов, применяемых для защиты поверхности, наиболее распространенным является дуговая наплавка, при которой толщина необходимого покрытия превышает 3 мм. Наплавку широко применяют в энергетике, а также в обрабатывающих отраслях промышленности [11]. Качество наплавленных деталей зависит от металлургических характеристик, в том числе от содержания δ -феррита в структуре, образующейся в наплавленном металле.

Металл шва аустенитной нержавеющей стали обычно содержит 2...7 % феррита в аустенитной матрице, что повышает свариваемость и прочность швов [12–23]. Сохранение заданного количества феррита и аустенита в шве имеет большое значение для обеспечения необходимой коррозионной стойкости и долговечности наплавленных конструкций [24].

Исследования показали, что небольшое количество первичного остаточного феррита в металле шва при комнатной температуре снижает чувствительность к образованию трещин в нержавеющей стали серии 300, являющейся полностью аустенитной в исходном состоянии [14–18]. Однако слишком большое содержание феррита способ-

ствует снижению механической прочности и коррозионной стойкости. Таким образом, в зависимости от назначения необходимо, чтобы критическое содержание феррита в стали составляло около 3...8 об. % [19–25]. Превышение этого значения (если материал эксплуатируется при высокой температуре) предполагает превращение δ -феррита в хрупкую σ -фазу [26–34]. Ограничение по содержанию феррита в швах требуется также при изготовлении деталей или конструкций из немагнитных материалов.

Большое влияние на содержание остаточного δ -феррита, образующегося при наплавке, оказывают такие параметры процесса, как ток сварки, скорость подачи проволоки, скорость сварки и расстояние между горелкой и изделием. В связи с этим возникла необходимость в разработке методологии с целью управления и оптимизации содержания δ -феррита, образующегося в процессе наплавки коррозионностойкого слоя, соответствующего составу аустенитной нержавеющей стали.

Целью данной работы является разработка уравнения регрессии для определения зависимости между количеством образующегося δ -феррита и параметрами процесса наплавки и степень влияния последних на образование δ -феррита.

Исследование выполняли в два этапа. На первом проводили эксперименты с различными параметрами процесса методом планирования эксперимента с целью построения статистических моделей для прогнозирования количества образующегося феррита, на втором был проведен анализ чувствительности на основе разработанных эмпирических уравнений.

Исследование проводили с использованием процесса дуговой наплавки порошковой проволокой (FCAW) диаметром 1,2 мм, соответствующей по

Таблица 1. Химический состав используемых материалов, мас. %

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N ₂	Cu
317L (порошковая проволока)	0,021	0,890	1,380	0,016	0,007	18,46	3,18	13,10	0,057	0,007
2062 (конструкционная сталь)	0,180	0,180	0,980	0,016	0,016	—	—	—	—	—



Таблица 2. Параметры процесса дуговой наплавки и их пределы

Параметры процесса	Программируемый предел				
	-1,682	-1	0	1	1,682
Сварочный ток $I_{св}$, А	176	190	210	230	244
Скорость сварки S , см/мин	26	29	34	39	42
Расстояние между горелкой и изделием N , мм	15	17	20	23	25

химическому составу металлу наплавки аустенитной нержавеющей стали 317L (AWS: A5-22-95; EN 12073) на подложку в виде пластины из конструкционной стали 2062. Химический состав основного и присадочного материалов, используемых в данном исследовании, приведен в табл. 1.

Методика проведения эксперимента. Были определены такие независимо контролируемые параметры процесса, как ток сварки $I_{св}$, скорость сварки S и расстояние между горелкой и изделием N . Рабочий диапазон параметров установлен путем выполнения серии испытаний и контроля качества наплавленного валика с учетом внешнего вида или гладкости поверхности, а также наличия каких-либо видимых дефектов. Установлено, что скорость подачи проволоки w_f прямо пропорциональна току сварки: $w_f = -6,92 + 0,0860 I_{св}$ [35].

Таблица 3. Матрица плана и результаты измерения

Параметры процесса			Измеренные значения FN	Нелинейная модель		Полиномиальная модель	
$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм		прогнозируемое значение FN	погрешность, %	прогнозируемое значение FN	погрешность, %
190	29	17	7,28	6,441868	13,05727	7,27302	0,137219
230	29	17	5,80	5,602188	3,530984	5,53902	4,711664
190	39	17	6,48	5,848796	10,84332	6,08182	6,596381
230	39	17	4,12	5,086421	-19,059	4,34782	-5,30887
190	29	23	5,62	6,53997	-14,1128	5,67252	-0,97875
230	29	23	5,67	5,687502	-0,36048	5,89452	-3,85986
190	39	23	5,70	5,937867	-4,00593	5,78632	-1,49179
230	39	23	5,72	5,163882	10,71129	6,00832	-4,84861
176	34	20	5,75	6,521081	-11,8244	6,10514	-5,81707
244	34	20	4,75	5,135792	-7,51183	4,81994	-1,45106
210	26	20	6,17	6,255008	-1,407	6,44838	-4,36358
210	42	20	5,43	5,349706	1,55698	5,58646	-2,747
210	34	15	5,55	5,649371	-1,75898	5,99242	-7,38299
210	34	25	6,23	5,795522	7,54855	6,04242	3,154034
210	34	20	5,88	5,73122	2,613408	6,01742	-2,26708
210	34	20	6,283	5,73122	9,627621	6,01742	4,413519
210	34	20	6,101	5,73122	6,452032	6,01742	1,388967
210	34	20	5,704	5,73122	-0,47494	6,01742	-5,20854
210	34	20	6,09	5,73122	6,260101	6,01742	1,206165
210	34	20	5,301	5,73122	-7,5066	6,01742	-11,9058
Коэффициент детерминации R^2				0,387		0,823	
Коэффициент корреляции Пирсона P				0,600		0,933	
Среднеквадратическая ошибка				0,112		0,052	
Абсолютная ошибка				0,406		0,190	

После определения рабочего диапазона параметров процесса установлен верхний и нижний запрограммированный предел (соответственно на уровне +1,682 и -1,682). При этом запрограммированные значения промежуточных уровней рассчитывали по уравнению $X_i = 1,682[2X - (X_{\max} + X_{\min})]/(X_{\max} - X_{\min})$, где X_i — необходимое запрограммированное значение параметра X от $X_{\min}$ до $X_{\max}$. Выбранные значения параметров процесса, а также единицы и обозначения этих параметров приведены в табл. 2.

Эксперименты проводили с использованием установки для синергетической сварки МИГ «Unimacro Esseti 501», находящейся в Технологическом институте (г. Коимбатор, Индия). Проведено 20 серий испытаний с использованием одной основной составной матрицы ротatableльного плана в произвольном порядке с целью исключения какой-либо систематической ошибки в системе. Испытания проводили наложением одного валика длиной 150 мм на пластины из конструкционной стали с использованием порошковой проволоки из нержавеющей стали 317L диаметром 1,2 мм в смеси защитных газов 95 % Ar + 5 % CO₂, подаваемой со скоростью 16 л/мин. Исследования проводили на постоянном токе обратной полярности при угле наклона электрода 90°.

Содержание феррита измеряли с помощью прибора FERRITSCOPE® MP30 фирмы «Fischer Instruments (G.B.) Ltd.», Англия. Ферритоскоп калибровали в соответствии со стандартами WRC (Исследовательского сварочного центра). Перед измерениями его регулировали по форме образца, выполняя корректирующую калибровку по стандартам пользователя в соответствии с методиками, описанными в стандартах ANSI/AWS A 4.2 (Национальный институт стандартизации США в Американском сварочном обществе).

Линейное наблюдение проводили для шлифованной плоской верхней наплавленной поверхности каждого образца по продольной оси наплавки. Измеренные средние значения содержания феррита FN приведены в табл. 3.

Построение математических моделей. *Нелинейная модель.* Используя содержание феррита FN в качестве зависимого параметра и такие параметры процесса, как ток $I_{св}$, скорость сварки S и расстояние между горелкой и изделием N , в качестве независимых параметров зависимость между ними можно выразить следующим выражением [36]:

$$FN = A I_{св}^b S^c N^d, \quad (1)$$



Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований

№ эксперимента	Параметры процесса			Измеренные значения FN	Нелинейная модель		Полиномиальная модель	
	$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм		прогнозируемое значение FN	погрешность, %	прогнозируемое значение FN	погрешность, %
1	200	32	21	5,73	6,072662	-5,64271	6,051	-5,305
2	210	29	23	5,70	6,078583	-6,22814	5,875	-2,978
3	210	39	20	5,79	5,480525	5,64682	5,643	2,605
4	230	34	23	5,61	5,400093	3,887105	5,831	-3,790
5	220	45	18	4,499	5,029275	-10,5438	4,362	3,141
6	190	34	20	6,399	6,166241	3,774732	6,130	4,388
7	230	29	20	5,43	5,647896	-3,85801	5,610	-3,208
Коэффициент детерминации R^2					0,599		1	
Коэффициент корреляции Пирсона P					0,798		0,92	
Среднеквадратическая ошибка					0,126		0,099	
Абсолютная ошибка					0,406		0,228	

где A , b , c и d — искомые постоянные.

Уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\log(FN) = \log(A) + b\log(I_{св}) + c\log(S) + d\log(N). \quad (2)$$

Выражение (2) можно выразить в виде математического линейного уравнения

$$K = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3, \quad (3)$$

где K — логарифмическое значение экспериментально измеренной характеристики FN; $\beta_0 - \beta_3$ — искомые постоянные; x_0 — единичный вектор-столбец; $x_1 - x_3$ — логарифмические значения сварочного тока, скорости сварки и расстояния между горелкой и изделием.

Постоянные определяли по экспериментальным данным, приведенным в табл. 3, с использованием статистической программы Systat® V11. Полученное в результате нелинейное уравнение имеет следующий вид:

$$FN = 10^{2,89} I_{св}^{-0,731} S^{-0,326} N^{0,050}. \quad (4)$$

Моделирование количества феррита FN с использованием уравнения полиномиальной регрессии. Для представления поверхности отклика с использованием коэффициентов K применяли следующее полиномиальное уравнение регрессии второго порядка [1, 37–44]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^K b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} X_i^2,$$

Таблица 5. Дисперсионный анализ для нелинейной и полиномиальной моделей

Источник	Нелинейная модель					Полиномиальная модель				
	Сумма квадратов	Число степеней свободы df	Среднеквадратическое отклонение	F -критерий	Коэффициент корреляции P	Сумма квадратов	Число степеней свободы df	Среднеквадратическое отклонение	F -критерий	Коэффициент корреляции P
Регрессия	0,019	3	0,006	3,370	0,045	6,454	6	1,076	10,137	0
Анализ остатков	0,030	16	0,002	—	—	1,379	13	0,106	—	—

где Y — отклик; b_0 — свободный член уравнения регрессии; коэффициенты $b_1, b_2, \dots, b_k$ — линейные, $b_{11}, b_{22}, \dots, b_{kk}$ — квадратичные, $b_{12}, b_{13}, \dots, b_{k-1,k}$ — интерактивные члены.

Значения коэффициентов указанного полинома определяли с помощью статистической программы Systat® V11. Полная модель оценки, использующая параметры в натуральном виде, может быть описана следующим уравнением:

$$FN = 33,58 + 0,0548 I_{св} - 0,264 S - 2,5999 N - 0,00047 I_{св}^2 + 0,00022 S^2 + 0,00384 N^2 - 0,00114 S I_{св} + 0,000815 N I_{св} + 0,02175 S N. \quad (6)$$

С целью упрощения несущественные коэффициенты в уравнении (6) можно опустить. Для этого применяются t - и F -критерии. С использованием методики последовательного расчета, включенной в программу Systat®, в модель автоматически по одной вводят переменные с $F \geq 4,0$ и исключают переменные с $F \leq 4,0$. После определения значимых коэффициентов строят конечную модель с параметрами в натуральном виде, определенными с помощью указанной методики:

$$FN = 39,57 + 0,0197 I_{св} - 0,4889 S - 2,446 N - 0,00048 I_{св}^2 + 0,00815 N I_{св} + 0,02175 S N. \quad (7)$$

Выбор уточненной модели. Из двух построенных таким образом моделей (нелинейной и полиномиальной) на основе определенных критериев, таких как дисперсионный анализ (ANOVA), коэффициент детерминации R^2 , коэффициент корреляции Пирсона P , степень точности и среднеквадратическая погрешность, выбрали наиболее точ-

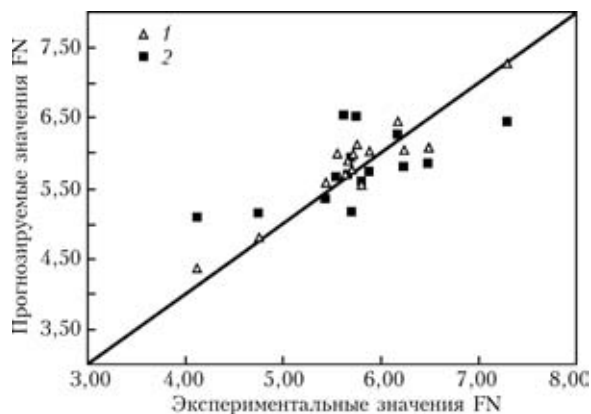


Рис. 1. Диаграмма разброса данных для полиномиальной (1) и нелинейной (2) моделей

ную. Сравнительные данные приведены в табл. 3–5.

Адекватность построенных моделей проверяли методом дисперсионного анализа (ANOVA) [32–40] (табл. 5). Метод позволил установить, что расчетный коэффициент F для нелинейной модели составляет 3,370, а для полиномиальной — 10,137. Соответственно значение R^2 и уточненное значение R^2 для нелинейной модели составляют 0,39 и 0,27, а для полиномиальной 0,82 и 0,74.

Как видно из рис. 1, в полиномиальной модели точки находятся ближе к линии 45° по сравнению с нелинейной моделью.

Для обеспечения точности разработанных моделей были проведены дополнительные эксперименты. Значения R^2 , P и RMSE для нелинейной и полиномиальной моделей составляют соответственно 0,599; 0,79; 0,126 и 1; 0,92; 0,099.

Как следует из рассмотренного выше, между экспериментальными и прогнозируемыми значениями при использовании уравнения полиномиальной

Таблица 6. Чувствительность содержания феррита (FN) к параметрам процесса наплавки

Параметры процесса			Чувствительность		
$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм	$d(FN)/dI_{св}$	$d(FN)/dN$	$d(FN)/dS$
176	34	20	0,01374	-0,2721	-0,0539
190	34	20	0,0003	-0,158	-0,0539
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
230	34	20	-0,0381	0,168	-0,0539
244	34	20	-0,05154	0,2821	-0,0539
210	26	20	-0,0189	-0,169	-0,0539
210	29	20	-0,0189	-0,1038	-0,0539
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
210	39	20	-0,0189	0,11375	-0,0539
210	42	20	-0,0189	0,179	-0,0539
210	34	15	-0,05965	0,005	-0,1627
210	34	17	-0,04335	0,005	-0,1192
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
210	34	23	0,00555	0,005	0,01135

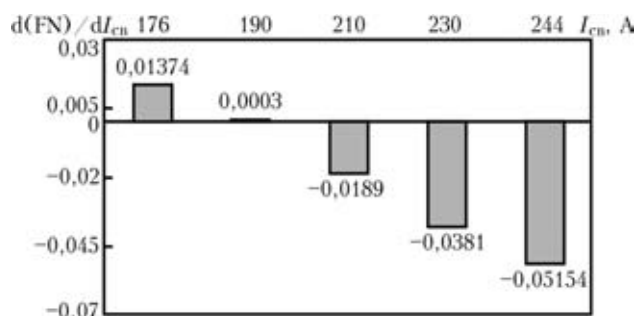


Рис. 2. Чувствительность FN к току сварки ($S = 34$ см/мин, $N = 20$ мм)

регрессии наблюдается достаточно хорошее согласование. Таким образом, для данного исследования как наиболее точное было выбрано полиномиальное уравнение.

Анализ чувствительности. Качественную и количественную эффективность параметров процесса можно определить с использованием анализа чувствительности, с помощью которого можно установить и определить порядок значимости критических параметров [37]. Такой анализ может помочь инженерам-технологам эффективно выбирать параметры процесса и контролировать содержание феррита без многочисленных экспериментов методом проб и ошибок и в результате сэкономить время и материалы.

Ниже приведены уравнения чувствительности содержания феррита, полученные путем дифференцирования уравнения (6) [37]:

чувствительность к току сварки:

$$d(FN)/d(I_{св}) = 0,0197 - 2 \cdot 0,00048I_{св} + 0,00815N, \quad (8)$$

к скорости сварки:

$$d(FN)/d(S) = -0,4889 + 0,02175N, \quad (9)$$

к расстоянию между горелкой и изделием:

$$d(FN)/d(N) = -2,446 + 0,00815I_{св} + 0,02175S. \quad (10)$$

Расчетные значения чувствительности к току, скорости сварки и расстоянию между горелкой и изделием, полученные с использованием указанных уравнений, приведены в табл. 6 и на рис. 2–6. При соответствующем увеличении значений параметров процесса положительные значения чувствительности означают, что количество образующегося остаточного феррита FN увеличивается, отрицательные — снижается.

Чувствительность к току сварки. Как видно из рис. 2, феррит, образующийся в процессе наплавки, более чувствителен к току сварки в области повышенных значений тока. Чувствительность имеет положительное значение при токе ниже 190 и отрицательное — выше 190 А, т. е. воздействие тока сварки заключается в увеличении образования феррита в областях более низких значений тока и в снижении скорости образования феррита в областях повышенных значений. Чувствительность FN к току сварки выше в областях более низких значений N (рис. 3). Кроме того, повышение силы тока вызывает снижение FN. Однако если величина

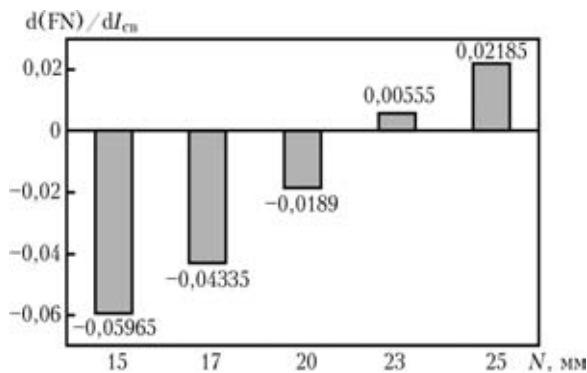


Рис. 3. Чувствительности FN к току сварки ($I_{св} = 210$ А, $S = 34$ см/мин)

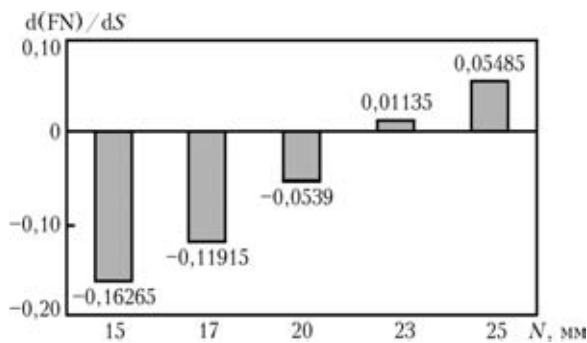


Рис. 4. Чувствительность FN к скорости сварки ($I_{св} = 210$ А, $S = 34$ см/мин)

N находится в области повышенных значений (например, выше 22 мм), с увеличением силы тока значение FN начинает возрастать.

При всех значениях скорости сварки чувствительность к току сварки остается постоянной (табл. 6), т. е. содержание феррита нельзя изменить путем изменения только скорости сварки.

Чувствительность к скорости сварки. Как следует из рис. 4, образование δ -феррита более чувствительно к скорости сварки в области более низких значений N , средний уровень которых соответствует нулевой чувствительности. В области повышенных значений N наблюдаются положительные значения чувствительности к скорости сварки. При $N < 22$ мм содержание феррита снижается, выше — увеличивается.

Чувствительность к расстоянию между горелкой и изделием. Чувствительность образования феррита к величине N при различных значениях S и $I_{св}$ показана на рис. 5 и 6. В обоих случаях она имеет положительные значения в областях повышенных значений скорости и тока сварки. Кроме того, чувствительность к расстоянию между горелкой и изделием максимальна при значении сварочного тока 176 и 244 А, т. е. даже незначительные изменения N вызывают существенное изменение величины FN в областях более высоких или более низких значений тока.

В заключение следует отметить, что в процессе работы установлены зависимости между параметрами процесса и количеством δ -феррита, образующимся в процессе наплавки порошковой проволокой 317L на пластины из конструкционной стали. Для вывода уравнений регрессии (нелинейной

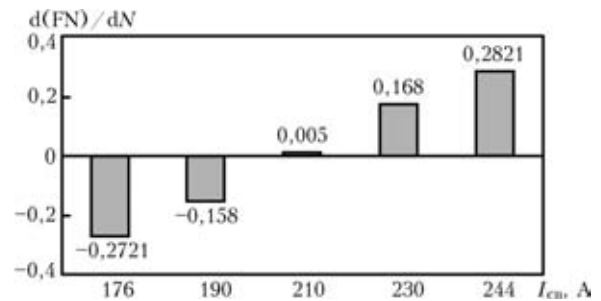


Рис. 5. Чувствительность FN к расстоянию между горелкой и изделием ($S = 34$ см/мин; $N = 20$ мм)

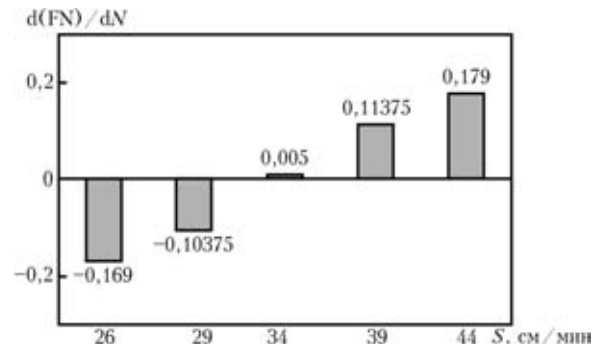


Рис. 6. Чувствительность FN к расстоянию между горелкой и изделием ($I_{св} = 210$ А; $N = 20$ мм)

и полиномиальной моделей) использовали методику изучения поверхности отклика. Установлено, что модель, использующая полиномиальное уравнение, является вполне удовлетворительной.

С использованием анализа чувствительности определили параметры процесса, оказывающие наибольшее влияние на образование δ -феррита.

Для контроля образования остаточного феррита более эффективно контролировать параметры N и S , наибольшее влияние оказывает изменение расстояния между горелкой и изделием.

Авторы выражают благодарность Всеиндийскому совету технического образования и Большой комиссии Университета (Нью-Дели, Индия) за финансовую поддержку в приобретении оборудования и материалов.

1. Murugan N., Parmer R. S. Mathematical models for bead geometry prediction in austenitic stainless steel surfacing by MIG welding // Intern. J. for the Joining of Materials. — 1995. — 7(2/3). — P. 71–80.
2. Murugan N., Parmer R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding // Welding J. — 1997. — 76(10). — P. 391–402.
3. Khodadad Motarjemi A., Kocak M. Fracture assessment of weld repaired clad steel wide plates by SINTAP defect assessment procedure // Welding in the World. — 2001. — 45, Special issue. — P. 27–33.
4. Davis J. R. ASM specialty handbook on stainless steel. — ASM Intern., 2nd print, 1996. — P. 107–119.
5. Laser cladding for repair of engineering components: Australian / N. Alam, L. Jarvis, D. Harris, A. Solta // Welding J. — 2002. — 47, 2nd quart. — P. 38–47.
6. Heston Tim. Cladding operations doubles life of boiler tubing // Welding J. — 2000. — 79(7). — P. 45–47.
7. Joo Suk Lee, Insup Kim, Akihiko Kimura. Application of small punch test to evaluate sigma-phase embrittlement of pressure vessel cladding material // J. of Nucl. Sci. and Technol. — 2003. — 40(9). — P. 664–671.
8. Missori S., Mordolo F., Sili A. Single-pass laser beam welding of clad steel plate // Welding J. — 2004. — 83(2). — P. 65–71.



9. *Rajasekaran S.* Surface topography of pulsed current gas metal arc clads // *Surf. Eng.* — 2000. — **16**(6). — P. 495–500.
10. *Nishimoto K., Ogawa K.* Corrosion properties in weldments of stainless steels. Pt 1: Metallurgical factors affecting corrosion properties // *Welding J.* — 1999. — **13**, № 11. — P. 2–11.
11. *Buvanasekaram G., Venkateswara Prasad N.* Effect of cladding parameters on intergranular corrosion and bonding properties of cladding stainless steel layers // *Proc. of National conf. on recent advances in materials processing.* — Annamalai Univ., 2001. — P. 136–147.
12. *Dhanuka M. P.* Measurement of delta-ferrite content in austenitic stainless steel weld metals using WRC-92 diagram // *Proc. of Intern. welding symp., Mumbai, 2003.* — P. 219–222.
13. *Smith D. V.* A practical approach to ferrite in stainless steel weld metal // *Welding J.* — 1988. — **67**(6). — P. 57–69.
14. *Ahmad N., Mazur W.* Assessment of the repair strategy and the effects of the repair on the reactor pool liner. — Confidential Technical report CMIT(C)-2-3-155, CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology, Aug., 2003, Australia.
15. *Welding consumable development for a cryogenic (4K) application* / S. F. Kane, A. L. Farland, T. A. Siewert, C. N. McCowan // *Welding J.* — 1999. — **78**(8). — P. 292–300.
16. *The effect of delta-ferrite phase in weld metal of stainless steel on the mechanical properties at cryogenic temperature* / M. Saito, Horiya, A. Yamamoto et al. // *Materials and welding research lab., Nagasaki-R7d Centre, Japan.* <http://www.ena.or.jp/we-net/ronbun/1996/e16/naga1996.html>.
17. *Delong W. T.* Ferrite in austenitic stainless steel weld metal // *Welding J.* — 1974. — **53**(7). — P. 273–286.
18. *Prasad Rao K., Prasanna Kumar S.* Assessment criterion for variability of delta-ferrite in austenitic weld and clad metals // *Ibid.* — 1984. — **63**(7). — P. 231–239.
19. *Olson D. L.* Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties // *Ibid.* — 1985. — **64**(10). — P. 281–295.
20. *Kotecki D. J.* Standards and industrial methods for ferrite measurement // *Ibid.* — 1988. — **77**(5). — P. 49–52.
21. *Kotecki D. J., Siewert T. A.* WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram // *Ibid.* — 1992. — **71**(5). — P. 171–178.
22. *Kotecki D. J.* Ferrite determination in stainless steel welds // *Ibid.* — 1974. — **76**(1). — P. 24–37.
23. *Siewert T. A., McCowan C. N., Olson D. L.* Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steel weld metal // *Ibid.* — 1988. — **67**(12). — P. 289–296.
24. *Ames N., Ramberg M., Johnson M., Johns T.* Comparison of austenitic, super austenitic and super duplex weld properties produced using GTAW flux // *Stainless Steel World, KCI Publ. BV, 2001.*
25. *Effect of welding parameters on the content of delta-ferrite in austenitic stainless steel weld and clad metals* / K. Prasad Rao, K. N. Krishnan, V. Rama Rao, G. J. Guru Raja // *Proc. of National IIW, Welding seminar, 1986, India.* — P. 64–72.
26. *Cui Y., Lundin Carl D.* Ferrite number as a function of the Larson-Miller parameter for austenitic stainless weld metals after creep testing // *Metallurg. and Materials Transac. A.* — 2004. — **35**. — P. 3631–3634.
27. *Vitek J. M., Iskander Y. S., Oblow E. M.* Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks. Pt 1: Neural network development // *Welding J.* — 2000. — **79**(2). — P. 34–40.
28. *Vitek J. M., Iskander Y. S., Oblow E. M.* Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks. Pt 2: Neural network development // *Ibid.* — 2002. — **79**(2). — P. 41–50.
29. *Balmforth M. C., Lippold J. C.* A new ferritic-martensitic stainless steel constitution diagram // *Ibid.* — 2000. — **79**(12). — P. 339–345.
30. *Kotecki D. J.* A Martensite boundary on the WRC-1992 diagram // *Ibid.* — 1999. — **78**(5). — P. 180–192.
31. *Barnhouse E. J., Lippold J. C.* Microstructure/property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels. [www.aws.org / wj/supplement](http://www.aws.org/wj/supplement).
32. *The metallographic examination of archaeological artifacts, Laboratory Manual, June, 2003, MIT, Summer Institute in Materials Science and Material Culture.*
33. *Vitek J. M., David S. A., Hinman C. R.* Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects. Pt 1: Model development // *Ibid.* — 2003. — **82**(1). — P. 10–17.
34. *Vitek J. M., David S. A., Hinman C. R.* Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects. Pt 2: Model results // *Ibid.* — 2003. — **82**(2). — P. 43–50.
35. *Palani P. K., Murugan N.* Modeling and simulation of wire feed rate for steady current and pulsed current gas metal arc welding, communicated for possible publication // *Intern. J. of Computer Applications in Technology.*
36. *Kim I. S., Son J.-S., Young-Jae Jeung.* Control and optimization of bead for multi-pass welding in robotic arc welding processes: Australian // *Welding J.* — 2001. — **46**, 3-d quart. — P. 43–46.
37. *Sensitivity analysis for process parameters in GMA Welding process using Factorial design method* / I. S. Kim, K. J. Son, Y. S. Yang, P. K. D. V. Yaragada // *Intern. J. of Machine Tools and Manufacture.* — 2003. — **43**. — P. 763–769.
38. *Design of experiments study to examine the effect of polarity on stud welding* / S. Ramasamy et al. // *Welding J.* — 2002. — **81**(2). — P. 19–26.
39. *Applied statistics and probability for engineers* / D. C. Montgomery et al. — New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
40. *Walpole, Myers.* Probability and statistics for engineers and scientists. — 6th ed. — New Jersey: Prentice Hall, 1998.
41. *Cheremisinoff N. P.* Practical statistics for engineers and scientists. — Technomic publ. Co. Inc., 1987.
42. *Cochran W. G., Cox G. M.* Experimental designs. — 2nd ed. — Singapore: John Wiley & Sons, 1957.
43. *Khuri A. I., Cornell J. A.* Response surfaces, designs and analyses. — New York: Marcell Dekker Inc., 1996.
44. *Montgomery D. C.* Design and analysis of experiments. — 5th ed. — New York: John Wiley & Sons Inc., 2001.

The quality of clad parts depends upon the quantity of residual δ -ferrite in deposited metal, which, in turn, depends upon the cladding process parameters. Control of the ferrite formation process in cladding can be readily provided by using equations which allow prediction of the ferrite number based on such process parameters as current and welding speed, as well as distance between the torch and workpiece. Variations in distance between the torch and workpiece were found to have the highest effect on the FN value, compared with other process parameters.

Поступила в редакцию 11.05.2005



МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ КОЛЬЦЕВЫМИ ЗАРЯДАМИ*

Б. И. ПАЛАМАРЧУК, д-р техн. наук, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **А. Т. МАЛАХОВ**, **А. В. ЧЕРКАШИН**,
А. Н. МАНЧЕНКО, **А. А. ЧАЙКА**, инженеры
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности блокирования распространения усталостной трещины путем формирования в ее окрестности поля остаточных сжимающих напряжений и пластических деформаций с помощью импульсного взрывного воздействия с фокусировкой энергии в зоне местонахождения трещины. Для моделирования ударных волн при взрывном нагружении материалов применен метод сквозного счета с искусственной вязкостью Неймана-Рихтмайера. Моделирование ударно-волнового (УВ)-процесса позволяет прогнозировать параметры импульсного воздействия на материалы, что облегчает оценку влияния на них плотности взрывчатых материалов, энергии взрыва и демпфирующих прокладок. Для сложных схем импульсного нагружения материалов параметры УВ-воздействия могут быть непосредственно измерены разработанными электретными датчиками давления.

Ключевые слова: ударно-волновая обработка, конструкционные стали, напряженное состояние, численное моделирование, давление волны, экспериментальная методика

В настоящее время остро стоит проблема повышения усталостной прочности конструкционных материалов на основе легких сплавов. Основной причиной снижения усталостной прочности является возникновение и распространение усталостных трещин. Была предложена идея локальной импульсной обработки тонколистовых материалов для наведения полей остаточных напряжений сжатия, которые, в свою очередь, препятствовали бы свободному распространению усталостной трещины в материале. Данная идея основана на механизме полной ликвидации или перераспределения напряженно-деформированного состояния у вершины трещины, что должно привести к дезориентации последней и созданию барьерных зон из остаточных напряжений сжатия в направлении распространения трещины, что будет препятствовать ее распространению или вовсе остановке развития на какое-то время в зависимости от уровня и характера наведенных напряжений.

На данный момент существует несколько различных схем импульсной ударно-волновой обработки (УВО) с использованием энергии взрыва. Все они различны по своей геометрии, мощности, типам используемых зарядов и схемам нагружения, что, в свою очередь, обеспечивает широкий диапазон уровней и размеров зон остаточных напряжений. Однако в большинстве схем обработки применяются химические конденсированные взрывчатые вещества (ВВ), свободное использование которых в наше время по ряду причин ограничено. Поэтому в целях минимизации количества однотипных экспериментов

возникла необходимость численного моделирования напряженного состояния материала после импульсной УВО.

Генерируемое взрывом нестационарное движение среды описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, для интегрирования которых обычно используют специально созданные разностные методы. В реальности реализующееся течение, как правило, является неоднородным, но, тем не менее, решение одномерных задач со сферической, цилиндрической или плоской симметрией течения дает много полезной для практики информации.

Для решения задач в одномерной постановке использовали метод сквозного счета с искусственной вязкостью, основным преимуществом которого является универсальность, возможность сквозного счета с однородными разностными схемами, реализующимися по одним и тем же формулам во всех узлах сетки, независимо от того, совпадает данный узел с точкой нерегулярности решения или нет. Однородность алгоритма разностного счета достигается введением искусственной вязкости, или псевдовязкости, которая «размывает» разрывы в ударных волнах, что позволяет не выделять их в виде особенностей.

Система уравнений одномерного движения среды и продуктов детонации (ПД) ВВ может быть записана в лагранжевых координатах в безразмерном виде следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial \theta} &= -v_0 \left(\frac{r}{x} \right)^{v-1} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial r}{\partial \theta} = u, \\
 v &= v_0 \left(\frac{r}{x} \right)^{v-1} \frac{\partial r}{\partial x}, \quad \frac{\partial e}{\partial \theta} = -p \frac{\partial v}{\partial \theta},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $u = U/a$ — скорость; $\theta = t/\tau$ — время; $r = R/\alpha$ — эйлерова координата; $x = X/\alpha$ —

* По материалам Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (13–17 сент. 2004 г., пос. Качивели, Крым, Украина).



лагранжева геометрическая координата; $v = \rho_0/\rho$ — удельный объем; $e = E\rho_0/P_0$ — удельная внутренняя энергия; $p = P/P_0$ — давление; ρ_0 — начальная плотность среды. Обезразмеривание проводили с помощью вспомогательных величин: $a = (P_0/\rho_0)^{1/2}$; $\alpha = (W/P_0)^{1/v}$; $\tau = \alpha/a$; $v = 1, 2$ и 3 для течения соответственно с плоской, цилиндрической и сферической симметрией. Параметр W при $v = 3$ — энергия взрыва; при $v = 2$ — энергия взрыва на единицу длины; при $v = 1$ — то же, но на единицу площади. Система уравнений (1) замыкается заданием уравнения состояния в виде $e(p, v)$. Естественно, для среды и ПД задаются различные уравнения состояния. Для расчетов использовался метод с искусственной вязкостью Неймана-Рихтмайера [1]. В этом методе в уравнениях (1) к давлению p добавляется псевдовязкое давление q , которое больше нуля в волнах сжатия и равно нулю в волнах разрежения. Применялась также квадратичная вязкость, которая по сравнению с другими видами вязкости имеет то преимущество, что ширина «размазывания» фронта ударной волной не зависит от ее интенсивности.

Система разностных уравнений для проведения численных расчетов на ЭВМ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{u_1^n - u_i^{n+1}}{\Delta\theta} &= \frac{1}{2} (v_{0\ i-1/2} + v_{0\ i+1/2}) \times \\ &\times \left(\frac{r}{x} \right)^{v-1} \frac{\delta p_i^n + \delta q_i^n}{x_i - x_{i-1}}, \\ \frac{r_i^{n+1} - r_i^n}{\Delta\theta} &= u_i^{n+1}, \\ v_{i+1/2}^{n+1} &= v_{0\ i+1/2} \frac{(r_{i+1}^{n+1})^v - (r_i^{n+1})^v}{x_{i+1}^v - x_i^v}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} e_{i+1/2}^{n+1} &= e_{i+1/2}^n - \left(\frac{p_{i+1/2}^{n+1} + p_{i+1/2}^n}{2} + q_{i+1/2}^{n+1} \right) \times \\ &\times (v_{i+1/2}^{n+1} + v_{i+1/2}^n), \end{aligned} \quad (3)$$

$$q_{i+1/2}^{n+1} = \begin{cases} \frac{2(b\delta u_{i+1/2}^{n+1})^2}{v_{i+1/2}^{n+1} + v_{i+1/2}^n}, & \text{если } \delta u_{i+1/2}^{n+1} < 0, \\ 0, & \text{если } \delta u_{i+1/2}^{n+1} \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\delta p_i^n = p_{i+1/2}^n - p_{i-1/2}^n$; $\delta q_i^n = q_{i+1/2}^n - q_{i-1/2}^n$; $\delta u_{i+1/2}^{n+1} = u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}$; b — безразмерный коэффициент, определяющий псевдовязкость; $\Delta\theta$ — шаг по времени. Для решения системы разностных уравнений задается конкретный вид уравнения состояния $e = e(p, v)$ для среды и ПД.

Метод расчета по разностной схеме «крест» (2) (второго порядка точности при аппроксимации дифференциальных уравнений разностными уравнениями) применяется примерно с 1950 г. и проверен на многих трудных задачах с известными точными решениями.

Разностная сетка для ПД и среды берется равномерной по массе, заключенной в ячейках между x_{i-1} и x_i , однако массовый интервал не одинаковый для ПД и окружающей среды. В процессе расчета количество ячеек в области ПД оставалось неизменным; в среде при достижении фронтом головной ударной волны точки сетки с некоторым фиксированным номером $m = i_{\max}$ производится одновременное сдвигание ячеек, после чего расчет продолжается на сетке с вдвое большей массой среды между соседними точками. Массовая скорость и термодинамические параметры потока в новых ячейках пересчитываются на основе значений в старых ячейках таким образом, чтобы при этом сохранялась масса, внутренняя и кинетическая энергии. На основе метода, изложенного в [2], коэффициент вязкости b' в среде изменялся в процессе расчета b согласно соотношению

$$b = b' \left(1 + \frac{i-k}{m-k} \right), \quad (5)$$

где $b' = \text{const}$ — неизменное первоначальное задаваемое значение коэффициента вязкости; $k = (m + m_*)/2$; m_* — количество точек разностной сетки для ПД. При этом, если $b < b'$, полагаем $b = b'$. Такой способ задания псевдовязкости оставляет неизменной ширину «размазывания» фронта головной ударной волны при резком увеличении вдвое шага по координате, что устраняет возникновение флуктуаций параметров потока при сдвигании ячеек. Для расчета плоского взрыва тротила бралось 25 точек в ПД и 350 точек сетки в среде. Для контроля точности счета произведены расчеты с уменьшенным вдвое шагом по координате и проверялось сохранение полной энергии системы на всех стадиях распространения взрывной волны.

Расчеты проводили с использованием так называемой схемы мгновенной детонации, моделирующей процесс взрывного нагружения металла, скользящей детонационной волной. В этой схеме в начальный момент времени давление, плотность и другие параметры ПД постоянные по всему занимаемому ими объему. Дальнейшее расширение ПД происходит с учетом сложных волновых движений, возникающих в процессе взаимодействия ПД с окружающей средой.

Уравнение состояния ПД задавалось в виде, предложенном в работе [3]:

$$P = A\rho^n + (k-1)\rho E \quad (6)$$

с изэнтропой

$$P = A\rho^n(n-1)/(n-k) + B\rho^k. \quad (7)$$

Для тротила в соответствии с [4] полагаем $k = 1,25$. Коэффициенты A , B , n определяются с помощью соотношений [3]

$$P_{*0} = A\rho_0^n + (k-1)\rho_0 Q = A\rho_0^n(n-1)/(n-k) + B\rho_0^k,$$

$$P_* = A\rho_*^n(n-1)/(n-k) + B\rho_*^k,$$

$$k_* = n - B\rho_*^k(n-k)/P_*,$$

где Q , P_* , ρ_* , k_* — теплота взрыва, давление, плотность и логарифмический наклон изэнтропы



в точке Чепмена–Жуге. Для тротила с начальной плотностью $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$ скорость детонации $D = 6950 \text{ м/с}$, $k_* = 3$ [5], $Q = 1030 \text{ ккал/кг}$ [6], $P_* = \rho_0 D^2 / (k_* + 1) = 1,932 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $\rho_* = \rho_0 (k_* + 1) / k_* = 2133,3 \text{ кг/м}^3$; $A = 0,6622$; $B = 84560$; $n = 3,1186$.

Уравнения состояния ПД в виде (6) и алюминия в виде (4) позволяют вычислять из разностного уравнения энергии (3) давление p и внутреннюю энергию e , не прибегая к итерациям.

Для устранения нежелательных колебаний параметров за фронтом волны, вызываемых квадратичной вязкостью, необходимо «размазать» фронт до ширины нескольких шагов разностной сетки в лагранжевых координатах. Оптимальным считается «размазывание» на 3...4 шага. Расчеты в алюминии проводили с неизменным коэффициентом вязкости b' , определяемым соотношением, аналогичным «классическому» соотношению для газа

$$b' = \varphi[(\gamma + 1)/2]^{0,5}, \quad \varphi = \text{const}, \quad 0,5 \leq \varphi \leq 2. \quad (8)$$

При решении вопроса о выборе значения псевдовязкости в ПД их рассматривали как совершенный газ с показателем адиабаты, изменяющимся по мере расширения от $n \approx 3,12$ до $k = 1,25$ см (7). Используя соотношение для газа (8), получаем, что при $\varphi = 1$ коэффициент b' изменяется в относительно узком диапазоне 1,06...1,43. Поскольку количество ячеек в ПД в ходе расчета остается неизменным, коэффициент вязкости b полагался постоянным и равным среднему значению $b = b' = (1,06 + 1,43)/2 = 1,25$. Помимо выбора вязкости, для проведения расчетов с помощью явных разностных схем необходимо выполнение условий устойчивости, накладывающих ограничение на допустимое значение шага по времени. Устойчивость применяемой нами явной разностной схемы «крест» исследована для газа в работах [1, 7], а для среды с произвольным уравнением состояния — в [8]. В расчетах шаг по времени выбирался по условию:

$$t = M \min_i \frac{r_{i+1} - r_i}{c_{i+1/2}}, \quad (9)$$

где r — эйлерова координата; c — скорость звука; $M \leq 1$ — число Куранта. В расчетах полагали $M = 0,20$, что во всех случаях обеспечивало устойчивость расчета в алюминии и в ПД.

Расчеты проводили для алюминия ($P_0 = 101325 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}$ = 1 бар, $c_0 = 5250 \text{ м/с}$, $\rho_0 = 2710 \text{ кг/м}^3$, $\gamma = 4,36$), нагружаемого при взрыве тротила ($\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$) по схеме мгновенной детонации, для плоской ($v = 1$) и цилиндрической ($v = 2$) симметрий течения.

На рис. 1 показаны профили давления в алюминии и ПД в зависимости от безразмерного расстояния до оси цилиндрического заряда $r^* = R/R_0$ (R_0 — радиус) в моменты времени, когда фронт ударной волны достигает расстояний 10, 20 и 30 толщин заряда. Параметр r^* является параметром подобия при расчетах одномерных течений, генерируемых взрывом ВВ. Видно, что

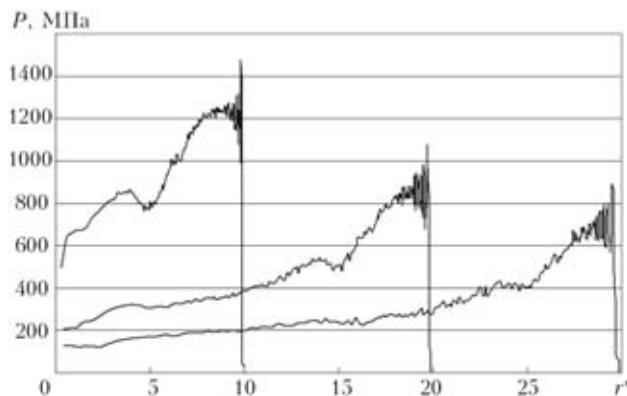


Рис. 1. Профили давления в алюминии и ПД ударной волны на различных расстояниях от места взрыва

на расстоянии около $r^* = 30$ амплитуда давления снижается до 800 МПа — динамического предела текучести при взрывном нагружении сплавов алюминия [5]. Этим расстоянием и ограничивается область, в которой можно создать остаточные напряжения при взрывной обработке цилиндрическими зарядами алюминия и его сплавов.

На рис. 2 показаны профили избыточной температуры ($t - t_0$) нагрева алюминия в цилиндрической ударной волне в зависимости от безразмерного расстояния r^* в моменты времени, когда фронт ударной волны достигает расстояний 10, 20 и 30 радиусов заряда. Видно, что максимальная температура нагрева, не превышающая на данных расстояниях 6 °С при начальной температуре $t_0 = 15$ °С, достигается сразу за фронтом волны. В дальнейшем при расширении материала в волне разгрузки происходит адиабатическое охлаждение до избыточных температур около 0,5...2 °С. Это подтверждает экспериментально наблюдаемый факт незначительного остаточного нагрева алюминия и его сплавов после сварки или обработки взрывом.

На рис. 3 показаны профили массовой скорости для цилиндрической ударной волны (в алюминии и ПД) в моменты времени, когда ее фронт достигает расстояний 10, 20 и 30 радиусов заряда. Видно, что массовая скорость достигает 50...100 м/с на фронте ударной волны и повышается до 170...270 м/с при приближении к границе раздела между металлом и ПД. Такое

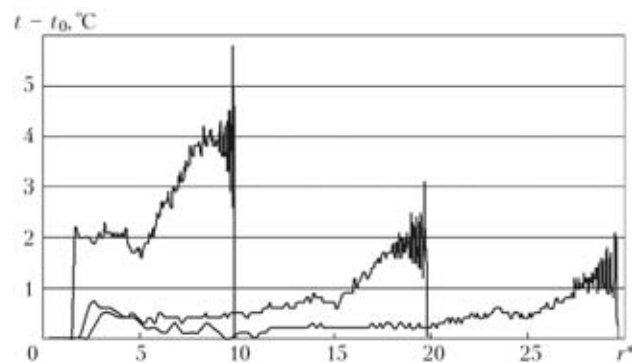


Рис. 2. Профили избыточной температуры ($t - t_0$) нагрева алюминия в ударной волне на различных расстояниях от места взрыва

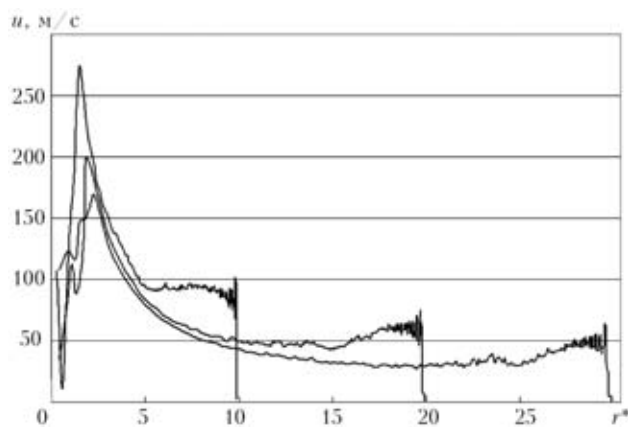


Рис. 3. Профили массовой скорости в ударной волне на различных расстояниях от места взрыва

явление повышения массовой скорости характерно для сферических и цилиндрических ударных волн в металлах и других малосжимаемых средах и отсутствует в плоских.

Все профили давления, температуры нагрева, массовой скорости, плотности можно брать из расчетов без изменения в соответствии с теорией подобия по параметру r^* . Грамотно используя теорию подобия для одномерного течения, можно вообще провести только один численный расчет воздействия взрыва заряда определенной толщины на среду. При другой толщине заряда и условиях взрыва характеристики взрывного воздействия можно определить путем соответствующего масштабирования результатов единственного численного расчета.

Численное моделирование показывает, что регулирование амплитуды ударной волны и длительности импульсного воздействия на материал можно достичь путем изменения начальной плотности ВВ, а также путем использования различного рода прослоек (воды, резины и т. п.). Последнее дает возможность получать необходимое воздействие на материал, используя штатные ВВ. Так, при использовании ВВ с плотностью 640 кг/м^3 начальный перепад давления в ударной волне уменьшается в 3 раза, а длительность воздействия увеличивается. Использование прослойки воды

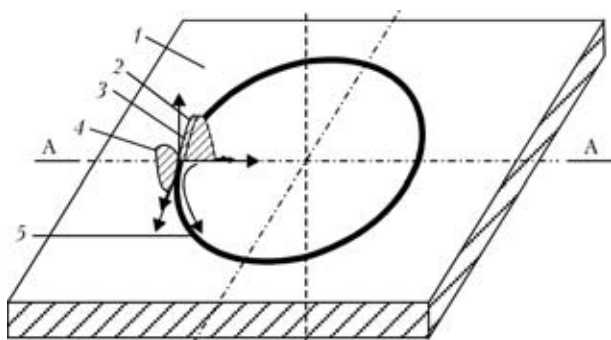


Рис. 4. Схема УВО: 1 — обрабатываемая пластина; 2 — направление массовой скорости; 3 — распространение ударной волны в материале в начале процесса детонации заряда; 4 — направление детонации шнурового заряда; 5 — расположение кольцевого заряда

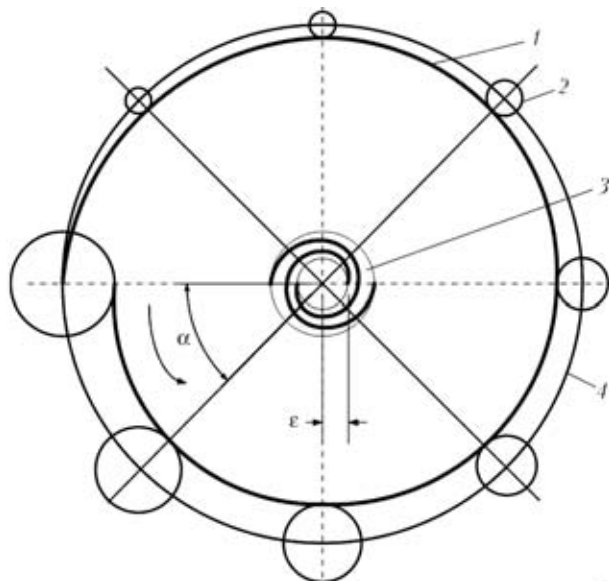


Рис. 5. Принципиальная схема месторасположения фронта массопереноса в материале при УВО

между ВВ и обрабатываемым материалом толщиной один радиус шнурового заряда уменьшает интенсивность падающей волны в 1,5 раза. Это позволяет проводить обработку материалов в мягких режимах, не повреждая поверхность. Численные расчеты показывают, что зона пластических деформаций алюминиевых сплавов при обработке шнуровыми зарядами составляет примерно 10...30 радиусов заряда в зависимости от применяемой схемы импульсного нагружения.

Увеличение интенсивности ударной волны от шнуровых зарядов можно достичь путем их расположения в виде кольцевых конфигураций. В этом случае увеличение параметров, сходящихся к центру ударной волны, дает возможность более эффективной проработки центральной зоны. Для создания барьерных зон с целью блокирования распространения и зарождения трещин могут быть использованы спиральные конфигурации зарядов. При расположении зарядов по спирали столкновения ударной волны между витками заряда создают знакопеременные поля напряжений в области обработки, которые также препятствуют распространению трещин через обработанную область.

В экспериментах использовали пластины из алюминиевого сплава Д16 толщиной 2 мм, которые обрабатывались шнуровыми зарядами, уложенными по кольцу, как показано на рис. 4.

На рис. 5 схематически показано распространение фронта массопереноса в материале в конце процесса детонации шнурового заряда при УВО по кольцевой схеме (см. рис. 4), где 1 — передний фронт массопереноса, сходящегося внутрь зоны, ограниченной зарядом; 2 — фронт массопереноса в конкретных точках приложения нагрузки от шнурового заряда; 3 — формирование зоны сжатия в месте схождения ударных волн в материале; 4 — исходное положение кольцевого заряда; ϵ — так называемый эксцентриситет, расстояние от оси симметрии заряда до точки схождения двух

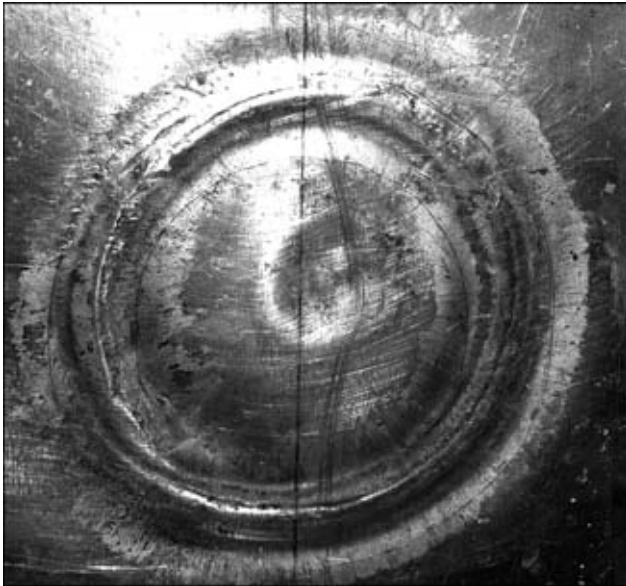


Рис. 6. Общий вид образца после обработки по кольцевой схеме (встречно направленных потоков вещества), где расстояние ε определяется соотношением

$$\varepsilon = \pi d \left(\frac{90 + \alpha}{180} \right) \frac{u}{D},$$

где d — диаметр кольцевого заряда; α — угол поворота оси, на которой рассматривается схождение встречных потоков, относительно точки начала инициирования заряда; D — скорость детонации шнурового заряда; u — скорость массопереноса.

На рис. 6 приведен общий вид образца после обработки кольцевым шнуровым зарядом, на котором видна деформированная центральная зона, смещенная относительно центра на величину порядка ε .

Результаты измерения остаточных напряжений сжатия $\sigma_{\text{ост}}$ внутри обрабатываемой зоны показали, что при кольцевой конфигурации шнурового заряда с вариацией диаметра кольца от 80 до 120 мм значения $\sigma_{\text{ост}}$ составили 60 МПа при максимальной удельной мощности заряда равной 33 г/м. При этом по данным [9] величина $\sigma_{\text{ост}}$, необходимая для торможения усталостной трещины, составляет $0,5\sigma_{0,2}$ для обрабатываемого материала.

Considered is the problem related to arresting of propagation of a fatigue crack through forming the residual compressive stress and plastic strain fields in the vicinity of a crack using a pulsed explosive impact involving focusing of energy in the crack location zone. The method of end-to-end calculation using an artificial Neumann–Richtmeier viscosity has been employed to model shock waves in explosive loading of materials. Modelling of the shock-wave process allows prediction of parameters of the pulsed effect on materials, which makes it easier to evaluate the effect on them by the density of explosives, explosion energy and damping interlayers. For complex diagrams of pulsed loading of materials, the shock-wave effect parameters can be directly measured using the developed electret pressure sensors.

Применение спиральных схем укладки шнуровых зарядов позволило увеличить уровень $\sigma_{\text{ост}}$ до 80...95 МПа при этом максимальный уровень $\sigma_{\text{ост}}$ достигал 170...180 МПа, при удовлетворительном качестве поверхности металла.

Для проверки адекватности численного метода определения параметров ударной волны разработана методика измерения давления в УВ. Для измерений применяют специальные датчики давления, чувствительным элементом которых является пьезоэлектрическая пленка толщиной 28 мкм и с пьезомодулем $8,9 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, общая толщина датчика вместе с электродами не превышает 40 мкм, что позволяет пренебречь эффектами отражения волны при измерениях. Данная методика позволяет экспериментально определить параметры УВ-воздействия на материал при сложных спиральных схемах обработки материалов, численное моделирование которых в силу сложной геометрии заряда представляет значительные трудности. Использование численного моделирования УВ-процессов с разработанными экспериментальными методиками позволяет значительно сократить количество экспериментов и оптимизировать технологические схемы УВО материалов.

1. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. — М.: Мир, 1972. — 418 с.
2. Higbie L. C., Plooster M. N. Variable pseudoviscosity in one dimensional hyperbolic difference schemes // J. Comput. Phys. — 1968. — 3. — P. 154–156.
3. Каширский А. В., Орленко Л. П., Охитин В. Н. Влияние уравнения состояния на разлет продуктов детонации // Журн. приклад. механики и физики. — 1973. — № 2. — С. 165–170.
4. Физика взрыва / Ф. Ф. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
5. Расчет параметров взрывных волн в плотных средах при различных схемах детонации / Е. Г. Баранов, В. А. Коваленко, Г. М. Ляхов // Журн. приклад. механики и физики. — 1980. — № 1. — С. 133–140.
6. Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А. Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — 232, № 4. — С. 852–855.
7. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные схемы газовой динамики. — М.: Наука, 1975. — 352 с.
8. Калиткин Н. Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978. — 512 с.
9. Кныш В. В. Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 73–75.

Поступила в редакцию 18.01.2005



5 ЛЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПАРКУ «ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА»

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

Рассмотрен опыт инновационной деятельности технопарков. Отмечены меры государственной поддержки, приоритетные направления, цели, задачи и результаты деятельности Технопарка «ИЭС им. Е. О. Патона» за период 2000–2004 гг.

Ключевые слова: инновационная деятельность, мировой опыт, эффективность, государственная поддержка, технопарки, ИЭС, приоритетные направления, цели и задачи, результаты

Во всех развитых странах технологические парки и технологические бизнес-инкубаторы являются основными элементами инновационной инфраструктуры, главной задачей которых является коммерциализация результатов научных исследований университетских, академических и иных исследовательских центров, научная продукция которых с помощью инновационных процедур доводится до промышленных и коммерческих структур. Объединение взаимных интересов разработчиков и потребителей обусловило бурный рост количества научных, научно-технологических и технологических парков. Сейчас в мире насчитывается более 700 технопарков, большинство из которых сосредоточено в США, Европе, Японии и Китае, т. е. в экономически наиболее весомых и динамично развивающихся регионах. Государственная власть этих стран, понимая важную роль технопарков, вводит для них специальный режим, включающий предоставление налоговых льгот и кредитов на льготных условиях, целевое финансирование отдельных инновационных разработок, государственный заказ на инновационную продукцию и т. д. При условии такой поддержки со стороны государства технологические парки обеспечивают не только развитие высокорентабельных видов бизнеса и наполнение национальных рынков наукоемкой высокотехнологичной продукцией, но и создание новых рабочих мест, стабильное присутствие конкурентоспособной продукции этих стран на мировых рынках товаров и услуг.

В качестве примера участия государства в финансировании инновационной деятельности нобелевский лауреат, академик Ж. Алферов приводит свои впечатления от недавней поездки в Сингапур: «Два небольших прикладных института, в каждом работают по 200 человек. Бюджет каждого института — 25 млн дол. Причем 90 % — средства государственные, и только 10 % получены по договорам с промышленностью. Когда я спросил: «Вы же делаете прикладные вещи, почему вас должно государство кормить?» — ответ был очень простой: «Промышленность платит за то, что ей

нужно сегодня, а за то, что нужно завтра, платит государство. Если, конечно, это «завтра» государству нужно».

В Украине, начиная с 1999 г., создано восемь технопарков, разработана нормативно-правовая база, обеспечивающая экономическую заинтересованность в инновационной деятельности. Начав с нуля, украинские технопарки за 2000–2004 гг. довели выпуск инновационной продукции до 1,3 млрд грн. в год. При этом решаются не только вопросы обеспечения потребностей внутреннего рынка Украины, т. е. снижается ее зависимость от импорта, но и постоянно наращиваются объемы поставок на экспорт высокотехнологической конкурентоспособной продукции.

Одним из первых в Украине в 1999 г. был создан Технологический парк «ИЭС им. Е. О. Патона». Научным центром, на базе которого создан технопарк, является Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — один из ведущих мировых центров. Его исследования и разработки по сварке материалов, наплавке и напылению защитных покрытий, специальной металлургии, прочности и работоспособности сварных конструкций, современным конструкционным и функциональным материалам широко известны во всем мире. В качестве примеров достижений института можно привести сварку корпуса танка Т-34 — лучшего танка Второй мировой войны, технологии сварки практически любых материалов любых толщин (от микрометров до метров) в любых условиях — от сварки под водой до сварки в космосе. Последние достижения института — сварка живых тканей человеческого организма.

С момента создания института его основатель академик Е. О. Патон требовал от своих сотрудников, чтобы проводимые исследования отвечали насущным потребностям отечественной экономики, выполнялись на современном научном уровне и обязательно заканчивались широким внедрением в промышленность. В дальнейшем на базе института был создан Межотраслевой научно-технический комплекс, включающий, наряду с академическим институтом, опытно-конструкторское и технологическое бюро, экспериментальное производство, три опытных завода, внешнеторговую фирму. В 1980-е годы руководством института была

проведена его реструктуризация и перевод на самостоятельный баланс хозрасчетных инженерных центров (прообраз малых и средних предприятий).

Таким образом, к моменту создания технопарка институт подошел, имея определенный организационный опыт, богатый научный потенциал и мощную производственную базу. Все это позволило создать не просто «гостиницу для малого бизнеса», а масштабный и эффективный инновационно-производственный комплекс.

Главная цель Технопарка ИЭС — создание благоприятных условий для организации исследований, разработки, промышленного выпуска и реализации на отечественном и мировом рынках конкурентоспособной инновационной продукции и услуг в области сварки и родственных технологий. Приоритетными направлениями деятельности технопарка является содействие максимальному использованию новейших достижений сварочной науки и техники в следующих областях:

современные энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии, оборудование и конструкции;

специальная электрометаллургия, технологии переработки металлолома, обогащение металлургического сырья, повышение качества конечной металлургической продукции;

современные машины, механизмы и средства новой техники в ракетно-космической, авиационной отраслях, в судостроении, железнодорожном и морском транспорте;

грунтообрабатывающая и уборочная техника с увеличенным ресурсом за счет технологий сварки и упрочнения рабочих органов;

сварочные и родственные процессы при строительстве, эксплуатации и реконструкции дорог, мостов и транспортных систем, включая трубопроводы;

оздоровление окружающей среды и человека, в том числе путем снижения техногенного влияния сварочного производства на аэро-, гидро-, геоэкологию, использование сварки и родственных технологий в медицине;

повышение квалификации и развитие инновационной культуры разработчиков и потребителей продукции сварочного производства.

Технопарком зарегистрировано 18 инновационных проектов, из которых 4 выполнено, в работе 14. По десяти проектам ведутся исследовательские работы и опытно-промышленное производство инновационной продукции. К выполнению проектов привлечено 2,8 тыс. чел., создано 1018 новых рабочих мест. Участники технопарка (исполнители проектов) постоянно наращивают объемы производства и платежи в бюджет как от инновационной, так и от других видов деятельности.

В работе технопарка задействованы основные предприятия-изготовители сварочного оборудования, которые за прошедшее пятилетие в рамках инновационных проектов выпустили продукции на 245,3 млн грн. Ряд проектов технопарка решают важные народнохозяйственные проблемы, направленность которых соответствует утвержденным приоритетным направлениям.

Общий объем реализации инновационной продукции технопарка ИЭС за 2000–2004 гг. составил 2,198 млрд грн., в том числе экспортировано продукции на 335 млн грн. В бюджеты и государственные целевые фонды уплачено 179,2 млн грн. С использованием средств спецсчета технопарка к финансированию научно-технической сферы привлечено 142,8 млн грн.

Технопарк «ИЭС им. Е. О. Патона» — единственный в Украине технопарк, у которого отчисления в бюджет и внебюджетные фонды превышают получаемые им льготы специального режима. 93,9 % средств спецсчетов израсходованы на создание, модернизацию и реконструкцию научно-технических и опытно-экспериментальных участков, приобретение научного и производственного оборудования, т. е. создание материальной базы инновационной деятельности; 5,9 — на проведение НИР и ОКР, подготовку конструкторской и технологической документации технических условий, патентование разработок, приобретение прав на объекты интеллектуальной собственности; 0,2 — на организацию конференций, семинаров и выставок, публикацию результатов научных исследований и инновационной деятельности.

Государственная поддержка инновационных проектов в виде reinvestии средств спецсчета, сформированного за счет специального режима, составляет около 10 % всех затрат на выполнение проектов, остальное финансирование выполняется за счет собственных ресурсов исполнителей проектов или инвесторов. Однако даже такая незначительная поддержка помогает решить вопросы, которые не решались на протяжении многих лет.

Так, реализация общего проекта Технопарка ИЭС и Симферопольского электромашиностроительного завода «СЭЛМА» позволила значительно обновить и расширить номенклатуру выпускаемого заводом оборудования для дуговой сварки, которая широко применяется в промышленности и строительстве. При этом не только обеспечиваются потребности Украины в сварочном оборудовании, но и значительно увеличиваются поставки его за границу. Доля экспорта уже сегодня составляет более 65 % общего объема продукции, которая выпускается предприятием.

Институт электросварки им. Е. О. Патона вместе с Инженерным центром сварки давлением разработали технологии и спроектировали машины нового поколения для контактной сварки высокопрочных железнодорожных рельсов. Такие машины производятся на Каховском заводе электросварочного оборудования и уже сегодня применяются при строительстве скоростных железных дорог и «бархатного» пути метрополитенов. До конца 2005 г. проектом предусмотрено довести долю экспорта с 20 до 75 % общего объема выпуска продукции. Уже заключены контракты с Китаем, Кореей, Австрией и Россией на поставки новейших установок для стыковой сварки. Сейчас за счет средств спецсчета готовится проект трубосварочной машины нового поколения для прокладки магистральных нефте- и газопроводов.



Инновационный проект Запорожского завода сварочных флюсов и стеклоизделий направлен на доведение до промышленного уровня и внедрения в производство разработанной в институте дуплекс-технологии выплавки сварочных флюсов. Это позволяет выпускать как традиционные, хорошо себя зарекомендовавшие марки, так и новые высококачественные флюсы для сварки. Они применяются в мосто- и судостроении, трубной промышленности, в том числе в северных широтах. Наполовину уменьшены затраты дефицитных и дорогих импортных компонентов шихты, которые заменены шлак-отходами металлургических и трубосварочных заводов Украины.

На Ингулецком горно-обогатительном комбинате (ИнГОК) начата реализация инновационного проекта по предварительному обогащению железной руды методом сухой магнитной сепарации и магнитно-флотационного доведения концентрата. Суть проекта заключается в выполнении комплекса работ, реализация которого обеспечит выпуск железорудного концентрата с содержанием железа 69...70 вместо нынешних 63,7 %. Это решит одну из важнейших проблем отечественной металлургии — низкое качество исходного сырья и выведет ИнГОК по качеству продукции в первую десятку горно-обогатительных предприятий мира, работающих на более качественном сырье. Первый в этой десятке — шведский комбинат ЛКАВ (70,8), десятый — Лебединский ГОК в России (66 %). Выполнение проекта значительно снижает техногенную нагрузку на окружающую среду, создает технические и экономические условия, обеспечивающие в перспективе стабильную работу ИнГОКа, в том числе как градообразующего комбината.

В Днепропетровске в рамках инновационного проекта Технопарка ИЭС АО «ВЕСТА-Днепр» ведет разработку и создание производства современных источников энергии, в том числе на первом этапе — необслуживаемых промышленных и стартерных батарей нового поколения для обычных и тяжелых условий работы, на втором — автономных и энергетических систем, включающих аккумуляторы — энергонакопители, солнечные энергетические системы и ветроэнергетические установки мощностью 10...30 кВт. Выполнение проекта позволит обеспечить потребности отдаленных энергопотребителей малой мощности (фермы, полевые станы, горные селения, пограничные заставы, ирригационные системы и т. д.) без подключения к действующим энергосетям и даст значительную экономию энергоносителей за счет использования возобновляемых источников энергии — солнца и ветра.

В 2000–2005 гг. базовая научная организация технопарка — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Научно-технический комплекс ИЭС на обновление своей лабораторной базы и разработку новых проектов получили 8,1 млн грн. из средств технопарка. Сейчас готовится ряд уникальных инновационных проектов, на которые в государстве нет и в ближайшее время не будет средств. Одним из них является разработанная специалистами ИЭС в сотрудничестве с украин-

скими хирургами технология высокочастотной сварки живых тканей человеческого организма. Изготовленное в ИЭС экспериментальное оборудование и получившее разрешение Минздрава Украины используется в ряде клиник Киева и Донецка. Прооперировано более 6 тыс. пациентов без единого летального исхода или тяжелых осложнений.

В мае 2004 г. украинские ученые демонстрировали в США американским хирургам и представителям медицинской промышленности возможность сварочной техники в хирургии. Показательные операции получили наивысшую оценку американских специалистов, а один из ведущих хирургов США Дж. Куц заявил, что разработка украинских ученых — это прорыв в медицину XXI века, который может уже в ближайшие два-три года произвести революцию в хирургии.

В основе проекта лежат работы, защищенные четырьмя патентами Украины, двумя патентами США и патентом Австралии. Коллектив авторов получил Государственную премию Украины в 2004 г. Несмотря на достигнутые результаты, проект находится только в начале пути. Необходимо дальнейшее совершенствование методики проведения операций, расширение «номенклатуры» органов человека, которых оперируют с использованием сварки, совершенствование аппаратуры и инструмента, создание их промышленного варианта и организация выпуска в объемах, способных обеспечить поставки на экспорт (СНГ, Китай, Корея, Япония, Ближний и Дальний Восток). В перспективе медицинская тематика проектов Технопарка ИЭС будет продолжена. Сейчас подготавливается проект по разработке технологии и оборудования для утилизации медицинских и других вредных и высокотоксичных отходов с использованием плазменных технологий.

В сотрудничестве с отделом экономических исследований ИЭС им. Е. О. Патона технопарк ведет предметно-ориентированный поиск, анализ и обобщение информации о деятельности технопарков во всем мире, разрабатывает предложения об использовании мирового опыта в практике создания и функционирования украинских технопарков. Материалы по научно-методическому сопровождению деятельности технопарков, разработанные в Технопарке ИЭС, информация о собственном и мировом опыте широко используются другими технопарками в их практической деятельности, а также органами власти при создании и совершенствовании необходимой нормативно-законодательной базы. При технопарке действует бизнес-клуб, где имеется возможность встретиться и обсудить волнующие проблемы. С НТУУ «Киевский политехнический институт» и Херсонским университетом заключены договоры о сотрудничестве, в соответствии с которыми Технопарк ИЭС оказывает им помощь в создании и организации деятельности технопарков «Киевская политехника» и «Текстиль».

Технопарк ИЭС, инновационная продукция которого составляет 57 % общего выпуска, единственный из всех действующих технопарков обеспечил

в 2000–2004 гг. превышение отчислений в бюджет и целевые фонды над льготами в сумме 36 млн грн. При этом не было израсходовано ни копейки бюджетных средств, была выпущена высокотехнологическая продукция и созданы дополнительные рабочие места. Регулярные проверки финансовой деятельности Технопарка ИЭС, а также целевого использования средств спецсчета выявили их полное соответствие действующему законодательству. Это показывает, что созданная нормативно-законодательная база функционирования технопарков и добросовестное ее соблюдение позволяют обеспечить такие результаты, при которых разговоры

о технопарках как о «бюджетной дыре» и о сплошных злоупотреблениях — не более, чем попытка злонамеренной дискредитации жизненно важного для страны дела.

Р.С. 12 января 2006 г. Верховная Рада Украины приняла новый Закон о внесении изменений и дополнений в ранее действующий Закон Украины «О специальном режиме инвестиционной и инновационной деятельности технологических парков», который позволит обеспечить дальнейшее развитие технопарков, повысить эффективность выполняемых инновационных проектов.

World experience of innovative activity of technoparks is considered. State support measures, as well as priority areas, goals, objectives, and results of activity of the «E. O. Paton Electric Welding Institute» Technopark in the period of 2000–2004 are described.

Поступила в редакцию 21.09.2005

УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА КЛ-118 ДЛЯ ЭЛС, ОСНАЩЕННАЯ СИСТЕМОЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С СЕМЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Вакуумная камера и откатные двери имеют две оболочки: внутреннюю из нержавеющей стали и наружную из конструкционной стали, соединенные между собой шпангоутами. Полученное коробчатое сечение позволяет существенно снизить металлоемкость конструкции при сохранении высокой жесткости, которая гарантирует высокую точность механизма перемещения.

Механизм перемещения электронно-лучевой пушки портального типа позволяет перемещать пушку по координатам X, Y, Z и вращать ее в плоскости X–Y ($\pm 90^\circ$) и X–Z (на 90°). Камера снабжена числовым программным управлением перемещения по семи координатам с возможностью одновременного управления перемещением по четырем координатам.

Уникальный стабилизатор высокого напряжения, оснащенный электровакуумной лампой, обнаруживает и подавляет пробои, что позволяет выполнять сварку непрерывным швом без несплошностей и дефектов.

Обеспечивается управление сваркой с автоматическим слежением за стыком в реальном масштабе времени с помощью системы RASTR, использующей эмиссию вторичных электронов.

Анализатор параметров луча позволяет оператору определить действительные рабочие режимы луча до начала выполнения шва и сократить время на подбор параметров сварки.

Катоды из гексаборида лантана обеспечивают срок службы более 40 ч при мощности 60 кВт, предотвращают «уход луча» при изменении положения фокуса.



Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 57
Тел./факс: (38044) 525-43-19
E-mail: nazarenko@technobeam.com.ua
<http://www.nas.gov.ua/pwj/beam>



ГАЗОПЛАМЕННАЯ ПАЙКА ПРИ МОНТАЖЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

С. П. ПАВЛЮК, канд. физ.-мат. наук., **Г. Н. КУТЛИН**, инж. (Киев. нац. ун-т им. Тараса Шевченко),
В. М. КИСЛИЦЫН, канд. техн. наук, **А. Г. МУСИН**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описан новый способ соединения выводов микросхем с дорожками печатных плат. Предложен способ пайки, позволяющий повысить плотность монтажа элементов и исключить ошибки оператора. Приведены результаты испытаний на разрыв соединений, полученных при нагреве пламенем водородно-кислородной смеси и горячим газом.

Ключевые слова: пайка, печатная плата, газопламенный нагрев, водородно-кислородная смесь, принудительное охлаждение, прочность соединений

В настоящее время наметился определенный разрыв между достигнутой высокой плотностью элементов микросхемы в объеме кристаллов кремния, размеры которых измеряются в нанометрах, и относительно невысокой плотностью монтажа навесных узлов (микросхем, конденсаторов, разъемов и других дискретных элементов) на печатных платах.

Актуальность разработки новых конструкций печатных плат и способов монтажа навесных узлов с применением пайки определяется, с одной стороны, тенденцией к миниатюризации узлов радиоэлектронной аппаратуры, а с другой — требованиями к удешевлению процесса сборки и повышению надежности электронных узлов в эксплуатации.

Одним из перспективных способов нагрева при монтаже бескорпусных микросхем непосредственно на печатных платах является электроконтактный нагрев [1], однако он применим только при монтаже способом flip-chip, т. е. для микросхем, контактные площадки которых обращены к металлической разводке печатной платы.

В настоящее время широкое распространение получили бескорпусные микросхемы с проволоочными внешними выводами. Для пайки микросхем

этого типа определенный интерес представляют результаты исследований новых источников нагрева на основе монокристаллического кремния, легированного особым образом, которые, кроме того, обеспечивают усилие сжатия паяемых деталей [2], а также энергии лазера, которая в данном случае поступает к присоединяемому выводу по гибкому светопроводу [3].

Повышение уровня миниатюризации электронных блоков возможно при условии совершенствования существующих конструкций печатных плат, а также способов соединения навесных узлов с печатной платой и должно сопровождаться как удешевлением процесса сборки, так и повышением надежности готовой продукции.

В связи с тем, что решение этих проблем возможно далеко не при любом способе нагрева, в настоящей работе исследуется вариант газопламенной пайки выводов навесных узлов электронной аппаратуры на печатную плату специальной конструкции.

С этой целью мы выбрали именно ту конструкцию паяного узла (рис. 1), которая, по нашему мнению, в наибольшей степени соответствует требованиям дальнейшей миниатюризации. В этой конструкции выводы 4 бескорпусной интегральной схемы 5 соединяются групповой пайкой с дорожками печатной платы 6. При приклеивании основания интегральной микросхемы к печатной плате

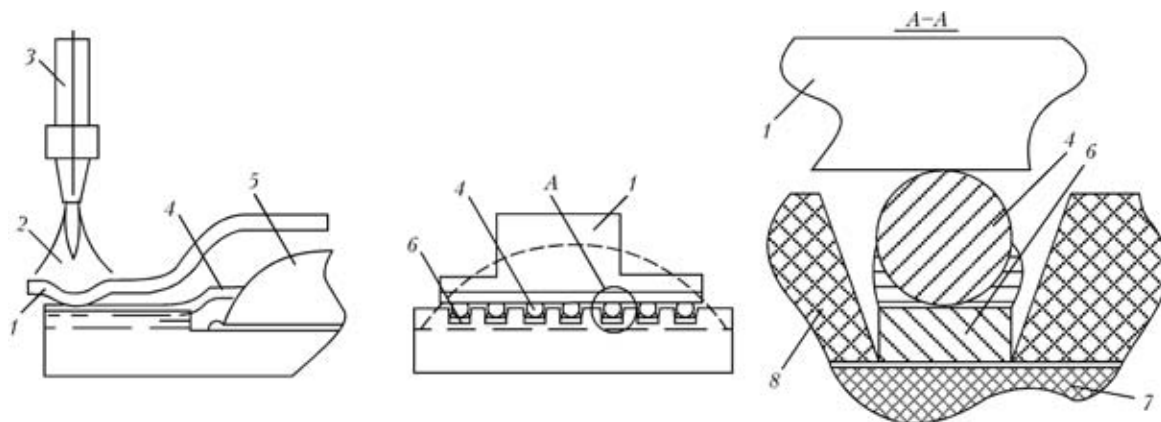


Рис. 1. Схема паяного узла: 1 — нагреватель; 2 — струя горячего газа или водородно-кислородной смеси; 3 — сопло; 4 — выводы микросхемы; 5 — бескорпусная интегральная микросхема; 6 — дорожка печатной платы; 7 — печатная плата; 8 — трафарет

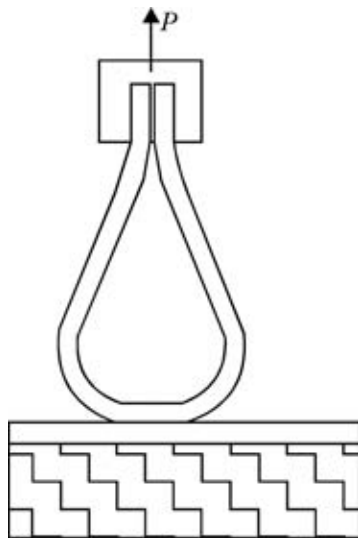


Рис. 2. Схема испытаний на разрыв (P — приложенное усилие)

ее выводы в виде золотой проволоки диаметром 0,06 мм укладывают в специальные пазы. Во время пайки выводы прижимают к дорожкам печатной платы гофрированным выступом нагревателя 1 с усилием, достаточным для незначительной, но заданной степени деформации и выдавливания тонкого слоя припоя из зоны контакта вывода с облуженными дорожками печатной платы.

Печатная плата 7 в данной конструкции состоит из основы, на которую в соответствии с топологией электронной схемы нанесены медные дорожки 6 с облуженными низкотемпературным припоем контактными площадками, и приклеенного к ней трафарета 8, изготовленного из электроизоляционного материала со сквозными отверстиями прямоугольной формы, расположенными напротив каждой из контактных площадок печатной платы. Таким образом, каждая контактная площадка оказывается утопленной в специальные пазы печатной платы, что предотвращает возможность ошибки при размещении в них выводов, если ширина контактных площадок почти равна диаметру присоединяемых выводов (60 мкм), а также исключает электрический контакт между смежными выводами интегральной микросхемы в случае, если расстояние между дорожками составляет около 60 мкм.

Наличие трафарета позволяет реализовать вариант групповой пайки нескольких выводов бескорпусной микросхемы к контактным площадкам печатной платы, избежать ошибки при раскладке выводов, сократить время подготовки к процессу пайки.

Пайку указанной конструкции осуществляли с помощью двух способов нагрева: струей горячего газа и пламенем водородно-кислородной смеси, направляемыми на гофрированный выступ нагревателя 1, являющегося своеобразным коллектором и рассекателем пламени. В обоих случаях в конструкцию нагревательного устройства входит сопло 3, из которого истекает струя горячего газа или пламени водородно-кислородной смеси 2.

Контролируемыми параметрами процесса пайки являются усилие сжатия паяемых выводов и температура начала плавления припоя, предваритель-

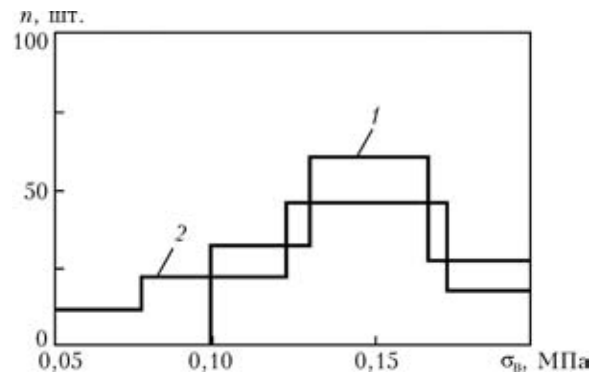


Рис. 3. Плотность распределения значений временного сопротивления паяных соединений при нагреве пламенем водородно-кислородной смеси (1) и горячим газом (2)

но нанесенного на контактные площадки печатной платы. Начало плавления припоя определяли по осадке пластины нагревателя, что косвенно подтверждает наличие деформации присоединяемых выводов и выдавливания прослойки припоя из зоны контакта выводов с дорожками печатной платы. По сигналу датчика осадки происходит автоматическое отключение подачи горячего газа или водородно-кислородной смеси, т. е. прекращение нагрева присоединяемых выводов и включение принудительного охлаждения паяемых соединений путем подачи через то же сопло струи охлаждающего воздуха. Каждый способ нагрева исследовали на партии (120 шт.) образцов паяных соединений. Качество пайки оценивали по значениям временного сопротивления соединения. Учитывая специфику данной конструкции паяного соединения, не соответствующей требованиям существующих стандартов на проведение испытаний, мы использовали схему испытаний на разрыв, представленную на рис. 2. По этой схеме предусматривается фиксирование в зажимных губках разрывной машины одновременно двух концов паяного вывода, что приближает испытания к реальным условиям эксплуатации.

Длина зоны соединения большинства образцов, пайку которых выполняли при нагреве горячим газом или пламенем водородно-кислородной смеси, как правило, не превышала ширину гофрированного выступа нагревателя, а ее ширина была равна ширине предварительно облуженной контактной площадки.

При исследовании участков разрушения паяных образцов выявлена зависимость прочности соединения от толщины прослойки припоя, расположенного между выводом и дорожкой печатной платы, причем образцы, разрушенные при более высокой нагрузке, отличались меньшей толщиной прослойки припоя в зоне соединения.

Более полное выдавливание припоя из зоны контакта паяемого вывода с дорожкой печатной платы происходит в условиях интенсивного нагрева и принудительного охлаждения, а именно, при нагреве пламенем водородно-кислородной смеси.

Зависимость временного сопротивления паяных соединений, полученных при двух способах нагрева, от их количества n , представлена на рис. 3.

Расположение зоны соединения вывода с дорожкой в прорези трафарета, наклеенного на печатную



плату, исключает возможность соприкосновения выдавленного припоя на соседние дорожки, а значит, и появления нежелательного электрического контакта между ними. Временное сопротивление некоторых образцов паяных соединений составляет 0,2 МПа и превышает аналогичный показатель оловянно-свинцового припоя на 10... 15 %, что указывает на формирование сварно-паяных соединений.

Выводы

1. Способ пайки с выдавливанием большей части припоя из зоны контакта соединяемых деталей при температуре, близкой к температуре его плавления, с последующим принудительным охлаждением способствует повышению прочности паяных соединений на 10... 20 % по сравнению с полученными без принудительного охлаждения.

2. Более интенсивный нагрев паяемых деталей пламенем водородно-кислородной смеси по сравнению с нагревом горячим газом, а также быстрое

охлаждение зоны соединения до температуры затвердевания припоя позволяют повысить качество пайки и на 30... 50 % увеличить производительность процесса.

3. Незначительное усложнение конструкции печатной платы за счет наклеивания трафарета с прорезями напротив контактных площадок существенно увеличивает плотность монтажа и исключает появление брака, возникающего при замыкании выводов между собой или с контактными площадками из-за смещения выводов вследствие ошибочных действий оператора.

1. Кислицын В. М. Технология пайки электросопротивлением кремниевых диодов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1987. — 16 с.
2. Использование кремния в качестве нагревательных элементов микропаяльников / С. П. Павлюк, А. А. Россосинский, В. М. Кислицын, Г. Н. Кутлин // Автомат. сварка. — 1999. — № 2. — С. 41–44.
3. Azdasht G., Zakel E., Reichl H. Implementation of low power diode laser for soldering by FPS method // Soldering and Surface Mount Technology. — 1996. — № 22. — P. 51–54.

New process is described for joining chip leads to tracks on printed circuit board. The method is suggested to prevent short circuiting of the leads, allowing a simultaneous increase in element packing density. Results of comparative tensile tests of the joints made by heating with oxyhydrogen flame and hot air are given.

Поступила в редакцию 18.10.2005,
в окончательном варианте 16.11.2005

К СВЕДЕНИЮ СВАРЩИКОВ!

На базе Международного учебно-исследовательского и консультационного центра «Интервелд» создан ООО «Международный грузино-украинский научно-технический центр по сварке и родственными технологиям «Интервелд» им. Е. О. Патона».

Учредителями Центра являются:

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; Ассоциация сварщиков Грузии.

Центр осуществляет деятельность по следующим направлениям:

1. Разработка научно-исследовательских и технологических проектов по сварке и родственными технологиям.
2. Оказание технической и консультативной помощи учреждениям, организациям, предприятиям и фирмам по вопросам сварочного производства.
3. Подготовка, переподготовка и повышение квалификации персонала сварочного производства.

Центр предлагает организациям и фирмам, занимающимся строительством зданий, сооружений, трубопроводов, терминалов и т. п., а также производствам сварных металлоконструкций и сварочного оборудования:

- разработку технических проектов и конструкторской документации сварных металлоконструкций и других изделий;
- технический надзор за технологией сварки;
- экспертизу сварных металлоконструкций и неразрушающий контроль качества сварных швов;
- исследование химического состава металла шва или основного металла и изменения параметров изделия в результате коррозии или механических воздействий;
- наладку сварочного оборудования;
- любые консультации в области сварки и родственных технологий.

Центр осуществляет подготовку, переподготовку, повышение квалификации и аттестацию персонала сварочного производства по программам, соответствующим евро- и международным стандартам (ISO, DIN, EN, IWI, DSW и др.).

Специалисты, прошедшие курс обучения и успешно сдавшие экзамены, получают квалификационный сертификат и удостоверение сварщика.

Тел.: (99532) 227511, 337644 Факс: (99532) 227511 E-mail: vabe@pisem.net

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАЩИТНЫМ ЭМАЛЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ

А. М. САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, В. Н. ВАЩЕНКО, И. В. БОБРОВ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные трудности, возникающие при дуговой сварке изделий с защитным эмалевым покрытием внутренней поверхности. Показано, что эмаль способна кратковременно (до 3...5 с) выдерживать высокотемпературное воздействие, вплоть до температур плавления стали. Столь малую длительность пребывания металла сварного соединения при указанных температурах обеспечивает импульсно-дуговая сварка.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, эмалированные изделия, покрытие, сварное соединение, пульсирующий термический цикл сварки, условия нагрева и охлаждения, остеклование эмали

В настоящее время проблема защиты от коррозии изделий, эксплуатирующихся в средах различной агрессивности, решается путем разработки и внедрения в производство различных защитных покрытий (полимерных, лакокрасочных, эпоксидных и др.).

Достаточно перспективными защитными покрытиями являются стекловидные эмали. Применение последних для защиты внутренних поверхностей труб в теплоэнергетике и нефтеперерабатывающей промышленности, а также изделий химического машиностроения продлевает срок их службы в 4...5 раз.

В случае эмалирования изделий после сварки проблем с его реализацией не возникает. Однако, если выполнить эмалирование изделия после сварки невозможно, как при сварке стыков трубопроводов, например, малого диаметра, либо замыкающих швов оболочковых конструкций без свободного доступа к внутренней поверхности, то сварку приходится выполнять по слою предварительно нанесенной эмали. При этом возникает ряд проблем, которые обусловлены сравнительно низкой теплоустойчивостью эмали, которая ограничивается температурами 800...900 °С. Превышение температуры более 900 °С приводит к выгоранию эмали, ниже 800 °С остеклование эмалевого слоя не достигается — эмаль спекается частично. В ней образуются трещины и газовые пузыри, что приводит впоследствии к его полному либо частичному разрушению и нарушению антикоррозионной защиты изделия. Такой узкий температурный интервал остеклования существенно ограничивает применение стекловидных эмалей для защиты сварных соединений. Поскольку при сварке с полным проплавлением обратная сторона соединения нагревается до температур, близких к температуре плавления металла, а в шве достигаются температуры, равные, либо превышающие ее, эмаль в этом месте выгорает.

В настоящее время для решения проблемы сварки стыков эмалированных труб используется ряд технологических приемов, основанных на применении замковых сварных соединений с неполным проплавлением кромок; использовании специальных формирующих устройств; предварительном выполнении защитных наплавов на кромки из коррозионностойких материалов. Используются также переходные вставки из коррозионностойких материалов, предварительно привариваемые к торцам труб. Все эти методы подробно изложены и проанализированы в работе [1]. Они достаточно надежны, но не лишены недостатков (достаточно высокая стоимость и трудоемкость). Кроме того, некоторые из них снижают работоспособность сварных соединений. Поэтому более перспективен метод, основанный на предварительном нанесении плакирующего слоя на внутреннюю сторону труб в районе стыка [1].

Анализ современных подходов к решению проблемы сварки эмалированных изделий свидетельствует, что большинство из них требует предварительной достаточно сложной и трудоемкой подготовки торцов труб под сварку. Поэтому задачей настоящей работы являлось выявление возможности сварки эмалированных изделий по слою эмали без специальной предварительной подготовки свариваемых кромок и применение специальных формирующих устройств. Так как стандартная технология термической обработки эмали предусматривает ее нагрев до 800...900 °С и выдержку при этих температурах в течение определенного времени, необходимо было определить ее способность выдерживать более высокотемпературные воздействия, близкие к температуре плавления стали. С этой целью образцы с нанесенной и просушенной эмалью нагревали до температур 800...1500 °С. При этом фиксировали длительность выдержки до начала остеклования эмали и ее сгорания.

Температурно-временные зависимости, приведенные на рис. 1, свидетельствуют, что по мере повышения температуры стойкость эмали снижается. Например, при нагреве до 900 °С остеклование эмали проходит за 4 мин, до 1200 °С — через 45 с после нагрева, а сгорает через 50 с. Временной интервал остеклования эмали состав-

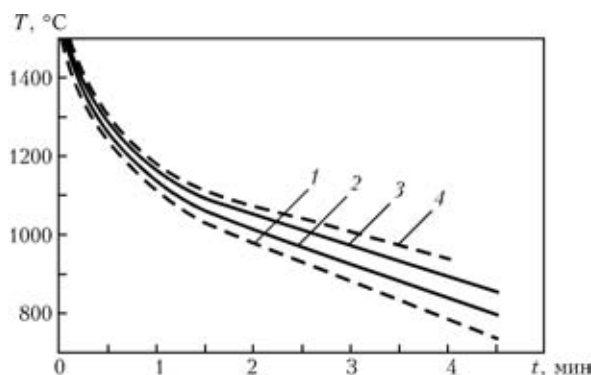


Рис. 1. Тепловые характеристики стекловидной эмали: 1 — спекание; 2, 3 — остеклование; 4 — сгорание

ляет 5 с. При нагреве до температур, близких к температуре плавления стали, эмаль в состоянии выдерживать тепловое воздействие в течение 3...4 с не сгорая. Следовательно, при сварке эмалированных изделий необходимо ориентироваться на такой способ сварки, при котором возможно достаточно точно регулировать условия нагрева и охлаждения сварного соединения, ограничивая длительность пребывания металла в области температур выше 1000 °С секундами. Причем длительность контакта защитной эмали с жидким металлом сварочной ванны не должна превышать 2...3 с. При традиционных способах сварки дугой постоянной мощности реализовать столь жесткие условия нагрева и охлаждения чрезвычайно трудно. Сварку необходимо выполнять на таких низких значениях погонной энергии, что становится проблематичным получение качественных сварных соединений из-за непроваров и несплавлений, но и это не обеспечивает решения проблемы. Эмаль либо сгорает, либо частично спекается с образованием трещин и газовых пузырей, что сопровождается последующим ее разрушением.

Обеспечить приемлемые тепловые условия в сварном соединении без ущерба для его качества можно путем использования пульсирующих термических циклов по типу приведенных в работе [2]. Такие либо подобные условия нагрева и охлаждения могут обеспечить импульсно-дуговая [2, 3], сварка дугой постоянной мощности с колебаниями электрода [4] и сварка многослойными швами [5].

Результаты сопоставления различных способов сварки показали, что наиболее широкие технологические возможности по регулированию условий нагрева и охлаждению сварных соединений имеет автоматическая шаговая импульсно-дуговая сварка. Отличительной особенностью данного способа является периодическое изменение тепловой мощности дуги. С учетом этого, а также благодаря регулированию длительностей импульсов, пауз и скорости сварки данный способ обеспечивает возможность формирования в сварном соединении всего спектра термических циклов [2]. В зависимости от сочетания параметров режима в сварном соединении могут быть сформированы традиционные термические циклы, аналогичные приведенному на рис. 2, а, с низкими скоростями нагрева и охлаждения, а также с большой длительностью пребывания металла сварных соединений в области

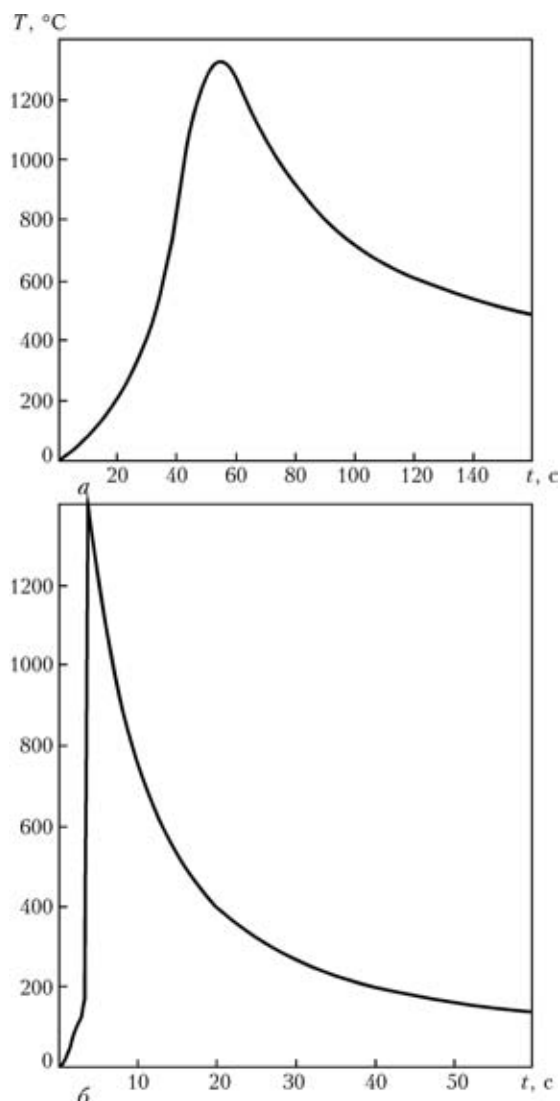


Рис. 2. Термические циклы при импульсно-дуговой сварке [2]: а — традиционный низкоскоростной; б — высокоскоростной

высоких температур. При таких термических циклах эмалевое покрытие под швом и в прилегающих к нему участках полностью выгорает.

При соответствующем сочетании параметров режима в сварном соединении могут формироваться пульсирующие термические циклы с достаточно большим количеством периодов нагрева и охлаждения и высокими скоростями изменения температур [2]. Такие циклы обеспечивают сравнительно небольшую суммарную длительность пребывания металла сварного соединения при температурах более 1000 °С. В зависимости от количества периодов нагрева и охлаждения, а также сочетания параметров режима сварки она может быть сведена к 2...5 с. Результаты экспериментов, выполненных на плоских образцах толщиной 3...5 мм и образцах труб диаметром 57...325 мм с толщиной стенки 4...10 мм, показали, что выбранный способ сварки обеспечивает гарантированное остеклование эмали под швом и ее сплавление с защитным слоем, нанесенным и остеклованным ранее. В результате на внутренней поверхности изделия образуется тонкий слой эмали без дефектов и трещин (рис. 3). Сварку плоских образцов выполняли в нижнем

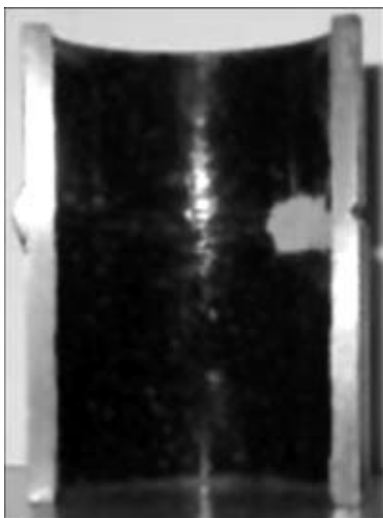


Рис. 3. Стык эмалированных труб, выполненный импульсно-дуговой сваркой по слою эмали

положении, трубных — в различных пространственных положениях с вращением образца для имитации условий сварки неповоротного стыка. Тепловая мощность дуги составляет 1,9...4,8 кВт в зависимости от толщины металла либо притупления кромок. В случае сварки образцов с толщиной кромок более 4 мм целесообразно применение разделки кромок с углом раскрытия 60°. Эмаль с толщиной слоя до 0,5...1,0 мм наносили на стык перед сваркой и просушивали при температуре не более 80 °С во избежание пористости. Сварка выполнялась на образцах из Ст 3, стали 10, стали 20, стали 09Г2С. Сварные швы выполняли без применения формирующих подкладок.

Импульсно-дуговая сварка позволяет также формировать в сварном соединении термические циклы, подобные приведенным на рис. 2, б. Они имеют традиционную форму, но отличаются высокими скоростями нагрева и охлаждения. Длительность пребывания металла в области температур более 1000 °С может ограничиваться несколькими секундами. Однако при подобных термических циклах сварки не обеспечивается гарантированное остеклование эмали по длине стыка. В слое эмали, частично спекшемся, но не остеклованном, образуются трещины и пузыри. Этот слой не полностью сплавляется с нанесенной и остеклованной ранее эмалью. Такая некачественная термическая обработка эмали под сварным швом приводит к его преждевременному разрушению.

Considered are the main problems arising in arc welding of parts with protective enamel coatings on their inside surfaces. It is shown that enamel can resist the short-time (up to 3...5 s) high-temperature effect, amounting to a melting point of steel. This short-time resistance of metal of a welded joint to the above temperatures can be provided by pulsed arc welding.

Таким образом, результаты исследований показывают, что для гарантированного остеклования эмали и надежного ее сплавления с ранее нанесенным и остеклованным слоем в сварном соединении необходимо обеспечивать условия нагрева и охлаждения, соответствующие пульсирующим термическим циклам по типу, приведенных в работе [2]. В этом случае длительность высокотемпературного воздействия на эмаль под швом достаточна для ее остеклования и сплавления с ранее нанесенной, но недостаточна для сгорания эмали.

Как показали результаты проведенных исследований, для создания таких условий нагрева и охлаждения в сварном соединении наиболее рационально применение импульсно-дуговой сварки, которая из всех способов дуговой сварки имеет наиболее широкие возможности в отношении регулирования теплового состояния сварного соединения независимо от толщины свариваемого металла.

Выводы

1. Качество слоя защитной эмали под сварным соединением определяется условиями его нагрева и охлаждения.

2. Тепловое состояние сварного соединения при сварке дугой постоянной мощности не обеспечивает гарантированного остеклования эмали под швом и надежного сплавления ее с ранее нанесенным на изделие и остеклованным защитным слоем. Эмаль либо сгорает, либо частично спекается с образованием трещин и газовых пузырей, что сопровождается последующим разрушением спеченного слоя.

3. Импульсно-дуговая сварка обеспечивает в сварном соединении условия нагрева и охлаждения, при которых эмаль под швом остекловывается и сплавляется с нанесенной на изделие и остеклованной ранее, но не сгорает.

1. Бут В. С. Дуговая сварка труб с внутренним защитным покрытием // Сварщик. — 2003. — № 2. — С. 8–11.
2. Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Е. М. Олейник // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 8–12.
3. Вагнер Ф. А. Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом // Свароч. пр-во. — 1980. — № 2. — С. 4–6.
4. Макара А. М., Мосендз М. А. Сварка высокопрочных сталей. — Киев: Техника, 1976. — 140 с.
5. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. — М.: Металлургия, 1976. — Т. 2. — 600 с.

Поступила в редакцию 28.01.2005



ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. С. ЮХИМЕЦ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, **В. И. КРАВЧЕНКО**, кандидаты техн. наук, **И. А. КЛИМЕНКО**, инж.
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины),
В. П. ЛЕСОВЕЦ, инж. (НАК «Нафтогаз Украины»)

Выполнен анализ напряженного состояния трубопровода с объемным дефектом на внутренней поверхности трубы для различных вариантов ремонтных работ, направленных на продление остаточного ресурса трубопровода. Показано, что установка двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта на расстоянии удвоенной длины дефекта, позволяет существенно снизить коэффициент концентрации напряжений и продлить остаточный ресурс трубопровода. При этом сохраняется возможность осуществления послеремонтного мониторинга дефектного участка.

Ключевые слова: трубопровод, коррозионные повреждения, ремонт, продление ресурса, бандаж

Распространенными повреждениями трубопроводов с большим сроком эксплуатации являются язвенные (объемные поверхностные) дефекты, являющиеся следствием коррозионных либо эрозионно-коррозионных процессов (рис. 1). На основании определения геометрических параметров дефекта непосредственным измерением (наружная) или средствами неразрушающего контроля (внутренняя поверхность) выполняется оценка его влияния на статическую и циклическую прочность [1, 2].

В результате проведенных расчетов может быть выявлено, что остаточный ресурс трубопровода является недостаточным. В такой ситуации принимается решение о проведении ремонта — сварке так называемой катушки — отрезка трубы взамен изымаемого дефектного, либо о снижении рабочего давления до соответствующего значения (по условиям обеспечения остаточного ресурса).

Указанные выше способы продления эксплуатации трубопровода могут оказаться неприемлемыми из-за требований непрерывности технологического цикла или стабильности режима перекачки продукта. В последнее время выполнен ряд

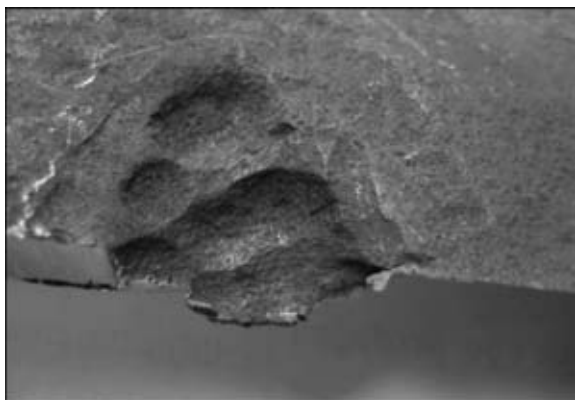


Рис. 1. Наружная поверхность трубы с язвенным повреждением (образец вырезан из трубы Ду 273×8)

фундаментальных разработок относительно альтернативного способа ремонта — заварки отдельных коррозионных дефектов на наружной поверхности стенки трубы без остановки трубопровода [3, 4].

В настоящей статье выполнен анализ напряженного состояния трубопровода с объемным дефектом на внутренней поверхности с целью раз-

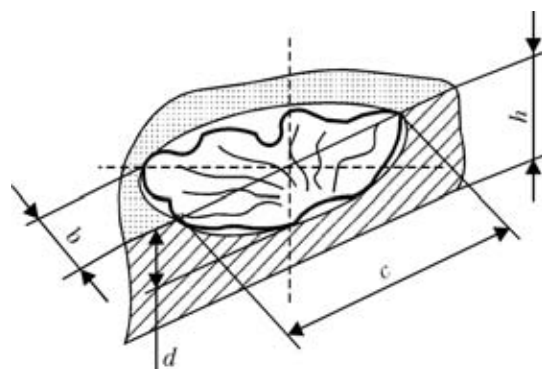


Рис. 2. Схема поверхностного дефекта, моделируемого половинной эллипсоидом (c — длина; b — ширина; d — глубина дефекта; h — толщина стенки трубы)

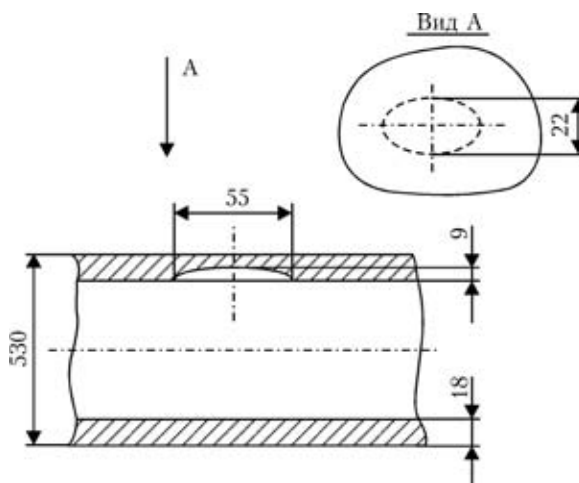


Рис. 3. Схема трубы с дефектом на внутренней поверхности

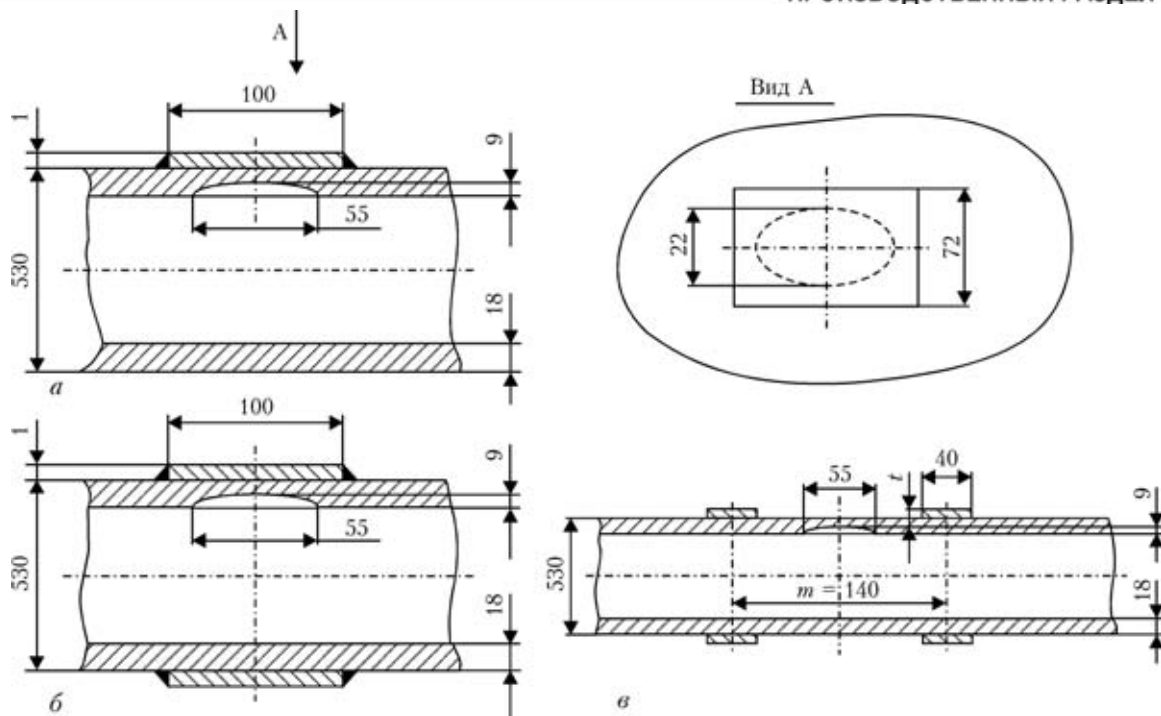


Рис. 4. Схемы вариантов трубопровода с язвенными дефектами: *а* — труба с приваренной накладкой; *б* — с бандажом; *в* — со сдвоенным бандажом

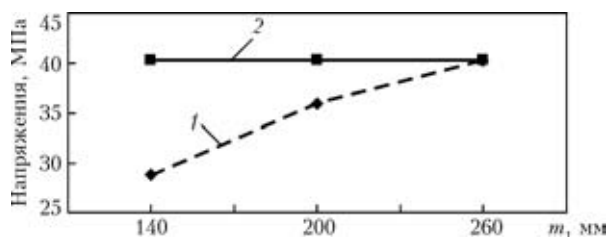


Рис. 5. Влияние расстояния между бандажами на максимальные напряжения в зоне дефекта ($t = 18$ мм, $\Delta P = 1$ МПа); 1, 2 — соответственно труба с бандажами и без

работки мероприятий для проведения ремонтных работ, направленных на продление остаточного ресурса трубопровода, без его остановки.

В качестве определяющего фактора, влияющего на циклическую прочность, выбран размах циклических деформаций (коэффициент концентрации напряжений (ККН)), рассчитываемый в зоне дефекта методом конечных элементов (МКЭ).

Расчеты проводили с помощью программного обеспечения SPACE, предназначенного для моделирования МКЭ трехмерного теплового и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, разработанного и успешно эксплуатируемого в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. В основе программного обеспечения конечно-элементного анализа находится смешанная схема МКЭ, обеспечивающая устойчивость численного решения и высокую точность получения результатов как для перемещений, так и для напряжений и деформаций [5, 6]. Данное обстоятельство имеет большое значение при решении задач ресурсного проектирования, поскольку именно деформации и напряжения должны определяться с максимальной точностью.

В состав программного обеспечения входит открытая для дальнейшего пополнения библиотека параметризованных моделей типичных элементов трубопроводов, включающая различные типы тройниковых соединений (равно- и неравнопроходные, цилиндрические, конические), переходы, отводы, фланцевые соединения, фрагменты трубы с коррозионным дефектом на внутренней или внешней поверхности [7].

В качестве геометрической модели рассматриваемых поверхностных дефектов трубопроводов использовали половину эллипсоида, осями симметрии которой являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном направлениях (рис. 2). Тестирование эффективности различных вариантов ремонта трубопроводов проводили на основании расчетов напряженного состояния трубы Ду 530×18 с полуэллиптическим дефектом на внутренней поверхности (рис. 3). Рассмотрены следующие варианты ремонта (рис. 4):

- приварка к наружной поверхности трубы накладки, располагающейся над дефектом (рис. 4, *а*);
- установка/приварка металлического бандажа, перекрывающего дефект (рис. 4, *б*);
- установка/приварка двух бандажей, располагающихся симметрично относительно дефекта (рис. 4, *в*).

Как следует из приведенных данных (таблица), наиболее эффективным способом снижения концентрации напряжений (повышения остаточного ресурса) при одной и той же толщине укрепляющего элемента является перекрытие зоны дефекта с помощью кольцевого бандажа (вариант 2). При установке бандажа с толщиной, равной 1,5 толщины стенки трубы, уровень концентрации напряжений в зоне дефекта снижается в 2 раза. Наименее эффективным является укрепление дефекта



Способы повышения остаточного ресурса трубопровода

№ п/п	Вариант ремонта	Толщина укрепляющего элемента t , мм	Коэффициент концентрации напряжений в зоне дефекта α_a	Допускаемое количество циклов $[N]^*$ при $\Delta P = 20$ МПа
1	Накладка	9	3,11	14610
		18	2,90	20880
		27	2,65	34310
2	Бандаж	9	2,29	87210
		18	1,85	666000
		27	1,63	$> 1 \cdot 10^6$
3	Сдвоенный бандаж ($m = 140$ мм)	9	2,59	39230
		18	2,34	74940
		27	2,10	171900
4	Без укрепляющего элемента	—	3,26	11610

* Расчет выполнен для трубы из низкоуглеродистой стали.

с помощью приварки накладки. Установка двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта (вариант 3) на расстоянии между внутренними кромками примерно $2s$ (две длины дефекта) также позволяет достигнуть значительного снижения ККН. В этом случае его уменьшение до того же уровня, что и в случае одного бандажа (вариант 2) достигается при удвоенной толщине бандажей. При этом заметное влияние на концентрацию напряжений оказывает расстояние между бандажами m (рис. 5). Так, при $m = 300$ мм положительное влияние конструктивного решения полностью утрачивается.

Установка сдвоенных бандажей, имеющих толщину, равную толщине стенки труб, в условиях циклического воздействия пульсирующего внутреннего давления $\Delta P = 20$ МПа повышает допускаемое количество циклов примерно в 6 раз.

The stressed state of pipeline with a volume defect on the inner surface of a pipe was analysed in terms of different variants of repair operations aimed at extension of remaining life of the pipeline. It is shown that the use of two bands located symmetrically relative to a defect at a distance of the double defect length allows a substantial decrease in stress intensity factor and increase in the remaining life of the pipeline, the possibility of post-repair monitoring of the defective region being retained.

Таким образом, сопоставление рассмотренных вариантов ремонта свидетельствует о том, что одной из мер продления ресурса трубопровода с язвенными дефектами на внутренней поверхности может являться укрепление дефекта с помощью двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта на расстоянии удвоенной длины дефекта. Несмотря на то что данный метод несколько уступает в эффективности снижения ККН в зоне дефекта методу приварки бандажа, перекрывающего дефект, и является наиболее материалоёмким, он позволяет отслеживать динамику изменения геометрических параметров дефекта в послерементный период.

1. Прочность трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 44–49.
2. Юхимец П. С., Гарф Э. Ф., Нехотящий В. А. Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 17–21.
3. API Standard 1104. Welding of pipelines and related facilities. Appendix 13. Service welding. — American Petroleum Institute, 1999, Sept.
4. Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
5. Бойко В. Б., Ворошко П. П., Кобельский С. В. Моделирование трехмерного теплового и напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью смешанных вариационных формулировок МКЭ. Сообщение 1 // Пробл. прочности. — 1991. — № 2. — С. 72–77.
6. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. — Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. — 250 с.
7. Кобельский С. В., Кравченко В. И., Лисовець В. П. Спеціалізоване програмне забезпечення для розрахунку міцності деталей трубопроводів у нафтогазовій промисловості // Нафт. і газова промисловість. — 2004. — № 1. — С. 52–54.

Поступила в редакцию 18.10.2005



АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕСТИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен алгоритм, обеспечивающий ориентацию манипуляционного робота по нормали к тестируемой поверхности в условиях неопределенности относительно ее положения в рабочем пространстве робота. Алгоритм синтезирован в результате решения задачи минимизации функционалов, характеризующих текущее расстояние от некоторой виртуальной плоскости до тестируемой поверхности при движении робота по заданным траекториям.

Ключевые слова: роботизация сварочных процессов, измерения, алгоритм, автоматическая ориентация

При роботизации процессов восстановительной наплавки изношенных деталей или термической правки деформированных тонколистовых конструкций возникает ряд задач, связанных с необходимостью предварительно (и в ходе самих процессов) определять геометрические параметры поверхностей, обрабатываемых деталей. Иногда можно обойтись измерениями деформаций лишь в характерных точках этих поверхностей. Один из алгоритмов локализации таких точек и определения в них деформаций с помощью манипуляционных роботов предложен в работе [1] и практически реализован при создании автоматизированного комплекса для термической правки, описанного в [2].

В работе [1] предполагалось, что измерительное устройство (ИУ), которым оснащается манипуляционный робот, заранее сориентировано по нормали к так называемым плоскостям уровня [3], характеризующим рельеф тестируемой поверхности. Вопросы, относящиеся к самой процедуре ориентирования ИУ, в работе [1] не рассматривались. Между тем, если указанная поверхность расположена в рабочем пространстве робота произвольным образом, а именно так, что упомянутые плоскости уровня не обязательно параллельны одной из координатных плоскостей системы координат робота, то процесс ориентирования ИУ в этом случае значительно усложняется. Это объясняется тем, что ориентирование обычно осуществляют путем обучения робота, при режиме ручного управления выполняют последовательность целенаправленных движений ИУ с одновременным измерением каким-либо образом его положения относительно нормали к тестируемой поверхности. И только после совмещения продольной оси ИУ с указанной нормалью производится запись угловых координат в запоминающем устройстве системы управления роботом.

Очевидно, что такой метод ориентирования имеет ряд недостатков. В частности, время обучения робота довольно продолжительное (иногда соизмеримо со временем выполнения основных тех-

нологических операций), а точность ориентации невысокая и зависит от опытности и квалификации оператора. В результате точность последующего измерения рельефа тестируемых поверхностей может оказаться недопустимо низкой.

В связи с этим весьма актуальным представляется решение задачи, связанной с автоматизацией самого процесса ориентирования ИУ относительно тестируемых поверхностей. Однако, насколько нам известно из публикаций [4–8], успехи в этом направлении пока весьма незначительны.

В настоящей работе представлен один из алгоритмов автоматического ориентирования, обеспечивающий в условиях неопределенности положения тестируемой поверхности заданную точность ориентации и существенно упрощающий процедуру обучения манипуляционного робота. Алгоритм синтезируется в результате решения задачи минимизации функционалов, характеризующих текущее расстояние от некоторой заданной виртуальной плоскости до тестируемой поверхности при движении измерительного устройства по специально заданным траекториям.

Формулировка задачи. Рассмотрим классическую (антропоморфную) кинематическую схему манипуляционного робота (рис. 1). Согласно этой схеме робот представляет собой пятизвенный механизм, связанный вращательными сочленениями. В качестве базовой системы координат робота используется декартова система $Oxyz$. Относительное положение звеньев определяется угловыми координатами q_i ($i = 1, \dots, 5$). Последнее (пятое) звено соединено с ИУ, предназначенным для определе-

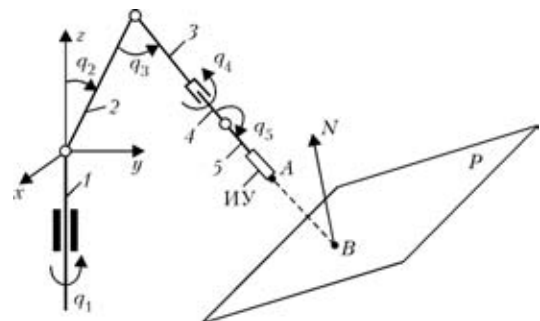


Рис. 1. Схема робота с ИУ и тестируемой поверхностью P : 1–5 — здесь и далее номера звеньев; остальные обозначения см. в тексте



ния расстояния D от точки A до поверхности P вдоль осевой линии ИУ. Продольная ось ИУ совпадает с этой осевой линией.

В рабочем пространстве робота расположена плоская поверхность P . Ее положение относительно базовой системы координат робота не известно, а следовательно, не определена ориентация продольной оси ИУ (отрезок AB на рис. 1) относительно указанной поверхности. Существует лишь возможность измерять с помощью ИУ расстояние D . Согласно рис. 1 точка A располагается в торце ИУ, точка B находится на поверхности P , N — нормаль к плоскости P .

Задачу автоматизации процесса ориентирования ИУ сформулируем следующим образом: требуется синтезировать такой алгоритм изменения угловых координат q_i , который на основе текущей информации о расстоянии D обеспечил бы автоматическую ориентацию продольной оси ИУ по нормали к поверхности P .

Синтез алгоритма ориентации. На первый взгляд может показаться, что из-за дефицита информации о положении поверхности в системе координат робота решение этой робототехнической задачи не возможно. Однако при более внимательном рассмотрении оказалось, что если использовать определенный технический прием, позволяющий получить недостающую информацию, то решение данной задачи вполне возможно.

Суть одного из таких приемов состоит в следующем. Пусть зафиксировано некоторое положение (конфигурация) манипуляционного робота с грубой ориентацией измерительного устройства ИУ относительно плоскости, например, изображенной на рис. 1. Пусть, кроме того, выполняется условие $q_5 = \pi - \Delta q_5$, где Δq_5 — достаточно малое приращение угловой координаты q_5 . Если теперь ИУ привести в движение путем изменения лишь одной угловой координаты q_4 , то точка A будет двигаться по окружности, расположенной в некоторой виртуальной плоскости W , ортогональной продольной оси звена 4, а изображающая точка B при этом будет описывать эллипс на плоскости P (рис. 2).

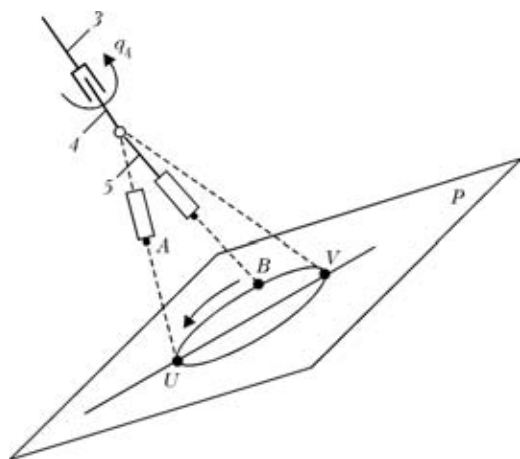


Рис. 2. Схема движения изображающей точки B по эллипсу при изменении угловой координаты q_4

Ось UV этого эллипса перпендикулярна линии пересечения плоскостей W и P . Очевидно, только тогда, когда изображающая точка находится в одной из вершин эллипса U или V , линия UV и осевые линии звеньев 4 и 5 лежат в одной плоскости, перпендикулярной плоскости P (рис. 3). Следовательно, если теперь перемещать изображающую точку B по линии UV , например, от точки U в направлении к точке V путем изменения угловой координаты q_5 при «замороженных» остальных координатах, то в точке B_* произойдет совмещение осевой линии AB с нормалью N к плоскости P .

Таким образом, для окончательного решения данной задачи остается локализовать точки U и B_* . С этой целью используем ИУ. Поскольку в общем случае плоскости W и P не параллельны, то расстояние D (равное отрезку AB) при движении точки B по эллипсу (рис. 2) будет изменяться и станет минимальным в точке U . Следуя [9], координаты этой точки можно определить из соотношения

$$q_4^U = \arg \min_{0 \leq q_4 \leq 2\pi} D[q_i(t)], \quad (1)$$

где q_4^U — пока еще неизвестная угловая координата точки U ; $D[q_i(t)]$ — функционал, характеризующий расстояние D в зависимости от координат q_i . Координата точки B_* (рис. 3) может быть найдена из аналогичного соотношения

$$q_5^{B_*} = \arg \min_{q_{n5} \leq q_5 \leq q_{b5}} D[q_i(t)], \quad (2)$$

где q_{n5} , q_{b5} — соответственно нижний и верхний пределы значений угла q_5 , назначаемые заранее при решении конкретной задачи.

Итак, алгоритм ориентирования ИУ относительно тестируемой поверхности P работает следующим образом. Сначала в режиме обучения устанавливается ИУ вблизи тестируемой поверхности P на нужном расстоянии и достаточно грубо ориентируется по нормали к этой поверхности. Затем запускается программа, обеспечивающая пошаговое (поточечное) движение ИУ по окружности над

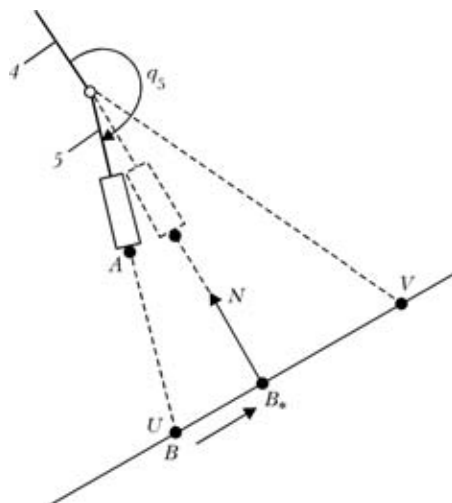


Рис. 3. Схема движения изображающей точки B вдоль линии UV при изменении угловой координаты q_5



поверхностью P путем изменения координаты q_4 при остальных «замороженных» координатах. В каждой локальной точке измеряется расстояние D и проверяется условие

$$D_k - D_{k-1} < 0, \quad (3)$$

где $k = 1, 2, \dots$ — номер локальной точки. Программа выполняется до тех пор, пока не будет нарушено условие (3), т. е. пока изображающая точка B не совпадет с точкой U (см. рис. 2).

После этого запускается аналогичная программа, также осуществляющая поточечное движение ИУ, но теперь уже по линии UV путем изменения угловой координаты q_5 при неизменных остальных координатах. При этом, как и прежде, в каждой точке k измеряется расстояние D и проверяется условие (3). Как только произойдет нарушение этого условия, точка B совпадет с целевой точкой B_* , в которой продольная ось ИУ будет совмещена с нормалью N к плоскости P . В завершение работы алгоритма производится запись угловых координат в запоминающем устройстве системы управления роботом. На этом процесс автоматического ориентирования ИУ относительно плоскости P заканчивается.

Экспериментальная проверка алгоритма. Для проверки работоспособности синтезированного алгоритма проведен ряд экспериментов с помощью шестизвеного манипуляционного робота РМ 01 (PUMA-560). Кинематическая схема РМ 01 отличается от схемы, изображенной на рис. 1, лишь дополнительным (шестым) звеном, благодаря которому ИУ вращается вокруг продольной оси этого звена.

В качестве ИУ использован датчик расстояния потенциометрического типа. Поскольку датчик конструктивно устроен так, что его продольная ось совпадает с продольной осью шестого звена РМ01, то изменение угловой координаты q_6 не оказывает влияние на положение и ориентацию ИУ. Тестируемую плоскую поверхность размером 500×500 мм разместили в рабочем пространстве РМ 01 под углом 36° к плоскости xy системы координат робота. ИУ в режиме обучения установили примерно в центре тестируемой поверхности и приблизительно сориентировали его относительно нормали к этой поверхности.

После таких простых подготовительных операций запускалась программа, реализующая алгоритм автоматической ориентации ИУ. Отработка программы длилась около 35 с. В результате ИУ автоматически устанавливалось по нормали к тестируемой поверхности.

Для окончательного вывода относительно эффективности предложенного алгоритма проведена экспериментальная проверка точности ориентирования ИУ, заключающаяся в следующем. В виртуаль-

ной плоскости W , которая теперь уже параллельна координатной плоскости τb так называемой системы координат инструмента $F\tau bn$, выбраны три точки, отстоящие друг от друга на расстоянии $\Delta l = 200$ мм. В этих точках (при предварительно установленной ориентации) с помощью ИУ измеряли расстояния D_1 , D_2 и D_3 . Поскольку ось n направлена вдоль продольной оси ИУ, то в случае точной ориентации относительно тестируемой поверхности должно выполняться условие $D_1 = D_2 = D_3$. Степень нарушения этого условия как раз и будет характеризовать погрешность в ориентировании ИУ относительно тестируемой поверхности.

В результате измерений получены следующие усредненные данные: $D_1 = 52,3$ мм, $D_2 = 52,9$ мм, $D_3 = 52,7$ мм. Подставляя эти значения в формулы

$$\psi_\tau = \arctg \frac{D_2 - D_1}{\Delta l}, \quad \psi_b = \arctg \frac{D_3 - D_1}{\Delta l},$$

получаем $\psi_\tau = 10,3'$, $\psi_b = 6,8'$.

Как и следовало ожидать, отклонения осевой линии ИУ от нормали к тестируемой поверхности, характеризуемые здесь углами ψ_τ и ψ_b , незначительны. Следует заметить, что при ориентировании ИУ в ручном режиме эти углы обычно на порядок больше.

Таким образом, экспериментальная проверка показала достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма автоматического ориентирования ИУ относительно тестируемой поверхности, расположенной в рабочем пространстве робота произвольным образом: во-первых, существенно повысилась точность ориентации ИУ; во-вторых, заметно упростилась сама процедура ориентирования; в-третьих, значительно уменьшилось время, затрачиваемое на ориентирование.

1. Цыбульский Г. А. Алгоритм поиска максимальных деформаций листовых конструкций с помощью манипуляционного робота // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 55–57.
2. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Г. А. Цыбульский и др. // Там же. — 2003. — № 7. — С. 3–8.
3. Торн Дж. Начальные главы дифференциальной геометрии / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 360 с.
4. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Пер. с фр. — М.: Мир, 1985. — 285 с.
5. Черноусько Ф. А., Болотник Н. Н., Градецкий Р. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. — М.: Наука, 1989. — 368 с.
6. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
7. Хорн Б. К. П. Зрение роботов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 487 с.
8. Козлов Ю. М. Адаптация и обучение в робототехнике. — М.: Наука, 1990. — 248 с.
9. Цыбульский Г. А. Двухуровневое координирующее управление манипуляционным роботом с кинематической избыточностью // Пробл. управления и информатики. — 1995. — № 3. — С. 143–150.

Suggested is the algorithm for ensuring orientation of the manipulation robot normal to the test surface under the conditions of uncertainty relative to its position in a work space of the robot. The algorithm was synthesised as a result of solution of the problem of minimising the functionals that characterise the current distance from some virtual plane to the test surface in movement of the robot along the set paths.

Поступила в редакцию 09.06.2005



НОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОШИПОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Г. В. ЖУК, инж. (ЗАО «Укрспецтерм», г. Киев), **В. М. ЛУКЬЯНЕЦ**, инж. (ЧНПП «Атол», г. Киев),
С. В. МАЗУР, инж. (Трипольская ТЭС, г. Украинка)

Описана новая установка для осуществления технологического процесса приварки экранных шипов паровых котлов. Приведены технические характеристики установки и показана эффективность ее применения при изготовлении и ремонте котлов тепловых станций.

Ключевые слова: дуговая приварка, углеродистые и низколегированные стали, установка, технология приварки, производительность, качество соединений

При ремонте на тепловых станциях значительный объем работ приходится на изготовление ошипованных экранов топок паровых котлов. Высокое качество работ является одним из условий их надежности и безаварийности.

Технология дуговой приварки экранных шипов является наиболее эффективной при изготовлении и ремонте шипованных экранов.

При работе паровых котлов к экранным трубам тепловой поток передается через футеровку и главным образом через шипы. Соотношение температурных уровней в футеровке и шипах зависит от температуры факела, массы и вязкости жидкого шлака, качества нанесения и материала футеровки, материала, размеров и количества приваренных шипов, их расположения и качества сварных соединений шипов с трубами.

Поскольку шипы, привариваемые к экранным трубам, служат также для крепления и охлаждения футеровки, то они в большой степени определяют ее стойкость и надежность работы шипованного экрана в целом. Уменьшение расстояния между шипами и увеличение их диаметра должно способствовать лучшему удерживанию набивных масс и более эффективному их охлаждению. Расположение шипов на экранах регламентируется ОСТ 108.130.01–79. Для изготовления шипов применяются стали марки 10, 20 по ГОСТ 1050–74 и сталь 12Х1МФ по ГОСТ 20072–74, а также сикромалевые стали по ГОСТ 5632–61.

Длительная и надежная работа шипованного экрана в первую очередь обеспечивается выполнением принятой схемы шипования и качеством сварных соединений шипов с трубами. Минимальная длина шипа определяется условиями зажима его в цанге шиповочного пистолета.

Способ дуговой приварки экранных шипов должен обеспечивать качество сварных соединений, при котором выдержаны следующие условия: достаточная прочность сварных соединений, обеспечивающая их целостность при технологических операциях изготовления шипованного экрана, при длительном воздействии рабочих температур и

коррозионной среды в условиях топочной камеры парогенератора; надежный тепловой контакт между шипом и стенкой трубы, обеспечивающий прохождение через него требуемого (расчетного) теплового потока; отсутствие существенных изменений в структуре металла трубы в зонах сплавления и термического влияния, способных ухудшить его служебные характеристики.

Согласно «Руководству по изготовлению и ремонту шипованных экранных труб котельных агрегатов в условиях электростанций» прочность сварных соединений шипов считается достаточной, если при легком обстукивании молотком массой 250 г со стороны непровара или при его отсутствии со стороны наименьшего венчика шипы не отламываются. При загибе на 30° шип также не должен отламываться. Количественную оценку механической прочности сварных соединений можно получить при испытании образцов шипованных труб на статический срез с изгибом.

В настоящее время на рынке сварочного оборудования представлено оборудование зарубежных фирм NELSON, BTH, KOCO, технические характеристики которого удовлетворяют требованиям по ошиповке. Однако высокая стоимость и повышенные требования к условиям эксплуатации сдерживают его широкое использование.

ЗАО «Укрспецтерм» совместно с ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона разработали и изготовили установку У-1152 для сварки шпилек диаметром от 4 до 14 мм, состоящую из источника питания с блоком управления (рисунок) и сварочного пистолета (1 или 2). Установка обеспечивает сварку





шпилек в среде защитных газов, под флюсом, с защитными керамическими кольцами, а также без защиты и может применяться для ремонта и изготовления шпированных экранов в стационарных и монтажных условиях.

Так, при капитальном ремонте энергоблока № 4 на Трипольской ТЭС были установлены три панели нижней радиационной части (НРЧ), на которых было приварено 150 тыс. шпиров.

При использовании предложенной технологии исчезли проблемы с прожогами труб, достигнуто уменьшение коробления труб после ошпировки, снижен расход защитных газов и сопутствующих материалов (цанги, сопла).

Опыт работы с использованием установки У-1152 на Трипольской ТЭС показал, что приварку шпиров могут выполнять рабочие невысокой квалификации, например, выпускники ПТУ. При этом к качеству приварки шпиров замечаний нет. В последующем в период капитального ремонта котла ТПП-210-А при замене НРЧ обоих корпусов предстояло приварить 1500 000 шт. шпиров. По нормам времени за смену должно привариваться 1500 шпиров, т. е. для ошпировки котла необходимо 1000 смен.

Средняя скорость ошпировки с использованием установки У-1152 составляет 6 шпиров в минуту одним пистолетом. В этом случае за смену можно приварить 2200... 2500 шпиров в течение 600 смен. Учитывая отсутствие прожогов труб устраняется вероятность повторной опрессовки котла после ремонта. Магнитное дутье устраняется в каждом конкретном случае без особых усилий. Определенные трудности возникают при зарядке цанги

Основные параметры установки

Параметр	Норма	
	Характеристика	
	жесткая	падающая
Номинальный сварочный ток, А	1000	
Потребляемая мощность, кВт	40	
Номинальная продолжительность работы, ПВ, %	10	
Пределы регулирования сварочного тока, А	250... 1300	
Номинальное рабочее напряжение на зажимах выпрямителя при номинальном токе, В	26	26
Пределы регулирования времени горения дуги, мс	5... 999	
КПД, не менее, %	84,5	83,5
Напряжение холостого хода, В, не более	85	
Габаритные размеры, не более, мм:		
длина	1000	
ширина	800	
высота	1000	
Масса, не более, кг	300	

шпиром, так как цанга и сопло пистолета в процессе работы нагреваются после приварки 200... 250 шпиров. Сварочный пистолет позволяет обеспечить различные скорости осадки шипа в сварочную ванну для получения оптимального качества сварки. Угол заточки шипа составляет 90° для труб толщиной более 5 мм, 120 — для труб 4,5... 5 мм и 160 — для труб менее 4,5 мм. На размер и форму заточки шипа влияет также материал шипа, точнее, его теплофизические свойства. Силу сварочного тока и время горения дуги необходимо выбирать в зависимости от рода тока, способа защиты зоны сварки, диаметра шипа, марки стали и положения трубы в пространстве (таблица).

New installation for realization of technological process of welding-on of screen lugs of steam boilers is described. Technical characteristics of the installation are given and the efficiency of its application in manufacture and repair of boilers of heat power stations is shown.

Поступила в редакцию 13.02.2006

УДК 621.791.75.037

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА РАМЗАУЭРА НА ПАРАМЕТРЫ КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ АРГОНОВОЙ ДУГИ С НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

О. М. ЧЕРНЫЙ, инж. (ОАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону, РФ)

Показано, что длина свободного пробега электронов и количество столкновений электронов с атомами в катодной области сварочной дуги определяются эффектом Рамзауэра.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочная дуга, катодная область, эффект Рамзауэра, свободный пробег электронов

Процессы, протекающие в катодной области, в зависимости от полярности играют существенную роль при нагреве электрода или изделия. Иссле-

дованию этих процессов посвящено много работ, однако многие вопросы остались пока еще не изученными, например, длина λ свободного пробега электрона в катодной области и количество N столкновений электрона с атомами при прохождении им катодной области. В настоящей работе сделана попытка исследовать эти проблемы.

© О. М. Черный, 2006



Рассмотрим дугу, горящую между двумя вольфрамовыми электродами в аргоне, у которой согласно работе [1] суммарное падение катодного U_k и анодного U_a напряжений составляет приблизительно 9 В. Согласно работе [1] $U_a \cong 4$ В и не зависит от материала электрода. Поэтому можно считать, что в рассматриваемом случае $U_k \cong 5$ В.

Изменение сечения S столкновений электронов с атомами аргона в зависимости от энергии W электронов (эффект Рамзауэра) исследуется в работах [2, 3] и выражается формулой

$$S = 24,9W^2 - 14,9W + 2,4. \quad (1)$$

В первом приближении будем считать, что падение электрического потенциала в катодной области описывается линейной функцией в зависимости от длины l_k катодной области. Тогда энергия, приобретенная электроном при прохождении им пути между двумя столкновениями, будет равна

$$W = \lambda U_k / l_k. \quad (2)$$

Величина λ согласно работе [4] вычисляется по формуле $\lambda = 1/\pi\sqrt{2}d^2n$, где d — диаметр атома, м; n — концентрация атомов в единице объема, $1/\text{м}^3$. Поскольку $S = \pi d^2/4$, то

$$S = 1/4\sqrt{2}\lambda n. \quad (3)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в (1) и считая, что $l_k = \lambda N$, получим

$$\lambda = 1/A[622/N^2 - 74,7/N + 2,4], \quad (4)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Далее будем исходить из принципа минимума энергии системы, в соответствии с которым любая система, состоящая из многих тел, стремится к минимуму концентрации энергии в ней, что в нашем случае при заданном U_k достижимо, если l_k имеет максимальное значение. При ограниченном количестве N столкновений электрона с атомами аргона в катодной области это возможно при мак-

симальном значении λ , которое исходя из (4) достигается при $N = 16,5$. Согласно зависимости S от W , приведенной в работах [2, 3], минимальное сечение столкновений электрона с атомами аргона (сечение Рамзауэра) равно $S_p = 1,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. Тогда максимальное значение λ , соответствующее S_p по (3), определяется из выражения

$$\lambda_p = 1/4\sqrt{2}S_p n. \quad (5)$$

Величину n определим по формуле $n = P/kT$ [4], где P — удельное давление газа, $\text{Н}/\text{м}^2$; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ — постоянная Больцмана; T — температура, К. Полагая $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$ и $T = 1 \cdot 10^4 \text{ К}$, получим $n = 7,2 \cdot 10^{23} \text{ 1}/\text{м}^3$. Подставляя S_p и n в (5), получим, что $\lambda_p = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

Необходимо отметить, что наличие максимума в уравнении (4), полученном из (1), описывающего эффект Рамзауэра, свидетельствует о стабильных значениях l_k и λ в катодной области, поскольку любое отклонение от $l_k = 16,5\lambda$ ведет к уменьшению значений λ и соответственно l_k , а следовательно, согласно отмеченному выше к увеличению концентрации энергии в катодной области, что является невозможным. На основании этого можно сделать вывод о том, что не только значения λ , но и l_k определяются эффектом Рамзауэра.

Таким образом, длина свободного пробега электронов и количество столкновений электронов с атомами в катодной области сварочной дуги определяются эффектом Рамзауэра и соответственно равны $\lambda_p = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ и $N = 16 \dots 17$.

1. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 353 с.
2. Golden D. E., Bandel H. W. Low-energy e-Ar total scattering gross section // Phys. Rev. — 1966. — **149**, 58. — P. 10–12.
3. Друкарев Г. Ф. Столкновения электронов с атомами и молекулами. — М.: Наука, 1978. — 235 с.
4. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. — М.: Высш. шк., 1973. — 360 с.

It is shown that the length of a free path of electrons and quantity of collisions of electrons with atoms in the cathode region of the arc are determined by the Ramsauer effect.

Поступила в редакцию 19.09.2005



НОВОСТИ

Симферопольский электромашиностроительный завод «ФИРМА СЭЛМА» освоил производство универсальных сварочных конверторов низкого напряжения КСУ-320

КСУ-320 используется для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, а также полуавтоматической сварки электродной проволокой (при комплектации подающим механизмом) с питанием от многопостовых источников типа ВДМ без использования балластных реостатов (РБ), в том числе вне закрытых помещений, где по условиям безопасности затруднено использование сварочных источников, питающихся от промышленной сети.



Конвертор обеспечивает:

- плавную регулировку индуктивного сопротивления сварочной цепи;
- возможность предварительной установки сварочного тока в режиме ММА;
- низкое напряжение с жесткими внешними характеристиками для полуавтоматической сварки и падающими внешними характеристиками для ручной дуговой сварки;
- исключение взаимного влияния сварочных постов при работе от одного сварочного источника;
- увеличение количества постов для сварки от одного многопостового источника за счет высокого КПД и пониженного энергопотребления;
- стабилизацию установленного сварочного режима при изменении напряжения питания от 45 до 90 В;
- «горячий старт» в режиме ММА;
- возможность использования парка, имеющегося электросварочного оборудования независимо от года выпуска, функциональной сложности и завода-изготовителя;
- возможность удаления сварочного поста на расстояние до 200 м от сварочных источников, а также проведения электросварочных работ на значительной высоте;
- повышение коэффициента наплавки на 5...8 % и при этом снижение затрат по удалению брызг металла в зоне сварочного соединения;

- возможность обеспечения многопостовой полуавтоматической сварки или одновременной работы постов в режимах ММА и МИГ/МАГ от одного источника;
- обеспечение (благодаря встроенному генератору) питания собственных цепей управления и механизма подачи сварочной проволоки;
- автоматическое отключение при перерывах в сварке более 4 мин (происходит отключение выходного напряжения, повторное включение происходит при замыкании электрода на свариваемое изделие);
- высокую степень защиты от негативных воздействий окружающей среды (механических повреждений, влажности и т. д.);
- имеет малую массу и габаритные размеры;
- по дополнительному заказу возможна установка приборов цифровой индикации сварочного тока и напряжения.

Таким образом, при использовании КСУ-320 достигаются следующие преимущества по сравнению с инверторной техникой:

1. КСУ-320 питается от напряжения холостого хода сварочного источника, в результате чего напряжение, которое приходит на КСУ-320, является электробезопасным, что позволяет обезопасить сварщика от высокого напряжения при работе на высоте, на металлической поверхности.
2. Используя многопостовый источник с напряжением холостого хода не менее 60 В, можно по разводке токовых шин подключаться в любом необходимом для сварки месте на расстоянии до 200 м от источника.
3. Одновременно от одного источника могут работать несколько сварщиков на токе до 300 А, при этом исключается взаимное влияние постов.
4. При подключении к многопостовому источнику можно создать многопостовую систему для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, а также многопостовую систему для полуавтоматической сварки (при подключении подающего механизма к КСУ-320). При этом допускается одновременное использование постов ручной дуговой и полуавтоматической сварки.
5. Масса КСУ-320 составляет всего 8 кг, что позволяет легко перемещать его в монтажных условиях.

Технические характеристики КСУ-320

Напряжение питания $U_{вх}$, В.....	45–90
Выходное напряжение, В	0–90
Номинальный сварочный ток, А (ПВ, %) ..250 (100 %)	
.....	320 (60%)
Пределы регулируемого сварочного тока, А	ММА 30...320
.....	МИГ/МАГ 40...320
Потребляемая мощность, кВт·А	11
Масса, кг	8
Габариты, мм	190×570×260

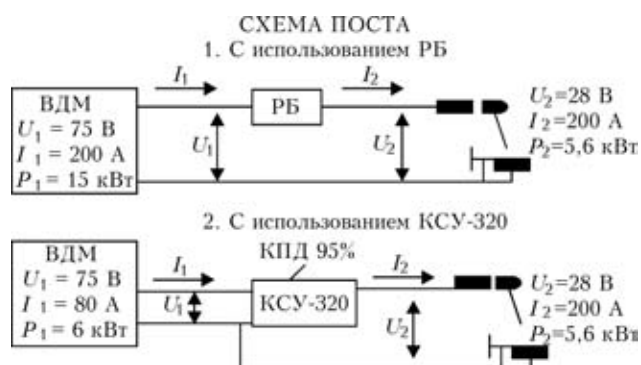


Расчет экономической эффективности использования КСУ-320 в составе сварочных выпрямителей типа ВДМ

Принимаем параметры сварочного поста: $I_2 = 200$ А, $U_2 = 28$ В.

Рассчитаем потребление электроэнергии для двух случаев:

- с использованием РБ;
- с использованием КСУ-320.



Разница в потреблении электроэнергии между $P_{1\text{ РБ}}$ и $P_{1\text{ КСУ}}$ составляет 9 кВт·ч (для одного поста).

Исходные данные для расчета: рабочие смены — 2; стоимость КСУ-320 — 1358 дол. (7200 грн.); стоимость РБ-302 — 126 дол. (669 грн.); ориентировочная стоимость электродов — 5,0 грн.; общий объем наплавленного металла в год составляет 1500 кг; годовой плановый фонд работы оборудования — 4000 ч, из них 2500 ч под нагрузкой; количество рабочих дней в году — 250; продолжительность рабочей смены 8 ч, из которых 5 ч ведутся сварочные работы; оптимальный сварочный ток на посту — 180...200 А.

При проведении сравнительных испытаний установлено, что в случае использования КСУ-320 коэффициент наплавки возрастает на 5...8 %. Разбрызгивание незначительное или отсутствует, формирование шва мелкочешуйчатое. При этом уста-

новлено, что расход электродов, необходимый для наплавки 1 кг металла, снижается на 3 % и в стоимостном выражении составляет 0,05·5,0 грн. = 0,25 грн. При годовом объеме 3000 кг наплавленного металла экономия составит 750 грн. или 150 кг электродов на одном посту.

Высокое качество выполняемых работ на этом оборудовании существенно снижает продолжительность вспомогательного времени за счет уменьшения времени, необходимого для зачистки швов от шлака и брызг металла в зоне сварки.

В настоящее время на предприятиях имеется большое количество сварочных источников типа ВДМ. Использование КСУ-320 позволяет повысить качество сварочных соединений и при этом существенно снизить парк используемого ЭСО, а, как следствие этого, снижение времени на его обслуживание. Переход на новую схему работы позволяет существенно снизить потребление электроэнергии.

При этом необходимо учесть то, что РБ в течение года требуют ремонта и замены спиралей (80 % используемых РБ после одного года эксплуатации обычно требуют капитального ремонта, а 30 % из них — замены на новые).

Таким образом, основными преимуществами схемы ВДМ-1202С+КСУ-320 являются:

- снижение энергопотребления поста на 6800 грн. в год;
- увеличение одновременно работающих постов от одного источника в нашем случае КСУ-320 — 12 постов (200 А), РБ-302 — 6 постов (200 А);
- повышение коэффициента наплавки на 5...8 % и снижение расхода сварочных электродов до 150 кг/год на одном посту;
- удаление при необходимости сварочного поста от источника до 200 м;
- выполнение сварочных работ электродами как с основным, так и с целлюлозным покрытием;
- задание технологически необходимой величины сварочного тока и ее фиксации на изделии с помощью многооборотных резисторов Mult-Lock;

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Показатели	1-й вариант	2-й вариант	Разница
	КСУ-320 (7200 грн.)	РБ-302 (669 грн.)	
1-й год			
Стоимость ЭСО, необходимого для организации одного поста	1358 \$	126 \$ × 2 = 252 \$, т. к . при двухсменной работе в течение года 1 РБ выйдет из строя	−1106 \$
Потребление электроэнергии в год одного поста (две смены)	4500 грн. (840 \$)	11 250 грн. (2125 \$)	6750 грн. (+1285 \$)
Итого	2198 \$	2377 \$	+179 \$
Эффективность внедрения КСУ-320 в первый год эксплуатации:			6750 грн. 750 грн. 7500 грн.
снижение энергопотребления			
экономия на сварочных материалах			
Итого			
2-й год			
Потребление электроэнергии в год одного поста	4500 грн. (840 \$)	11 250 грн. (2100 \$)	6420 грн. (+1200 \$)
Эффективность внедрения КСУ-320 в период эксплуатации			7500 грн.

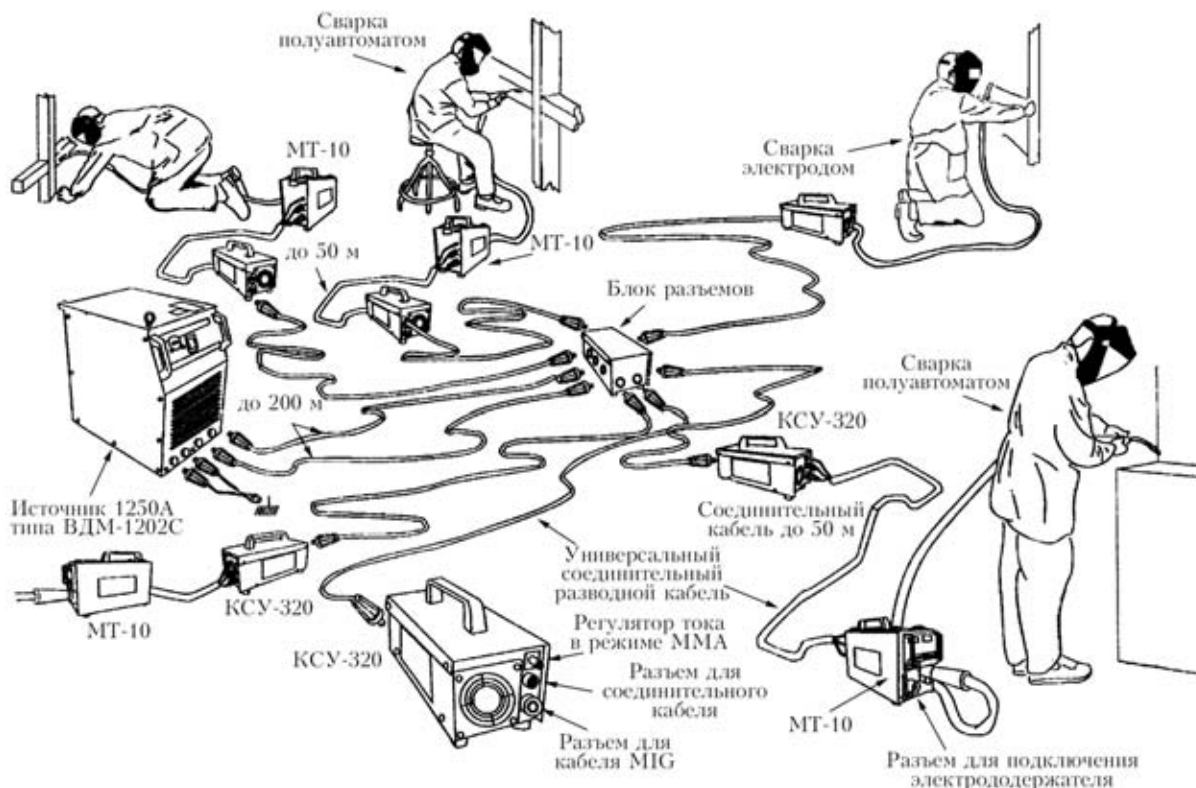


Схема подключения КСУ-320 и подающего механизма МТ-10 к многопостовому источнику для обеспечения многопостовой сварки покрытыми электродами и/или полуавтоматической сварки в защитных газах

- плавная регулировка индуктивности;
- масса КСУ-320 в 2,5 раза меньше массы РБ-302;
- уменьшение сечения сварочных кабелей вдвое между ВДМ-КСУ, что позволяет экономить до 10 грн. на 1 пог. м сварочного кабеля;

- организация системы многопостовой полуавтоматической сварки посредством последовательного подключения в цепь сварочного полуавтомата типа МТ-10, ПДГ-422.

ПЛАЗМАТРОН® — ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ СВАРКА И ПАЙКА

Предприятие «ИНОКОН Технологии» (рис. 1), расположенное в г. Аттнанг-Пуххайм (Австрия), разработало революционный метод высококачественной сварки и пайки — ПЛАЗМАТРОН®. «Инокон технологии» обеспечивает широкий спектр обслуживания заказчика: от проектирования под конкретного потребителя до ввода установок в эксплуатацию. При комплектации установок (с учетом требований заказчика) применяются как

собственные установки фирмы, так и подходящие под данный способ сварки системы других известных производителей.

Предприятие предлагает также приборы для ручной сварки.

В основе — технология ПЛАЗМАТРОН®

Головка ПЛАЗМАТРОН® (рис. 2) производит плазму перед соплом, а не за ним, как в традиционном исполнении. Одновременно ПЛАЗМАТРОН® фокусирует луч плазмы к точке фокуса и с четко выраженной формой бутылочного горлышка так, что достигается зона действия одинакового диаметра. Такое сужение, фокусировка, происходит благодаря специально разработанному потоку горячей смеси, который и образует отстоящий от сопла рабочий фокус. При этом отпадает необходимость в предваритель-



Рис. 1



Рис. 2



ной электрической дуге, и катод специально выступает на 1,5 мм примерно из края сопла. Это позволит проводить направленную сварку и повысить скорость пайки и сварки.

Особенности и преимущества, достигаемые специальной конструкцией

- абсолютное отсутствие брызг (несмотря на высокую мощность и припой);
- высокое качество и прочность швов при переменных нагрузках;
- возможность достижения очень высоких скоростей сварки при некоторых типах швов;
- метод применим для соединений как тонких, так и толстых деталей конструкций;
- большое количество специальных модулей для сварки и пайки специфических контуров;
- низкая степень теплопередачи (детали практически не нагреваются и не деформируются);
- снижение затрат, благодаря следующим факторам: низкой стоимости подключения и эксплуатации; экономии энергии и КПД (80 %); продолжительного срока эксплуатации сопел; оптически чисто выполненным швам — отпадает необходимость дальнейшей их обработки.

Различные варианты исполнения

РОБОТ-ПЛАЗМАТРОН® позволяет использовать Плазматрон® в полностью автоматизированном сварочном процессе. Для роботов или автоматизированного привода существуют различные механические головки ПЛАЗМАТРОНА®. Большое количество сопел (рис. 3) обеспечивает оптимальную работу ПЛАЗМАТРОНА®, и для любого применения найдется как минимум одно подходящее сопло.



Рис. 3

Плазматрон с сенсором управления швом: по желанию заказчика на протяжении уже длительного времени возможна поставка ПЛАЗМАТРОНА® в комплекте с сенсором управления швом (АПН) (рис. 4). АПН — адаптивная платформа управления швом фирмы «Скансоник», имеет ряд преимуществ, которые позволяют получать швы осо-

бо высокого качества. Этот тактильный метод управления швом дает возможность головке ПЛАЗМАТРОНА® четко находить начало шва и гарантирует точное ведение всего сварочного процесса вдоль шва. Благодаря применению АПН автоматически «выравниваются» несовершенства сборки элементов конструкции.

Прибор ПЛАЗМАТРОН® для ручной сварки — это еще одна возможность использования метода ПЛАЗМАТРОН® (рис. 5). Новый прибор имеет ряд преимуществ таких, как: высокая скорость процесса и применение метода на открытом пространстве (сырость и ветер не являются при этом помехами). ПЛАЗМАТРОН® частично компенсирует разность высот между катодом и деталью, которую может создать сварщик при ручной сварке, что упрощает его применение.

Применение

Этот метод позволяет варить практически любые металлические сплавы: различные типы стали, высоколегированные сплавы, сплавы алюминия, агломераты и цветные металлы. При пайке оцинкованных листов ПЛАЗМАТРОН® также достигает скорость, не доступную при использовании других методов пайки. При высокотемпературной пайке неоцинкованных сталей достигается очень хорошее качество соединений. Метод совершенствуется изо дня в день. Постоянно происходит оптимизация систем в зависимости от специфики применения отдельными клиентами. Для испытаний, оптимизации процесса и производства предварительных и малых серий систем в распоряжении предприятия «Инокон» имеются собственная лаборатория ПЛАЗМАТРОН® и квалифицированная техническая группа специалистов-профессионалов.

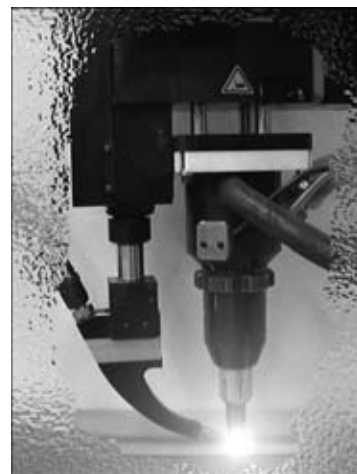


Рис. 4



Рис. 5

<http://www.inocon.at>



**Способ переноса
холодного металла
обеспечивает
конкурентоспособность**

Компания Фольксваген в Саксонии — одна из первых автомобилестроительных компаний, которая использует как стандарт инновационный процесс соединения с помощью переноса холодного металла (ПХМ*). Условия производства кузова высокого класса автомобиля Бентли Континентал (Bentley Continental) традиционно характеризуются относительно низким уровнем механизации. Необходимы новые решения, позволяющие повысить качество, производительность и понизить стоимость. Частичным решением является применение процесса сварки с ПХМ, разработанного компанией Фрониус. Отсутствие разбрызгивания и уменьшение количества подводимого тепла предполагает получение отличных результатов, уменьшение трудоемкости процесса соединения и ремонта.

Устойчивость и внешний вид задней стойки марки Бентли должны соответствовать жестким требованиям. Используемая сварочная установка должна соответствовать этим стандартам. Свариваются три детали разной толщины, изготовленные из высокопрочных оцинкованных стальных листов. Использование процессов сварки МИГ/МАГ является затруднительным, поскольку при этом необходим большой подвод тепла, что может привести к деформации и, следовательно, к дополнительным трудоемким операциям (ранее специалисты-механики были вынуждены тщательно рихтовать вогнутый листовый металл возле соединения, а затем «разглаживать» его и удалять сварочные брызги). Между тем их квалификацию и способности можно было бы использовать в других целях. Кроме того, компания Фольксваген, Саксония выдвинула еще одну задачу: сократить время обработки каждого автомобиля на два часа (без потери качества) — и таким образом достичь конкурентное преимущество. Благодаря процессу ПХМ производственные специалисты доби-

В 2004 г. товароборот компании Фрониус составил приблизительно 168 млн евро при штате 1500 человек. Семейная компания считается международным лидером в области технологии дуговой сварки во всех отраслях металлообрабатывающей промышленности. Компания предлагает своим покупателям оборудование, начиная от ручных до полностью автоматизированных сварочных установок для обеспечения высококачественных и рентабельных процессов. Техническая поддержка потребителей осуществляется 10 дочерними компаниями и 75 партнерами по продажам и обслуживанию во всем мире. Кроме сварочной технологии, компания также занимается электронными устройствами на солнечных батареях и системами зарядки аккумуляторных батарей.



лись своей цели и теперь «пожинают плоды». Главное достоинство — это уменьшение тепловложения на 20...30 %, что привело к значительному уменьшению термического воздействия на заднюю стойку, а следовательно, и сокращению времени, затрачиваемого на трудоемкий процесс рихтовки и выравнивания.

При сварке ПХМ электродная проволока отводится с частотой до 70 Гц при цифровом управлении. Контролируемое прерывание дуги (70 раз в секунду) гарантирует необходимую периодичность попадания расплавленной капли металла с электродной проволокой в шов. Устраняется необходимость удаления сварочных брызг с кузовов дорогих автомобилей, являющегося очень трудоемкой операцией (любая образовавшаяся пыль оседает на поверхности кузовов сложного профиля и нарушает условия стерильности в покрасочном цеху).

Начальник участка по изготовлению кузовов в г. Мозель А. Крюгер отмечает: «Процесс ПХМ обладает всеми хорошо известными преимуществами процесса сварки МИГ/МАГ и отличается еще двумя несомненными преимуществами: ПХМ более точный и быстрый, чем стандартный процесс МИГ/МАГ».

*Перенос холодного металла (ПХМ) реализуется при дуговом процессе сварки с импульсной подачей электродной проволоки (процесс СМТ, см. «Автоматическая сварка». — 2004. — № 12. — С. 55–58).



ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. И. И. Рябцев (ИЭС) 15 февраля 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка материалов, содержащих фосфор, для электродуговой наплавки слоев с повышенными триботехническими характеристиками».

Работа посвящена исследованию закономерностей формирования в сплавах на основе железа структур, которые упрочнены фосфидами, и созданию на этой основе нового класса наплавочных материалов, которые

имеют повышенные триботехнические свойства. Новые наплавочные материалы предназначены для восстановления и упрочнения деталей, которые работают в условиях трения металла по металлу без смазки.

С использованием энтропийного метода были произведены расчеты изобарных потенциалов реакций образования фосфидов основных легирующих элементов. Установлено, что в первую очередь наиболее вероятно образование фосфидов молибдена, хрома и марганца. Эти же фосфиды имеют наиболее высокую температуру плавления. На основании термодинамических расчетов и опыта создания материалов для наплавки деталей пар трения для исследований выбран наплавленный металл 20ХГСП.

На машине трения по схеме испытаний «вал–плоскость» исследованы триботехнические характеристики наплавленного металла 20ХГСП с различным содержанием фосфора. Установлено, что коэффициент трения наплавленного металла 20ХГСП при увеличении содержания фосфора до 1 % снижается примерно в 1,5 раза. При содержании 1,0...1,6 % фосфора износ наплавленного образца снижается в 4,0...4,5 раза, а контртела из стали 45 в 1,5 раза.

Установлено, что при наплавке порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГСП открытой дугой или под флюсом АН-348А практически весь фосфор усваивается наплавленным металлом. Это позволяет с одинаковым успехом производить наплавку порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГСП в самозащитном варианте или под флюсом.

В зависимости от содержания фосфор в наплавленном металле 20ХГСП частично растворяется в матрице, а частично образует фосфиды и фосфидные эвтектики. Легирование хро-

мом и марганцем увеличивает растворимость фосфора в наплавленном металле до 1,45 % и более, по сравнению с растворимостью фосфора в чистом железе — 1,2 %.

При наплавке жесткой технологической пробы установлено, что горячие трещины в наплавленном металле 20ХГСП не образуются при содержании 0,3...3,5 % фосфора. До содержания фосфора 1,2 % наплавленный металл имеет узкий диапазон кристаллизации, что положительно сказывается на его стойкости против образования горячих трещин. При более высоком его содержании в наплавленном металле образуется большое количество легкоплавких фосфидных эвтектик, которые «залечивают» зародыши горячих трещин.

Холодные трещины в наплавленном металле исследованного типа образуются при содержании свыше 1,6 % фосфора. Очагами зарождения и распространения холодных трещин являются хрупкие фосфидные эвтектики, выделяющиеся по границам зерен. С учетом трудностей управления процессами образования фосфидных эвтектик содержание фосфора в наплавленном металле 20ХГСП с точки зрения трещиностойкости ограничено 1,3 %.

Исследована делимость шлаковой корки при повышенных температурах при многослойной наплавке с подогревом порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГСП. Установлено, что введение 4,0...7,5 % ZrO_2 в шихту порошковой проволоки ПП-Нп-20ХГСП увеличивает окислительную способность шлака, разницу в КТР шлаковой корки и наплавленного металла в диапазоне температур 200...600 °С и температуру затвердевания шлака, что улучшает делимость шлаковой корки при повышенных температурах при наплавке этой проволокой под флюсом АН-348А.

По результатам проведенных исследований разработано два состава порошковой проволоки ПП-Нп-20ХГСП: для наплавки открытой дугой и под флюсом АН-348А. Порошковая проволока ПП-Нп-20ХГСП включена в разработанные в отделе № 2 ИЭС им. Е. О. Патона ТУУ 28.7.05416923.066-2002 «Проволоки порошковые наплавочные».

Опытно-промышленная проверка разработанной порошковой проволоки ПП-Нп-20ХГСП при наплавке крановых колес показала, что их износостойкость возросла в 1,5...2,0 раза по сравнению с серийными колесами из стали 65Г. Экономический эффект от использования порошковой проволоки ПП-Нп-20ХГСП для наплавки колес одного мостового крана составляет 3150 грн./год.

УДК 621.79(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Плазмотрон, отличающийся тем, что на тыльной части электрода размещена конусная поверхность с углом, меньшим и равным углу трения, по которой электрод герметично соединен с металлическим стаканом, который его охватывает, торцевая поверхность упомянутого стакана через кольцевой эластичный элемент упирается в упругую диэлектрическую втулку. Приведены и другие отличительные признаки. Патент 73138. В. В. Процев [6].

Установка для контактной стыковой сварки трубчатой оболочки с заглушкой, отличающаяся тем, что сварочная камера содержит стаканоподобный корпус с центральным отверстием в днище, закрепленный на направляющем корпусе основного зажима, соосно его каналу, цанга дополнительного зажима размещена в середине стаканоподобного корпуса, а его привод содержит упорный элемент, выполненный с возможностью перемещения вдоль оси корпуса с боку его открытого торца и

контакта с цангой дополнительного зажима. Приведены и другие отличительные признаки. Патент 47847. Н. Н. Белаш, Н. А. Лаврентьев, В. С. Красноуцкий (ННЦ «Харьковский физико-технический институт») [6].

Устройство для магнитно-импульсной обработки металлов, отличающееся тем, что первый тиристор анодом соединен с плюсом первой батареи конденсаторов, а катодом — с одним из выводов индуктора, другой вывод которого соединен с минусом последней батареи конденсаторов, причем остальные тиристоры анодом с плюсом, а катодом с минусом подключены между соответствующими батареями конденсаторов. Патент 73184. А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. (ИЭС им. Е. О. Патона) [6].

Состав электродного покрытия, отличающийся тем, что в состав покрытия дополнительно вводится в качестве отвердителя шлак феррохромового производства при следующем соотношении компонентов, мас. %: 50...53 мрамора; 12...15 плавикового шпата; 7...9 кварцевого песка; 3...5 ферромарганца; 3...5 ферросилиция; 8...12 ферротитана; 1...1,5 шлака феррохро-

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украины «Промислова власність» за 2005 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



мового производства. Патент 7550. С. В. Бондарев, В. Д. Кассов (Донбасская государственная машиностроительная академия) [6].

Кантователь крупнотоннажных металлоконструкций, отличающийся тем, что рама кантователя выполнена в виде замкнутого контура со свободным отверстием, контуры которого соответствуют контурам периметра изделия в его устойчивом положении, с возможностью свободного сквозного перемещения изделия через отверстие контура, а зажимы установлены симметрично по отношению к плоскостям контура рамы с возможностью объединения функций как собственно зажимов, так и ложементов. Патент 7259. А. И. Желем, В. П. Ермаков [6].

Способ диффузионно-реактивного соединения металлов и сплавов, при котором собранные детали нагревают до температуры, превышающей температуру образования эвтектики между основным металлом и металлом-депрессантом, отличающийся тем, что детали собирают с фиксированным соединительным зазором, близким нулю, а металл-депрессант размещают непосредственно возле этого зазора. Патент 73308. В. С. Несмих, К. А. Ющенко, Т. Н. Кушнарева (МО «Интерм») [6].

Горелка для электродуговой наплавки в среде защитных газов, отличающаяся тем, что токопроводящий мундштук на большей части его длины размещается в водоохлаждаемой кольцевой полости, при этом его осевой канал по длине заполнен центровочными втулками из тугоплавкого композиционного материала, формирующими осевое отверстие для перемещения проволоочного электрода. Приведены и другие отличительные признаки. Патент 7718. Н. Б. Клейно, А. В. Андюк, Д. Е. Жеребчевский (ООО «Кант») [7].

Порошковая проволока для подводной сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей, отличающаяся тем, что сердечник дополнительно содержит ферротитан и ферробор при следующем соотношении компонентов, мас. %: 25...35 рутилового концентрата; 15...25 гематита; 5...15 ферромарганца; 3...7 никеля; 5...15 ферротитана; 0,2...1,1 ферробора; 0,7...1,3 бихромата калия; остальное железного порошка. Патент 7914. С. Ю. Максимов, В. С. Бут, А. А. Радзиевская и др. (ДК «Укртрансгаз, ИЭС им. Е. О. Патона») [7].

Состав покрытия для защиты поверхности от налипания брызг расплавленного металла, отличающийся тем, что содержит лигнин и марганцевый шлак при следующем соотношении компонентов, мас. %: 8...10 мела; 12...15 лигнина; 17...21 марганцевого шлама; остальное воды. Патент 8107. В. В. Чигарев, С. В. Малыгина (Донбасская государственная машиностроительная академия) [7].

Способ изготовления электрода для дуговой сварки, отличающийся тем, что ферросплавы переплавляют и рафинируют вместе с отходами титана электрошлаковым способом и вводят в состав покрытия в виде порошка комплексного ферросплава. Патент 7650. В. С. Попов, И. М. Белоник, С. П. Бережный (Запорожский НТУ) [7].

Способ холодного плакирования листового проката, отличающийся тем, что холодное плакирование осуществляют с использованием металлического порошка, который в процессе прокатки находится между прокатным валком и компонентом листового проката с меньшим коэффициентом трения. Патент 68900. Е. В. Байков, А. Г. Маншилин (НПО с ОО с иностранными инвестициями «Доникс») [8].

Способ соединения подкладок с корпусом микросборок (микросхем), отличающийся тем, что в конструкцию вводят выводы-компенсаторы, которые размещают между корпусом и подвеской. Патент 8837. В. П. Райзман, В. В. Стрельбицкий [8].

Электрод для контактной точечной сварки, отличающийся тем, что на конце электрода выполнена резьба и он оснащен внешним кольцом, выполненным из изоляционного, термостойкого, жаропрочного материала. Патент 8832. А. Г. Кузьменко, В. В.

Горват, В. В. Горват (Хмельницкий национальный университет) [8].

Двухслойный сварной пакет для изготовления биметаллического листа, отличающийся тем, что пазы и компенсаторы деформации выполнены в материале основного сляба на двух взаимно перпендикулярных сторонах, причем паз в поперечном сечении выполнен в форме треугольника, а компенсатор деформации в основе имеет поперечное сечение меньше, чем в верхней части. Патент 8874. А. В. Попов, Б. А. Попов, О. Н. Литвинов и др. (ЧФ «Латимерия», ООО «Лизинговая компания «Актив») [8].

Способ получения плакированной стали, отличающийся тем, что в качестве промежуточного слоя используют двухслойный лист толщиной не менее 2...3 мм из конструкционной стали и из железоникелевого сплава 00Н18МТЮ, при этом толщина последнего принимается равной 0,1...0,2 мм. Патент 8885. А. В. Попов, Б. А. Попов, О. Н. Литвинов и др. (То же) [8].

Формирующее устройство для электрошлаковой наплавки и выплавки, отличающееся тем, что оно дополнительно содержит как минимум еще один датчик уровня металлической ванны с щупом в его центре, вмонтированный в ползун и размещенный на расстоянии от передней его кромки, не меньшей, чем величина зазора между щупом и ползуном, при этом первый датчик размещен своим центром на уровне передней кромки ползуна, для чего на ползуне выполнен прилив. Патент 8871. А. В. Попов, Б. А. Попов, О. Н. Литвинов и др. (То же) [8].

Устройство для получения гетерогенных отливок, отличающееся тем, что рама для перемещения тележки с заготовкой дополнительно оснащена двумя шарнирными опорами, симметричными относительно вертикальной оси перемещения расходных электродов. Приведены и другие отличительные признаки. Патент 8922. А. В. Попов, Б. А. Попов, О. Н. Литвинов и др. (То же) [8].

Способ изготовления предохранительной скобы тележки железнодорожного вагона включает изготовление двух элементов — скобы и пластины из разнородных по химическому составу и механическим свойствам металлов и соединении элементов с помощью точечной электросварки, которую ведут в импульсном режиме подачи тока на электроды. Патент 8935. А. И. Рудометкин, Н. И. Батаев (ОАО «Завод «Артемполисварка») [8].

Способ изготовления высоколегированной сварочной проволоки, отличающийся тем, что на слиток или блюм из высоколегированной стали по периметру наплавляют технологический слой низкоуглеродистой стали, при этом толщину наплавленного слоя принимают равной 1.5% толщины заготовки. Патент 8928. А. В. Попов, Б. А. Попов, О. Н. Литвинов и др. (ЧФ «Латимерия», ООО «Лизинговая компания «Актив») [8].

Машина для прессовой сварки труб с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, отличающаяся тем, что в ней гидроцилиндры осадки выполнены как цилиндры двухстороннего действия с односторонним истоком. Патент 73809. С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. С. Качинский и др. (ИЦ сварки давлением НТК «ИЭС им. Е. О. Патона») [9].

Способ дуговой широкоослойной наплавки, отличающийся тем, что время перемещения дуги от одного к другому краю ленты разделяют на периоды, которые складываются из трех заданных интервалов времени, на протяжении которых последовательно прогревают наплавляемую поверхность и оплавливают ее электродной лентой при неподвижной дуге, охлаждают наплавленный участок и перемещают дугу на соседний участок. Патент 9158. Р. Н. Рыжов, А. Л. Зимовченко (НТУУ «КПИ») [9].

Головка для широкоослойной наплавки с использованием поперечных магнитных полей, отличающаяся тем, что ее электромагниты имеют возможность автономного питания, являются составляющими многополюсной электромагнитной системы и содержат стержневые цилиндрические сердечники. Приведены и другие отличительные признаки. Патент 91608. А. Л. Зимовченко, Р. Н. Рыжов (То же) [9].



По зарубежным журналам*

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ

AUSTRALASIAN WELDING (Австралия) 2005. — Vol. 50, Second Quarter (англ. яз.)

Blodgett O., Miller D. Основная причина разрушения сварных соединений — нарушение основного принципа конструкции — распределения сил, с. 12–13.

Natarajan S. Коррозионные испытания сварных изделий, выполненных дуговой сваркой плавящимся электродом из стали

Cr–0,5 Мо, используемых в энергетических установках, с. 33–39.

Herold H. et al. Использование азотистых защитных газов при сварке термостойких никелевых сплавов, с. 40–47.

BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша) 2005. — Roc. 49, № 4 (пол. яз.)

Kuzio T. Научно-исследовательская и внедренческая деятельность Института сварки в области пайки и родственных процессов на рубеже XX и XXI веков, с. 17–29.

Pietras A., Papkala H. Сварка давлением алюминия с медью, с. 30–41.

Brozda J., Sedek P. Участие Института сварки во внедрении в энергетику Польши жаропрочных сталей нового поколения и обеспечение надежности сварных конструкций, с. 42–47.

Piatek M. Вклад Института сварки в развитие оборудования для сварки и родственных процессов в течение последнего десятилетия, с. 48–52.

Szczok E., Kubica M. Сертификационная деятельность Института сварки, с. 53–60.

Kurpisz B. Обучение сварочного персонала в Институте Сварки в соответствии с европейскими и международными программами, с. 61–66.

BULETINUL INSTITUTULUI in SUDURA si INCERCARI de MATERIALE (Румыния) 2005. — № 2 (рум. яз.)

Fleser T. et al. Сравнительное исследование надежности зон металлургической разнородности в паропроводе с острым паром, с. 3–11.

Dragut L. et al. Технологические аспекты наплавки способом сварки МИГ/МАГ деталей из серого чугуна, с. 12–22.

Pascu D.-R. Структурно-механическое определение характеристик и теплоустойчивости высоковольтных электрических контактов, сваренных ЭЛС, с. 23–28.

JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония) 2004. — Vol. 42, № 11 (яп. яз.)

Koga S. Разработка точечной сварки трением с перемешиванием, с. 1–7.

Kato K., Sakano R. Разработка технологии точечной сварки с перемешиванием кузовов автомобилей, с. 8–13.

Ogawa M. et al. Сварка трением с перемешиванием рычагов подвески, с. 14–20.

Shibayanagi T., Maeda M. Микроструктура и твердость соединений алюминиевого сплава 7075, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 21–30.

Katoh M. et al. Свойства разнородных соединений — чистый алюминий / сплав 5083, выполненных сваркой трением с перемешиванием, и их свойства, с. 31–40.

* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 287-07-77, НТБ ИЭС).



Международная конференция по сварке алюминия
INALCO'04, с. 41–53.

PRACTICAL WELDING TODAY (США) 2005. — Vol. 9, № 1 (January/February) (англ. яз.)

Vaughan S. Прогноз развития промышленных отраслей, использующих сварку, на 2005 год по сравнению с 2004 годом, с. 16–19.

Watson J., Simpson J. Как оптимизировать работу плазменной горелки, с. 20–21.

Lytle K., Stapon G. Как упростить выбор защитного газа, с. 22–25.

Capudean B. Термические циклы, ЗТВ и прочность мартенсита, с. 26–27.

PRACTICAL WELDING TODAY (США) 2005. — Vol. 9, № 2 (March/April) (англ. яз.)

99% сварных швов, выполненных на классических автомобилях марки ФОРД, гарантируют эстетический вид, с. 20–21.

Miller B. Какие вопросы чаще всего имеют место при выполнении твердой наплавки, с. 22–24.

Cameron P. Соответствующие ли у вас технические условия на процесс сварки?, с. 28–29.

Сварочная выставка в Далласе, организованная Американским сварочным обществом, с. 32–35.

Armao F. Дуговая сварка алюминия вместе с другими процессами, с. 36–37.

PRACTICAL WELDING TODAY (США) 2005. — Vol. 9, № 2 (англ. яз.)

Elving J. Выбор автоматизированного оборудования для резки на малых и средних предприятиях, с. 14–15.

Vaughan S. Центр обучения — промышленность провозглашает технику безопасности как приоритетное направление, с. 20–24.

Преподаватель должен пользоваться высочайшим доверием, чтобы помочь студентам, с. 26.

Vaughan S. Художественная галерея с произведениями из металла, с. 28.

Обучение и производство-руководство 2005 г. для покупателей, с. 32–37.

PRAKTIKER (Германия) 2005. — № 4 (нем. яз.)

Wener A. Алюминию — сто пятьдесят лет, с. 74–75.

Роботизированная сварка самоохлаждающихся бочек, с. 76.

Jungling R., Titze M. Наплавка изношенных поверхностей трамвайных рельсов, с. 77–78.

Tatter U. Для ремонтной сварки старых стальных деталей требуется мужество, с. 79–83.

Frank C. Ручная сварка Nd:YAG-лазером. Ч. 1. Для наплавки и соединения нужен мультиталант, с. 86–89.

Leble P. Контроль плотности, ч. 2, с. 92–93.

Schmidt M. Чертежи форм разделки — передачи по интернету, с. 94–95.

Steinhage M., Jerzembeck J. Определение предельных величин для монооксидов азота на рабочем месте, с. 99–102.

PRAKTIKER (Германия) 2005. — № 5 (нем. яз.)

Oehmigen H.-G. Конструктор-сварщик на машиностроительном предприятии и изготовление стальных конструкций, с. 108–111.

Szelagowski P. Мокрая сварка портовых конструкций, с. 112–116.

Bobzin K. et al. Плазменная пайка алюминиевых и магниевых сплавов, с. 118–119.

Vollrath K. Резка водой тонкого и толстого металла, с. 120–124.

Klein H. M. Обучение кадров сокращает дефекты и затраты. Ч. 2. Пайка МИГ, сварка в смеси защитных газов при ремонте кузовов, с. 126–128.

Jerzembeck J. Можно ли ремонтировать сваркой алюминиевые ободья колес, с. 129–130.

Otto F. О выплате заводской зарплат, с. 130–134.

QUARTERLY JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония) 2005. — Vol. 23, № 2 (May) (яп. яз.)

Anzai T. et al. Влияние окалины на сопротивление микробиологической коррозии металла шва, выполненного на серебросодержащей нержавеющей стали SUS304AB, с. 179–185.

Elrefaey A. et al. Нахлесточные соединения алюминия с оцинкованной сталью, полученные сваркой трением с перемешиванием, с. 186–193.

Abdel-Aleem H. et al. Применение ультразвуковой дефектоскопии и визуальных ТЕМ-исследований для оценки поверхности раздела соединений 5052/SUS304 и 5052/SPCC при ультразвуковой сварке, с. 194–202.

Kim J. et al. Конечноэлементный анализ процесса дуговой сварки с применением параллельной обработки вычислений, с. 203–208.

Shimizu H. et al. Способность к подаче сварочной проволоки в процессе сварки, с. 209–219.

Shimizu H. et al. Механизм износа мундштука во время сварки, с. 220–229.

Morikawa S. et al. Изучение ветрозащитных камер гидравлического типа для дуговой сварки в защитном газе. Ч. 1. Фундаментальные исследования в области ветрозащитных камер, формирующих сферические потоки, с. 230–235.

Morikawa S. et al. Изучение ветрозащитных камер гидравлического типа для дуговой сварки в защитном газе. Ч. 2. Фундаментальные исследования в области ветрозащитных

камер, используемых при выполнении стыковых соединений, с. 236–244.

Halim A. et al. Плазменная сварка тонких листов, с. 245–251.

Kodama S. et al. Характеристики капельного переноса короткими замыканиями при высокоскоростной сварке МАГ с колебаниями горелки. Ч. 1. Разработка дуговых сенсоров для автоматической высокоскоростной сварки трубопроводов в полевых условиях, с. 252–258.

Kawaguchi I. et al. Основные характеристики сварки мощным CO₂ лазером и механизмы подавления дефектообразования при применении азота в качестве защитного газа. Ч. 1. Изучение сварочных явлений, наблюдаемых при применении мощного лазера, с. 259–264.

Tsukamoto M. et al. Применение фокусировки импульсного лазера для инициирования разряда в системах для сварки ТИГ, с. 265–269.

Shoubako S. et al. Характеристики столба дуги на полом катоде, с. 270–275.

Osuki T. et al. Анализ этапа затвердевания металла шва Fe–36 % Ni, сопровождающегося кристаллизацией NbC, с. 276–285.

Xu G. et al. Изучение лазерной сварки и ТИГ наплавки Стеллита 6 на сталь с 12 % Cr, с. 286–295.



Morizono Y. et al. Твердофазное соединение чистой меди с серебром, дисперсно-упрочненными оксидными частицами, с. 296–301.

Fujii N. et al. Сравнение прочностных свойств швов в соединениях чугуна с малоуглеродистой сталью, выполненных различными способами сварки, с. 302–310.

Ishikawa N. et al. Расчет деформаций с учетом критерия вязкого трещинообразования в кольцевых швах на высокопрочных трубопроводах, с. 311–318.

Kawabata T. et al. Изучение возможностей подавления вязкого трещинообразования в высокопрочной стали класса 780 МПа. Ч. 4. Изучение сопротивления разрушению высокопрочной стали класса 780 МПа после предварительной деформации, с. 319–328.

RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2005. — Ап. LVII. — № 1 (итал. яз.)

Volpone M., Mueller S. M. Сварка трением с перемешиванием (FSW) — причины успеха, с. 23–30.

Miazzon A. Сооружение вантовых подвесных мостов с пролетами большей протяженности. Пример — мост Сторбелт Ист., с. 33–46.

Baune E. et al. Сварка новых низколегированных материалов с 2,25Сг типа Т/Р23 и Т/Р24, с. 49–60.

Tagawa T. et al. Разброс значений ударной вязкости вследствие развития устойчивой трещины, с. 329–336.

Aoyama H. et al. Применение диффузионной сварки графита со сплавом 0,5% Ti–0,07% Zr–Mo для изготовления конструкций, эксплуатируемых при сверхвысоких температурах, с. 337–343.

Ishikawa M. et al. Соединение с пропусканием импульсного тока 60-ти раскrojенных дисков бескислородной меди для линейных ускорителей, с. 344–352.

Yamamoto N. et al. Влияние слоя интерметаллидов на прочность поверхности раздела соединения малоуглеродистой стали со сплавом Al–Mg 5052 на основе при сварке трением, с. 353–358.

Minero M. Последние достижения в области автоматизированных систем ультразвукового контроля «Phased Array», с. 63–70.

Boschini M., Vendramini A. Роль защитных газов при лазерной сварке — новые разработки, с. 73–109.

Dogan B. et al. Роль зарождения трещин ползучести при оценке дефектов, с. 97–102.

Сварка А-ТИГ — основы процесса и промышленное применение, с. 105–109.

RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2005. — Ап. LVII, № 2 (итал. яз.)

Stucchi A. Контактная сварка алюминия и его сплавов, с. 177–185.

Berger W. et al. Сварка трубопроводов из высокопрочных сталей электродами с основным покрытием, с. 187–194.

Murgia M. Термообработка после сварки как важный элемент производственного цикла, с. 197–203.

Lertora E., Gambaro C. Конструкционные (монтажные) клеи — исследование соединений, выполненных эпоксидным клеем, с. 205–214.

Zappavigna G. Новая норма Case 2235-6 для проведения контроля методом дифрагированных волн толстостенных реакторов, с. 217–222.

Capello E., Previtali B. Перспективы применения волоконных лазеров на промышленном уровне, с. 225–232.

Pertershausen H. Рекомендации МИС по усталостным испытаниям крупногабаритных сварных компонентов, с. 235–241.

RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2005. — Ап. LVII, № 3 (итал. яз.)

Murgia M. Сварка стальных арматурных стержней, с. 343–352.

Valente T. Оценка риска химических соединений — систематический и методологический подход, с. 357–364.

Rinaldie F., Pignatti C. Термообработка после сварки сосудов давления на строительном участке — методика и применение, с. 367–375.

Costa G., Murgia M. Разработка и перспективы аттестации и сертификации персонала, работающего в области сварочного производства и контроля, с. 377–386.

Furnari A. et al. Проблемы коррозии абсорбционной башни для SO₃, построенной из нержавеющей стали марки Sandvick SX, с. 389–395.

НОВЫЕ КНИГИ

Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич, В. И. Швачко, А. С. Котельчук / Под ред. академика Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 2004. — 441 с.

В монографии обобщены результаты исследований процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке. Рассмотрены термодинамика и кинетика процессов абсорбции газов, растворимость газов в железоуглеродистых сплавах в зависимости от температуры и состава, особенности взаимодействия низкотемпературной плазмы, содержащей водород и азот. Приведены данные о влиянии металлургических и технологических факторов, условий кристаллизации сварочной ванны на содержание газа в металле сварных швов. Представлены результаты математического моделирования процессов поглощения газов. Оценена роль газов в образовании пористости швов при сварке покрытыми электродами и порошковыми проволоками. Предложены методы управления абсорбцией и десорбцией газов и предупреждения пористости. Проанализирован механизм образования индуцированных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей,





в том числе высокопрочных низколегированных. Даны рекомендации для предупреждения образования холодных трещин. Рассмотрены характеристики новых сварочных материалов. Для научных и научно-технических работников, интересующихся проблемами металлургии сварки и сварочных материалов, а также студентов, магистрантов вузов и аспирантов.

ПЕТУШКОВ В. Г. Применение взрыва в сварочной технике / Под ред. академика Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 2005. — 753 с.

Настоящая монография — первая в научно-технической литературе Украины книга по теории и практике обработки металлов взрывом. В ней рассмотрены основы физики взрыва и ударных волн в твердых телах, влияние взрыва на комплекс механических свойств металла, описаны конкретные схемы и новые технологические процессы упрочнения, сварки, резки и повышения надежности сварных металлоконструкций взрывом, а также некоторые вопросы защиты окружающей среды от вредного побочного действия взрыва. Для инженерно-технических работников и специалистов, занимающихся обработкой металлов и сплавов в машиностроении, металлургии, промышленном строительстве, а также для работников, связанных с использованием энергии взрыва в материаловедении и металлообработке. Может быть полезна студентам машиностроительных специальностей технических вузов в качестве учебного пособия.



ЛЕЩИНСКИЙ Л. К., САМОТУГИН С. С. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции. — Мариуполь: ООО «Типография Новый мир», 2005. — 392 с.

Обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов наплавки, структуры и эксплуатационных свойств слоистых композиций, получаемых наплавкой и поверхностной обработкой высококонцентрированной плазменной струей. Разработаны принципы выбора оптимальной технологии получения композиций, методика расчетов и испытаний. Даны практические рекомендации по выбору составов и сочетаний слоев в композициях при наплавке и упрочнении деталей и инструмента различного функционального назначения.

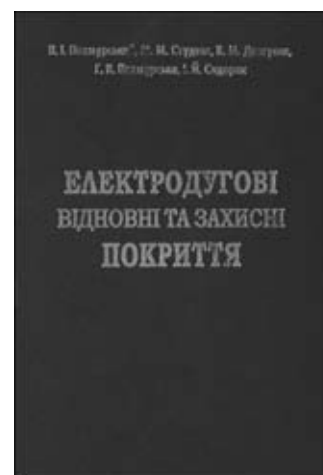
Для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов высших технических учебных заведений.



Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. — Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2005. — 192 + вклейка 8 с.

Рассмотрены теоретические и технологические аспекты формирования защитных и восстановленных покрытий из порошковых электродных проволок, их физико-механические свойства, а также некоторые методы повышения твердости, износостойкости, снижения пористости и улучшения эксплуатационных свойств путем их лазерной обработки. Приведены примеры использования таких покрытий для восстановления размеров и геометрии с целью продления ресурса деталей и механизмов.

Рассчитана на научных и инженерно-технических работников, занимающихся восстановлением и поверхностным упрочнением деталей машин, а также преподавателей и студентов соответствующих специальностей.





ЗУСИН В. Я., СЕРЕНКО В. А. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов. — Мариуполь: Рената, 2005. — 468 с.

В книге даются сведения об основных способах сварки алюминия и его сплавов. Анализируются особенности и трудности сварки алюминия. Показывается возможность практической реализации сварки под слоем флюса. Приводятся данные о влиянии различных технологических процессов, сопровождающих сварку, на служебные свойства алюминиевых конструкций.

Подробно рассматриваются способы упрочнения и восстановления различных деталей из алюминиевых сплавов, работающих в сложных условиях. Приводятся необходимые сведения для понимания физической сущности образования пор при сварке и наплавке. Дается краткое описание математической модели порообразования в сварном шве. Значительный объем работы посвящен методике разработки сварочных и наплавочных материалов и способов их промышленного изготовления. Показаны варианты технологии механизированной сварки и наплавки алюминия и его сплавов.

Предназначена для инженеров и аспирантов, занимающихся вопросами разработки сварочных материалов, технологии сварки и наплавки алюминия и его сплавов, может быть полезной для студентов сварочных специальностей.



РОЯНОВ В. О., ЗУСИН В. Я., САМОТУГИН С. С. Виникнення дефектів при зварюванні та споріднених процесах: Навч. посібник: 2-е вид. перероб. і доп. — Маріуполь: Рената, 2005. — 198 с.

В учебном пособии рассмотрены причина возникновения, механизмы развития и методики анализа дефектов при сварке и родственных процессах — наплавке, газотермическом напылении, поверхностном упрочнении. Приводятся необходимые сведения о влиянии дефектов на работоспособность сварных конструкций, наплавленных и упрочненных изделий. Рассмотрена методика предупреждения и устранения дефектов.

Предназначено для студентов сварочных специальностей. Может быть полезным для инженерно-технических и научных работников промышленных предприятий и лабораторий, исследовательских организаций.



КОНОНЕНКО В. Я. Газовая сварка и резка. — Киев: Экотехнология, 2005. — 208 с.

Рассмотрены оборудование, инструменты и приспособления для газовой сварки, резки и пайки металлов. Приведены характеристики газов, технологии газопламенной обработки металлов, основные положения по организации труда и технике безопасности.

Рассчитана на инженерно-технических работников, студентов вузов и учащихся средних специальных учебных заведений.



ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ СВАРОЧНОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Одним из условий вступления Украины во Всемирную торговую организацию (ВТО) является адаптация украинского технического законодательства к международным и европейским стандартам, а также разработка и внедрение процедур подтверждения соответствия с учетом европейской и международной практики.

В настоящее время требования к менеджменту качества в целом для всего предприятия определяются международным стандартом ISO 9001:2000, в сварочном производстве эти процессы регламентируются ISO 3834:1994. В них обобщен передовой опыт в области управления производством и содержатся требования к организации производства.

Особенностью стандарта ISO 9001:2000 является то, что он предъявляет требования не к качеству продукции напрямую, а к системе организации управления производством, которое должно обеспечивать стабильный уровень качества продукции. В основу этого стандарта заложен «процессный подход», который позволяет определить все процессы, необходимые для функционирования системы менеджмента качества, в том числе и специальные. Преимуществом «процессного подхода» является обеспечение непрерывного контроля за отдельными процессами, а также за их совокупностью и взаимодействием. Стандарт ISO 9001:2000 дает определение «специальным процессам», но не описывает их важнейшие предпосылки. Процессы сварочного производства по своей специфике относятся к «специальным процессам», так как соответствие технических характеристик сварных конструкций не всегда может быть подтверждено только испытаниями. В этом случае гарантия соответствия обеспечивается путем контроля производственного

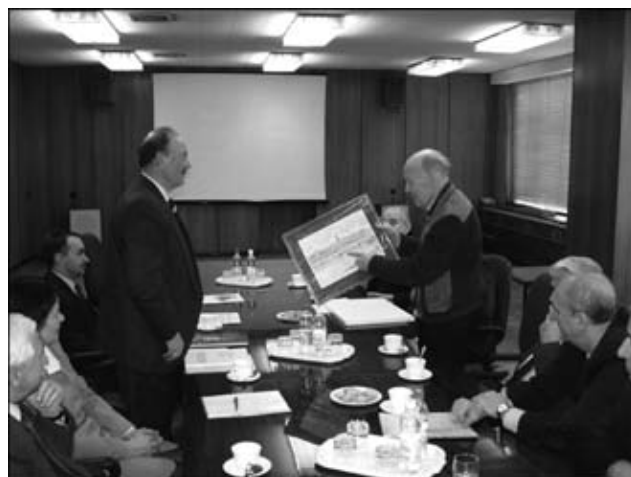
процесса. Мировая практика показывает, что внедрение системы менеджмента качества производственных процессов сварки по EN 729/ISO 3834 гарантирует требуемое качество сварных швов в готовом изделии и соответствие установленным критериям. Оценку системы менеджмента качества на соответствие требованиям EN 729/ISO 3834 проводят специально уполномоченные органы.

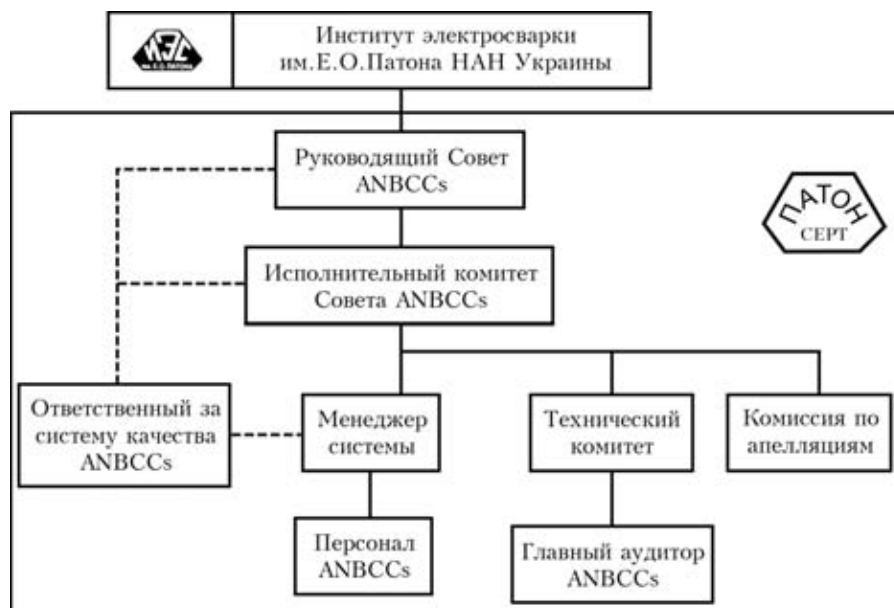
В июле 2005 г. Институтом электросварки им. Е. О. Патона была подана заявка на проведение аккредитации института как Уполномоченного Национального органа по сертификации производств сварных конструкций (ANBCCs) в системе Европейской сварочной федерации (EWF). Согласно руководящим документам EWF 483, EWF 487, EWF 489, EA-6.02 был подготовлен комплект необходимой документации, регламентирующей деятельность ANBCCs и начаты работы по подготовке к практической оценке производства сварных конструкций на заводе «АТЛАС ВОРД БІЛДІНГ СИСТЕМС УКРАЇНА» г. Житомир.

Одним из основных этапов процесса аккредитации ANBCCs является аудит комиссии EWF, который был проведен в период с 28 января по 1 февраля 2006 г.

В состав комиссии входили: главный аудитор — Герман Хернандес (генеральный директор Института сварки и качества «CESOL», Испания), который в настоящее время является также Президентом EWF и технический эксперт Михал Кубика, аудитор Польского Института сварки.

Комиссией EWF проведена экспертиза всей необходимой документации ANBCCs на соответствие следующим требованиям руководящих документов EWF: ответственность за внедрение требований EWF; структура ANBCCs, полномочия и ответственность;





Организационная структура Уполномоченного Национального органа по сертификации производств сварных конструкций (ANBCCs)

орган управления ANBCCs;
менеджер системы EWF;
перевод документов EWF;
реестр аудиторов и технических экспертов;
оформление результатов оценки производств сварных конструкций и т. д.

В процессе оценки была согласована и утверждена структура ANBCCs (рисунок). Под наблюдением комиссии EWF проведена практическая апробация разработанных методик по оценке производства сварных конструкций на заводе «АТЛАС ВОРД БІЛДІНГ СИСТЕМС УКРАЇНА» г. Житомир на соответствие требований EN 729/ISO 3834.

На заключительной встрече у директора ИЭС им. Е. О. Патона академика Б. Е. Патона были подведены итоги аудита. В отчете комиссия EWF дала положительное заключение по результатам оценки ANBCCs и приняла решение о представлении документов в технический комитет EWF на аккредитацию Института электросварки им. Е. О. Патона как Упол-

номоченного Национального органа по сертификации производств сварных конструкций на соответствие требований EN 729/ISO 3834.

Предприятия, подавшие заявки в ANBCCs ИЭС им. Е. О. Патона на проведение сертификации производства сварных конструкций по EN 729/ISO 3834 и успешно прошедшие ее, смогут получить сертификат с логотипом EWF, который признается в Европе и во всем мире. Предприятия, получившие такой сертификат, включаются в международный реестр и получают широкое международное признание как наиболее конкурентноспособные, имеющие четкую организацию производства, нацеленную на интересы потребителя, обеспечивающую стабильное и гарантированное качество.

Л. М. Лобанов, председатель
исполнительного комитета УНОСП,
Н. А. Проценко, менеджер системы EWF, аудитор по
сертификации систем управления качеством

И. В. ГОРЫНИНУ — 80



10 марта 2006 г. исполнилось 80 лет со дня рождения видного ученого-судостроителя, академика, генерального директора ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», Игоря Васильевича Горынина.

Вся деятельность И. В. Горынина после окончания в 1949 г. металлургического факультета Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина связана с Центральным научно-исследовательским институтом конструкционных материалов «Прометей»: в 1958 г. он был назначен заместителем директора по науке — Главным инженером, с 1977 г. возглавил институт.

В 1956 г. И. В. Горынин защищает кандидатскую диссертацию, затем докторскую (1966), получает звание профессора (1971), избирается членом-корреспондентом АН СССР по специальности «Физикохимия и технология неорганических веществ» (1979), действительным членом АН СССР (1984). И. В. Горынин на протяжении всей своей творческой деятельности возглавляет ряд основополагающих магистральных направлений в становлении и развитии судостроительной промышленности. Он создал научный фундамент и организовал в широких масштабах производство неизвестных ранее конструкционных материалов и высоких технологий, обеспечивших в результате реализацию крупнейших проектов XX века, в том числе: атомного подводного флота, не имеющих аналогов атомных ледоколов, уникальных надводных кораблей, крупных танкеров и сухогрузов, специаль-

ных глубоководных аппаратов, судов с динамическими принципами поддержания, объектов атомной энергетики, оборудования для разведки и освоения морского шельфа.

Работы по реализации части этих проектов выполнялись совместно с ведущими институтами и учеными Украины. Наиболее тесные творческие контакты по сварке высокопрочных сталей и легких сплавов, а также по оценке работоспособности сварных соединений в судостроительной и атомной промышленности в течение всех послевоенных лет до настоящего времени налажены с отделами Института электросварки имени Е. О. Патона. Первые научные доклады на международной арене, в том числе и на пленарных заседаниях Международного института сварки, представлялись совместно, начиная с 1970 г.

И. В. Горынин — член бюро Отделения химии и наук о материалах РАН. В Санкт-Петербургском научном центре РАН он является членом президиума и председателем Объединенного научного совета по проблемам механики, прочности и материаловедения. И. В. Горынин — председатель Межведомственного совета РАН — Минатом по проблеме «Исследование и создание конструкционных материалов для термоядерных реакторов», член Межведомственного совета по атомным электростанциям, председатель секции экспертного совета по направлению «Технология новых материалов» ФЦП «Национальная технологическая база», сопредседатель секции «Металлы и сплавы со специальными свойствами...», Научно-технического Совета подпрограммы «Новые материалы» Федеральной целевой научно-технической программы «Иссле-

дования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения», председатель Международного комитета Всемирного титанового конгресса.

И. В. Горынин — лауреат Ленинской премии (1963), Государственной премии СССР (1974), Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники (1994), премии имени Академика А. Н. Крылова Правительства Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургского научного центра РАН (2001). В 2003 г. И. В. Горынину присвоено звание «Почетный судостроитель» за вклад в развитие кораблестроения, атомной энергетики и оборудования для нефте- и газодобычи на шельфе северных морей. В 2003 г. он награжден серебряным орденом «Созидатель С.-Петербурга», присуждаемым Советом представителей науки и культуры города по результатам опроса общественного мнения.

За работу «Принципы легирования, термическая обработка и физические основы создания радиационно-стойкой стали» президиум АН СССР в 1991 г. присудил И. В. Горынину премию имени П. П. Амосова. За цикл работ в области создания материалов для судостроения Российская академия наук в 2000 г. наградила И. В. Горынина Золотой медалью им. Д. К. Чернова.

И. В. Горынин награжден двумя орденами Трудового Красного Знамени (1959, 1970), орденом Ленина (1981), Орденом Октябрьской Революции (1986), Орденами Святого Сергия Радонежского (2001) «За заслуги перед Отечеством III степени» (1996) и «За заслуги перед Отечеством II степени» (2002).

А. И. АКУЛОВУ — 80



1 марта исполнилось 80 лет со дня рождения видного ученого и педагога, профессора Московского государственного индустриального университета Александра Ивановича Акулова.

А. И. Акулов родился в с. Хрущево Ленинского района Тульской области. После окончания средней школы он успешно сдает экзамены в МВТУ им. Н. Э. Баумана и в 1949 г. оканчивает механико-технологический факультет, в состав которого входила кафедра сварочного производства. С этого времени его творческая деятельность посвящена развитию и созданию новых сварочных технологий, подготовке специалистов высшей квалификации.

После окончания МВТУ его оставляют работать на кафедре. В это время в бывшем СССР и за рубежом разворачиваются масштабные исследования причин разрушения сварных конструкций, исследуются процессы плавления и кристаллизации сварочной ванны, ведется поиск материалов, обеспечивающих легирование швов и способов защиты зоны сварки. А. И. Акулов активно участвует в исследованиях и

дискуссиях. За четыре года он подготовил под руководством Г. А. Николаева кандидатскую диссертацию.

В 1965 г. А. И. Акулов защитил докторскую диссертацию, а в 1966 г. получил звание профессора. Несколько лет он возглавляет факультет автоматизации и механизации сварочного производства МВТУ им. Н. Э. Баумана.

В послевоенные годы в стране широко развернулось строительство магистральных трубопроводов. При совершенствовании технологий сварки труб серьезной проблемой оставалась сварка кольцевых неповоротных стыков на трассе. Стыки собирали с помощью центраторов и сваривали вручную на остающихся подкладках, что значительно ухудшало эксплуатацию трубопроводов. А. И. Акулов, подключившийся к исследованию и совершенствованию нового способа дуговой сварки — сварки плавящимся электродом в CO₂, разработал технологию механизированной сварки корневого шва без подкладки. Способ был внедрен на всех строящихся трубопроводах и в 1962 г. применение подкладных колец нормативными актами было запрещено. В 1963 г. А. И. Акулов в составе группы ученых и специалистов удостоивается Ленинской премии «За разработку и внедрение процессов автоматической и полуавтоматической сварки в углекислом газе плавящимся электродом».



С 1970 по 1973 гг. по заданию ЮНЕСКО А. И. Акулов работал в Индии руководителем проекта по организации головного Института технологии машиностроения и его филиалов в городах Мадрас, Пуна и др.

С середины 1970-х годов он занимался проблемами автомобилестроения, в частности, вопросами роботизации и автоматизации процессов сварки, разработкой и внедрением новейших технологий. С 1975 по 1981 гг. он ректор Московского автомобилестроительного института (ВТУЗ), впоследствии Московский государст-

венный индустриальный университет. Здесь с 1976 г. заведовал кафедрой оборудования и технологии сварочного производства по 1992 г. С 1992 г. — профессор этой кафедры. Избран почетным профессором МГИУ. Награжден медалями, кавалер ордена Дружбы РФ.

А. И. Акуловым опубликовано более 300 научных трудов и изобретений, в том числе монографии, справочники и учебники, переизданные за рубежом. Им подготовлено около 40 кандидатов и 8 докторов наук. Он удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

А. А. БОНДАРЕВУ — 70 лет



20 марта исполнилось 70 лет Анатолию Андреевичу Бондареву, доктору технических наук, видному специалисту в области электронно-лучевой сварки. После окончания в 1964 г. Украинского заочного политехнического института работал инженером-технологом на Сумском заводе электронных микроскопов, старшим научным сотрудником Всесоюзного научно-исследова-

тельского института компрессорного машиностроения (г. Сумы).

В 1968 г. поступил в аспирантуру ИЭС им. Е. О. Патона и после ее окончания в 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1989 г. — защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Основные направления научной деятельности А. А. Бондарева — разработка научных основ свариваемости легких сплавов и других конструкционных материалов с использованием высококонцентрированных источников нагрева таких, как электронный и лазерный луч. Результаты научных исследований были реализованы при разработке промышленной технологии сварки высоконагруженных

изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, глубокого вакуума и криогенных температур. А. А. Бондарев разработал и внедрил более 35 технологий при создании изделий ракетно-космической техники, в самолето-, судо-, автомобиле-, приборостроении на предприятиях Сибири, Урала, юга России, в Украине и за рубежом.

Выполнены исследования свариваемости алюминиевых сплавов электронным лучом в невесомости, разработаны принципиальные рекомендации как по применяемым материалам, так и по конструированию соединений в случае сварки на орбите в условиях отсутствия доступа человека.

Разработаны принципиально новые технологии сварки разнородных материалов таких, как нержавеющая сталь, инвар с алюминиевыми сплавами, а также сварки новых конструкционных материалов в виде пеноалюминия, композитов и др.

Он автор более 300 научных работ, двух монографий, более 40 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

А. А. Бондарев награжден орденом «Знак Почета» и медалями СССР, серебряной медалью ВДНХ СССР, Почетными грамотами, занесен в Энциклопедию современной Украины.

Сердечно поздравляем юбиляров, от всей души желаем им крепкого здоровья и бодрости, творческой энергии и новых достижений в развитии сварочной науки и сварочного производства.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»



К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Е. В. СОКОЛОВА



В марте 2006 г. исполнилось 100 лет со дня рождения одного из известных специалистов в области сварки — Евгения Владимировича Соколова, который внес большой вклад в создание и развитие отечественного производства сварочных электродов.

После окончания в 1931 г. Дальневосточного политехнического института Е. В. Соколов сначала работал инженером треста «Стальмост», затем в Оргметалле. В 1941 г. он был назначен главным инженером отдела сварки ЦНИИТмаш.

В начале Великой Отечественной войны Е. В. Соколов возглавил контору № 1 Главного управления восстановительных работ НКПС, а с 1944 г. был назначен главным инженером Московского опытно-сварочного завода. Будучи высококвалифицированным специалистом, обладающим обширной эрудицией и незаурядными организаторскими способностями, Е. В. Соколов совместно с Н. Д. Быковым (директор завода) создали работоспособный коллектив и на долгие годы определили приоритетные направления развития предприятия. Для Е. В. Соколова характерен неформальный подход к подбору кадров. Никакие анкетные обстоятельства не препятствовали приему людей на работу. Работающим в заводском секторе науки никогда не навязывались направления решения задач, предоставлялась полная свобода творчества.

Московский опытно-сварочный завод, являясь узкоспециализированной организацией, изначально сосредоточил в себе все звенья производства: от прикладных исследований до изготовления и апробации опытных партий, промышленного выпуска и технического обслуживания. Отсутствие организационных барьеров, а часто и соединение в одном лице исследователя, технолога, конструктора и производственника во многом обеспечило успех работы.

За создание наплавочных электродов Е. В. Соколову в 1950 г. присуждена Государственная премия.

Широкое распространение получил ванный способ сварки рельсов и арматуры, одним из авторов которого является Е. В. Соколов. Ему принадлежит ряд печатных трудов. Большую популярность приобрел в начале 1960-х годов «Справочник по сварке», вышедший под редакцией Е. В. Соколова. Многие годы он являлся членом редколлегии журнала «Сварочное производство», а с 1960 по 1980 гг. — его главным редактором.

Е. В. Соколов неоднократно избирался членом президиума ВНИТО сварщиков и активно работал в секции сварки НТО «Машпром».

Е. В. Соколов награжден орденом «Знак Почета» и медалями.

Светлую память о Евгении Владимировиче Соколове, человеке большого личного обаяния и неиссякаемого оптимизма с благодарностью хранят все те, кто знал и работал с ним.

К 90-ЛЕТИЮ Б. И. МЕДОВАРА

(о сварке, металловедении и металлургии в наследии ученого или о настоящем и будущем специальной электрометаллургии)

29 марта 2006 г. незаурядному человеку и выдающемуся ученому — сварщику, металловеду и металлургу, академику НАН Украины Борису Израилевичу Медовару исполнилось бы 90 лет. Он ушел из жизни в 2000 г. О жизни и творчестве ученого достаточно полное представление дает биобиблиографическое издание Академии наук, вышедшее в 1986 г. к его семидесятилетию. Большинство его работ опубликовано и хорошо известно специалистам материаловедов. Ученый придавал исключительное значение публикациям результатов исследований. Поэтому список его научных трудов поражает — более 2000 публикаций. Вместе с тем, некоторые особенности стиля исследований академика, его мысли о будущем близких ему разделов науки о металлах и соответствующих отраслей промышленности не только не теряют актуальности, но и приобретают все большее значение.

... Годы творческой активности Б. И. Медовара — это годы его работы в нашем институте, т. е. почти 60 лет, начиная с его прихода в ИЭС в 1941 г. и до конца жизни, с двухлетним перерывом, когда он воевал на фронтах Великой Отечественной войны. Именно в

эти годы в обществе созрело понимание того, что материалы, конструкционные материалы по преимуществу, по-прежнему определяют прогресс человечества. С этой точки зрения можно даже говорить о продолжении железного века в истории.

В океане стали, ежегодно используемом человечеством, на долю легированных сталей приходится едва ли 10...11%. Из этих примерно 100 миллионов тонн стали всего лишь чуть более 1 млн т высоколегированных сталей и сплавов производится на предприятиях специальной электрометаллургии (СЭМ). Однако без металлов, получаемых методами СЭМ, мы лишились бы сегодня многих благ цивилизации, правда, и многих видов вооружений также не было бы. Один из основных технологических процессов СЭМ — это электрошлаковый переплав, появлению и развитию которого мы во многом обязаны Б. И. Медовару.

ЭШП как металлургический процесс родился благодаря сварке и это хорошо известно специалистам. Более того, практически все основные процессы СЭМ — это процессы, в которых применяются сварочные источники нагрева металла. Здесь важно, как



Во время обсуждения результатов экспериментальных работ Б. И. Медовара (в центре) с группой учеников *слева направо*: В. В. Лапин, П. Д. Антонев (ПО «Жданов-тяжмаш», ныне ОАО «Азовмаш»), В. Я. Саенко, А. К. Цыкуленко (ИЭС им. Е. О. Патона)

нам кажется, другое. Сегодня мало кто представляет себе, что сварщики даже раньше металлургов осознали необходимость повышения качества сталей, снижения содержания в них вредных примесей, газов, неметаллических включений. Именно сварщики первыми осознали, что в большинстве случаев конструкционный материал, сталь — это не просто листовой или сортовой прокат, поковка или отливка с тем или другим сочетанием механической прочности, пластичности и т. д. и т. п., а это еще и материал, который нужно сварить для создания той или иной конструкции...

Фактически параллельно развитию этих представлений шло становление Б. И. Медовара как ученого сварщика. Именно в те послевоенные годы им были проведены работы, которые и сегодня применяют в сварке газопроводных труб большого диаметра для магистральных газопроводов. Интересные исследования выполнены им по сварке аустенитных сталей и сплавов. В начале 1950-х годов прошлого века Б. И. Медовар начал исследования процесса получения слитков переплавом расходных электродов под слоем шлака в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Эти исследования и привели к появлению процесса, известного во всем мире сегодня как ЭШП...

В многолетнем творческом пути академика есть несколько, если угодно, особо любимых этапов, объектов исследований. Эти этапы, направления исследований порой трудно очертить временными рамками. Иной раз через десятилетия ученый и его соратники возвращались к давним проблемам с новыми идеями и подходами. В хронологической последовательности творческий путь Б. И. Медовара довольно точно делится на «сварочный» и «металлургический» периоды. Переход от одного к другому произошел в конце 1950-х — начале 1960-х годов когда и родился ЭШП — главное и любимое детище ученого. Однако и в сварочном и в металлургическом периодах деятельности Б. И. Медовара есть особые, своего рода ключевые проблемы, которыми он занимался фактически всю свою жизнь.

В сварке — это, как отмечено выше, комплекс фундаментальных и производственных проблем, связанных со сваркой труб большого диаметра, сваркой вы-

соколегированных аустенитных сталей и биметалла, а также сваркой стальных заготовок особо крупных сечений. В металлургии — это весь комплекс проблем теории, технологии и оборудования электрошлакового переплава и литья. Кроме того, создание нового класса конструкционных материалов — сталей с заданной анизотропией структуры и свойств, известных также, как АКМ и КСМ (армированные квазимонолитные и квазислоистые) — прообраз конструкционных сталей и сплавов будущего.

Некоторые особенности стиля работы, научного поиска Б.И. Медовара заслуживают отдельного внимания. В основе подходов к науке о металлах он проявил не только глубокие теоретические знания, но и реальное знание промышленности, понимание ее нужд и тенденций развития. Соединив в себе опыт и знания металловеда, сварщика и металлурга, талант исследователя-

экспериментатора и зоркий глаз инженера, академик всю свою жизнь занимался самыми острыми проблемами в своей области науки и техники, находился даже не на «острие», а впереди «острия» направления главного удара. (Военная терминология применена нами здесь умышленно, ибо ею пользовался сам Медовар, человек своего времени, офицер-танкист, воевавший на фронтах Великой Отечественной войны, ученый-металлург, ученый-сварщик, всю свою жизнь занимавшийся военной техникой и внесший немалый вклад в производство и сварку сталей для военно-морского флота, бронетанковой и другой военной техники.) Неустанная жажда нового, постоянный интерес к новым задачам, способность заражать коллег своим видением проблем и путей их решения привлекали к ученому не только его сотрудников, но и коллег из других НИИ и промышленных предприятий. В ИЭС иногда шутили, что Б. И. Медовар заставляет работать на себя весь институт. Вполне очевидно, что в исследовательском институте результативно реализовать такого рода объединение усилий административными мерами невозможно. Людей, пытающихся работать творчески, объединяют только общие идеи. А идеями он был богат всегда и не боялся делиться ими. Кроме того, академик обладал хорошими способностями учителя, умел находить и нацеливать на исследовательскую работу способную молодежь. Недаром среди его учеников около сотни кандидатов и более двух десятков докторов наук. Его фантастическая работоспособность заряжала энергией коллег, работавших с ним рядом.

В своих поисках ученый пытался как можно быстрее провести натурные эксперименты в масштабе, максимально приближенном к реальности, получить в руки металл, образцы металлического изделия и исследовать их. Если новые данные, полученные в экспериментах, не вписывались в рамки существующих теорий и представлений, он смело искал объяснения новым эффектам, привлекал к этому поиску специалистов смежных областей знаний. В этой связи весьма показателен пример создания современной танковой брони с пониженным содержанием углерода. Традиционно во всем мире такого рода сталь основана на Cr–Ni–Mo системе ле-



гирования при содержании углерода около 0,4%. Б. И. Медовар смело пошел на двукратное снижение содержания углерода в танковой броне. Решение оказалось удивительно продуктивным.

В ходе жарких дискуссий, предшествовавших промышленному освоению новой брони, ученый аргументированно отстоял свою позицию и убедил оппонентов на основании колоссального опыта и знаний не только в области металлургии, но и сварки, сварных конструкций. Против постулата «снаряд не только должен задерживаться броневой защитой танка, но и снаряд не должен вызывать разрушений по сварным швам» трудно было что-либо возразить, ибо неоднократные попытки повысить снарядостойкость танковой брони путем повышения степени легирования не приводили к успеху, так как в сварной конструкции — в танке при обстреле неизбежно появлялись протяженные трещины. Всесторонние полигонные испытания обстрелом подтвердили предвидение ученого: низкоуглеродистая танковая броня обеспечила то, что военные называют «живучестью» бронекорпуса.

Примеров тому, как ученый смело шел против стоявших представлений, немало. Пожалуй, самый разительный из них — это отказ от ЭШП обычных конструкционных низко- и среднелегированных сталей. На глазах учеников и многочисленных отечественных и зарубежных «ЭШПистов» Б. И. Медовар четко сформулировал и обосновал необходимость применения ЭШП не для рафинирования сталей и сплавов от вредных примесей, а для «рафинирования структуры» металла, управления формой, размерами и распределением металлических и неметаллических структур в металле. Идеи, связанные с управлением затвердеванием сталей и сплавов, постоянно занимали беспокойный и пытливый ум исследователя. Именно на этом пути

родились всевозможные технологии электрошлакового литья и даже новый класс металлических материалов с заданной анизотропией структуры и свойств (ЗАС) — армированные квазимонолитные и квазислоистые стали.

Прекрасное виденье металлургических проблем металлургии позволяло Б.И. Медовару реализовывать интересные технические решения, казалось бы, на кончике пера. Так родилась не только низкоуглеродистая броневая сталь, но и такой сегодня обыденный прием, как закалка низколегированных сталей типа 09Г2С или контролируемая прокатка обычных углеродистых сталей... В этих работах ясно прослеживалась еще одна особенность творческого стиля ученого. Он никогда не боялся, что идеи могут украсть, постоянно стремился к широкому обсуждению спорных проблем с прямыми конкурентами. Вместе с тем был очень настойчив в реализации патентной защиты интеллектуальной собственности — сотни и сотни патентов лучшее тому подтверждение.

ЭШП и весь круг научных и практических проблем, связанных с любимым детищем ученого, до конца жизни оставался стержнем его научных интересов. Вопреки досужим разговорам о том, что ЭШП не нужен металлургии, он целеустремленно продолжал исследования в этой области. Сегодня основные достижения его в ЭШП стали основой для многих критических областей техники и прежде всего энергетики. Особенности ЭШП, обеспечивающие самую высокую локальную скорость кристаллизации, по сравнению с другими процессами СЭМ определили блестящее настоящее и будущее электрошлакового переплава — детища нашего института, детища Б. И. Медовара.

Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко

Более 13 лет на рынке сварочного оборудования Украины



предприятие
«Триада-Сварка»
г. Запорожье

- Электрогазосварочное оборудование
- Горелки к полуавтоматам
- Электрододержатели
- Пусконаладочные работы
- Ремонт сварочного оборудования, в том числе сложного
- Технологическое обеспечение сварочных процессов
- Автоматизированные сварочные линии и комплексы



тел. (380612) 33 1058,34 3623,
13 2269,(38061) 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua

**Электромашино-
строительный завод
«ФИРМА СЭЛМА»**



ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ



95000, г. Симферополь, Украина
ул. Генерала Васильева, 32А
Тел.: (0652) 48-65-37, 48-18-62
E-mail: sales@selma.crimea.ua

www.selma.ua



маски
катоды
флюсы
горелки
редуктора
проволоки
электроды
выпрямители
плазмотроны
клемы массы
трансформаторы
сварочные трактора
керамические сопла
держатели электрода
сварочные полуавтоматы
установки для автоматизированной плазменной резки
оборудование для газоплазменной резки, наплавки, напыления
установки для контактной сварки
установки для микроплазменной сварки
гарантийное и сервисное обслуживание
установки очистки и фильтрации воздуха
установки для автоматической сварки в среде защитных газов всех видов металла
оборудование для антикоррозионной защиты
установки для автоматической сварки под флюсом
композиционные металлополимерные материалы

ТОРГОВИЙ ДІМ 03680, г. Киев, Украина, пр-т Глушкова, 1, пав. №21, тел./факс: (+380 44) 526-93-70, 526-93-76, 526-93-75, 526-92-16, e-mail: igor@welding.kiev.ua, house@welding.kiev.ua

ЗВАРЮВАННЯ

Разработка, производство, внедрение Порошковые проволоки для сварки, наплавки и напыления

- Производство порошковых проволок ПП-АН, ПП-Нп;
- оборудование для наплавки; Welding Alloys;
- наплавочные установки Welding Alloys;
- порошковые проволоки Welding Alloys;
- проволоки сварочные Hyundai Welding;
- внедрение новых технологий;
- техническое сопровождение;
- разработка новых проволок;

HYUNDAI
WELDING CO., LTD.

ООО НПФ "Элна" является представителем компаний WELDING ALLOYS LIMITED (Англия) и HYUNDAI WELDING (Южная Корея) в Украине

ООО НПФ "Элна" ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03680 тел. (044) 200-80-25, 200-85-17 факс (044) 200-85-17 e-mail: Info@elna.com.ua



г. Киев, 03150,
ул. Боженько, 11
www.gefest-sv.com.ua
gefest-sv@kievweb.com.ua

тел./факс: (38044) 200-88-33

Производство высококачественных электродов для:

- Сварки высоколегированных сталей
 - ОЗА-6
 - ЦА-11
 - ЗА-48М/22
 - АНЖР-1
 - АНЖР-2
 - ЦТ-15
- Сварки теплоустойчивых сталей
 - ЦУ-5
 - ЦА-39
 - ТМУ-21У
 - ТМА-1У
 - ТМА-3У
- Наплавки слоев со специальными свойствами
 - ЦН-12М
 - ЦН-6А
 - НИИ-48Г
 - Т-590
 - НР-70
 - ЦЧ-4
 - Гефест-6 (ОЗН-6)
 - ЦНИИ-4

А также множество других марок
на заказ

ГОРЕТЬ, ЧТОБЫ СОЗДАВАТЬ!

Вся продукция СЕРТИФИЦИРОВАНА

ЭЛЕКТРОДЫ ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ФЛЮСЫ

Электроды для сварки углеродистых, низколегированных сталей и чугуна (АНО-21, АНО-6у, МР-3, УОНИ-13/55, АНО-4, УОНИ-13/45, АНО-27, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ/60, ЦУ-5, ЦЧ-4)

Порошковые проволоки для сварки, наплавки, резки (в том числе под водой) ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН8, ПП-АН29, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН69, ПП-АН19Н, ПП-АНВ2у, ППС-ЭК1, ПП-ЭК2, ПП-Нп-30Х20Мн, ПП-Нп-12Х14Н13, ПП-Нп-200Х15С1ГРТ, ПП-Нп-30Х12СМТ, ПП-Нп-60Х9С3ГТ, ПП-Нп-200ХГР, ПП-Нп-Х25Г14Н3Т, ПП-Нп-80Г15Н4, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные и керамические, для сварки и наплавки (АН-72, АН-М13, АНК-40, АНК-565, АНК-57, АНК-47А. По отдельным заказам изготавливаем флюсы других марок)

Опытный завод сварочных материалов
ИЭС им. Е.О. Патона
04112, г. Киев, ул. Е. Телиги, 2
Тел.: (044) 456 63 69
Факс: (044) 456 50 01

Лидер производства порошковых проволок в Украине



ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"

Порошковые проволоки для наплавки
по ГОСТ 26101-84

-80Х20 РЗТ,35В9Х3СФ,25Х5ФМС,18Х1Г1М и др.

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК

-ВЕЛТЕК Н200 - Н620

Порошковые проволоки для сварки

-АН1,АН8,АН39,АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ

-ТМВ3,ТМВ6,ТМВ7,ТМВ11,ТМВ14,ТМВ29 и др

Диаметрами от 1,0 до 6,0 мм., производство до 5000 т/год
разработка, адаптация к условиям заказчика.

ул. Полеская, 24, офис 504

03056, Киев, Украина

тел./факс: (38044) 456-0209, 458-3485

e-mail: weldtec@iptelecom.net.ua www.weldtec.com.ua



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: (38044) 271 20 36, 271 21 02
Специализированный магазин: "ИНПАТ-СЕРВИС",
тел.: (044) 220 92 89

"ИЭС - ЭЛПС"

ОАО "ЗОНТ"

АВТОГЕНМАШ

Машины для термической резки "Комета М"

Машины для микроплазменной резки "Метер"

Переносные газорезущие машины "Радуга"

Машины для фигурной газокислородной резки "АСП - 70М"

Капитальный ремонт и модернизация МТР

Поставка источников плазменной резки, насосов, теплообменников и газисных частей к циркулярному оборудованию

oaozont@zont.com.ua т. +38048 717-00-50

www.zont.com.ua ф. +38048 715-69-50

65104, Украина, пр. Маршала Жукова, 103

Завод автогенного оборудования
г. Краматорск

Сертифицированная продукция!

РЕЗКИ

Резаки Р1 "Донмет"	- 54 грн.
Горелки газосварочные Г2 "Донмет"	- 46 грн.
Горелки для кровли ГВ "Донмет"	- 23 грн.
Керосинорезы РК-200	- 115 грн.
Бачки керосиновые БГ-08 "Донмет"	- 123 грн.
Редуктор БПО "Донмет"	- 37 грн.
Редуктор БКО "Донмет"	- 73 грн.

АСП-10, баллоны, вентили баллонные,
рукава резинотканевые, манометры, карбид...

Тел./факс (0626) 44-26-85, (06264) 5-77-13

E-mail: svarka@donmet.com.ua

<http://www.donmet.com.ua>



СпецСплав www.spetssplav.dp.ua



Порошковые проволоки
Ферросплавы
Лигатуры
Хром металлический
Флюсы сварочные
Электроды для резки
Комплексные раскислители
Электроды наплавочные

ул. Курсантская, 1д,
г.Днепропетровск,
49051, Украина

тел.: (380562) 32-26-22
т/ф: (380562) 32-37-99
sp@spetssplav.dp.ua

ЗАРЕЗЕРВИРУЙТЕ место
для Вашей рекламы
в следующих номерах.
Звоните:
(044) 529 26 23, 287 63 02

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОДОРОДНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ «ВОМ-2007»

5-я Международная конференция

21-25 мая 2007 г.

г. Донецк, Украина

Генеральные направления ВОМ-конференций — водородная экономика и материалы: эффективность и безопасность современных водородоемких производств и проблемы перехода к водородной цивилизации будущего.

Конкретные задачи ВОМ-конференций — организовать широкий обмен информацией и личное общение представителей водородного сотрудничества стран СНГ и мирового водородного движения, иницилирующих новое видение

- проблем перехода к водородной экономике и долгосрочных задач выявления бифуркационных точек на пути к водородной цивилизации;
- задач и путей решения современных производственных проблем, связанных с водородной деградацией материалов и обостряющихся в связи с окончанием сроков проектной службы конструкций, коммуникаций и аппаратов многих водородоемких и водородобезопасных производств в странах СНГ;
- перспективных задач ближайшего будущего в области физики, химии и физической химии систем водород-конденсированное вещество, в области водородной, термической и пластической обработки конструкционных и функциональных материалов для обеспечения безопасности и эффективности их использования в промышленности, на транспорте и в быту в период коммерциализации водородной экономики.

Контакты:

E-mail: goltsov@physics.donetsk.ua

Научно-технические журналы ИЭС им. Е. О. Патона <http://www.nas.gov.ua/pwj>

«Автоматическая сварка», 12 номеров в год, издается с 1948 г. В журнале представлена разнообразная научно-техническая информация по сварке, наплавке, резке, пайке и нанесению защитных покрытий; производственный опыт применения современных технологий для соединения материалов и восстановления изделий; сведения о новых книгах и патентах; обзорная информация о профильных выставках и конференциях; банк производителей товаров и услуг на рынке сварочного производства Украины и России.

Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 номера в год, издается с 1989 г. В журнале представлены последние достижения в области технической диагностики и неразрушающего контроля (акустическое излучение, магнитные, радиоволновые, термические, оптические, радиационные и другие методы). Широко освещаются методики оценки и прогнозирования разрушений в сварных конструкциях.

Тел.: (38044) 271-23-90, 529-26-23

«Современная электрометаллургия», 4 номера в год, издается с 1985 г. В журнале освещаются разработки в области электрошлаковой, электронно-лучевой и плазменно-дуговой технологий, вакуумно-дугового переплава и индукционной плавки, а также в области внепечной обработки стали, энерго- и ресурсосберегающих металлургических технологий и др. До 2002 г. журнал издавался под названием «Проблемы специальной электрометаллургии».

Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

«The Paton Welding Journal», 12 номеров в год. Полный перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка».

Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Advances in Electrometallurgy», 4 номера в год. Полный перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия».

Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

На официальном сайте журналов www.nas.gov.ua/pwj приведены рефераты опубликованных статей с 2000 г.

Подписка по каталогам подписных агентств, а также через редакцию

Адрес редакций журналов:
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Тел./факс: (38044) 271-24-03, 529-26-23,
528-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.ua



ПОДПИСКА – 2006 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	150 грн.	300 грн.	1980 руб.	3960 руб.	78 дол. США	156 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Телефоны и факсы редакции журнала «Автоматическая сварка»: тел.: (38044) 287-63-02, 271-24-03, 529-26-23, факс: (38044) 528-34-84, 528-04-86, 529-26-23.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия)

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200 г. по

200 г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) — 500 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 400 \$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) — 300 \$

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) — 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) 150 \$

Черно-белая (170×250 мм) — 80 \$

Черно-белая (170×125 мм) — 50 \$

Черно-белая (80×80 мм) — 15 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу.

• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу.

• Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади.

• При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000 \$, предусмотрена гибкая система скидок.

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290 мм.

• В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов, необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации.

Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 5.0

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi.

• К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются).

Подписано к печати 09.02.2006. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 6 цв. вклеек.

Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.