



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

И. Арата (Япония), Н. П. Алешин (Россия),
И. Гривняк (Словакия),
У. Дилтей (Германия),
Е. А. Дорошкевич (Беларусь),
П. Зайфарт (Германия),
А. С. Зубченко (Россия),
К. Иноуэ (Япония), К. Мацубучи (США),
Н. И. Никифоров (Россия),
Б. Е. Патон (Украина),
Я. Пилярчик (Польша)

Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23
Факс: (044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

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

Перепечатка материалов из журнала
«Автоматическая сварка» возможна при
обязательном письменном согласовании
с редакцией журнала

При перепечатке материалов ссылка на
журнал «Автоматическая сварка» обязательна

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не
несет

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Махненко О.В., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И., Зайфарт П., Бауцман К. Компьютерная программа «Приварка трубок к трубной решетке теплообменников» 3

Кархин В.А., Плошихин В.В., Бергман Х.В. Моделирование тепловых и кристаллизационных процессов при лазерной сварке алюминиевых пластин 11

Коринец И.Ф., Ци Чжень Чун. Влияние зазора на размеры стыкового шва при дуговой сварке в смеси Ar + 25 % CO₂ плавящимся электродом 16

Варуха Е.Н., Морозов А.А. Расчет глубины проплавления изделия при сварке в углекислом газе 20

Кусков Ю.М., Рябцев И.И., Дорошенко Л.К., Васильев В.Г. Особенности плавления и кристаллизации наплавленного металла типа 20ХГС, легированного фосфором 24

Туник А.Ю. Газотермические покрытия, содержащие твердые смазки, для работы в условиях сухого трения и повышенных температур 27

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Киреев Л.С., Замков В.Н. Сварка плавлением титана со сталью (Обзор) 31

Цыган Б.Г., Пирогов Л.И., Донченко А.В., Трубаев Ю.А. Комплексная механизация и автоматизация производства вагонов бункерного типа 34

Сергиенко В.А. К вопросу определения терминов при газовой резке и сварке 42

Сидорук В.С. О состоянии охраны интеллектуальной собственности в Украине 46

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Червяков Н.О., Ющенко К.А. Методика исследования продольных остаточных напряжений при наплавке валика на пластину из никелевого сплава 49

Черняк Я.П., Бурский Г.В., Каленский В.К. Некоторые особенности замедленного разрушения металла ЗТВ стали М76 после наплавки аустенитной проволокой 50

Разработано в ИЭС: Резонансный сварочный источник РСИ-110 53

Диссертация на соискание ученой степени 54

Патенты в области сварочного производства 54

По зарубежным журналам 55

ХРОНИКА

Международный день интеллектуальной собственности 58

Седьмая сессия научного совета по новым материалам 59

Международной ассоциации академий наук 61

Наши поздравления 61

Памяти Н.Н.Хоменко 62

Памяти И.А.Бондаренко 62

РЕКЛАМА 63

Главные спонсоры журнала:

Каховский завод электросварочного оборудования



ОАО «Фирма СЭЛМА»

Ново-Краматорский машиностроительный завод



ПЛИИ Бинцель Украина ГмБХ

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

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

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

**THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:**

I. Arata (Japan),
N. P. Alyoshin (Russia),
I. Hrivnak (Slovakia),
U. Diltey (Germany),
E. A. Doroshkevich (Belorus),
P. Seyffarth (Germany),
A. S. Zubchenko (Russia),
K. Inoue (Japan),
K. Masubuchi (USA),
N. I. Nikiforov (Russia),
B. E. Paton (Ukraine),
Ya. Pilyarchik (Poland)

Address:

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

Editors:

E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
L. V. Gerasimenko, T. V. Yushchina

Electron galley:

I. S. Batasheva, I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegireva

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Makhnenko V.I., Velikoivanenko E.A., Makhnenko O.V., Rozyinka G.F., Pivtorak N.I., Seyffarth P., Bautsman K. Computer program "Tube-to-tube sheet" welding of heat exchangers"	3
Karkhin V.A., Ploshikhin V.V., Bergman Kh.V. Modelling of heat and crystallization processes in laser welding of aluminium plates	11
Korinets I.F., Gi Gian Chun. Effect of gap on sizes of butt welds in consumable electrode arc welding in Ar + 25 % CO ₂	16
Varukha E.N., Morozov A.A. Calculation of depth of penetration of product in CO ₂ welding	20
Kuskov Yu.M., Ryabtsev I.I., Doroshenko L.K., Vasiljev V.G. Peculiarities of melting and crystallization of deposited metal of 20KhGS steel type alloyed with phosphorous	24
Tunik A.Yu. Thermal coatings containing solid lubricants for the operation in the conditions of dry friction and elevated temperatures	27

INDUSTRIAL

Kireev L.S., Zamkov V.N. Fusion welding of titanium with steel (Review)	31
Tsygan B.G., Pirogov L.I., Donchenko A.V., Trubachev Yu.A. Integrated mechanization and automation of manufacture of welded railway cars of a bunker type	34
Sergienko V.A. About the problem of definition of terms in gas cutting and welding	42
Sidoruk V.S. About status of protection of intellectual property in Ukraine	46

BRIEF INFORMATION

Chervyakov N.O., Yushchenko K.A. Method of investigation of longitudinal residual stresses in hardfacing of bead on nickel alloy plate	49
Chernyak Ya.P., Bursky G.V., Kalensky V.K. Some peculiarities of delayed fracture of HAZ metal of steel M76 after surfacing using austenitic wire	50
Developed at the Paton Institute: Resonance welding power source RST-110	53
Thesis for scientific degree	54
Patents in the field of welding	54
Review of foreign journals	55

NEWS

International day of intellectual property	58
7th Session of Scientific Council on new materials of International Association of Academies of Sciences	59
Our congratulations	61
In memory of N. N. Khomenko	62
In memory of I. A. Bondarenko	62

ADVERTISING	63
--------------------------	----

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title
«The Paton Welding Journal».

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please,
contact the editorial board



КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА «ПРИВАРКА ТРУБОК К ТРУБНОЙ РЕШЕТКЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ»

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
П. ЗАЙФФАРТ, проф. (SLV M/V GmbH), **К. БАУЦМАН**, инж. («Infracog», Германия)

Описана компьютерная программа и показаны ее возможности при оценке как локальных явлений, связанных с приваркой отдельных трубок (скорости охлаждения, микроструктурные изменения, остаточные напряжения), так и общих деформаций трубной решетки в зависимости от свойств материалов, геометрических размеров, типа соединения, порядка приварки трубок к трубной решетке.

Ключевые слова: компьютерная программа, математическое моделирование, расчетные алгоритмы, электродуговая приварка, трубки, трубная решетка, теплообменник, банк данных, температурные поля, химический состав, микроструктура, диаграмма АРА, диаграмма Шеффлера, околосварная зона, качество технологического процесса, кинетика деформаций, остаточные напряжения, холодные трещины

Сварные узлы типа «трубная решетка–трубки» являются весьма характерными для современных теплообменных аппаратов. Очень часто трубки и решетки изготавливаются из различных сталей, что создает определенные сложности в получении качественного соединения. В ряде случаев при приварке трубок могут возникнуть проблемы деформаций трубной решетки. Обычно они решаются экспериментально, что требует достаточно больших затрат средств и времени. В этой связи возникает потребность в использовании математического моделирования для частичного решения указанных вопросов с помощью современной компьютерной техники, что позволит сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований при отработке технологии. В результате сотрудничества Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, SLV (Мекленбург) и фирмы «Infracog» (Германия) была создана компьютерная программа, в основу которой положены расчетные алгоритмы математического моделирования основных физических явлений, сопровождающих процесс электродуговой приварки трубок к трубной решетке, в сочетании с банком данных основных расчетных характеристик (теплофизические свойства, характеристики микроструктурных превращений, механические свойства) для типовых материалов труб и трубных решеток, используемых в теплообменниках. Краткому описанию этой программы и демонстрации ее возможностей посвящена данная статья.

Краткое описание компьютерной программы.

«Дружеский интерфейс» позволяет оперативно использовать программу разработчикам технологии без поиска дополнительных сведений, выходящих за рамки технологической информации.

На рис. 1 приведено изображение экрана при вводе исходных данных, включающих выбранный материал, геометрические размеры, режимы и условия сварки. При назначении материалов пользователь может ознакомиться со списком наименований материалов в банке данных, а также с конкретным содержанием информации по данному материалу (табл. 1, 2). При выборе геометрических параметров сварного соединения предварительно выбирают тип соединения (один из пяти, приведенных на рис. 2) и указывают геометрические размеры a , x . Вводятся основные конструктивные геометрические размеры (рис. 1), в том числе и

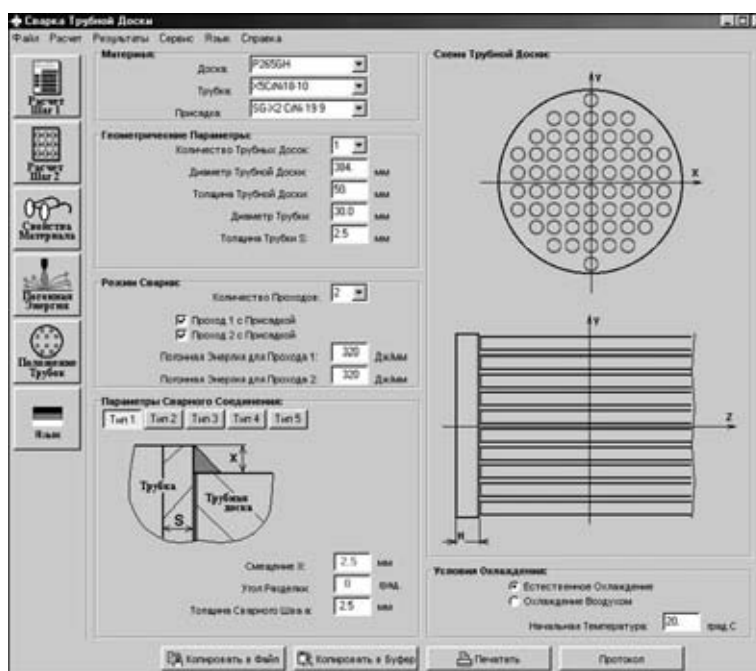


Рис. 1. Изображение экрана при вводе исходных данных



Таблица 1. Наименование сталей, расчетные характеристики которых содержатся в банке данных

Материал трубной доски и трубок по EN (отечественные аналоги)	Присадочный материал по DIN 8557 (отечественные аналоги)
10CrMo9-10 (14X3M)	SG2 (09Г2)
11CrMo9-10 (15X3M)	SCMo (09ГМ)
13CrMo4-5 (18XM)	SGCrMo1 (10XГМ)
16Mo3 (сталь 20 с 0,3%Mo)	SGCrMo2 (10XГМ2)
P235GH (16ГФТ)	SG-X5CrNiMoNb 19 12 (08X19H12M)
P235G2TH (16Г2ФТ)	SG-X5CrNiNb 19 9 (08X19H9H)
P265GH (20ГФТ)	SG-X15CrNiMn 18 8 (15X20H9Г6)
P295GH (20Г2ФТ)	FLUXOFIL M 8 (06ГС)
P355GH (20Г2ФТ)	FLUXOFIL M 10 (06ГС)
X2CrNiMoN22-5-3 (08X22H5M3)	
X5CrNi18-10 (08X18H10)	
X6CrNiMoTi17-12-2 (10X17H12M2T)	
X6CrNiTi18-10 (08X18HT)	

Таблица 2. Распечатка из банка данных информации относительно расчетных характеристик стали P265GH

Тип стали (1- аустенитная, 2- ферритно-перлитная сталь):
2
P265GH

Предел текучести $\sigma_T(20^\circ\text{C})$, МПа при 20 °C в зависимости от толщины D:

Dmin, мм	Dmax, мм	$\sigma_T(20^\circ\text{C})$, МПа
0	16	265
16	40	255
40	60	245
60	100	215
100	150	200

T, °C	E, МПа	$\frac{\sigma_T(T)}{\sigma_T(20^\circ\text{C})}$	α , 1/°C	λ , Дж/см·с·°C	σ_f , Дж/см ³ ·°C
20	198000	1.000	.0000122	.515	3.79
100	184000	.918	.0000130	.510	3.85
200	176000	.867	.0000144	.485	4.12
300	167000	.836	.0000158	.444	4.41
400	158000	.775	.0000168	.427	4.77
500	134000	.704	.0000168	.393	5.32
600	115000	.551	.0000163	.356	6.01
700	105000	.285	.0000158	.319	6.59
800	92000	.132	.0000158	.259	6.57
900	70000	-	-	-	5.06
1000	52000	-	-	-	5.06
1100	24000	-	-	-	5.09
1200	7000	-	-	-	5.26

Химический состав:

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
.20	.40	1.4	0.03	0.025	0.02	0.3	.3	0.08	0.01	0.3	0.03	0.02

$T_{\text{жидкост}}(^\circ\text{C})$: 1450
 $T_{\text{сольнотек}}(^\circ\text{C})$: 1480
 Скрытая теплота плавления (Дж/кг): 2.10

мартенсит		бейнит		феррит-перлит	
Tn	Tk	Tn	Tk	Tn	Tk
415	250	650	415	750	650

dt - время охлаждения от 800 до 500 °C, соответствующие 85% и 50% превращения в мартенсит (m) и феррито-перлит (fp)

dt (m85)	dt (m50)	dt (fp85)	dt (fp50)
2	3	250	25

координаты положения центров трубок на трубной доске.

Для последней операции имеется специальная подпрограмма, с помощью которой компьютер автоматически сначала вчерне «размещает» трубки по заданному шагу $t = \text{const}$ между центрами трубок, а затем пользователь по чертежу вносит отдельные коррективы. В случае необходимости пользователь может решать с помощью обращения «help» возникшие отдельные вопросы. По желанию пользователя программа работает на одном из трех языков (русский, английский, немецкий).

Предусмотрены два характерных варианта теплообменника: с одной трубной доской, когда вход и выход трубки на одной доске, и с двумя трубными досками и прямыми трубками с учетом того, что приварка концов каждой трубки идет одновременно. Приварка концов к трубной решетке производится дуговой сваркой неплавящимся электродом (с присадкой и без присадки) с пульсацией сварочного тока. Параметры пульсации тока задаются исходными данными так же, как скорость вращения сварочной головки.

Температурные поля при такой сварке рассчитываются [1, 2]. Определяются размеры и форма зоны проплавления трубки, трубной доски и предыдущего слоя (при двухслойной сварке). На основе этих данных оценивается средний химический состав расплавленной зоны, что является основой для дальнейших расчетов ее микроструктурного состояния. Последнее рассчитывается с использованием диаграммы Шеффлера для высоколегированной стали либо с использованием соответствующих диаграмм АРА для низколегированных ферритных сталей [3, 4]. Диаграммы АРА используются и для околошовной зоны в трубной доске. Соответствующие характеристики для параметрических уравнений, связывающих количество ожидаемой фазы в микроструктуре со временем охлаждения $t_{8/5}$ в интервале 800... 500 °C, приведены в банке данных (табл. 2). Там же приведены температуры T_n^j и T_k^j , определяющие начало и конец появления соответствующей фазы в j -микроструктуре при характерных для такой сварки (малые погонные энергии) значениях $t_{8/5}$. Знание температурных полей и объемных изменений, связанных с температурным расширением и микроструктурными изменениями, позволяет проследить развитие упругопластических деформаций вплоть до остаточного состояния [5].



Рис. 2. Типы геометрии сочетания трубки с трубной решеткой, предусмотренные программой

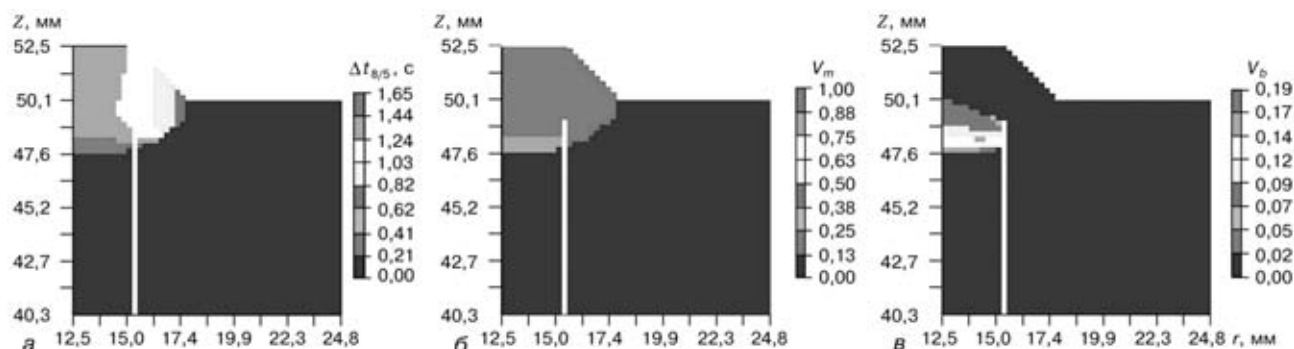


Рис. 3. Длительность охлаждения $\Delta t_{8/5}$ (а) и результаты расчета содержания мартенсита (б) и бейнита (в) в зоне сварного шва для соединения типа № 1 (первая серия)

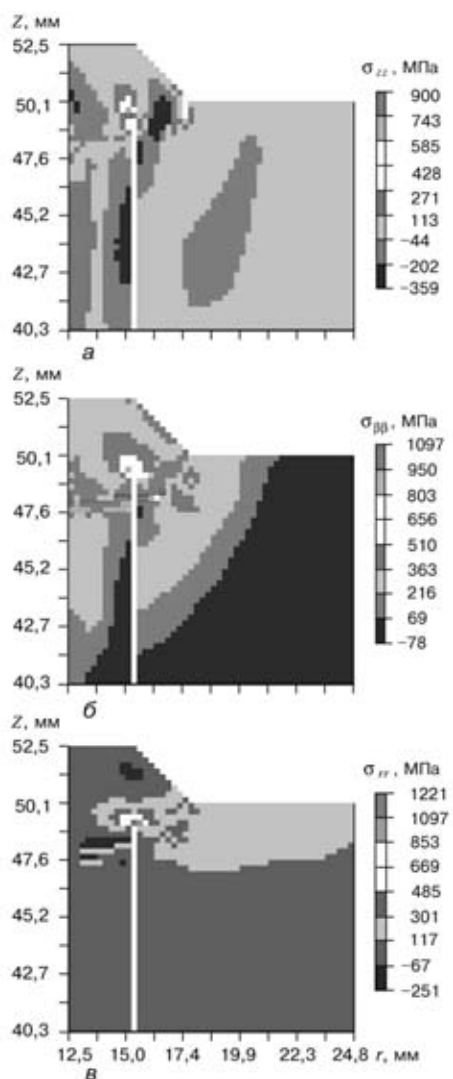


Рис. 4. Результаты расчета остаточных напряжений в зоне сварного шва σ_{zz} (а), $\sigma_{\phi\phi}$ (б) и σ_{rr} (в) для соединения типа № 1 (первая серия)

Величина и распределение остаточных напряжений в сочетании с данными относительно микроструктурного состояния в шве и околошовной зоне является одной из характеристик качества технологического процесса с позиций, например, образования холодных (водородных) трещин.

Кроме того, получаемые локальные данные относительно кривизны трубной доски затем используются в приближенном методе «функции усадки» (inherent strain method) [6, 7] для получения данных относительно кинетики изгибных дефор-

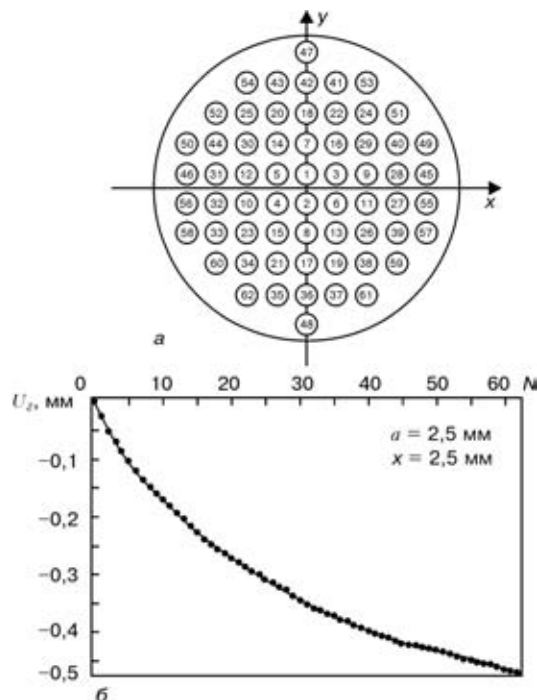


Рис. 5. Последовательность приварки трубок (а) и кинетика изменения прогиба центра трубной доски после приварки очередной трубки (б) для соединения типа № 1 (первая серия) (N – номер привариваемой трубки)



Таблица 3. Химический состав материалов, используемых в расчете

Материал	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
P265GH (трубная доска)	0,20	0,40	1,40	0,030	0,025	0,02	0,30	0,30	0,08	0,01	0,30	0,03	0,02
P235G2TH (трубки)	0,17	0,35	0,60	0,040	0,040	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SG2 (присадочный материал)	0,080	0,85	1,50	0,025	0,025	—	—	—	—	—	—	—	—
X5CrNi18-10 (трубки)	0,060	0,45	1,58	0,023	0,019	0,0	18,02	0,0	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0
SG-X2CrNi 19 9 (присадочный материал)	0,025	0,90	1,70	0,023	0,020	—	—	—	—	—	—	—	—

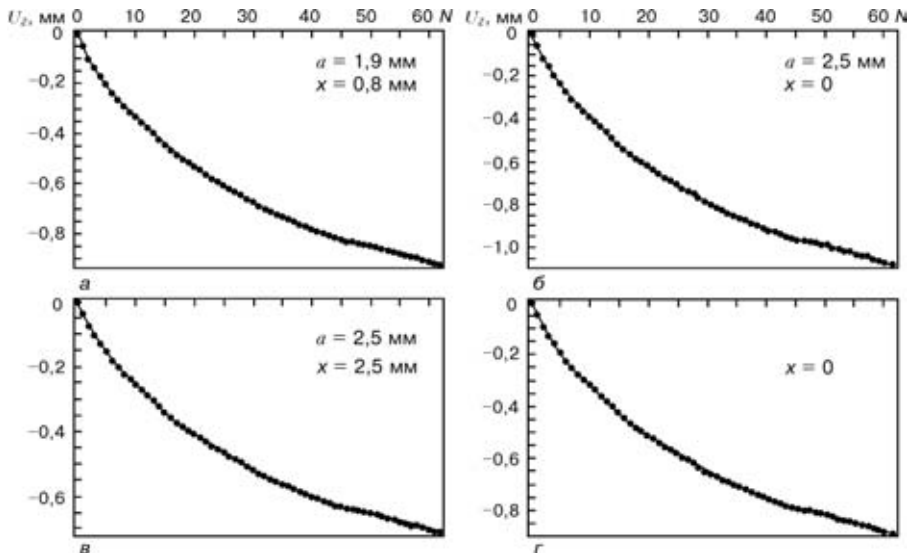


Рис. 6. Кинетика изменения прогиба центра трубной доски после приварки очередной N -й трубки для соединений соответственно типа № 2–5 ($a-x$)

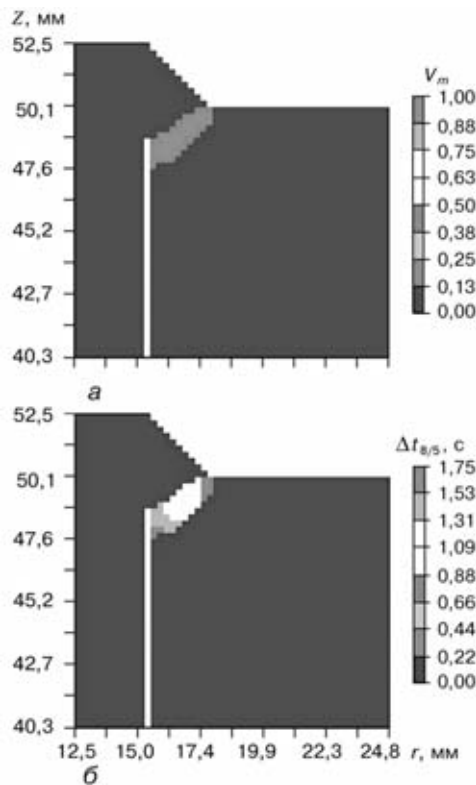


Рис. 7. Результаты расчета содержания мартенсита (a) и длительности охлаждения $\Delta t_{8/5}$ ($б$) для соединения типа № 1 (вторая серия)

маций трубной доски от последовательной приварки всех трубок.

Примеры использования. Рассмотрим несколько примеров использования описанной программы для получения информации, необходимой при оценке альтернативных вариантов технологии. Узел теплообменника из трубной доски (см. рис. 1) диаметром 384 мм из ферритной стали P265GH по EN 10028-2 1992 с 58 отверстиями для концов трубок диаметром 30 мм (толщина стенки 2,5 мм). В первой серии расчетов принимали материал трубки

сталь P235G2TH по EN 100281-2. Во второй серии материал трубок — аустенитная сталь X5CrNi18-10 по DIN 8556. В качестве присадки в первой серии использовали материал SG2, а во второй — SG-X2CrNi 19 9.

Химический состав основного и присадочного материалов приведен в табл. 3. Сварку выполняли за два прохода в аргоне неплавящимся электродом с пульсацией сварочного тока. Средняя погонная энергия по длине кольцевого шва на каждом проходе $q_{II} \cong 320$ Дж/мм. Рассматривался вариант теплообменника с одной трубной доской и различными типами соединений (см. рис. 2), а также вариант с двумя трубными досками и различной длиной трубок L , привариваемых одновременно с обоих торцов.

На рис. 3–5 представлены результаты расчета для первой серии опытов, когда трубки выполнены из ферритно-перлитной стали P235G2TH, а сварное соединение соответствует типу № 1 на рис. 2. Сварка без предварительного подогрева.

Обращает внимание обилие закалочных микроструктур (мартенсита) в зоне сварного шва, что обусловлено достаточно быстрым охлаждением этой зоны $\Delta t_{8/5} \approx 1,5...1,6$ с (рис. 3, a) и относительно высоким содержанием углерода и марганца.

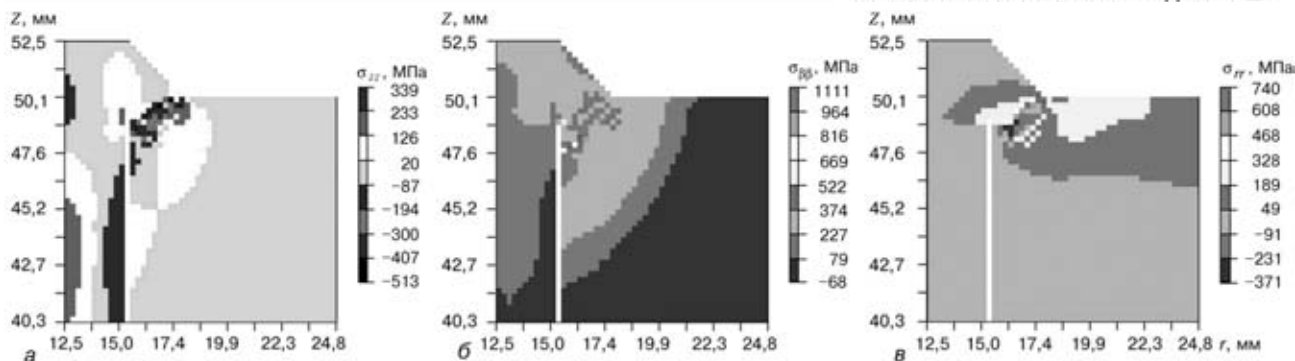


Рис. 8. Результаты расчета остаточных напряжений в зоне сварного шва σ_{zz} (а), $\sigma_{\phi\phi}$ (б) и σ_{rr} (в) для соединения типа № 1 (вторая серия)

Наличие твердых микроструктур в зоне сварного соединения обуславливает появление достаточно высоких пиков остаточных напряжений (рис. 4). Однако размеры зон с высокими остаточными напряжениями невелики — это небольшие вкрапления. Такие напряжения могут способствовать образованию холодных трещин, однако их протяженность будет незначительной. Тем не менее считаться с такой угрозой следует.

Данные на рис. 5, б демонстрируют кинетику изменения прогиба центра трубной доски по мере приварки трубок (порядок приварки указан на рис. 5, а) первой серии сварного соединения типа № 1 при одной трубной доске. Видно, что максимальный прогиб в конце приварки всех трубок составляет примерно 0,47 мм. Следует отметить, что этот результат достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными для такого варианта сочетания геометрических размеров, материалов и режимов сварки.

Аналогичные данные получены и для других типов сварных соединений, приведенных на рис. 2. Не имея возможности подробно останавливаться на особенностях для каждого типа сварного соединения, отметим только их влияние на деформации трубной решетки. Данные на рис. 6 демонстрируют это влияние. Сравнивая их с данными на рис. 5, б видим, что наиболее рационален с этих позиций тип соединения № 1, указанный на рис. 2.

Вторая серия вариантов расчета с трубками из аустенитной стали X5CrNi18-10 с присадкой SG-X2CrNi 19 9 представлена отдельными результатами на рис. 7–10.

Данные на рис. 7–9 соответствуют типу № 1 сварного соединения согласно рис. 2. Сравнивая их с данными на рис. 3–5, видим, что наличие закалочных структур для такого вари-

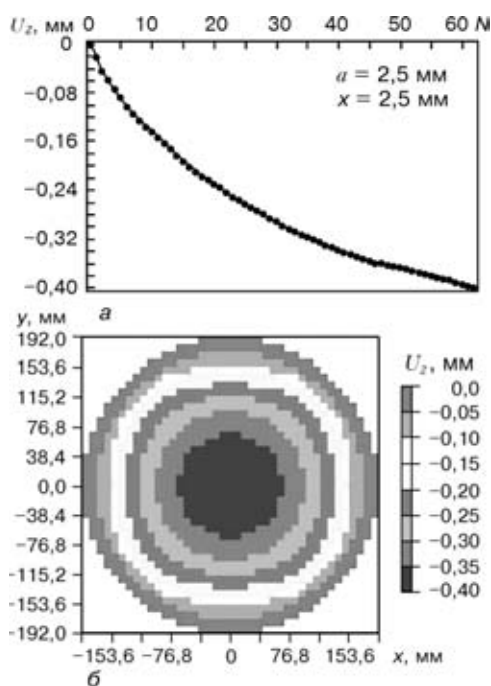


Рис. 9. Результаты расчета кинетики изменения прогиба центра трубной доски в процессе приварки трубок (а) и распределение остаточных прогибов в различных точках трубной доски (б) для сварного соединения типа № 1 (вторая серия) (порядок приварки трубок по рис. 5, а)

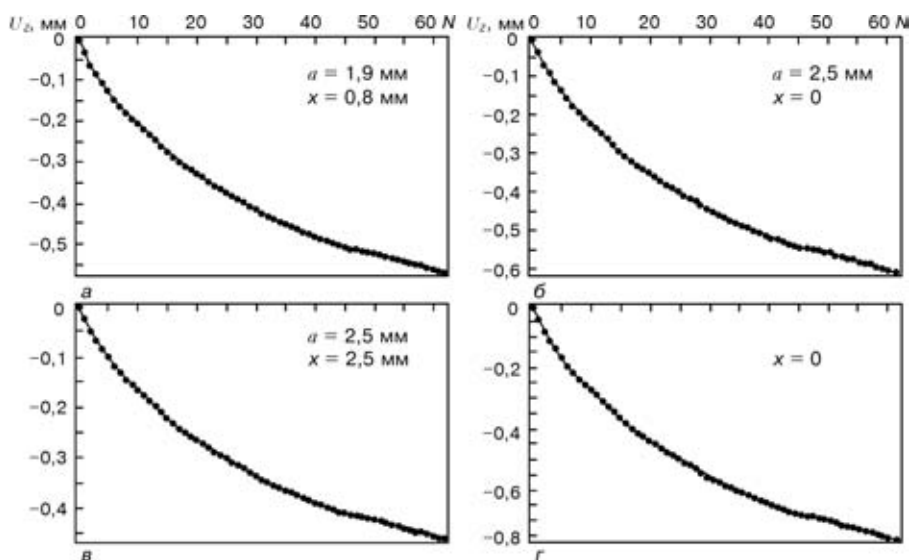


Рис. 10. Кинетика изменения прогиба центра трубной решетки для соединений соответственно типа № 2–5 (а–г) (вторая серия)

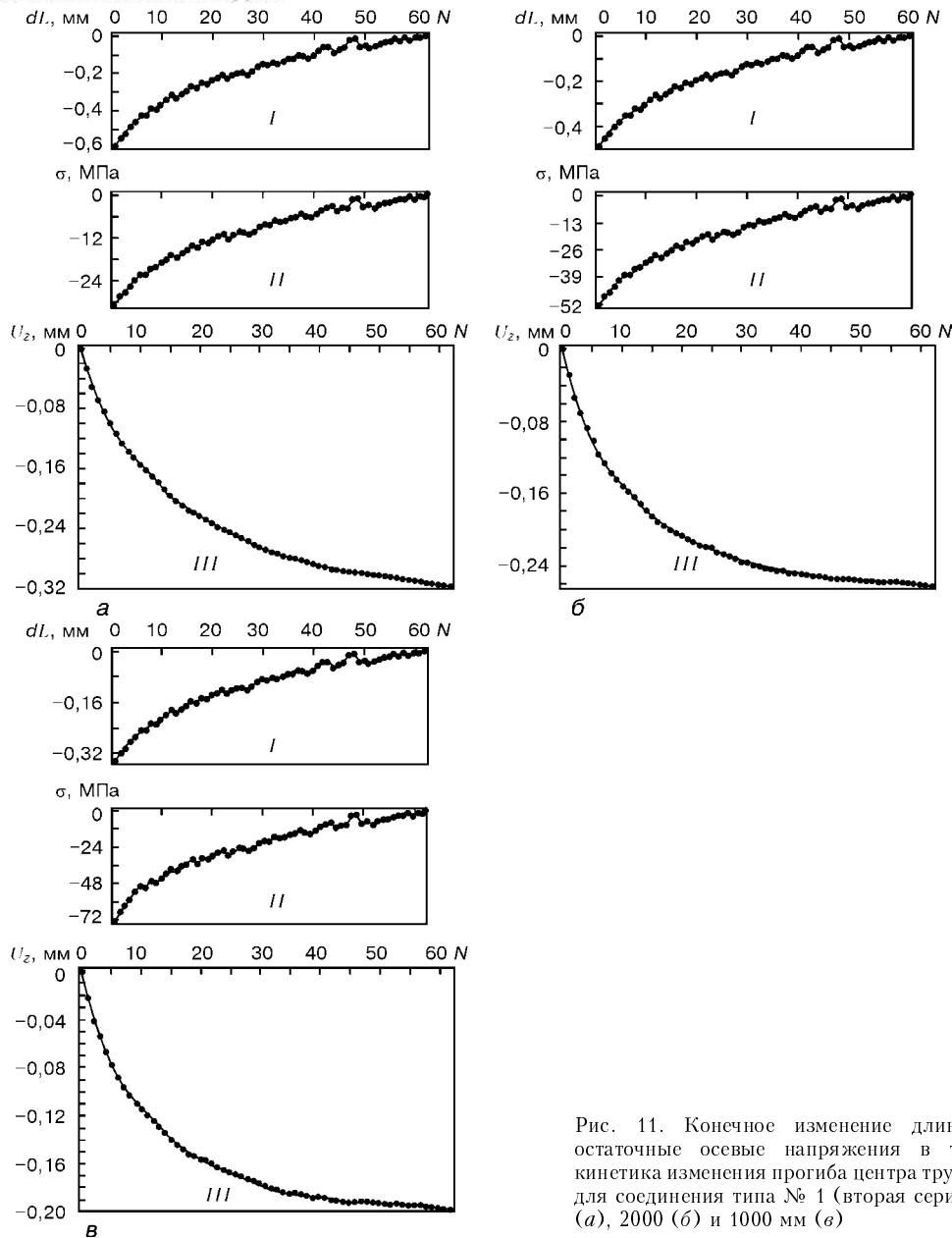


Рис. 11. Конечное изменение длины трубок (I), остаточные осевые напряжения в трубках (II) и кинетика изменения прогиба центра трубной доски (III) для соединения типа № 1 (вторая серия) при $L = 4000$ (а), 2000 (б) и 1000 мм (в)

анга наблюдается только в околошовной зоне в трубной доске, где имеются небольшие вкрапления высоких растягивающих напряжений σ_{rr} , с которыми, очевидно, также следует считаться с позиций холодных трещин.

Однако, если для первой серии наиболее опасным является околошовная зона в трубке с высокими пиками (~ 1000 МПа) напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ (рис. 4, б), то здесь зоной риска является околошовная зона трубной решетки с высокими пиками (~ 700 МПа) напряжений σ_{rr} .

Сравнивая деформации трубной решетки на рис. 5, б и рис. 9, а, видим, что во второй серии эти деформации примерно на 15 % ниже для соединений типа № 1. Для других типов соединений (см. рис. 6 и 10) эта разница еще более значительная: для типов № 2 и 3 на 40 %, для типа № 4 на 35 и № 5 на 16 %. Указанное снижение общих деформаций трубной решетки вызвано тем, что во второй серии

усадочные явления при приварке трубок в значительной степени происходят в аустенитной зоне (трубка и зона проплавления), где материал обладает большей податливостью, что обуславливает более низкий уровень остаточных напряжений и деформаций трубной решетки. Наиболее существенно указанное явление заметно для соединений типа № 2 и 3 (см. рис. 2), когда за счет разделки значительная часть активной зоны усадки имеет аустенитный металл.

Влияние длины трубок L на прогибы и уровень напряжений в трубках при конструкции теплообменника с двумя трубными досками показано на примере соединения типа № 1 второй серии. Порядок приварки трубок тот же. На рис. 11 приведены данные по влиянию длины L на прогиб центра трубной решетки и осевые напряжения в трубках. Видно, что при $L > 4000$ мм взаимное влияние трубных досок незначительное, а при $L <$

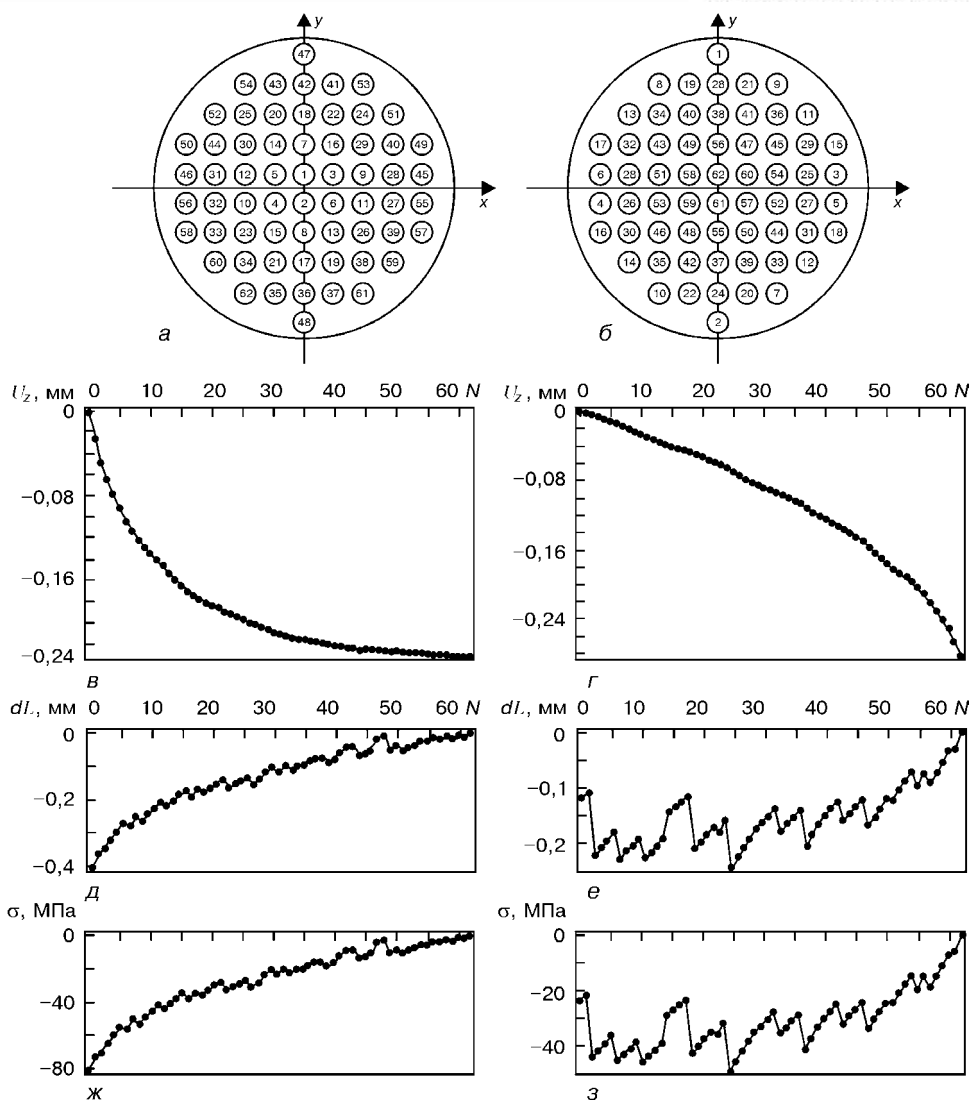


Рис. 12. Деформации трубной доски и трубок в случае соединения типа № 1 двух трубных досок (длина трубок 1 м) и для двух вариантов последовательности сварки: *a* — первый вариант — от центра к краям; *б* — второй вариант — от краев к центру; *в, г* — кинетика прогиба центра трубной доски по мере приварки трубок соответственно для первого и второго варианта; *д-з* — изменения длины трубок и напряжений в трубках после приварки всех трубок соответственно для первого и второго варианта (первая серия)

< 1000 мм деформации заметно уменьшаются, но при этом возрастают осевые напряжения в трубках. Распределение напряжений между трубками здесь существенно зависит от порядка их сварки с трубной решеткой (рис. 12).

Максимальные осевые сжимающие напряжения возникают при данном порядке выполнения сварки (см. рис. 5, *a*) в центральных трубках, заваренных в первую очередь. Это эффективно с позиций снижения деформаций трубной решетки, однако способствует значительной осевой нагрузке центральных трубок, что может привести к потере устойчивости. Действительно, критическую нагрузку для идеально прямой трубки с жестко заделанными концами можно определить по зависимости

$$\sigma_{кр} = -\frac{4\pi^2 E}{\lambda^2},$$

где λ — продольная жесткость, равная $\lambda = L/i$; i — радиус момента инерции сечения трубки, в данном случае $i = 3,88$ мм.

Согласно расчету величина $\sigma_{кр}$ для труб длиной 1000, 2000, 4000 мм соответственно составляет -118,5; -29,6; -7,4. Сравнивая данные рис. 11, видим, что при порядке приварки трубок, указанном на рис. 5, *a*, при $L = 2000$ мм и более риск потери устойчивости центральных трубок весьма значителен.

Заключение. Разработанная компьютерная программа позволяет прогнозировать при сварке характерного узла теплообменников (трубная решетка с трубками) размеры зоны проплавления, ее средний химический состав и микроструктуру, изменение микроструктуры в околошовной зоне основного металла, остаточные локальные напряжения в зоне соединения, общие деформации трубной решетки и остаточные осевые усилия в трубках.



Программа оснащена базой данных по теплофизическим, механическим и металлофизическим (характеристики диаграммы АРА и Шеффлера) свойствам типовых материалов для рассматриваемых узлов и имеет «дружеский интерфейс» пользователя.

Результаты апробирования программы на конкретном сочетании геометрических размеров, механических свойств и режимов сварки, взятых из опыта, показывают следующее:

— имеет место удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментом по наиболее сложному показателю прогнозирования — деформациям трубной решетки;

— из пяти рассмотренных типов сварных соединений (см. рис. 2) трубной решетки с трубками наименьшие деформации при прочих равных условиях дает соединение типа № 1;

— применение аустенитной стали для трубок и присадки позволяет по сравнению с вариантом ферритной стали получить более низкие остаточные локальные напряжения в зоне соединения, соответственно снизить риск образования холодных трещин, и более низкие остаточные общие деформации трубной решетки;

— для конструкций с двумя трубными досками и короткими прямыми трубками приварка в определенной последовательности одновременно концов трубок может существенно снизить деформации трубных решеток, особенно при ограниченных толщинах последних; однако при этом следует считаться с риском потери устойчивости при осевом сжатии трубок, привариваемых в первую очередь.

1. *Компьютерное моделирование сварочных процессов как средство прогнозирования дефектов в сварных соединениях* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 10–19.
2. *Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Т. Г. Кравцов и др. // Там же. — 2001. — № 1. — С. 3–10.
3. *Seyffarth P., Kasatkin O. G. Calculation of structural transformations of the welding process.* — S. l., [1982]. — 21 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1228-82).
4. *Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels* / Ed. C. V. Vander Voort. — ASM publ., 1991. — 80 p.
5. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1975. — 320 с.
6. *Ueda Y., Murakawa H., Nakacho K., Ma N.* Establishment of Computational Welding Mechanics // Trans. of JWRJ. — 1995. — 24, № 2. — P. 73–86.
7. *Махненко В. И., Лобанов Л. М., Махненко О. В.* Прогнозирование общих деформаций сварных узлов на основе банка данных по поперечной и продольной усадке и угловым деформациям соответствующих образцов // Автомат. сварка. — 1991. — № 10. — С. 1–5.

The paper describes a computer program and demonstrates its capabilities in evaluation of both the local phenomena related to welding-on separate tubes (cooling rates, microstructural changes, residual stresses), and of total deformations of the tubesheet, depending on the properties of materials, geometrical dimensions, type of the joint, and sequence of welding tubes to tubesheets.

Поступила в редакцию 27.11.2001



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН

В. А. КАРХИН, д-р техн. наук (С.-Петербург. гос. техн. ун-т, РФ),
В. В. ПЛОШИХИН, д-р-инж. (Байройт ГмбХ, Германия),
Х. В. БЕРГМАН, д-р-инж. (Байройтский ун-т, Германия)

Изложен метод решения обратной квазистационарной задачи теплопроводности для определения параметров режима лазерной сварки по измеренным (заданным) характеристикам сварного шва. За целевую функцию взята сумма взвешенных квадратов разностей рассчитанных и заданных характеристик сварного шва и значений искомых параметров, а также членов регуляризации. Определена эффективная (вводимая) энергия по измеренной ширине шва и углу кристаллографической ориентации зерен металла шва при лазерной сварке алюминиевого сплава. Показано влияние режима сварки на форму сварочной ванны и микроструктуру металла шва.

Ключевые слова: моделирование, обратная задача теплопроводности, тепловые процессы, кристаллизация, лазерная сварка, алюминиевый сплав

В сварочной практике часто возникают задачи, связанные с нахождением таких параметров режима сварки, которые приводят к получению желаемых результатов (необходимым параметрам шва, требуемым свойствам металла шва и ЗТВ и др.), либо обратные задачи, когда по имеющимся экспериментальным данным (параметрам формы шва, виду микроструктуры металла шва и ЗТВ) необходимо воссоздать параметры режима, в частности, определить мощность теплового источника. Последнее относится к классу обратных задач, т. е. нахождению по следственным результатам причин их достижения [1–3].

Получить решение обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) гораздо сложнее, чем решение прямой задачи, так как первое крайне чувствительно к погрешностям измерений. Снижение чувствительности возможно за счет использования регуляризации [1, 2]. Методы, основанные на решении ОЗТ, широко используются при исследовании и отработке тепловых режимов различных объектов авиационной, ракетно-космической техники, энергетике. В последние годы разрабатываются методы решения ОЗТ применительно к сварочным процессам [4–7].

Цель настоящего исследования — разработка метода решения обратной квазистационарной задачи теплопроводности на примере стыковой лазерной сварки пластин (рис. 1, б). Этот пример

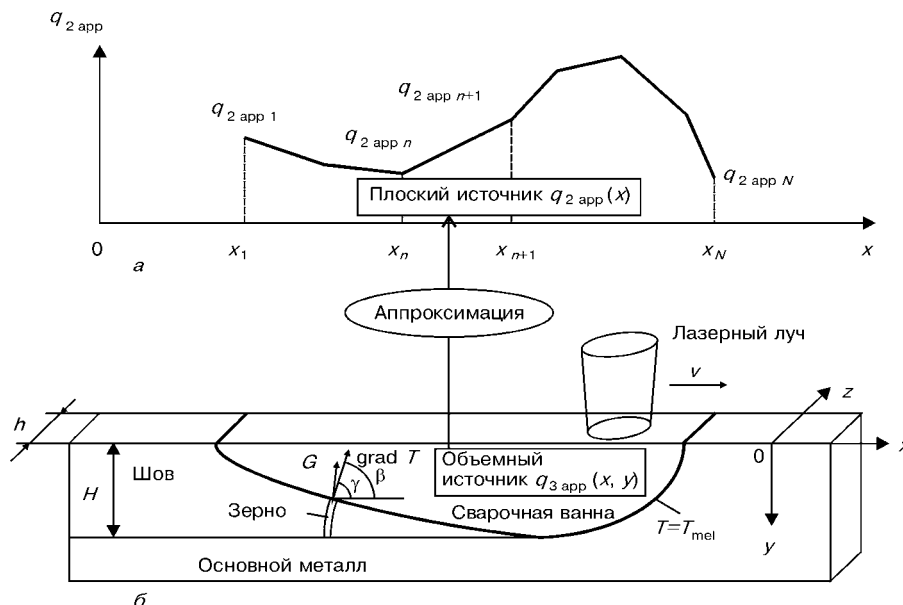


Рис. 1. Представление эквивалентного объемного источника в сварочной ванне в виде эквивалентного плоского источника на кромке пластины: а — кусочно-линейное распределение плотности эквивалентного плоского источника на кромке пластины; б — схема лазерной сварки

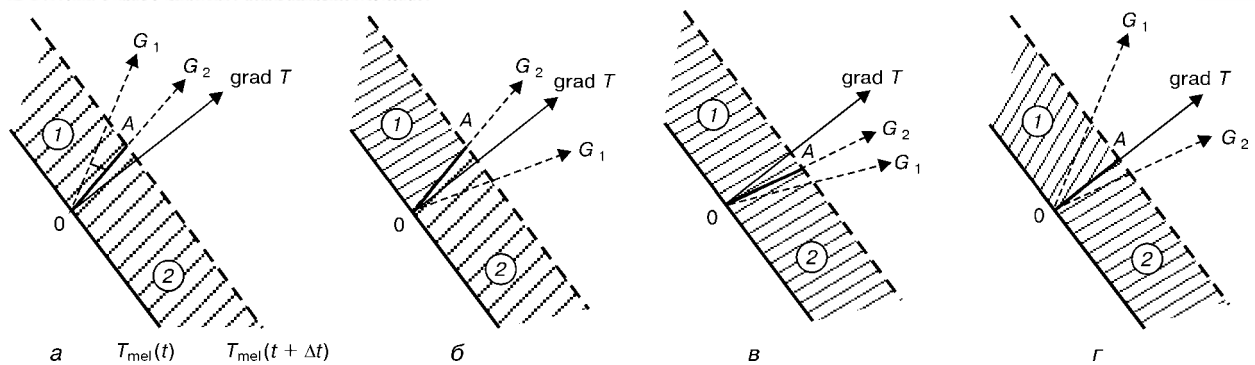


Рис. 2. Схема образования границы OA между растущими соседними зёрнами 1 и 2 на фронте кристаллизации за короткий промежуток времени Δt (G_1 и G_2 — направления кристаллографической ориентации зёрен 1 и 2)

соответствует стыковой сварке с отбортовкой кромок, наплавке кромок и т. п.

Решение прямой задачи теплопроводности.

Алгоритм решения ОЗТ основывается на решении соответствующей прямой задачи. Пусть тепловой источник (лазерный луч) движется прямолинейно вдоль оси x с постоянной скоростью v (см. рис. 1, б). Тогда квазистационарное линейное уравнение теплопроводности в подвижной системе координат x, y, z имеет вид

$$\lambda \nabla^2 T + crv \frac{\partial T}{\partial x} + q_{3 \text{ app}} = 0, \quad (1)$$

где

$$q_{3 \text{ app}} = q_{3 \text{ net}} - cr \left(w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{3L}.$$

Здесь λ — теплопроводность; cr — объемная теплоемкость; $q_{3 \text{ app}}$ — плотность мощности эквивалентного объемного источника; w_x, w_y и w_z — компоненты конвективной скорости жидкости. Эквивалентный источник учитывает реальный источник, т. е. лазерный луч $q_{3 \text{ net}}$, конвекцию жидкости в сварочной ванне (слагаемое в скобках), теплоту плавления и затвердевания q_{3L} .

Допустим, что пластина относительно тонкая (нет перепада температуры по толщине, $dT/dz = 0$). Если сварочная ванна относительно длинная (имеет вытянутую форму), то объемный источник можно аппроксимировать плоским, действующим на кромке пластины (см. рис. 1). Распределение плотности мощности эквивалентного плоского источника $q_{2 \text{ app}}(x)$ представлено с достаточной точностью в виде кусочно-линейной функции (см. рис. 1, а). Тогда решение уравнения (1) для однородной пластины описывается выражением

$$T(x, y) = \frac{1}{\pi \lambda} \sum_{n=1}^{N-1} \int_{x_n}^{x_{n+1}} [q_{2 \text{ app } n} + \frac{q_{2 \text{ app } n+1} - q_{2 \text{ app } n}}{x_{n+1} - x_n} (\xi - x_n)] \exp \left[-\frac{v(x - \xi)}{2a} \right] \times (2) \\ \times K_0 \left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ab}{v^2}} \right) d\xi + T_0; \\ r = \sqrt{(x - \xi)^2 + y^2}; \quad b = 2\alpha / (crh),$$

где a — температуропроводность; K_0 — модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка; α — коэффициент поверхностной теплоотдачи; T_0 — начальная температура; h — толщина пластины; N — количество точек задания кривой $q_{2 \text{ app}}(x)$ (см. рис. 1, а). В действительности значения плотности мощности $q_{2 \text{ app } n}$ в отдельных точках x_n ($n = 1, \dots, N$) неизвестны, они являются решением обратной задачи.

Уравнение (2) позволяет вычислять все характеристики температурного поля (максимальную температуру, температурный градиент и его направление и т. п.).

Решение прямой задачи кристаллизации.

Если при решении ОЗТ за экспериментальные данные принимаются углы кристаллографической ориентации зёрен металла шва, то необходимо решать кристаллизационную задачу, связывающую эти углы с температурным полем. Эту задачу решали методом расчета эволюции границ зёрен, основанном на следующих физических допущениях [8]:

- фронт кристаллизации задается изотермой плавления T_{mel} ;
- распределения размера и кристаллографической ориентации отдельных зёрен в основном металле известны;
- кристаллографические оси [100] и [010] всех зёрен лежат в плоскости пластины, причем за [100] принималась ось, которая отклоняется от оси y менее чем на 45° . Ось [001] перпендикулярна плоскости пластины. Таким образом, кристаллизационная задача является двухмерной, что справедливо для случая сварки тонких пластин;

— при кристаллизации новая граница OA между соседними зёрнами 1 и 2 формируется в зависимости от кристаллографических ориентаций зёрен G_1 и G_2 и направления локального температурного градиента $\text{grad } T$ на фронте кристаллизации $T = T_{\text{mel}}$ (рис. 2).

Пусть в текущий момент t граница между зёрнами на фронте кристаллизации находится в точке 0. Тогда рост границы за короткий промежуток времени Δt (точку A на фронте кристаллизации в момент $t + \Delta t$) можно определить исходя из следующего критерия селекции зёрен: то зерно, кристаллографическое направление которого ближе к направлению температурного градиента, имеет преимущество в росте перед соседним зерном (рис. 2, а-в). Если направления роста зёрен рас-

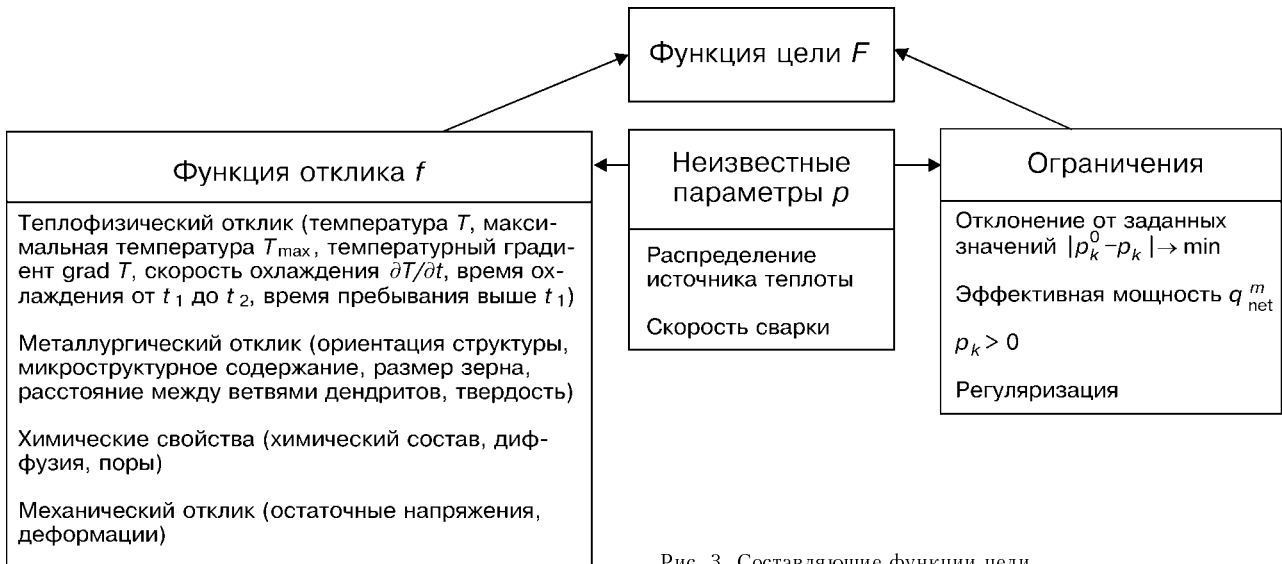


Рис. 3. Составляющие функции цели

ходятся, то новая граница совпадает с локальным температурным градиентом (см. рис. 2, з). Последнее допущение основано на экспериментальных наблюдениях, свидетельствующих о том, что в зерне 1, в котором отклонение направления роста первичных ветвей G_1 от направления температурного градиента $\text{grad } T$ больше, чем у соседнего зерна 2, вторичные ветви развиваются интенсивнее по сравнению со вторичными ветвями соседнего зерна [8].

Решением кристаллографической задачи является набор границ между всеми зернами, т. е. расчетный макрошлиф сварного шва в плоскости пластины, статистическая обработка которого дает распределения размера зерен и угла [100] направлений кристаллографической ориентации зерен γ (математическое ожидание, дисперсию и т. п.) на любом удалении от границы шва.

Принятая модель экспериментально подтверждена для случая лазерной сварки, когда за счет высоких температурных градиентов и высоких скоростей кристаллизации микроструктура сварного шва имеет ячеисто-дендритную морфологию, т. е. преимущественно состоит из первичных и третичных ветвей дендритов с ярко выраженной направленностью, соответствующей кристаллографической ориентации [8].

Решение обратной задачи. Критерием точности решения обратной задачи является следующая функция цели:

$$\begin{aligned}
 F(\mathbf{p}) = & \sum_{j=1}^J w_j^f [f_j^m - f_j(\mathbf{p})]^2 + \sum_{k=1}^K w_k^p [p_k^0 - p_k]^2 + \\
 & + w^q [q_{\text{net}}^m - q_{\text{net}}(\mathbf{p})]^2 + w_0 \sum_{n=1}^N [p_n]^2 + \\
 & + w_1 \sum_{n=1}^{N-1} [p_{n+1} - p_n]^2 + w_2 \sum_{n=1}^{N-2} [p_{n+2} - 2p_{n+1} + p_n]^2,
 \end{aligned}$$

где J — количество измерений; K — количество искомых параметров ($K \geq N$); $q_{\text{net}}^m, q_{\text{net}}$ — заданное

и расчетное значения эффективной мощности лазерного луча:

$$q_{\text{net}} = q_{\text{app}} = \frac{1}{2} h \sum_{n=1}^N p_n (x_{n+1} - x_{n-1}), \quad (3)$$

где q_{app} — мощность эквивалентного источника; $p_n = q_{2 \text{ app}}(x_n)$; $x_0 = x_1$ и $x_{N+1} = x_N$. Равенство $q_{\text{net}} = q_{\text{app}}$ в уравнении (3) следует из условия теплового баланса.

Поясним физический смысл приведенной функции F вектора искомых параметров \mathbf{p} , $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$. В общем случае искомый параметр p_k может быть плотностью мощности в заданной точке, скоростью сварки и т. д. Функция отклика f (экспериментальное и расчетное значения в j -й точке, f_j^m и f_j) является теплофизической, металлургической, химической или механической характеристикой (рис. 3). Ограничения могут содержать заданное априори значение k -го параметра p_k^0 , ограничения по его знаку и величине, по эффективной мощности q_{net} и т. д. (рис. 3). Весовые коэффициенты w_j^f и w^q зависят от ошибки измерения f_j^m и q_{net}^m , а весовой коэффициент w_k^p — от допустимого изменения параметра p_k относительно заданного значения p_k^0 . Если неизвестна эффективная (вводимая) мощность q_{net}^m , то принимается $w^q = 0$. Регуляризация нулевого, первого и второго порядка (коэффициенты w_0, w_1 и w_2) позволяет сглаживать функцию распределения мощности и предписывать ее вид. Таким образом, функция цели F позволяет гибко учитывать предварительное знание физического объекта.

Решением обратной задачи по определению является глобальный минимум функции цели F . Функцию F минимизировали с помощью итерационного метода Гаусса–Ньютона [7]. При этом на каждой итерации последовательно решали прямые задачи теплопроводности и кристаллизации. Отметим, что без регуляризации решение обратной задачи может быть неустойчивым.

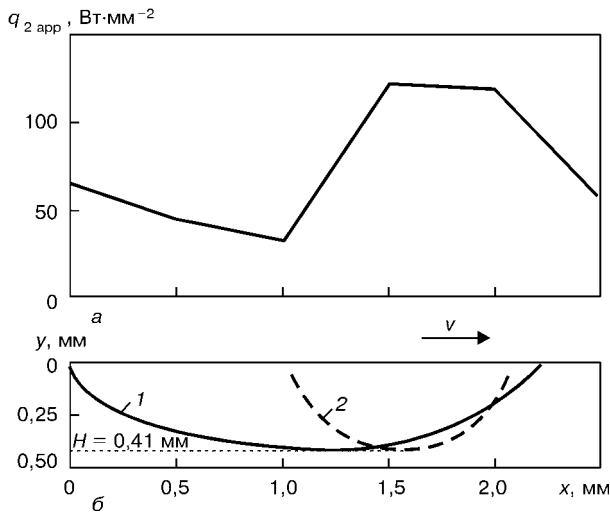


Рис. 4. Распределение плотности мощности эквивалентного плоского источника на кромке пластины (а) и форма сварочной ванны (б) при мощности лазерного луча 1700 Вт и скорости сварки 50 мм·с⁻¹: 1 — плоский источник, уравнение (2); 2 — линейный источник, уравнение (4)

Эксперимент. Кромки пластины толщиной 1,15 мм переплавляли лазерным лучом диаметром 0,6 мм. Материал — алюминиевый сплав АС 120 (1,05... 1,20 % Si и 0,36... 0,44 % Mg). Замеряли ширину шва (глубину проплавления) H на поперечных макрошлифах и угол [100] направлений кристаллографической ориентации зерен металла шва методом рентгеновской дифрактометрии [9].

Таким образом, в качестве экспериментальных значений функции отклика f^m принимались максимальная температура T_{\max} , равная температуре плавления T_{mel} , при $y = H$ и средние значения угла ориентации зерен γ при заданных координатах y . За расчетные значения функции отклика f принимались максимальная температура T_{\max} при $y = H$ и значения наиболее вероятного угла γ .

Анализ результатов. Задачи решали при следующих исходных данных: мощность лазерного луча $q_{\text{gross}} = 1700$ Вт; $a = 76,30$ мм²·с⁻¹; $\lambda = 0,175$ Вт·мм⁻¹·К⁻¹; $T_{\text{mel}} = 890,5$ К; $T_0 = 293$ К; $\alpha = 0,00005$ Вт·мм⁻²·К⁻¹; $\omega_j^f = 10$ К⁻², если $f_j = T_{\max}$; $\omega_j^f = 1$ К⁻², если $f_j = \gamma_j$; $\omega_k^p = 0$; $\omega^q = 0$; $\omega_0 = 0,0001... 0,1$; $\omega_1 = 0... 0,01$; $\omega_2 = 0... 0,01$ Вт⁻²·мм⁴. Скорость сварки изменялась в диапазоне 16,7... 50 мм·с⁻¹. При моделировании кристаллизации принимали, что распределения размера и кристаллографической ориентации зерен основного металла случайны и равномерны, начальный диаметр зерна лежит в диапазоне 20... 30 мкм. Решением обратной задачи являются значения плотности мощности $q_{2\text{app}n}$ в фиксированных точках x_n ($n = 1, \dots, N, N = K$).

На рис. 4, а показано распределение мощности $q_{2\text{app}}$ при скорости сварки $v = 50$ мм·с⁻¹. Максимум в передней части сварочной ванны соответствует положению лазерного луча, а некоторый подъем в хвостовой части — эффекту теплоты затвердевания. Эффективный КПД нагрева пластины лазерным лучом составляет 12,8 %, что близко к величине ($\eta = 12,0$ %), замеренной при неподвижном луче длиной волны 1,06 мкм [10]. Передняя

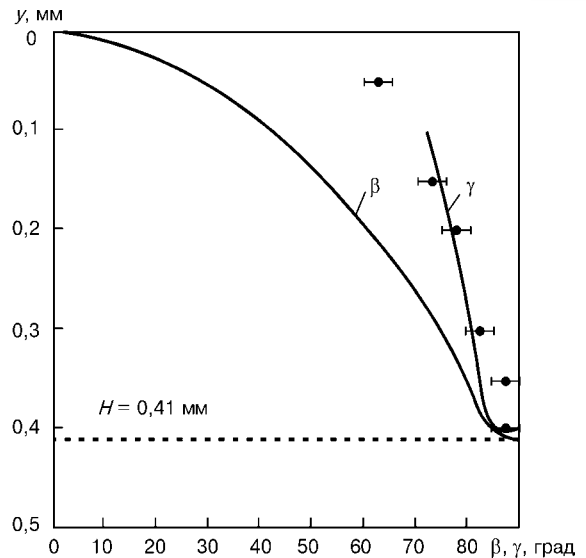


Рис. 5. Распределение углов температурного градиента β и наиболее вероятного [100] направления кристаллографической ориентации зерен γ по ширине сварного шва: сплошная кривая — расчет; точки — эксперимент

часть ванны определена приближенно, так как на ее форму и размеры не накладывается никаких ограничений (рис. 4, б).

В сварочной практике популярны расчетные схемы простых идеализированных источников теплоты. Если далее эквивалентный источник упростить и принять сосредоточенным на линии $x = x_0$, то получается известная схема линейного источника на кромке пластины [11]:

$$T(x, y) = \frac{q_{\text{app}}/h}{\pi\lambda} \exp\left[-\frac{v(x-x_0)}{2a}\right] K_0\left(\frac{vr}{2a}\sqrt{1+\frac{4ab}{v^2}}\right) + T_0. \quad (4)$$

Отметим, что использование схемы линейного источника приводит к расчетной форме шва, близкой к полуокружности (рис. 4, б). В этом случае единственной неизвестной является величина мощности q_{app} и поэтому принципиально нельзя одновременно удовлетворить экспериментальные условия как по глубине проплавления, так и по углу ориентации зерен.

Рассчитывали наиболее вероятное значение угла γ кристаллографической ориентации зерен [100] в зависимости от координаты y (рис. 5). Видно, что угол γ относительно близок к углу температурного градиента β по всей глубине шва, за исключением небольшой зоны вблизи кромки пластины. Последнее объясняется тем, что из-за изменения направления температурного градиента селекция зерен главным образом происходит между [010] направлениями, а не между [100] направлениями кристаллографической ориентации. Иными словами, если при «вертикальном» положении температурного градиента в нижней части сварочной ванны ($\beta \approx 90^\circ$) рост зерна происходит за счет первичных дендритов [100] ориентации, то в верхней части сварочной ванны при горизонтальном положении температурного градиента ($\beta \approx 0^\circ$) рост этого же зерна реализуется за счет вторичных дендритных ветвей, имеющих соответственно [010] ориентацию.

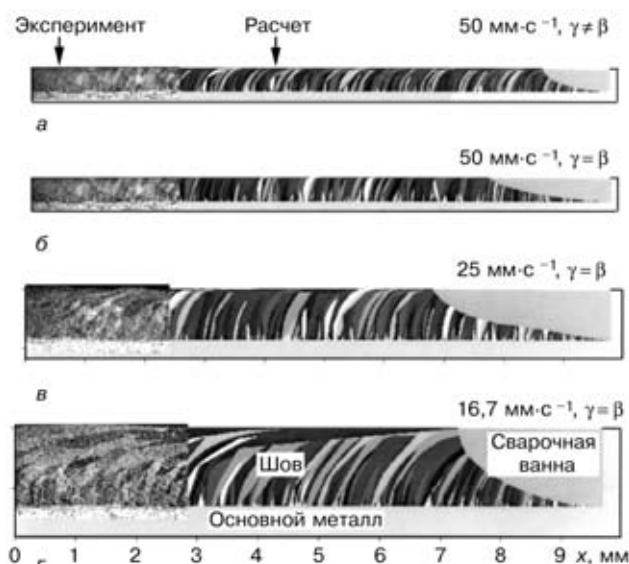


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные продольные макрошлифы при различной скорости сварки (показана только хвостовая часть сварочной ванны)

При скорости сварки $v = 50 \text{ мм·с}^{-1}$ накладывались импульсы частотой 50 Гц, что привело к видимым полосам неоднородности на продольных макрошлифах (рис. 6, а). Видно, что расчетная граница хвостовой части сварочной ванны близка по форме темным полосам макрошлифа. Если не учитывается влияние конвекции жидкого металла сварочной ванны и тепла плавления и затвердевания (схема линейного источника на рис. 4, б), то расчетная форма шва значительно отличается от экспериментальной.

Если принять направление температурного градиента $\text{grad } T$ на фронте кристаллизации за ориентацию зерен G ($\beta = \gamma$, рис. 1), то решение обратной задачи упрощается (не надо решать кристаллизационную задачу). Однако в этом случае получается завышенная длина сварочной ванны (рис. 6, а, б).

Режим сварки оказывает существенное влияние на форму сварочной ванны и текстуру металла шва (рис. 6, б–г). Форма сварочной ванны определяет преимущественную кристаллографическую ориентацию зерен (наиболее вероятное значение угла γ). Чем вытянутее форма, тем больше угол γ . Чем шире сварочная ванна относительно размера зерен основного металла, тем интенсивнее происходит селекция зерен, что приводит к различию в текстуре и, следовательно, в свойствах между металлом шва и основным металлом. Раз-

личие увеличивается по мере удаления от границы шва.

В целом расчетная микроструктура металла шва удовлетворительно соответствует экспериментальной (рис. 6).

Отметим, что изложенная методика может быть использована и при других методах сварки плавлением.

Выводы

1. Разработанный метод решения обратной задачи теплопроводности позволяет определять режим лазерной сварки по измеренным характеристикам сварного шва.

2. Предложенная функция цели дает возможность учитывать предварительные знания о сварочном процессе.

3. Режим лазерной сварки оказывает сильное влияние на расчетную текстуру металла шва, которая зависит от формы сварочной ванны и отношения размера зерна основного металла и ширины шва.

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
2. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клар Ч. Некорректные обратные задачи теплопроводности. — М.: Мир, 1989. — 310 с.
3. Kurpisz K., Nowak A. J. Inverse thermal problems. — Southampton, Boston: Comput. Mech. Publ., 1995. — 258 p.
4. Beck J. V. Inverse problems in heat transfer with application to solidification and welding // Modeling of casting, welding and advanced solidification processes / Eds. M. Rappaz, M. R. Ozgu, K. W. Mahin. — 1991. — P. 503–514.
5. Zabaras N. Inverse modeling of solidification and welding processes // Ibid. — 1991. — P. 523–530.
6. Al-Khalidy N. Two-dimensional inverse phase change problem // Advanced computational methods in heat transfer / Eds L. C. Wrobel, G. Comini, C. A. Brebbia, A. J. Nowak. — Southampton, Boston: Comput. Mech. publ. — 1996. — Vol. 4. — P. 427–437.
7. Inverse modelling of the heat input distribution during deep penetration laser and electron beam welding / V. A. Karkhin, A. S. Ilyin, V. V. Plochikhine, H. W. Bergmann // 8th conf. on laser mater. processing in the nordic countries / Eds F. O. Olsen, J. K. Kristensen. — Copenhagen, 13–15 Aug., 2001. — P. 289–300.
8. Ploshikhin V. V., Bergmann H. W. Simulation of grain structures in laser beam welds undergoing the planar solidification mode // Mathematical modelling of weld phenomena / Ed. H. Cerjak. — London: The Inst. of Mater. — 1998. — Vol 4. — P. 150–165.
9. Bergmann H. W., Mayer S., Mueller K., Ploshikhin V. V. Texture evolution in laser beam welds undergoing the planar solidification mode // Ibid. — P. 166–183.
10. Dausinger F. Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivitaet. — Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.
11. Boulton N. S., Lance Martin H. E. Residual stresses in arc-welded plates // Proc. Inst. Mech. Eng. — London, 1936. — Vol. 133. — P. 295–348.

Described is the method for solving the inverse quasi-stationary problem of thermal conductivity to determine parameters of laser welding by measured (assigned) characteristics of the weld. The sum of weighted squares of differences between the calculated and assigned characteristics of the weld and values of the parameters to be determined, as well as the regularisation terms, was used as the criterion function. The effective energy input was determined from the measured weld width and angle of crystallographic orientation of grains of the weld metal in laser welding of aluminium alloy. The effect of welding conditions on the shape of the weld pool and microstructure of the weld metal is shown.

Поступила в редакцию 12.01.2002



ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА НА РАЗМЕРЫ СТЫКОВОГО ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СМЕСИ $Ar + 25\% CO_2$ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

И. Ф. КОРИНЕЦ, канд. техн. наук, ЦЗИ ЧЖЕНЬ ЧУН, магистр (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Установлена зависимость формы шва от величины зазора при дуговой сварке в смеси $Ar + 25\% CO_2$ плавящимся электродом бескосного стыкового соединения и разработана детерминированно-статистическая модель формы шва с учетом влияния зазора. Разработанную модель рекомендуется применять при создании программного обеспечения системы адаптивного управления дуговой сваркой стыковых соединений с нестабильным зазором.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, защитная смесь, стыковое бескосное соединение, зазор, размеры шва, математическая модель

Дуговая сварка в углекислом газе и в смеси $Ar + 25\% CO_2$ находит широкое применение при сварке конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. При сварке металла малых и средних толщин наиболее распространенными являются одно- и двусторонние однопроходные угловые и стыковые швы. Как правило, в этом случае применяют заготовки без скоса кромок, которые на стыковых соединениях собирают с обязательным зазором. Известно, что в стыковых соединениях из листовых и трубных заготовок зазор существенно влияет на размеры и качество формирования шва как при сварке на весу, так и при сварке на подкладке. Стабильный зазор в стыке практически невозможно обеспечить даже при условии высокой точности подготовки кромок и сборки, поскольку в процессе сварки плавлением неизбежны деформации кромок. В этих условиях зазор является одним из основных технологических факторов, влияющих на формирование стыкового шва.

Первые закономерности по влиянию зазора на формирование шва были получены в условиях дуговой сварки под флюсом [1–3]. Эти результаты не потеряли научной и практической ценности до настоящего времени. Однако использовать их непосредственно для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах не представляется возможным. Ряд исследователей учитывали влияние зазора на форму шва наряду с другими факторами при разработке математических моделей формирования шва, создании расчетных методов определения и оптимизации режима дуговой сварки в углекислом газе [4–6]. Другие данные о влиянии зазора на форму шва в условиях дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом нами не обнаружены. Однако в настоящее время в связи с созданием адаптивных систем управления дуговой сваркой, которые должны реагировать в режиме реального времени на случайные отклонения подготовки кромок, в том числе на отклонения зазора в стыке, исследования по влиянию зазора

на формирование шва не потеряли своей актуальности.

Поэтому цель работы — исследование влияния зазора на формирование шва при дуговой сварке в смеси $Ar + 25\% CO_2$ плавящимся электродом и разработка математической модели формы шва с зазором в стыке.

Разработка детерминированно-статистической модели формы шва. Математическая модель формы шва должна устанавливать зависимость размеров стыкового шва (h — глубина проплавления, e — ширина шва, g — высота выпуклости шва) и его формы (ψ_{II} — коэффициент формы проплавления, ψ_V — коэффициент формы валика) от параметров режима сварки (d — диаметр электродной проволоки, I — сварочный ток, v — скорость сварки, v_{II} — скорость подачи электродной проволоки, U — напряжение сварки, L — вылет электродной проволоки, q — расход и состав защитного газа) и величины зазора b (рис. 1).

Известно, что параметры сварки в различной степени влияют на размеры и форму шва. В наименьшей мере на размеры шва влияет расход защитного газа и вылет электродной проволоки, который поддерживают постоянным и равным $L = 10d$. Сварочный ток и скорость подачи электродной проволоки являются зависимыми между собой параметрами и поэтому один из них можно

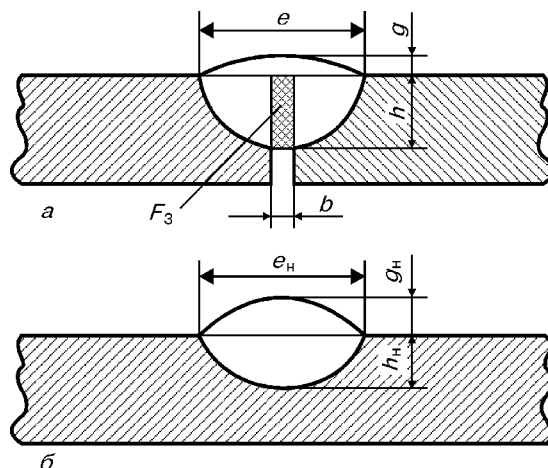


Рис. 1. Размеры стыкового шва (а) и наплавленного валика (б)



исключить, например, скорость подачи электродной проволоки. Если учесть то обстоятельство, что в мировой практике преимущественно находят применение электродные проволоки диаметром 1,0 и 1,2 мм, то на первом этапе исследования влияние диаметра электродной проволоки на форму шва можно также исключить из рассмотрения. Напряжение сварки существенно влияет на ширину шва. Однако оптимальная величина напряжения связана со сварочным током и не изменяется в широком пределе. Если принять, что оптимальное напряжение зависит от сварочного тока, то его влияние на форму шва будет автоматически учитываться в модели через сварочный ток. Этот анализ дает основание для уменьшения в модели количества параметров режима сварки, которые оказывают влияние на формирование шва, т. е. учета прежде всего сварочного тока и скорости сварки.

Для решения поставленной задачи применяем предложенный в работе [7] метод детерминированно-статистического моделирования, при котором зависимость размеров шва от параметров сварки и величины зазора представляются в виде произведения степенных функций, а коэффициенты определяются в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Выполненные исследования позволяют предложить несколько вариантов моделей, которые отличаются различным представлением зависимости размеров шва от зазора. В первом варианте модели зависимость размеров шва от зазора имеет вид степенной функции:

$$h = 0,595 \frac{I^{0,531}}{V^{0,486}} b^{0,176}, \quad (1)$$

$$e = 0,069 \frac{I^{1,051}}{V^{0,324}}, \quad (2)$$

$$g = 1,465 \frac{I^{0,295}}{V^{0,679}} \frac{1}{b^{0,129}}. \quad (3)$$

Однако в случае нулевого зазора в стыке и при наплавке глубина проплавления и высота выпуклости равняются нулю, что противоречит реальному процессу. Обращает на себя внимание выражение (2), показывающее, что ширина шва от зазора не зависит.

Во второй модели отсутствует недостаток первого варианта модели:

$$h = 0,042 \frac{I^{0,950}}{V^{0,496}} (1 + b)^{0,658}, \quad (4)$$

$$g = 1,047 \frac{I^{0,413}}{V^{0,638}} \frac{1}{(1 + b)^{0,453}}. \quad (5)$$

Возможен и третий вариант модели, в котором зависимость размеров шва от зазора представляется в виде показательной функции:

$$h = 0,020 \frac{I^{1,094}}{V^{0,409}} 1,284^b, \quad (6)$$

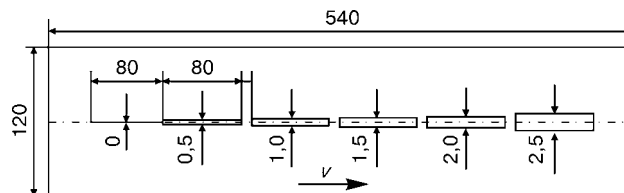


Рис. 2. Образец-имитатор стыкового соединения с переменным зазором

$$g = 1,062 \frac{I^{0,469}}{V^{0,778}} 0,692^b. \quad (7)$$

Проверка адекватности моделей. Определение коэффициентов в уравнениях (1)...(7) и проверка адекватности моделей выполнена при сварке серии образцов-имитаторов стыкового соединения с зазором (рис. 2). Образцы-имитаторы из стали ВСтЗсп представляли собой пластины толщиной 5 мм, в которых фрезой прорезаны щели со ступенчатым изменением зазора. Небольшая длина прорезей и наличие перемычек между ними гарантируют стабильность зазора. Дуговую сварку в смеси Ag + 25 % CO₂ выполняли омедненной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Режим сварки изменяли в следующих пределах: сварочный ток — 140, 180 и 220 А, напряжение сварки — 24, 26 и 27 В, скорость сварки — 5,7, 7,6, 10,2, 12,8, 15,0 и 17,6 мм/с, расход смеси — 10... 12 л/мин. Сварку выполняли на медной подкладке. При зазоре 2,5 мм на всех режимах дуга погружалась в зазор и не было получено качественного формирования шва. После сварки были вырезаны поперечные темплеты, протравлены и выполнены обмеры швов. Результаты расчетных и экспериментальных данных по третьей модели представлены на рис. 3.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что средняя относительная погрешность при определении глубины проплавления составила 10, 7,2 и 6,9 % соответственно по 1-й, 2-й и 3-й модели, выпуклости шва — соответственно 6,9, 5,9 и 5,7 % и ширины шва — 8 % для всех моделей. Наиболее высокую точность дает 3-я модель.

Обсуждение результатов. В рассматриваемых условиях сварки можно выделить три варианта формирования соединения: с выпуклым швом; с вогнутым швом и со швами, имеющими непровары кромок. В первом случае имеет место стабильный процесс сварки с частично погруженной в основной металл дугой. Во втором также наблюдается стабильный процесс, но с дугой, полностью погруженной в основной металл. Зазор не заполняется наплавленным металлом. В третьем случае дуга полностью погружена в основной металл, процесс сварки нестабильный, дуга хаотично перемещается по толщине металла вверх-вниз и перескакивает с одной кромки на другую. Формирование шва не происходит.

Результаты исследований подтверждают существенное влияние зазора на глубину проплавления. Так, глубина проплавления при зазоре 2 мм может превышать глубину проплавления при наплавке



$h, e, g, \text{ мм}$

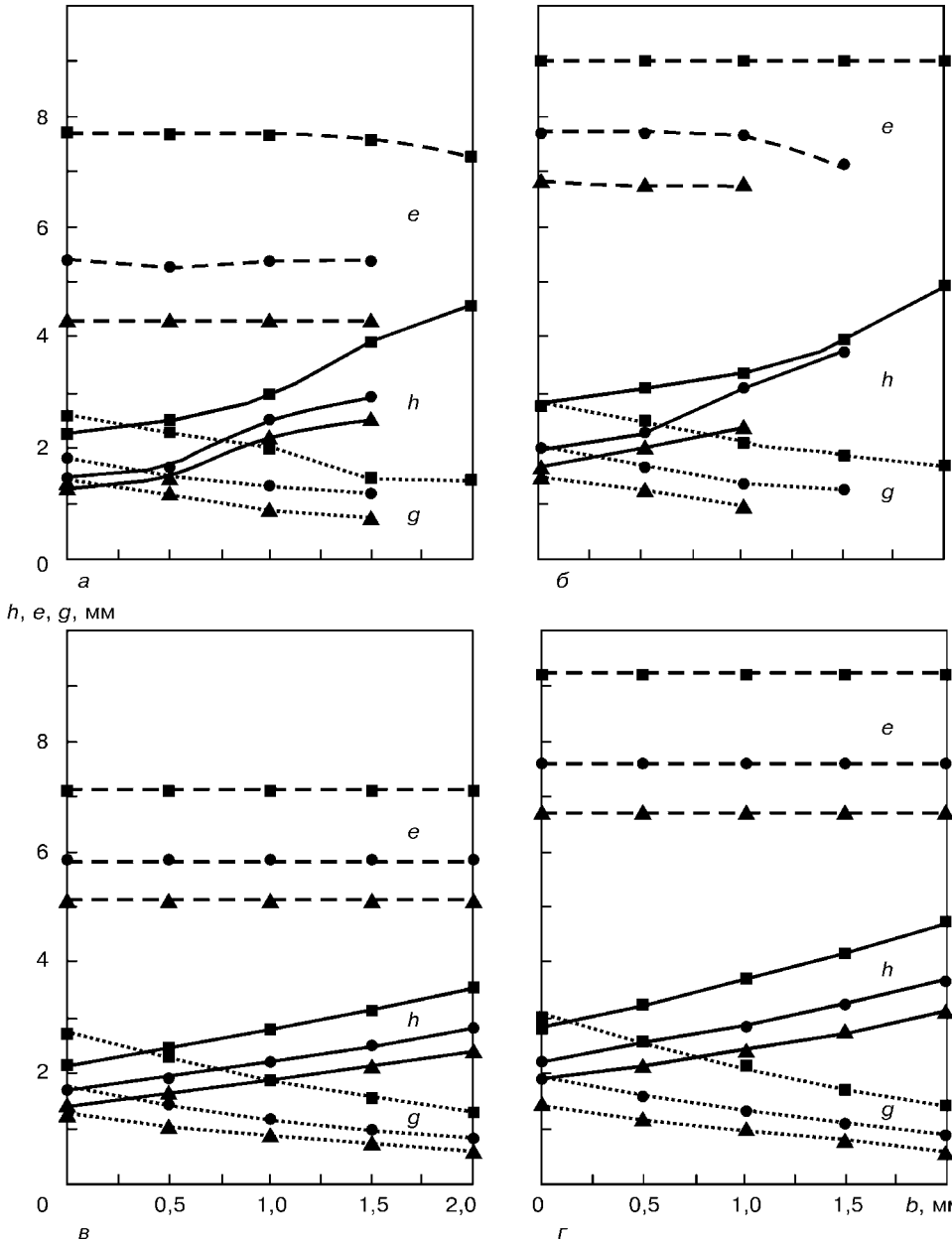


Рис. 3. Влияние зазора и режима дуговой сварки в $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ на размеры шва: а, б — экспериментальные данные при $I = 140$ и 180 А ; в, г — расчетные при $I = 140$ и 180 А ; ■ $v = 5,7$; ● — $10,2$; ▲ — $15,0 \text{ мм/с}$

(стык без зазора) в 2 раза (рис. 3). С увеличением зазора выпуклость шва снижается и при больших зазорах переходит на вогнутость. Ширина шва практически не зависит от зазора до тех пор, пока не происходит полное погружение дуги в основной металл. В случае погружения дуги в основной металл ограничиваются блуждающие отклонения дуги, холодный металл ее сжимает, и ширина шва уменьшается. На погружение дуги в зазор, очевидно, оказывают влияние соотношения между длиной дуги и величиной зазора, что должно быть предметом дальнейших исследований.

При создании расчетных методов определения режима сварки представляет интерес зависимость между размерами шва при сварке стыка с зазором и размерами валика при наплавке (см. рис. 1). Так, зависимости между фактическими размерами шва h и g с учетом величины зазора b и размерами валика при наплавке $h_{\text{н}}$ и $g_{\text{н}}$ имеют вид

$$h = h_{\text{н}} + 0,8b^{1,024}, \quad (8)$$

$$g = g_{\text{н}} - 0,5b^{0,9}, \quad (9)$$

или с учетом площади заполнения зазора F_3 наплавленным металлом (см. рис. 1):

$$h = h_{\text{н}} + 0,4(bh)^{0,844}, \quad (10)$$

$$g = g_{\text{н}} - 0,382(bh)^{0,486}. \quad (11)$$

Выводы

1. При дуговой сварке в защитных газах плавящимся электродом зазор является одним из наиболее существенных технологических факторов, оказывающих влияние на глубину проплавления и высоту выпуклости (вогнутости) стыкового шва. Ширина шва не зависит от величины зазора при неполном погружении дуги в основной металл.



2. Разработана математическая модель формы бескосного стыкового шва с учетом величины зазора. Показана целесообразность учета в модели двух основных параметров сварки: сварочного тока и скорости сварки.

3. Разработанная модель может применяться при создании программного обеспечения системы адаптивного управления дуговой сваркой стыковых соединений с нестабильным зазором.

4. Целесообразно продолжить исследования поведения дуги в зазоре и найти оптимальное соотношение между длиной и напряжением дуги и величиной зазора в стыке.

1. *Островская С. А.* Сварка стыковых швов без разделки кромок с обязательным зазором // Автомат. сварка. — 1950. — № 2. — С. 2–8.

Dependence of the shape of the weld upon the size of the gap in MIG square butt welding in the Ar + 25 % CO₂ mixture was established, and the deterministic-statistical model of the weld shape, allowing for the gap effect, was developed. The model is recommended for development of software for the system of adaptive control of arc butt welding of joints with the unstable gap.

2. *Донченко В. Ф.* Влияние зазора в стыке на размеры поперечного сечения стыкового шва при автоматической сварке под флюсом // Свароч. пр-во. — 1964. — № 9. — С. 24–27.
3. *Донченко В. Ф.* Обоснование параметров режима автоматической сварки под флюсом стыковых соединений по зазору // Там же. — 1965. — № 5. — С. 25–28.
4. *Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г.* Оптимизация режима сварки в CO₂ // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 30–34.
5. *Бабкин А. С., Кривошея В. Е.* Разработка алгоритма расчета параметров режима сварки в углекислом газе на микро-ЭВМ // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 3–5.
6. *Попков А. М.* Расчет параметров шва при сварке в углекислом газе стыковых бескосных соединений // Там же. — 1986. — № 9. — С. 21–22.
7. *Корищев И. Ф., Цзи Чжэнь Чуи.* Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 1–7.

Поступила в редакцию 27.09.2001

УКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ВАГОНОСТРОЕНИЯ

Главная научная организация в Украине по проблемам подвижного состава магистрального и ведомственного железнодорожного транспорта, стандартизации продукции этой отрасли, орган по сертификации продукции вагоностроения и вагонного литья. В структуре института — единственный в Украине испытательный центр, аккредитованный на право проведения сертификационных испытаний как в системе УкрСЕПРО, так и системе сертификации продукции железнодорожного транспорта МПС Российской Федерации. Проводит работы и по диагностированию грузовых и пассажирских вагонов эксплуатационного парка с целью продления срока их службы.

С 2000 г. институт возглавляет Анатолий Владимирович Донченко — кандидат технических наук, номинант издания «Золотая книга деловой элиты Украины», награжден в 2002 г. Грамотой Кабинета Министров Украины. Научные работники организации плодотворно работают над созданием новых пассажирских вагонов европейского уровня, в том числе для скоростных поездов; вагонов электро- и дизель-поездов, метро и трамваев; вагонов типа «Восток-Запад», предназначенных для беспрепятственной перевозки пассажиров и грузов между странами СНГ и Европы. Институт имеет для этого современную экспериментальную базу, в том числе скоростную вагон-лабораторию (до 200 км/ч), высококвалифицированный персонал, уникальный многолетний опыт в области вагоностроения.

Мы стремимся найти партнеров для эффективного сотрудничества в области создания конкурентоспособной продукции для железнодорожного транспорта.

Наш адрес: 39621, г. Кременчуг, ул. И. Приходько, 33
тел.: (05366) 623-32, факс: (05366) 6-10-36



РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Е. Н. ВАРУХА, д-р техн. наук, А. А. МОРОЗОВ, магистр (Головной аттестацион. центр южного региона РФ)

Представлена нелинейная модель проплавления изделия, описывающая зависимость глубины проплавления от параметров процесса механизированной сварки и наплавки в углекислом газе на токе обратной полярности.

Ключевые слова: дуговая сварка или наплавка, математическое моделирование, глубина проплавления, параметры режима сварки, защитный газ, обратная полярность

До настоящего времени нет достаточно точных и простых методик расчета и регистрации глубины проплавления изделия в процессе сварки. Это обусловлено многочисленными факторами, влияющими на нее, и сложностью их учета. Разработка таких методик позволила бы упростить процедуры расчета режимов сварки и создания систем адаптивного управления глубиной проплавления для сварочного оборудования.

Для проведения расчетов параметров режима сварки необходимо задание геометрических размеров сварного шва. При этом должна быть известна зависимость между глубиной проплавления и шириной шва и основными характеристиками процесса (ток и скорость сварки, напряжение на дуге, диаметр и вылет электрода).

До настоящего времени существовало довольно много работ, посвященных установлению связи между параметрами процесса сварки и геометрическими размерами шва. В решении этой задачи можно выделить три основных подхода:

- определение взаимосвязи режима сварки и размеров шва на основе экспериментальных данных [1];
- создание эмпирических уравнений, связывающих режим сварки и размеры шва методом формальной [2] и критериальной интерполяции [3];
- разработка систем аналитических уравнений, полученных из теории теплопередачи [4].

Каждый из них имеет недостатки: значительную трудоемкость получения экспериментальных данных; невысокую точность эмпирических моделей; сложность учета всех факторов, влияющих на распределение температуры в изделии. Бурное развитие вычислительной техники, наличие мощных прикладных компьютерных программ и разработка довольно совершенной математической модели плавления электрода [5] позволяют подойти к решению задачи построения математической модели проплавления изделия на более высоком уровне.

Целью настоящей работы явилась разработка модели для расчета глубины проплавления при наплавке и сварке в углекислом газе на токе обратной полярности стыковых соединений без разделки кромок с нулевым зазором.

Для получения экспериментальных данных была проведена серия опытов по наплавке валиков на пластины из стали СтЗсп толщиной 12 мм в углекислом газе (расход 15...16 л/мин). Наплавку (сварку) осуществляли от преобразователя ПСГ-500 с жесткой вольт-амперной характеристикой в диапазоне напряжений 28...43 В и диапазоне токов 120...500 А. Скорость наплавки изменяли ступенчато от 17,6 до 38,5 м/ч. В качестве электрода использовали сварочные проволоки Св-08Г2С номинального диаметра $d_s = 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0$ мм. Для последующих расчетов принимали фактические размеры d_s , а именно: 0,97; 1,16; 1,4; 1,57 и 1,97 мм. Скорость подачи проволоки в процессе сварки изменяли в пределах от 165 до 650 м/ч. Расстояние от торца токоподводящего мундштука до поверхности пластины выставляли 18, 20 и 22 мм, токоподводящие мундштуки были выполнены из меди марки М0. Наплавленные пластины разрезали поперек валиков в двух местах. Выполняли макрошлифы, по которым с точностью не более $\pm 0,1$ мм измеряли геометрические размеры швов.

Для статистической обработки использовали четыре значения каждого из измеренных параметров без их усреднения. Такой подход позволяет получить большую точность последующей математической обработки экспериментальных данных, поскольку среднеквадратические характеристики более точно отражают изучаемые закономерности, чем их среднеарифметические значения.

При разработке модели использовали метод многофакторного регрессионного анализа, реализован-

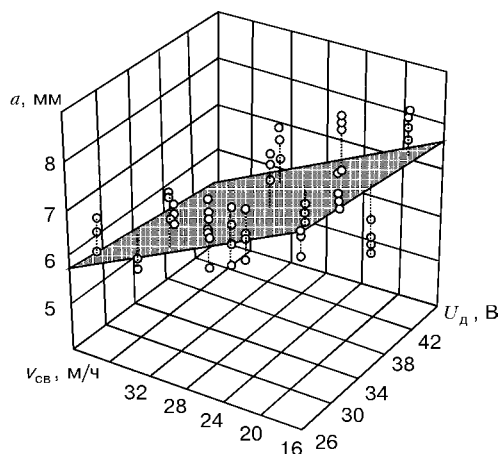


Рис. 1. Зависимость глубины проплавления a от напряжения на дуге U_d и скорости сварки $v_{св}$ при $d_s = 1,6$ мм; $v_{п} = 554$ м/ч

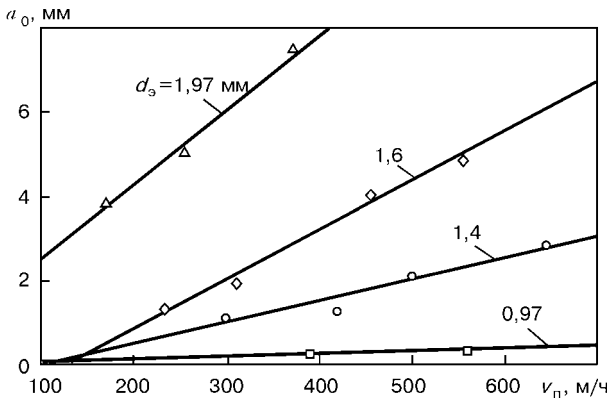


Рис. 2. Зависимость величины a_0 от скорости подачи электродной проволоки при ее различных диаметрах

ный в прикладной программе «Statistica». Для расчета глубины проплавления в качестве независимых переменных использовали напряжение на дуге U_d , массовую скорость подачи v_m и скорость сварки $v_{св}$.

Исходя из классических представлений о закономерностях проплавления изделия и полученных экспериментальных данных, был задан следующий вид искомой формулы для расчета глубины проплавления

$$a = b_0 + b_1 v_m + b_2 U_d + b_3 v_{св}, \quad (1)$$

где a — глубина проплавления, мм; b_0, b_1, b_2, b_3 — эмпирические коэффициенты.

Для определения значений коэффициентов уравнения (1) с помощью метода наименьших квадратов были построены линейные зависимости $a = f(U_d, v_{св})$ при фиксированных значениях d_s и v_n , одна из которых представлена на рис. 1. При нулевых значениях U_d и $v_{св}$ полученная плоскость пересекает ось предикат в точке a_0 , значение которой в каждом случае различное, но линейно зависящее от диаметра электродной проволоки и скорости ее подачи (рис. 2).

Для определения величины a_0 было предложено рассматривать ее зависимость не от линейной скорости подачи проволоки v_n , а от ее массовой скорости подачи v_m (рис. 3). Установлено, что a_0 практически не зависит от диаметра и возрастает с увеличением v_m . С помощью линейной аппроксимации получена следующая зависимость:

$$a_0 = -2,04 + 4,95 v_m. \quad (2)$$

Рис. 3. Зависимости постоянной составляющей глубины проплавления a_0 от массовой скорости подачи электродной проволоки для $d_s = 1,0$ (1); 1,4 (2); 1,6 (3); 2,0 мм (4)

Таким образом мы определили значения коэффициентов b_0 и b_1 из (1): $b_0 = 2,04$ мм, $b_1 = 4,95$ мм·с/г.

Подставив значения b_0 и b_1 в уравнение (1), по экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов были определены значения коэффициентов b_2 и b_3 для различных $v_{св}$. Коэффициенты b_2 и b_3 могут быть описаны следующими зависимостями

$$b_2 = -1,5 \cdot 10^{-4} v_{св}^2 + 6,1 \cdot 10^{-3} v_{св} - 4,68 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{6,4 \cdot 10^{-3} v_{св}^2 - 0,25 v_{св} + 3,72}{v_{св}} + \frac{6,8 \cdot 10^{-3} v_{св}^2 + 0,52 v_{св} - 15,41 - \frac{115,5}{v_{св}}}{v_{св}} v_m. \quad (4)$$

Определение всех коэффициентов уравнения (1) позволило описать искомую зависимость с достаточной для практических целей точностью (коэффициент корреляции с экспериментальными данными составляет 0,92). Полученная модель нелинейна относительно параметров режима сварки (рис. 4).

Появление области роста глубины проплавления при увеличении скорости сварки противоречит некоторым существующим моделям расчета глу-

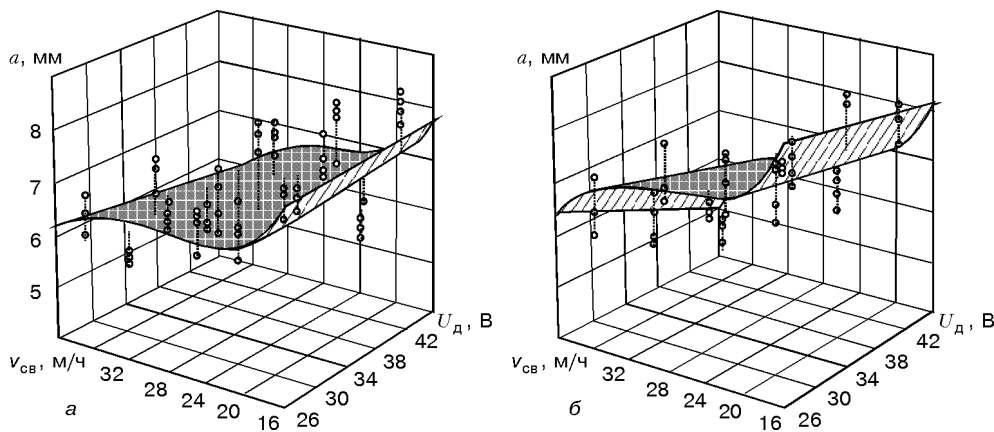


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления от напряжения на дуге и скорости сварки: а — $d_s = 1,6$ мм; $v_n = 2,4$ г/с; б — $d_s = 1,97$ мм; $v_n = 2,5$ г/с (точки — экспериментальные данные)

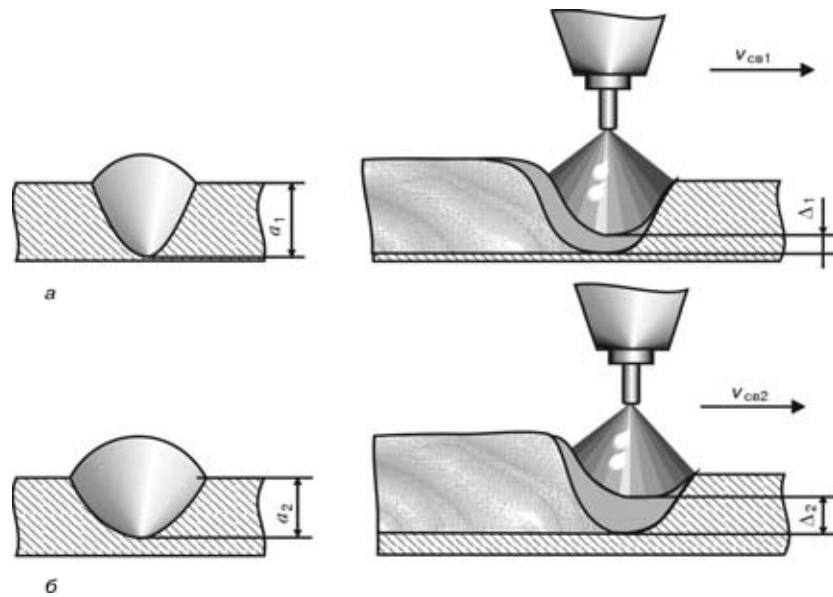


Рис. 5. Влияние толщины жидкой прослойки Δ под дугой на глубину проплавления при изменении скорости сварки ($v_{св1} > v_{св2}$)

бины проплавления. Однако этот результат подтверждается исследованиями в области влияния толщины жидкой прослойки под дугой на глубину проплавления [6, 7].

Рост глубины проплавления при увеличении скорости сварки в определенном диапазоне объясняется тем, что жидкий металл ванны вытесняется давлением дуги в хвостовую часть и не успевает подтекать под дугу за счет собственной массы. Таким образом, энергия дуги расходуется главным образом на плавление основного металла, а не на перегрев расплавленного (рис. 5).

Полученную модель сравнивали с известной моделью Акулова. Сравнение проводили для $d_э = 1,4; 1,6; 2,0$ мм при различных параметрах режима сварки. В качестве критерия оценки точности расчетных моделей использовали соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

Для наглядности результаты сравнения выводили в виде графиков зависимостей глубины проплавления от скорости сварки при фиксированных значениях $d_э, v_п, U_д$. Поведение расчетных моделей при различных скоростях подачи электродной проволоки и значениях напряжения на дуге для $d_э = 2,0$ мм показано на рис. 6.

Как видно из рис. 6, зависимость глубины проплавления от скорости сварки, соответствующая модели Акулова, имеет вид гиперболы. Недостатком такого описания можно считать неадекватный рост глубины проплавления при малых значениях $v_{св}$ и стремление к некоторому ненулевому значению при высоких скоростях сварки.

Расчеты, проводимые по модели Акулова, хорошо совпадают с экспериментальными данными в диапазоне скоростей сварки от 28 до 40 м/ч. Увеличение напряжения и уменьшение скорости подачи электродной проволоки приводит к возрастанию ошибки.

Можно сделать вывод, что модель Акулова адекватно отражает действительные значения глубины проплавления только в жестких рамках ограничений по скорости сварки, скорости подачи электродной проволоки и напряжению на дуге.

Анализ данных расчета по разработанной модели показывает, что при малых скоростях сварки напряжение на дуге практически не влияет на глубину проплавления. При увеличении $v_{св}$ степень влияния $U_д$ возрастает, при этом с повышением напряжения на дуге глубина проплавления уменьшается. Увеличение $v_{св}$ сначала приводит к резкому снижению глубины проплавления, а затем к небольшому ее повышению. На больших скоростях сварки глубина проплавления вновь начинает уменьшаться.

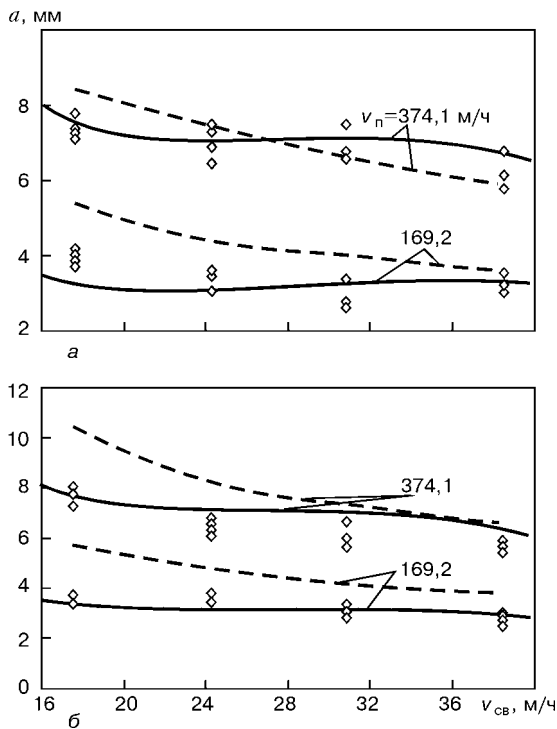


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки для $d_э = 2,0$ мм и $U_д = 30$ (а) и 40 В (б): сплошные кривые — результат расчета по полученной модели; штриховые — по модели Акулова



Полученная модель позволяет заключить, что при определенном напряжении на дуге и/или скорости сварки глубина проплавления становится практически равной нулю, что особенно важно при расчете параметров режима сварки.

Если в формулу (1) ввести известную зависимость v_m от тока сварки $I_{св}$, вылета $h_э$, диаметра и химического состава сварочной проволоки [5], то полученная формула может быть использована для решения обратной задачи — по заданному значению глубины проплавления, диаметра и вылета сварочной проволоки может быть рассчитан сварочный ток, т. е. могут значительно упроститься инженерные расчеты режимов сварки.

Установленные в процессе исследований закономерности могут применяться при разработке автоматизированных систем управления глубиной проплавления изделия в процессе наплавки (сварки), для учета влияния на глубину проплавления других материалов электродных проволок и изделия, защитных сред и условий наплавки (сварки). Например, для описания процесса сварки с разделкой кромок и с зазором между свариваемыми элементами.

Выводы

Presented is the non-linear model of penetration of a work piece, describing dependence of the penetration depth upon parameters of the process of automatic CO₂ welding and surfacing at a reverse polarity current.

1. Разработана модель для расчета глубины проплавления при наплавке (сварке) в углекислом газе на токе обратной полярности стыкового соединения без разделки кромок с нулевым зазором.

2. Определена и математически описана функциональная зависимость глубины проплавления от параметров режима наплавки (сварки).

3. Полученная эмпирическая формула обеспечивает наибольшую простоту и точность инженерных и научных расчетов глубины проплавления при механизированной наплавке (сварке) и позволяет проводить ее экспресс-оценку.

1. Акулов А. И., Бельчук Т. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1977. — 432 с.
2. Дубовицкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO₂ // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 30–35.
3. Рыкалин Н. Н., Бекетов А. И. Расчет термического цикла околошовной зоны по очертанию плоской сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1967. — № 9. — С. 22–25.
4. Кривошея В. Е. Моделирование процессов сварки // Автоматизация сварочного производства в свете решений XXVI съезда КПСС. — Л.: ЛДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1981. — С. 44–52.
5. Варуха Е. Н., Докторский Р. Я. Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 33–35.
6. Лецицкий Л. К., Павлов И. В. Толщина жидкой прослойки под дугой при наплавке ленточным электродом и проволокой // Автомат. сварка. — 1975. — № 3. — С. 75–76.
7. Чернышев Г. Г., Рыбачук А. Н. О толщине жидкой прослойки под дугой // Технология и автоматизация процессов сварки и пайки. — М.: Машиностроение, 1969.

Поступила в редакцию 02.10.2001



ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА 20ХГС, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Ю. М. КУСКОВ, канд. техн. наук, И. И. РЯБЦЕВ, Л. К. ДОРОШЕНКО, инженеры, В. Г. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Методом дифференциального термического анализа исследованы процессы плавления и кристаллизации наплавленного металла типа 20ХГС, легированного 0,1...2,4 % фосфора. Установлено, что в наплавленном металле этого типа фосфидные эвтектики, опасные с точки зрения склонности к горячим трещинам, появляются при содержании фосфора более 1 %.

Ключевые слова: наплавленный металл, легирование фосфором, фосфидные эвтектики, кристаллизация наплавленного металла, дифференциальный термический анализ

В большинстве случаев фосфор считается нежелательной примесью в стали. При кристаллизации стальных слитков обнаружена внутрикристаллическая ликвация фосфора, приводящая к снижению пластичности и ударной вязкости, особенно при пониженных температурах. Фосфор является одним из элементов, ответственных за отпускную хрупкость стали [1]. Аналогичным образом он влияет и на свойства металла сварных швов [2]. По этой причине его содержание в сталях и в металле сварных швов обычно ограничивают 0,03 %.

Однако существуют стали и чугуны, в которых фосфор применяется в качестве легирующего элемента. Согласно данным работы [3], фосфор при содержании до 0,6 % упрочняет сталь. Наряду с углеродом и молибденом он является одним из наибольших упрочнителей стали в нормализованном состоянии.

Массовая доля фосфора 1 % и более благоприятно влияет на износостойкость и антифрикционные свойства сплавов на основе железа [4, 5]. При этом фосфиды железа и некоторых легирующих элементов при трении металла по металлу выполняют роль твердой смазки [6]. Положительно воздействует фосфор и на жидкотекучесть стали. Как следует из статьи [7], фосфор как поверхностно-активное вещество способствует уменьшению поверхностного натяжения жидкого железа, что приводит к его полному растеканию по твердой подложке.

Поскольку фосфор положительно влияет на антифрикционные свойства и жидкотекучесть стали, его использование в качестве легирующего элемента в некоторых наплавочных материалах может быть перспективным, например, в порошковых или сплошных проволоках, обеспечивающих получение наплавленного металла типа сталей 18ХГС и 30ХГСА. Данные проволоки широко применяются в различных отраслях промышленности для восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях трения металла по металлу [8].

Применению фосфора как легирующего элемента в наплавочных материалах может препятствовать образование легкоплавких фосфидных эвтектик, которые повышают склонность сталей к горячим трещинам при сварке и наплавке.

С учетом возможного отрицательного влияния фосфидных эвтектик на склонность наплавленного металла к горячим трещинам были исследованы процессы плавления и кристаллизации образцов наплавленного металла типа стали 20ХГС с различным содержанием фосфора (табл. 1).

Процессы плавления и кристаллизации опытных образцов наплавленного металла изучали методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке ВДТА-8М. Образцы для исследований вырезали из 4–6-го слоя металла, наплавленного порошковыми проволоками, в шихте которых содержалось различное количество фосфора в виде феррофосфора. В работе [9] показано, что с помощью метода ДТА можно зафиксировать даже небольшие изменения в фазовом составе материала, например, наличие или отсутствие эвтектик.

Нагрев и охлаждение образцов наплавленного металла производили в гелии при давлении 0,05 МПа со скоростью 80 °С/мин в тигле из оксида алюминия.

В случае использования метода ДТА значения температуры начала и конца плавления и кристаллизации исследуемых материалов определяют по кривым их нагрева и охлаждения с помощью гра-

Таблица 1. Химический состав и твердость исследуемых образцов наплавленного металла

Номер образца сплава	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %					Твердость наплавленного металла, <i>HV</i>
	C	Mn	Si	Cr	P	
I	0,22	1,15	0,88	1,10	—	220
II	0,23	1,13	0,93	1,20	0,11	229
III	0,23	1,23	0,98	1,15	0,31	229
IV	0,22	1,20	0,90	1,25	0,57	321
V	0,24	1,14	0,96	1,23	1,00	320
VI	0,23	1,08	0,90	1,18	1,28	341
VII	0,21	1,20	1,00	1,27	1,98	363
VIII	0,22	1,18	0,92	1,21	2,38	413

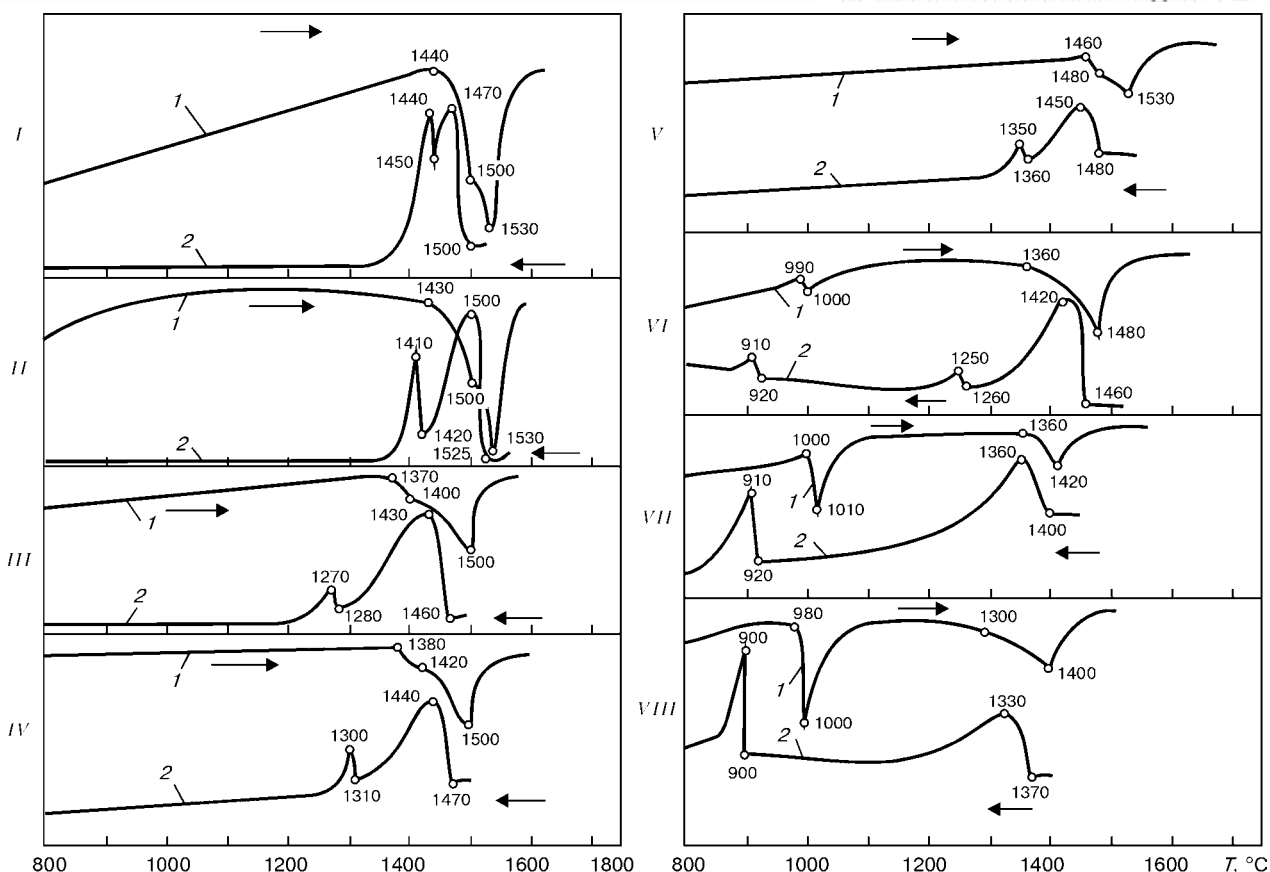


Рис. 1. Дифференциальные термические кривые нагрева (1) и охлаждения (2) образцов из стали 20ХГС с различным содержанием фосфора, %: I – без фосфора; II – 0,11; III – 0,31; IV – 0,57; V – 1,0; VI – 1,28; VII – 1,98; VIII – 2,38

дуировочного графика плавления и кристаллизации эталонного образца в тех же условиях. В качестве эталона в экспериментах использовали образец из чистого вольфрама. Масса исследуемых образцов и эталона равнялась примерно $(1 \pm 0,1)$ г.

Стадиям фазовых превращений, плавления и кристаллизации сплава соответствуют отклонения от прямого хода кривых нагрева или охлаждения, свидетельствующие о протекании эндо- или экзотермических процессов. Степень этих отклонений зависит от химического состава исследуемого материала.

На рис. 1 приведены кривые нагрева и охлаждения образцов опытных составов наплавленного металла, а в табл. 2 указаны температуры их плавления и кристаллизации. Согласно методу ДТА температура начала плавления определяется по кривой нагрева, а температура начала кристаллизации – по кривой охлаждения.

Как показали эксперименты (рис. 1, образцы I... V, кривые 1), до содержания фосфора, равного примерно 1,0 %, в наплавленном металле типа стали 20ХГС на кривых нагрева в высокотемпературной области фиксируются два перегиба. Анализ диаграмм состояния сталей этого класса [10–12] позволил объяснить природу происходящих превращений. Первые перегибы на кривых нагрева образцов (образец I, кривая 1, 1440... 1500 °С; образец II, кривая 2, 1430... 1500 °С; образец III, кривая 1, 1370... 1400 °С; образец IV, кривая 1, 1380... 1420 °С; образец V, кривая 1, 1460... 1480 °С) связаны с началом плавления твердого раствора и вероятным

протеканием перитектической реакции. Второй перегиб (при более высоких температурах) свидетельствует о плавлении оставшегося твердого раствора.

При большем содержании фосфора (рис. 1, образцы VI... VIII, кривые 1) на кривых нагрева сначала отмечаются перегибы, которые соответствуют плавлению фосфидной эвтектики при 980... 1000 °С, а затем в условиях более высокой температуры плавится матрица сплава. При таком содержании фосфора изменяется характер плавления матрицы сплава (кривые плавления имеют только один перегиб). Следует отметить, что с повышением содержания фосфора возрастает ко-

Таблица 2. Температуры плавления и кристаллизации опытных сплавов

Номер образца сплава	Температура плавления и кристаллизации, °С			
	Матрица		Эвтектика	
	Плавление	Кристаллизация	Плавление	Кристаллизация
I	1440	1500	Эвтектика не зафиксирована	
II	1430	1525	То же	
III	1370	1460	»	»
IV	1380	1470	»	»
V	1460	1480	»	»
VI	1360	1460	990	920
VII	1360	1400	1000	920
VIII	1300	1370	980	900

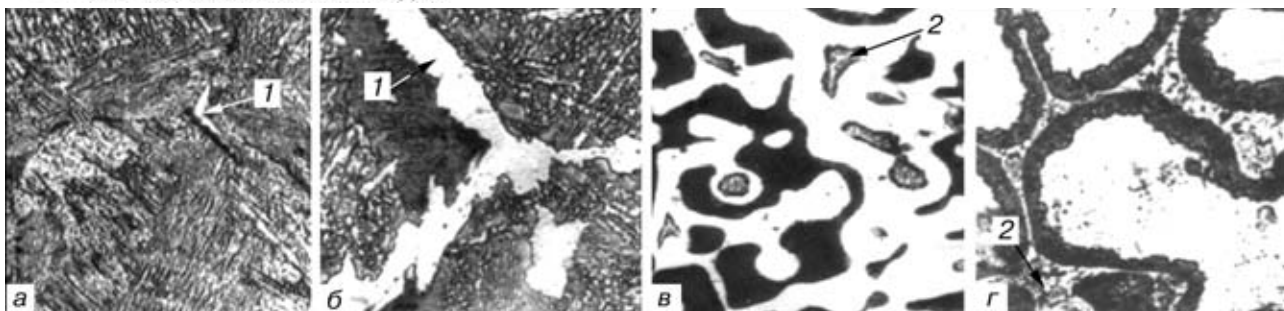


Рис. 2. Микроструктура (X500) стали 20ХГС с различным содержанием фосфора, %: а — без фосфора; б — 0,11; в — 1,28; г — 1,98; 1 — феррит; 2 — фосфидная эвтектика. Травление электролитическое в 20%-м растворе хромовой кислоты

личество фосфидной эвтектики, о чем свидетельствует увеличение пиков на кривых нагрева, соответствующих плавлению фосфидной эвтектики.

На кривых охлаждения стали с относительно невысоким содержанием фосфора первый (высокотемпературный) пик соответствует началу кристаллизации твердого раствора, а второй — перитектической реакции, которая согласно работе [10] протекает практически при постоянном, но различных для каждого из исследуемых материалов, значениях температуры (рис. 1, образцы I...V, кривые 2). Для этих сталей кристаллизация начинается с образования α -твердого раствора. В результате перитектической реакции образуется α -фаза.

При содержании фосфора 1,98 и 2,38 % на кривых охлаждения в высокотемпературной области зафиксирован один пик (рис. 1, образцы VII, VIII, кривые 2), что свидетельствует об отсутствии в стали фосфора перитектического превращения. Кристаллизация матрицы этих сталей происходит сразу с образованием γ -фазы.

Из данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что с повышенным содержанием фосфора значения температуры начала плавления и кристаллизации стали 20ХГС имеют тенденцию к понижению.

Проведено металлографическое исследование образцов стали 20ХГС с различным содержанием фосфора. Наплавленный металл типа стали 20ХГС без фосфора имеет бейнитную структуру с небольшим количеством феррита (рис. 2, а). Введение фосфора в качестве элемента-ферритизатора увеличивает количество ферритной фазы (рис. 2, б). Дальнейшее повышение содержания фосфора приводит к изменению соотношения между этими фазами, но участков фосфидной эвтектики в структуре этих сталей не обнаружено.

Появление фосфидной эвтектики зафиксировано при массовой доле фосфора 1,28 % (рис. 2, в). Эти данные подтверждают результаты ДТА: на кривой нагрева образца этой стали было зафиксировано первое появление пика, соответствующего плавлению фосфидной эвтектики (рис. 1, образец VI, кривые 1, 2). При содержании фос-

фора около 2,0% и более в структуре стали 20ХГС образуется сплошная сетка фосфидной эвтектики, окаймляющей зерна матрицы сплава (рис. 2, г).

Таким образом, в процессе исследований, выполненных с помощью метода ДТА, установлено, что в наплавленном металле типа 20ХГС опасные с точки зрения склонности к горячим трещинам фосфидные эвтектики появляются при содержании фосфора более 1 %. Этот факт должен учитываться при разработке наплавочных материалов, предназначенных для восстановления и упрочнения деталей, которые работают в условиях трения металла по металлу.

1. Мучник С. В. Химия и технология фосфорсодержащих сплавов. Фосфорсодержащие сплавы // Химия и технология фосфидов и фосфорсодержащих сплавов. — Киев: Ин-т проблем материаловедения, 1979. — С. 15–20.
2. Влияние фосфора на структуру и свойства металла швов при сварке низколегированных сталей / А. А. Алексеев, И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Ю. Д. Морозов // Автомат. сварка. — 1989. — № 4. — С. 7–10.
3. Spretnak J.W. Phosphorus in metallurgy. Phosphorus and its compounds // Technology, biological functions and application. — 1961. — Vol. 2. — P. 1823–1855.
4. Качко М. О., Марковський Е. А., Ильченко В. Д. Антифрикційні сплави заліза з фазами твердого мастила // Металознавство та обробка металів. — 1998. — № 3. — С. 17–21.
5. Влияние состава и структуры антифрикционного сплава железа на его износостойкость / Е. А. Марковский, В. Д. Ильченко, Л. И. Бутенко и др. // Процессы литья. — 1999. — № 2. — С. 60–64.
6. Бакфарт Ф. Г., Дашел С. Г. Новое о смазочных материалах // Сб. докл. Междунар. конф. по смазочным материалам (Вашингтон, 1964). — М.: Химия, 1967. — 651 с.
7. Самсонов Г. В., Панасюк А. Д., Боровикова М. С. Влияние фосфора на адгезию жидких металлов к тугоплавким соединениям // Получение, свойства и применение фосфидов: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 63–66.
8. Рябцев И. А., Кодратьев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Экотехнология, 1999. — 62 с.
9. Уэлдландт У. Термические методы анализа. — М.: Мир, 1978. — 526 с.
10. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1977. — 645 с.
11. Гудремон Э. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1960. — 1638 с.
12. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1962. — 1488 с.

Processes of melting and solidification of deposited metal of the steel 20KhGS type alloyed with 0.1...2.4 % phosphorus are studied by the differential thermal analysis method. It has been established that phosphide eutectics, dangerous from the standpoint of hot cracking susceptibility, may appear in this type of the deposited metal at a phosphorus content of more than 1 %.

Поступила в редакцию 19.11.2001



ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ, СОДЕРЖАЩИЕ ТВЕРДЫЕ СМАЗКИ, ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

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

Представлены результаты исследования композиционных порошков с твердыми смазками систем FeCr–TiC–Mo–C и Cr₂O₃–TiO₂–CaF₂, а также газотермических покрытий триботехнического назначения. Определены условия газотермического напыления, обеспечивающие получение плотных покрытий с высокой адгезионной и когезионной прочностью, при достаточно равномерном распределении твердой смазки по сечению.

Ключевые слова: газотермические покрытия, структура, фазовые превращения, твердые смазки, коэффициент трения, износостойкость, трение без смазки

Более 80 % средств, затрачиваемых на ремонт оборудования, используется для восстановления узлов трения. Долговечность их безремонтной эксплуатации находится в прямой зависимости от выбранного материала и конструктивного исполнения узлов.

Важным направлением в современной технике стало создание антифрикционных материалов, способных работать без смазки, поскольку отказ от нее существенно упрощает конструкции машин, облегчает их обслуживание, особенно в области низких и высоких температур, повышает надежность.

Одним из эффективных способов решения данной проблемы является применение защитных покрытий с антифрикционными свойствами. В этом случае создается комбинированный материал, в котором должны сочетаться необходимые прочностные свойства основы и высокая стойкость внешнего слоя (покрытия) в условиях воздействия внешней среды и контактных нагрузок.

Газотермическое напыление (ГТН) — перспективный способ нанесения защитных покрытий с антифрикционными свойствами, важной особенностью которого является возможность управления составом, структурой и свойствами покрытий путем применения различных порошковых композиций в виде механических смесей или композиционных порошков (КП), в качестве которых могут выступать металлы, сплавы, оксиды, бескислородные тугоплавкие соединения и твердые смазки (графит, нитрид бора, дисульфид молибдена, фтористый кальций и др.) [1–3].

В статье описываются исследования КП, в состав которых входят твердые смазки, а также результаты разработки и изучения многокомпонентных покрытий из этих порошков триботехнического назначения.

При проведении исследований применяли металлографию, микродюрометрию, рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), Оже-спектроскопию. Значения микротвердости являются интег-

ральной характеристикой материала покрытий, поскольку измерить микротвердость отдельных структурных составляющих в ряде случаев не представляется возможным из-за их малых размеров. Сведения о фазовом составе и равномерности распределения твердой смазки по объему покрытия устанавливается путем сопоставления результатов РСФА и РСМА.

Исследования антифрикционных свойств покрытий выполняли на триботехническом комплексе, аналоге зарубежного «pin-on-disk» по ASTM 99-90. В качестве твердых смазочных материалов были выбраны графит и фтористый кальций. Графит — традиционный материал со слоистой структурой. В условиях ГТН он не плавится, легко сублимирует и выгорает, поэтому может быть введен в объем покрытия только в составе КП [4]. Фтористый кальций — коррозионноустойчивый материал, предназначенный для работы при повышенных температурах [5, 6]. Он является наиболее технологичной твердой смазкой для нанесения способами ГТН, поскольку плавится при 1418 °С без разложения, не подвержен активному окислению с образованием нежелательных продуктов и может быть использован как в составе механических смесей, так и в виде КП.

КП, в состав которых входили твердые смазки, были изготовлены с использованием способа самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В табл. 1 приведены композиции этих материалов и их фазовый состав.

В КП FeCr–TiC–Mo–C, содержащем в качестве твердой смазки графит, роль пластичной составляющей играет FeCr; TiC является тугоплавкой твердой добавкой; молибден вводили для увеличения прочности сцепления. В КП Cr₂O₃–TiO₂–CaF₂, включающем в качестве твердой смазки CaF₂, оксиды хрома и титана играли роль износостойкой матрицы. Кроме того, оксид титана вводили для придания композиции пластичности. Внешний вид и микроструктура частиц КП приведены на рис. 1.

Покрытия наносили способами детонационного (ДН) и сверхзвукового воздушногазового плазменного напыления (СВГПН), а также плазменного напыления с использованием аргоноводород-

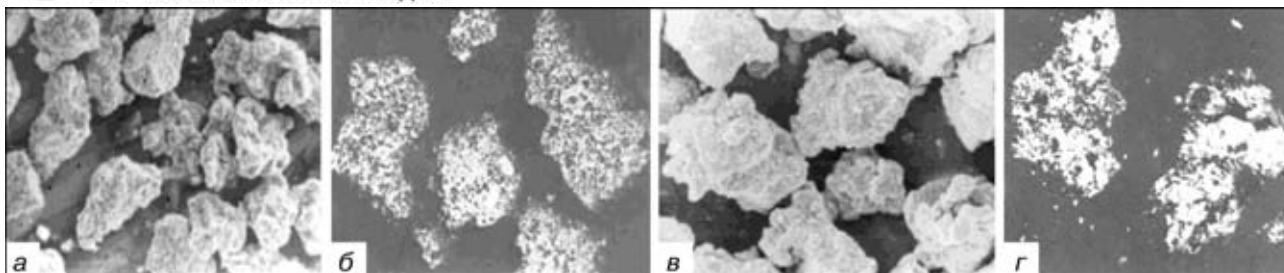


Рис. 1. Внешний вид (а, в), $\times 300$ и микроструктура (б, г), $\times 400$, частиц КП системы FeCr-TiC-Mo-C (а, б), $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ (в, г)

Таблица 1. Фазовый состав КП

Композиция напыляемого материала	Результаты РСФА*
15FeCr-70TiC-3Mo-12C	TiC, FeCr, C, Mo
40Cr ₂ O ₃ -45TiO ₂ -15CaF ₂	TiO ₂ (рутил), Cr ₂ O ₃ , CaF ₂ , Cr (следы), Ti (следы)

* Здесь и в табл. 3, 4 фазы и отдельные элементы расположены в порядке снижения интенсивности отражений рентгеновских лучей.

Таблица 2. Режимы ГТН

Способ нанесения покрытия	Рабочий газ	Расход газа, м ³ /ч	Ток, А	Напряжение, В	Дистанция, мм
ДН	C ₃ H ₈	0,5	—	—	100
	O ₂	2,0			
СВГПН	Воздух, P = 0,4 МПа	12	200...300	300...450	230
ПН-Ar+H ₂	Ar	2,3	450...500	60...65	130
	H ₂	0,1			

ной плазменной струи (ПН-Ar + H₂). Режимы ГТН покрытий приведены в табл. 2.

При исследовании покрытий из КП FeCr-TiC-Mo-C и $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$, полученных указанными способами, установлено следующее. Детонационные покрытия системы FeCr-TiC-Mo-C плотные, без сколов, хорошо прилегают к основе и имеют слоистую структуру (рис. 2, а), которая состоит из частиц белого (1) и серого (2) цвета, а также включений твердой смазки (3) (черного цвета). Структурная составляющая белого цвета, имеющая форму ламелей и частиц округлой формы, состоит из феррохрома с включениями мелкодисперсных частичек TiC (табл. 3). Вторая структурная составляющая покрытия темного цвета — это оксиды титана, легированные железом, молибденом и хромом. Наличие указанных фаз подтверждают результаты РСФА и РСМА.

Покрытия, нанесенные с использованием СВГПН, отличаются от детонационных более неоднородной и крупнозернистой структурой, однако с достаточно равномерным распределением графитных включений (рис. 2, б). По прочности сцепления первые практически не уступают вторым, однако из-за более высокой степени неоднородности структуры в данном случае зафиксирован разброс значений микротвердости.

И при ДН, и при СВГПН КП FeCr-TiC-Mo-C на воздухе происходит значительное окисление карбида титана с формированием оксидных фаз. Оставшаяся часть карбида титана находится как в виде зерен (размером 5...10 мкм) в металлической (феррохромовой) матрице, так и в виде мелкодисперсных выделений в оксидной фазе.

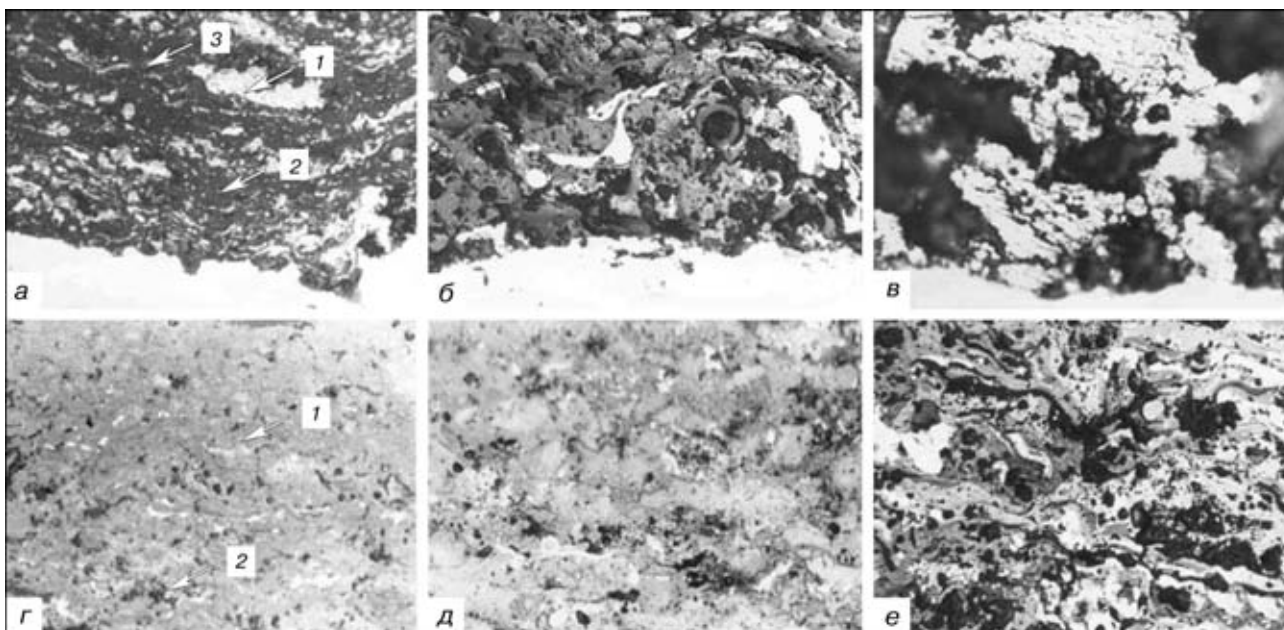


Рис. 2. Влияние способов напыления на структуру покрытий из КП системы FeCr-TiC-Mo-C (а-б); $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ (в-д); а, в — ДН; б, д — СВГПН; е, е — ПН-Ar+H₂; ($\times 400$)



Таблица 3. Характеристика покрытий, нанесенных различными способами ГТН

Композиция напыляемого материала	Способ нанесения покрытия	$\sigma_{сц}$, МПа	HV , ГПа	Фазовый состав покрытий (по результатам РСФА и РСМА)
15FeCr-70TiC-3Mo-12C	ДН	42,4...45,5	5,71...6,16	TiC, FeCr, TiO ₂ , Ti ₃ O ₅ , комплексные оксиды системы Ti-Cr-Fe-O, C, Mo (следы)
	СВГПН	36,5...39,5	2,21...7,07	TiC, Ti ₃ O ₅ , FeCr, комплексные оксиды системы Ti-Cr-Fe-O, C, Cr
	ПН-Ar+H ₂	<12,0	2,87...3,60	TiC, FeCr, C, Ti ₃ O ₅ (следы)
	ДН	39,5...42,5	2,94...4,90	Cr ₂ O ₃ , Ti ₂ Cr ₂ O ₇ , комплексные оксиды системы Ti-Cr-Ca-O, TiO ₂ , CaF ₂ , Cr, TiN
40Cr ₂ O ₃ -45TiO ₂ -15CaF ₂	СВГПН	35,0...39,0	2,86...4,73	Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , TiCrO ₃ , Ti ₂ Cr ₂ O ₇ , TiO, комплексные оксиды системы Ti-Cr-Ca-O, CaF ₂
	ПН-Ar+H ₂	20,0...29,5	4,82...7,42	Cr ₂ O ₃ , TiCrO ₃ , Ti ₂ Cr ₂ O ₇ , TiO, комплексные оксиды: Ti-Cr-Ca-O, CaF ₂ , Cr

Таблица 4. Фазовый состав поверхности покрытий после трибо-технических испытаний при 400 °С

Композиция напыляемого материала	Результат РСФА
15FeCr-70TiC-3Mo-12C	TiO ₂ , TiC, FeCr, C, Mo (следы), Ti ₃ O ₅ (следы)
40Cr ₂ O ₃ -45TiO ₂ -15CaF ₂	Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , Ti ₂ Cr ₂ O ₇ , CaF ₂ , Ca ₉ Cr ₆ O ₂₄ , TiN (следы)

При напылении данной композиции с использованием аргоноводородной плазменной струи образование новых фаз не происходит, если не считать появление следов оксида титана. Покрытие отличается высокой степенью пористости и неоднородности (рис. 2, в). По твердости и прочности сцепления с основой оно уступает покрытиям, нанесенным способами СВГПН и ДН. Согласно результатам металлографических исследований, количество твердой смазки в покрытиях составляет около 17 об. % по сравнению с 25 об. % (12 мас. %) в исходном порошке. При исследовании излома детонационных покрытий методом Оже-спектроскопии установлено, что около 30 ат. % углерода связано в карбид титана, а остальное приходится на долю свободного графита. Металлографический анализ и Оже-спектроскопия свидетельствуют о том, что при напылении КП FeCr-TiC-Mo-C происходит потеря углерода. Для ДН она составляет в среднем 30...32 %.

При ДН покрытий из КП на основе оксидов титана и хрома с фтористым кальцием формируются плотные покрытия с наиболее высокой прочностью сцепления с основой по сравнению с другими способами, в которых обнаружены сложный оксид титана хрома Ti₂Cr₂O₇ (1), комплексные оксиды Ti-Cr-Ca-O (2) и TiN, свидетельствующие о протекании процессов межфазного взаимодействия как в самих частицах, так и между компо-

нентами напыляемого материала и кислородом окружающего воздуха (рис. 2, г; табл. 3).

При СВГПН порошков Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂ также формируются покрытия, представляющие собой оксидную матрицу, в которой находятся включения твердой смазки черного цвета (рис. 2, д).

Как и при ДН, помимо исходных фаз Cr₂O₃, TiO₂ и CaF₂, в покрытии обнаружены Ti₂Cr₂O₇, комплексные оксиды Ti-Cr-Ca-O, а также новый оксид TiCrO₃ (табл. 3). Покрытие уступает по качеству детонационному, поскольку в нем обнаружены поры и выкрашивание, свидетельствующие о снижении его когезионной прочности.

При плазменном напылении того же КП с использованием Ar + H₂ в качестве плазмообразующего газа формируются покрытия с более высокой твердостью (табл. 3). Структура покрытия плотная, ламелярная, причем внутренняя структура ламелей также характеризуется гетерогенностью (рис. 2, е). Кроме других оксидов, в покрытии обнаружен оксид титана TiO. Хлопьевидные включения твердой смазки (черного цвета) распределены по сечению покрытия достаточно равномерно.

В результате проведения комплексных исследований покрытий определены режимы ГТН, обеспечивающие получение плотных покрытий с высокой адгезионной и когезионной прочностью при достаточно равномерном распределении твердой смазки по сечению. С точки зрения качества покрытия (плотности, однородности структуры и максимальной прочности сцепления с основой) для дальнейших триботехнических испытаний в условиях сухого трения были выбраны покрытия, полученные способом ДН из порошков системы FeCr-TiC-Mo-C и Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂.

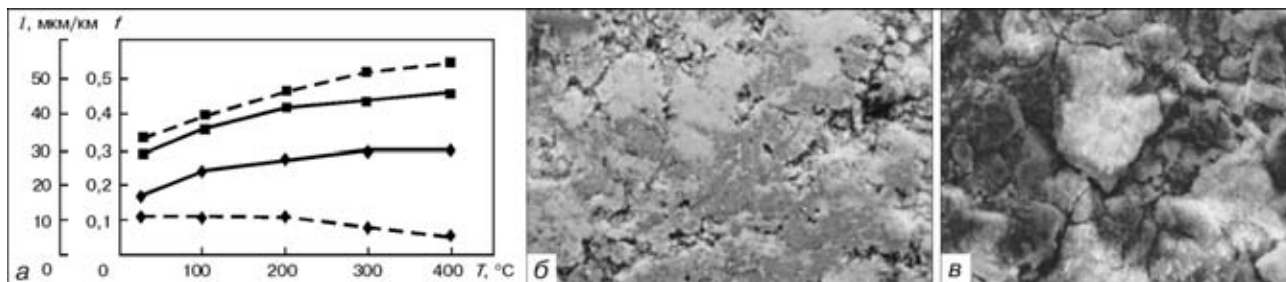


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f (сплошная кривая) и износа I (штриховая кривая) от температуры (а); внешний вид дорожек трения покрытий из КП системы Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂ (б) и FeCr-TiC-Mo-C (в), X750



Исследования антифрикционных свойств покрытий проводили при следующих параметрах: $T = 20 \dots 400$ °С, $P = 30$ МПа, $v = 0,5$ м/с, путь трения 1000 м, контакт по Герцу.

Отработку методики испытаний осуществляли на образцах при комнатной температуре. Установлено, что время приработки поверхностей трения не превышало 3 мин после начала испытания. Результаты триботехнических испытаний покрытий, нанесенных ГТН из порошков $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ и FeCr-TiC-Mo-C при повышенных температурах, представлены на рис. 3 а. После испытаний изучали фазовый состав (табл. 4) и поверхность трения покрытий (рис. 3, б, в).

С повышением температуры от 20 до 200 °С у покрытия FeCr-TiC-Mo-C обнаружено увеличение коэффициента трения при стабилизации износа. При дальнейшем повышении температуры до 400 °С коэффициент трения принимает постоянное значение, не превышающее 0,30, а износ стабилизируется и несколько уменьшается.

Для снимков поверхностей трения, сделанных с помощью оптического микроскопа и приведенных на рис. 3, характерны такие процессы: выглаживание поверхности (наиболее заметное по краям пор), сопровождаемое разрушением гребней шероховатости; заполнение микропор частицами износа, отделившимися от покрытия и контртела. Разрушение микровыступов происходит до установления равновесной шероховатости, при которой процесс трения характеризуется оптимальными для данных условий работы параметрами. После исследования способом РСМА поверхности дорожки трения было зафиксировано образование оксидов титана TiO_2 , Ti_3O_5 и графитной пленки, защищающей основной металл от внешних воздействий, а также существенное повышение значений антифрикционных характеристик трибопары.

Для покрытия $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ происходит значительное увеличение коэффициента трения (до 0,45) и износа (до 55 мкм) во всем температурном интервале, связанное с тем, что при повышении температуры образуются сложные оксиды $\text{Ti}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и $\text{Ca}_9\text{Cr}_6\text{O}_{24}$, снижается когезионная прочность, а это приводит к выкрашиванию материала покрытия и образованию сетки трещин (рис. 3, в). В то же время в системе FeCr-TiC-Mo-C , содержащей

пластичный компонент FeCr , такого явления не зафиксировано.

Выводы

1. Установлено, что качество антифрикционных покрытий, их структура, фазовый состав, твердость и триботехнические свойства зависят от способа и режимов ГТН, а также состава и структуры исходного порошка, размера частиц.

2. При газотермическом напылении КП развиваются процессы межфазного взаимодействия частиц напыляемого порошка с окружающей средой и внутри самих частиц между составляющими его компонентами. В КП FeCr-TiC-Mo-C зафиксировано окисление TiC и FeCr , частичное выгорание твердой смазки. В порошке $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ происходит образование сложных оксидов также внутри самих частиц.

3. Триботехнические свойства ГТН с твердыми смазками определяются их фазовым составом и структурой. Наиболее высокими показателями антифрикционных свойств как при нормальной, так и при высоких температурах отличаются покрытия из порошка FeCr-TiC-Mo-C , поскольку они представляют собой достаточно пластичную матрицу, состоящую из оксида титана и феррохрома, упрочненную твердыми включениями карбида титана с равномерно распределенным по сечению графитом в качестве твердой смазки. Указанным покрытиям уступают покрытия из порошка $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$, состоящие лишь из износостойких оксидных фаз с включениями CaF_2 , которые характеризуются более низкой когезионной прочностью.

1. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. — Киев: Наук. думка, 1980. — 404 с.
2. Энциклопедия неорганических материалов: В 2 т. — Киев: Укр. сов. энцикл. — 1997. — Т. 1. — С. 88–94.
3. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. — М.: Химия, 1967. — 320 с.
4. Вайштейн В. Э., Трояновская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. — М.: Машиностроение, 1968. — 180 с.
5. Влияние фторида кальция на формирование антизадириного слоя в порошковых антифрикционных материалах / И. М. Федорченко, В. Т. Бондарь, Ю. Д. Шевчук и др. // Трение и износ. — 1989. — 10, № 1. — С. 97–103.
6. Порошковая металлургия сталей и сплавов / Д. И. Дзеньладзе, Р. П. Щегалева, Л. С. Голубева и др. — М.: Металлургия, 1978. — 264 с.

The paper presents the results of investigation of composite powders with FeCr-TiC-Mo-C and $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$ greases, as well as thermal coatings for tribotechnical purposes. Conditions of thermal spraying were determined providing dense coatings with a high adhesion and cohesion strength at a uniform enough distribution of the grease over the section.

Поступила в редакцию 18.10.2001,
в окончательном варианте 28.11.2001

СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНА СО СТАЛЬЮ (Обзор)

Л. С. КИРЕЕВ, В. Н. ЗАМКОВ, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен обзор литературы по сварке плавлением титана со сталью: электронно-лучевая, аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. Показано, что сваривать непосредственно титан со сталью не удастся из-за образования хрупких интерметаллидных фаз. Поэтому была предложена технология сварки через промежуточные барьерные вставки. Сварка титана со сталью в твердожидком состоянии возможна без применения промежуточных вставок. Такое соединение образуется с помощью рельефной контактной сварки с программируемым конечным внутренним выплеском и последующей проковкой зоны соединения.

Ключевые слова: сварка плавлением, электронно-лучевая сварка, аргодуговая сварка вольфрамовым электродом, рельефная контактная сварка, сварка в твердожидком состоянии, титан, сталь, интерметаллидные фазы, промежуточные барьерные вставки, карбиды ванадия, граница раздела титан-сталь

Проблема создания титаностальных сварных конструкций привлекала внимание исследователей еще в конце 1950-х годов, когда началось промышленное использование титана в различных областях техники. Интерес был обусловлен, с одной стороны, уникальными свойствами титана и сплавов на его основе, а с другой, — высокой стоимостью титановых полуфабрикатов. Предполагалось, что использование элементов из титана (где это необходимо по условиям работы изделия) и стали в одной сварной конструкции позволит повысить как ее эксплуатационные характеристики, так и экономическую эффективность. Однако все попытки непосредственной сварки плавлением титана со сталью не давали положительных результатов [1, 2]: в швах возникали трещины. Исследования показали, что причина их появления обусловлена образованием хрупких интерметаллидных фаз при сплавлении титана с железом и большинством легирующих элементов сталей [3], а сварка титана со сталью возможна лишь с применением промежуточных вставок, которые хорошо свариваются с обоими металлами. Обоснование выбора материалов для промежуточных вставок было впервые дано в работе [4].

Титан образует непрерывные твердые растворы с цирконием, гафнием, ванадием, ниобием, молибденом, танталом и благодаря этому удовлетворительно сваривается с данными металлами [4–7]. В свою очередь из металлов этой группы непосредственно со сталью удается сварить только ванадий. Однако пластичность и вязкость металла таких швов зависят от соотношения в них количества ванадия, железа и легирующих элементов стали. Это прежде всего вызвано тем, что в системе Fe–V при массовой доле ванадия в пределах от 22 до 65 % в металле образуется хрупкая σ -фаза [7]. Отрицательное влияние на пластичность швов ванадия со сталью оказывают углерод (в связи с образованием карбида ванадия) [8] и легирующие элементы стали, например, никель, марганец, крем-

ний и др., если их массовая доля в шве превышает соответственно 18, 2,8 и 1,6 % [9]. Чтобы швы титана с ванадием имели удовлетворительные свойства, в них должно быть определенное соотношение титана и ванадия, при котором в металле образуется однофазная термически стабильная β -структура.

Следует еще раз подчеркнуть, что ванадий — это единственный металл, который можно соединять непосредственно со сталью способом сварки плавлением. Во всех других случаях промежуточная вставка между титаном и сталью состоит из двух металлов, например, из тантала или ниобия и меди или сплавов на ее основе [4].

В настоящее время для изготовления титаностальных конструкций способом сварки плавлением используют две технологические схемы. В соответствии с первой сварка осуществляется с использованием многослойных вставок, заранее изготовленных с применением сварки давлением (взрывом, совместной прокаткой и т. п.). Крайними металлами таких многослойных вставок являются, с одной стороны, титан, а с другой, — сталь. В этом случае с помощью сварки плавлением соединяются однородные металлы (титан с титаном и сталь со сталью). По другой схеме соединение осуществляется с использованием одного (ванадия) или нескольких промежуточных металлов-вставок, которые последовательно свариваются плавлением друг с другом [1].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Технология ЭЛС титанового сплава ОТ4-1 со сталями марок ВНС2, 12Х18Н12Т, ЭП56, ферритными хромистыми сталями и железом рассмотрена в работах [8–12]. Сварку выполняли с применением вставки из сплава ванадия марки ВВ8. Прочные и достаточно пластичные швы ванадия со сталью были получены при сварке со смещением пучка на сталь на расстояние 1,1...1,3 мм от стыка. При сварке сплава ОТ4-1 с ванадием пучок смещали на титан на расстояние 0,5 мм от стыка. Сварку выполняли на скорости $v = 45$ м/ч при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ. Ток фокусировки составлял $I_{\phi} = 118$ мкА, а ток пучка — 59 и 63 мкА соответственно для швов ВВ8 + ВНС2 и ВНС2 + ОТ4-1. При сварке на указанном режиме массовая доля ванадия в шве ВВ8 + ВНС2 не превышает 15 %, а основной структурной составляющей металла шва является ле-



гированный ванадием пластинчатый феррит [11]. Металл шва с такой структурой отличается относительно высокой пластичностью, а прочность сварного соединения не уступает прочности сплава ВВ8. Аналогичные результаты были получены при сварке титана со сталями марок 12Х18Н12Т и ЭП56.

При сварке титана с железом, низкоуглеродистой или ферритной хромистой сталью металл шва необходимо дополнительно легировать 2...16 мас. % никеля в зависимости от концентрации углерода в металле шва. Такое легирование обеспечивает вязкое разрушение швов, содержащих до 0,06 мас. % углерода. При большей его концентрации (независимо от содержания никеля) зафиксировано хрупкое разрушение по зоне сплавления ванадий-швов [8].

Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом. При дуговой сварке титана со сталью с использованием промежуточной вставки из сплава ванадия основная проблема состоит в том же, что и при ЭЛС. Необходимо получить швы определенного химического состава [12]. В шве сталь-ванадий массовая доля последнего не должна превышать 15 %, а в шве титан-ванадий — 25...30 %, что обеспечивает однофазную термически стабильную β -структуру. Для этого сварку обоих швов осуществляли со смещением электрода относительно стыка на 0,8...1,0 мм. Скорость сварки не должна быть менее 30 м/ч. Следует отметить, что сварные соединения титана со сталью, полученные через вставку из ванадия, могут достаточно надежно работать и при повышенных температурах в интервале 200...300 °С [13], и в агрессивной среде [14]. При более высоких значениях температуры (500...600 °С) соединения быстро теряют пластичность вследствие выделения σ -фазы и образования карбидов ванадия [8, 13].

Сварка титана со сталью в твердожидком состоянии. В работах [15–23] сформулирована и экспериментально подтверждена принципиальная возможность получения соединений титана со сталью без промежуточных вставок. Такое соединение образуется с помощью рельефной контактной

сварки с программируемым конечным внутренним выплеском и последующей проковкой зоны соединения.

Как следует из работы [16], при рельефной контактной сварке соединение образуется вначале в жидкой фазе в результате плавления свариваемых заготовок под действием тепла, выделяющегося в зоне стыка при прохождении тока, а после выплеска и проковки — в твердожидкой фазе. В зависимости от физико-химических свойств свариваемых материалов и параметров сварки (тока, формы рельефа, усилия сжатия) соотношение жидкой и твердой фаз может изменяться. В случае сварки титана со сталью желательно, чтобы в результате выплеска и проковки из зоны сварки было удалено максимальное количество жидкого металла ядра, и соединение сформировалось преимущественно в твердой фазе. В результате исследований, представленных в работе [17], были сформулированы необходимые условия образования таких соединений титана со сталью, определены требования к форме рельефов на титановых и стальных деталях, к форме электродов и режимам сварки, создана математическая модель для расчета температурно-временных процессов [19], разработано соответствующее оборудование для практического использования этой технологии.

Экспериментально при сварке сталей толщиной 10 мм марок Ст3, 12Х13, 10Х18Н10Т с титановыми сплавами толщиной 2 мм марок ВТ1-0, ОТ4-1, ВТ5-1 и ВТ20 установлено, что (при прочих равных условиях) прочность сварной точки на отрыв и работа разрушения при ударном изгибе снижаются с увеличением легирования стали [18]. Все соединения имеют в переходной зоне диффузионную прослойку толщиной 1...8 мкм. При равной толщине прослойки прочность точки зависит от ее химического состава и площади контакта. Алюминий, который попадает в шов из титанового сплава, во всех случаях снижает его прочность. Хром, а в большей степени хром и никель, несколько повышает прочностные характеристики (таблица). Сварные соединения обычно разрушаются из-за хрупкого скола. Очагом зарождения начальных микротрещин, как правило, является канал, по которому происходит внутренний выплеск, и разрушение сопровождается частичным вырывом приповерхностных слоев титана.

Таким образом, работоспособность сварных соединений титана со сталью, выполненных рельефной сваркой, зависит от химического состава зоны соединения, а также от формы и количества остатков литого ядра, т. е. факторов, определяемых полнотой реализации выплеска, и характера физико-химических процессов на границе раздела титан-сталь. Этот технологический процесс и оборудование для его осуществления [22] главным образом предназначены для облицовки стальных емкостей титановым листом.

Анализ литературы показал, что сварка плавлением титана со сталью возможна только с применением промежуточных барьерных слоев. Такие соединения характеризуются удовлетворительными механическими свойствами, однако имеют весь-

Марка стали	Марка титана	Усилие отрыва, кН	Работа разрушения при изгибе, Дж	Угол загиба, град
Ст3	ВТ1-0	4,0	20,0*	60
	ОТ4-1	2,8	2,7	11
	ВТ5-1	2,7	2,7	10
	ВТ20	2,6	1,5	8
12Х13	ВТ1-0	4,2	20,0*	60
	ОТ4-1	3,6	7,5	26
	ВТ5-1	3,2	—	—
	ВТ20	3,1	—	—
10Х18Н10Т	ВТ1-0	5,9	20,0*	60
	ОТ4-1	4,9	20,0*	60
	ВТ5-1	4,7	13,1	35
	ВТ20	3,5	6,9	24

* Образцы не разрушились.

ма низкую коррозионную стойкость и недостаточно надежны в процессе эксплуатации, особенно при повышенных температурах.

Что касается сварки титана со сталью в твердодожидком состоянии, то этот способ имеет весьма ограниченное применение.

1. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов // Под ред. С. М. Гуревича. — Киев: Наук. думка, 1979. — 300 с.
2. Metzger G., Lison R. Electron beam welding of dissimilar metals // *Welding J.* — 1976. — 55, № 8. — С. 230–240.
3. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // *Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы.* — 1965. — 1, № 1. — С. 29–36.
4. Гуревич С. М., Замков В. Н. Сварка титана со сталью // *Автомат. сварка.* — 1962. — № 8. — С. 21–26.
5. Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М. Сварка разнородных металлов. — Киев: Техніка, 1975. — 205 с.
6. *Сварка разнородных металлов и сплавов* / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. — М.: Машиностроение, 1984. — 239 с.
7. Лариков Л. Н., Рябов В. Р., Фальченко В. М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М.: Машиностроение, 1975. — 189 с.
8. Гонсеровский Ф. Г. Влияние углерода на ударную вязкость сварных соединений ванадия с железом и ферритными сталями // *Свароч. пр-во.* — 1972. — № 11. — С. 7–8.
9. Гонсеровский Ф. Г. Влияние легирующих элементов на ударную вязкость сварных соединений ванадия с нержавеющей сталью // *Автомат. сварка.* — 1972. — № 10. — С. 17–20.
10. *Электроннолучевая* сварка титанового сплава ОТ4-1 со сталью ВНС-2 / В. Р. Петренко, Ф. Н. Рыжков, А. В. Башкатов и др. // *Свароч. пр-во.* — 1974. — № 10. — С. 19–20.
11. Гонсеровский Ф. Г. Особенности получения пластичных сварных соединений ванадия со сталью // Там же. — 1972. — № 12. — С. 10–12.
12. Стрижевская Л. Г., Старова Л. Л., Куликов Ф. Р. Свариваемость и свойства сварных соединений титана со сталью, выполненных с применением ванадиевого сплава: Лекции по сварке разнородных металлов. — М.: О-во «Знание», 1973. — Ч. 2. — С. 46–51.
13. Стрижевская Л. Г., Куликов Ф. Р., Курочко Р. С. Высокоресурсные сварные соединения титана со сталью // *Материалы 8-го всеююз. совещ. по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 30–33.
14. Гуревич С. М., Куликов Ф. Р., Дружинина И. П. Коррозионная стойкость сварных соединений титана со сталью // *Материалы 8-го всеююз. совещ. по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 33–35.
15. Быковский О. Г. Плакирование титаном стальных аппаратов для химического производства // *Свароч. пр-во.* — 1984. — № 11. — С. 34–35.
16. *О роли* выплеска при рельефной сварке титана со сталью / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // Там же. — 1988. — № 7. — С. 4–5.
17. *Выбор* параметров режима рельефной сварки титана со сталью / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // *Автомат. сварка.* — 1988. — № 11. — С. 61–64.
18. *Влияние* состава исходных материалов на формирование и свойства точечных сварных соединений сплавов титана со сталью и никелем / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // *Свароч. пр-во.* — 1988. — № 11. — С. 15–17.
19. Быковский О. Г., Горбунов А. Д. Математическое моделирование теплового состояния металла при контактной точечной сварке // Там же. — 1990. — № 7. — С. 36–38.
20. Быковский О. Г., Пиньковский И. В., Рябов В. Р. Фрактнографическое исследование разрушения сварных титано-стальных соединений // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 8. — С. 5–8.
21. *Особенности* контактной сварки титана ВТ1-0 с низкоуглеродистой сталью / И. В. Пиньковский, О. Г. Быковский, И. В. Ткаченко, В. Р. Рябов // *Свароч. пр-во.* — 1987. — № 5. — С. 11–12.
22. *Точечная* рельефная сварка титана со сталью в монтажных условиях / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло, В. Р. Рябов // Там же. — 1988. — № 12. — С. 4–5.
23. *Смачиваемость* титана и стали сплавами системы Ti-Fe при сварке плавлением / В. Р. Рябов, О. Г. Быковский, В. Е. Самойлов, И. В. Ткаченко // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 11. — С. 10–13.

Review of literature on titanium-steel fusion welding is presented: electron beam and argon-arc tungsten electrode welding. It is shown that it is difficult to weld titanium with steel directly due to formation of brittle intermetallic phases. In this connection the technology of welding was suggested using intermediate barrier inserts. Titanium-steel welding in a solid-liquid state is possible without use of intermediate inserts. This joint is made using a projection resistance welding with a programmed final inner splash and subsequent forging of the joint zone.

Поступила в редакцию 25.09.2001,
в окончательном варианте 16.10.2001



КОМПЛЕКСНАЯ МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ВАГОНОВ БУНКЕРНОГО ТИПА

Б. Г. ЦЫГАН, Л. И. ПИРОГОВ, кандидаты техн. наук (Кременчуг. гос. политехн. ун-т),
А. В. ДОНЧЕНКО, канд. техн. наук, **Ю. А. ТРУБАЧЕВ**, инж. (Укр. гос. НИИ вагоностроения, г. Кременчуг)

Рассмотрены прогрессивные технологические процессы, изготовления сварных металлоконструкций вагонов, бункерного типа и применяемое для их осуществления технологическое оборудование. Механизация и автоматизация наиболее трудоемких операций позволяет существенно повысить производительность труда и уменьшить затраты, связанные с изготовлением вагонов. Описанные конструкции технологического оборудования, могут быть широко использованы на многих машиностроительных заводах при выполнении сборочно-сварочных работ.

Ключевые слова: механизация, автоматизация, сварка, вагоностроение, технологический процесс, технологическое оборудование

На железных дорогах многих стран мира успешно эксплуатируются саморазгружающиеся вагоны с кузовом в виде бункера (хопперы), которые используются для бестарной перевозки сыпучих грузов, насчитывающих около 600 наименований. Они бывают двух типов: закрытые (для перевозки сыпучих грузов, требующих защиты от атмосферного воздействия) и открытые (для остальных грузов — уголь, железные окатыши, гравий и пр.).

Вагоны-хопперы, выпускаемые в Украине для перевозки цемента, минеральных удобрений, торфа, железных окатышей и т. д., по своим важнейшим параметрам (коэффициенту тары, объему и массе перевозимого груза) превосходят аналоги из России, Германии, Франции и других стран. Практически все бункерные вагоны имеют типовую цельносварную металлоконструкцию кузова. В то же время они отличаются между собой кон-

струкцией и количеством бункеров, загрузочных и разгрузочных люков, расположением последних относительно пути, механизмами разгрузки. Наиболее высокий уровень механизации и автоматизации сборочно-сварочных работ при производстве бункерных вагонов в Украине достигнут на ОАО «Стахановский вагоностроительный завод». Изготавливаемый в настоящее время на этом заводе четырехосный закрытый саморазгружающийся вагон (рис. 1) предназначен для перевозки по всей сети железных дорог стран СНГ (колеи 1520 мм) насыпных гранулированных, крупнозернистых, кристаллических неслеживающихся некоррозионноактивных минеральных удобрений, а также сыпучего порошкообразного сырья (апатитового концентрата, фосфорной муки).

Вагон представляет собой цельносварную конструкцию. Загрузка осуществляется через люки, расположенные в крыше. Они оборудованы крышками, которые обеспечивают надежное запираение и уплотнение для предотвращения попадания влаги внутрь вагона. В нижней части кузова по обе

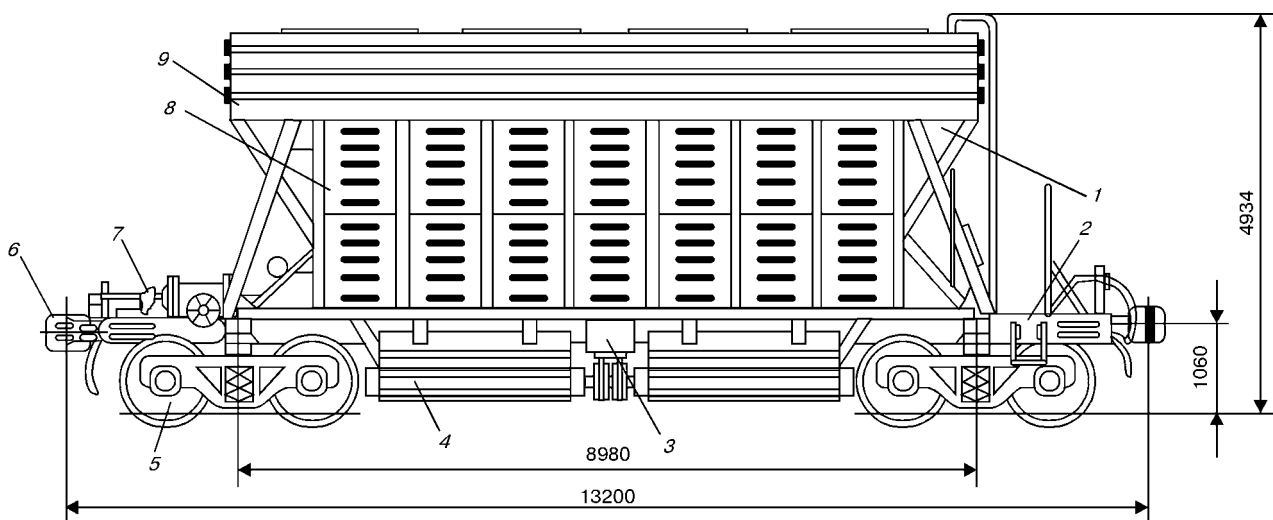


Рис. 1. Вагон-хоппер для минеральных удобрений (модель 19-923): 1 — кузов с бункерами; 2 — рама; 3 — механизм разгрузки; 4 — крышки разгрузочных люков; 5 — ходовая часть; 6 — автосцепное устройство; 7 — автоматический тормоз; 8 — стена боковая; 9 — крыша с загрузочными люками

стороны вагона расположены по два щелевых разгрузочных лока, открывание и закрывание которых производится механизмом с пневматическим приводом. Для организации производства этого вагона проектнотехнологическими институтами были разработаны технологические процессы, которые предусматривали использование наиболее прогрессивного технологического оборудования и оснащения, комплексно-механизированные поточные линии с жесткой и гибкой связью, предметно-замкнутые цехи и участки. Производство организовано по замкнутому циклу, сварка узлов и общая сборка вагона размещены в двух пролетах сборочно-сварочного цеха. Основным принципом компоновки цеха является обеспечение прямооточности производственного процесса изготовления рамы, бункеров, крыши, боковых и торцевых стен, кузова.

Основным базовым узлом вагона является рама (рис. 2). Она состоит из хребтовой балки 1, двух шкворневых балок 4, коньков продольного 2 и поперечного 5, нижнего 7 и лобового 6 листов, кронштейна рычага 3, пятника 8. Технологический процесс сборки рамы начинается с изготовления хребтовой балки, которая выполняется из двух балок зетового профиля № 31, свариваемых между собой продольным стыковым швом. На концевых частях балки устанавливаются передние упоры автосцепного устройства. Сверху приваривается конек, придающий ей дополнительную прочность и способствующий лучшему сыпанию груза. Сборка и сварка хребтовой балки организованы на специализированном участке (рис. 3).

Зетовые профили в цех доставляются в контейнерах (рис. 3, а), откуда они поштучно передаются на стэнд обрезки их по длине, а затем с помощью пневматических манипуляторов 1 укладываются в стэнд сборки 2 (рис. 3, б). Автоматическая сварка стыкового шва хребтовой балки выполняется одновременно двумя сварочными ав-

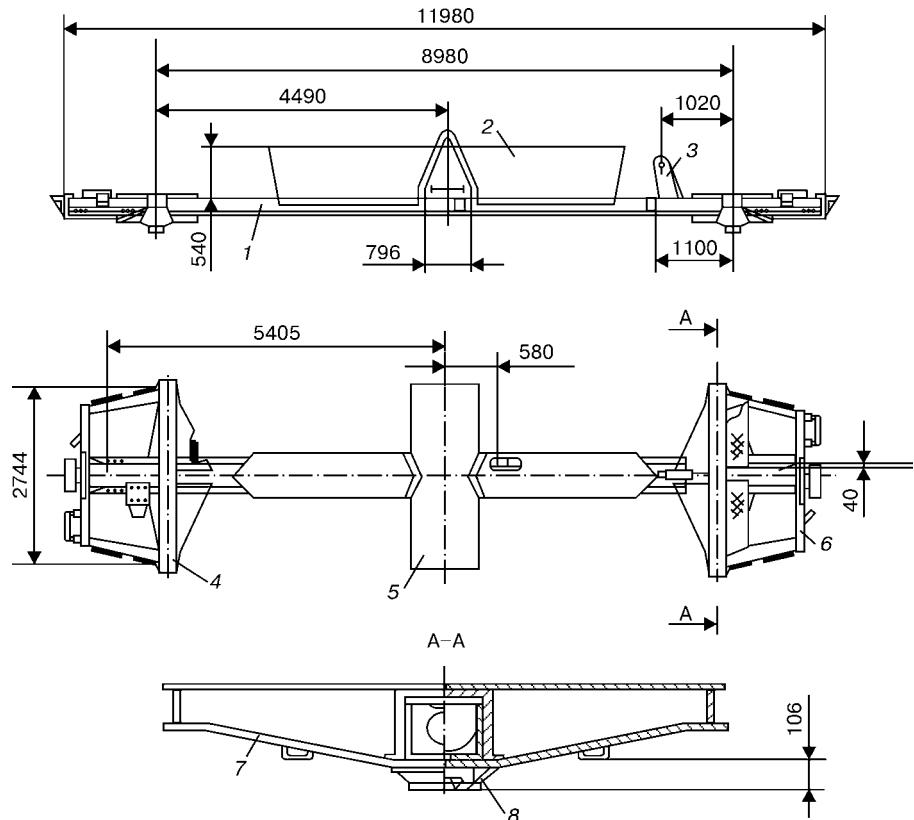


Рис. 2. Рама вагона-минераловоза (обозначения см. в тексте)

томатами А-1412 на флюсо-медной подушке (рис. 3, в). Для получения качественного формирования валика шва зазоры, образовавшиеся при сборке, заполняются гранулированными металлическими присадками из проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм. Для уменьшения деформации сварка балки выполняется с применением упругого обратного ее выгиба с последующим закреплением и использованием обратнотупенчатого способа, т. е. одним автоматом производится накладывание шва от начала балки до ее середины, а вторым — от середины до конца балки.

Окончательная сборка узла, промежуточный контроль, исправление некачественных участков сварного шва и сдача изделия работникам ОТК производится в цапфенном сварочном кантователе (рис. 3, ж). Собранная (совместно с передними и задними упорами) хребтовая балка перемещается на агрегатный двухсторонний сверлильный станок модели АМ 15-411 (рис. 3, з). Затем она укладывается на тележку-кантователь 4 (рис. 3, д), где производится операция клепки, выполняемая гидравлическими поворотными скобами 3. Заклеп-

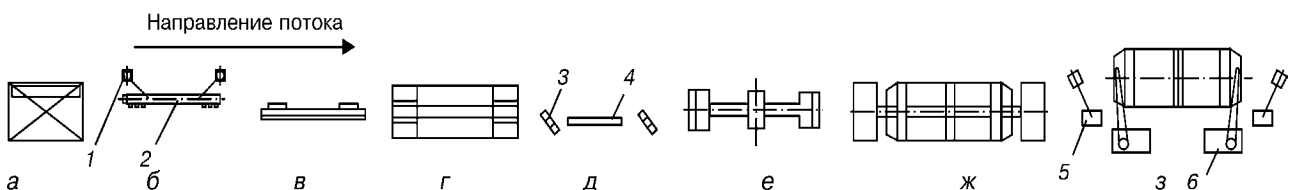


Рис. 3. Схема участка сборки и сварки рам вагона-минераловоза: а — контейнер для зетового профиля; б — стэнд сборки хребтовой балки; в — установка автоматической сварки; г — двухсторонний сверлильный станок; д — тележка-кантователь для клепки упоров; е — стэнд сборки рамы; ж — цапфенный сварочный кантователь; з — стэнд сверловки и клепки пятников (остальные поз. см. в тексте)

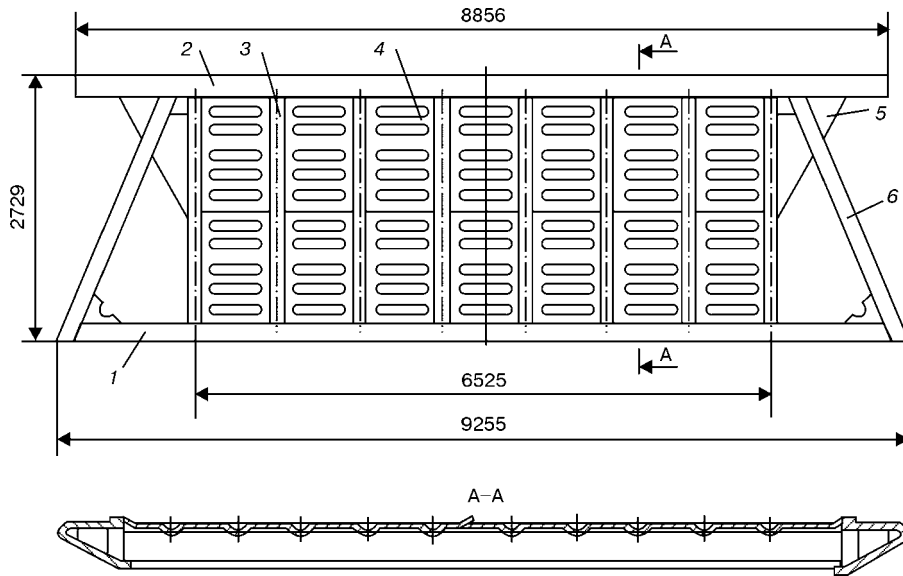


Рис. 4. Общий вид боковой стены вагона-минераловоза: 1 — обвязка нижняя; 2 — обвязка верхняя; 3 — стойка; 4 — лист обшивки; 5 — лист крайний; 6 — раскос

ки нагреваются в электрической печи, обеспечивающей быстрый (в течение 20... 25 мин) нагрев 20 заклепок диаметром 27... 30 мм до температуры 850... 900 °С, предотвращение их перегрева и образования окалины. В качестве нагревательных элементов используются карбидокремниевые электроды, на которые подается напряжение от источника сварочного тока ТДФ-1200.

Далее хребтовая балка перемещается и укладывается в стенд для сборки (рис. 3, е) с узлами шкворневой балки, коньками (продольным и поперечными) и другими деталями, входящими в раму. Все собираемые элементы прихватываются между собой и собранный узел закрепляется в сварочном кантователе (рис. 3, ж). Сваренная рама мостовыми кранами устанавливается в стенд сверловки (рис. 3, з), где радиально-сверлильными станками 6 выполняются отверстия и затем приклейка к раме пятников, осуществляемых при помощи подвесных гидроскоб 5. Затем она собирается с предварительно изготовленными бункерами и сваривается в кантователе с подъемными центрами. Готовое и принятое ОТК изделие передаточной тележкой перемещается на стенд общей сборки кузова вагона.

Боковая стена вагона-минераловоза (рис. 4) представляет собой каркасную конструкцию, состоящую из нижней 1 и верхней 2 обвязок, соединенных между собой вертикальными стойками 3. Для придания каркасу жесткости у крайних

стоек устанавливаются раскосы 6. Верхняя обвязка выполняется из гнутого профиля коробчатого сечения открытого типа, нижняя и раскосы — из квадратной трубы толщиной 5 мм. Стойки выполняются из двутавра № 12. Обшивка 4 боковой стены изготавливается из листового профильного проката толщиной 3 мм с периодически повторяющимися гофрами. К стойкам полотно обшивки приваривается электрозаклепками диаметром 21 мм с шагом 110 мм, а к верхней и нижней обвязкам — нахлесточным швом. Верхняя и нижняя обвязки, стойки и подкосы изготавливаются из стали 09Г2Д, обшивка боковой стены — из стали 10ХНДП или 09Г2Д.

Производство боковых стен организовано на комплексно-механизированной поточной линии, состоящей из четырех рабочих мест и начинается со сборки и сварки полотна обшивки на специализированной установке (рис. 5, а). Полотно обшивки состоит из двух гофрированных листов, образующих между собой нахлесточное соединение, свариваемое с обеих сторон угловым швом катетом 3 мм. Листы мостовым краном укладываются по упорам на стенд и фиксируются боковыми прижимами. К началу места сварки на маршевой скорости подводится сварочный портал и производится автоматическая сварка полотна в углекислом газе проволокой диаметром 2 мм со скоростью 80 м/ч. Предотвращение образования зазоров в нахлесточном соединении достигается путем сжатия свариваемых кромок прижимным роликом, смонтированным на портале.

После сварки первого шва изделие раскрепляется, с помощью мостового крана на этом же рабочем месте кантуется на 180° и производится сварка второго шва. Готовое изделие поднимается подъемным рольгангом, встроенным в раму стенда, и перемещается на стенд сборки с каркасом боковой стены (рис. 5, б). На поступившее в стенд сборки полотно обшивки укладываются по упорам распорные стойки, верхняя и нижняя обвязки и листы обшивки. Все детали соединяются между собой

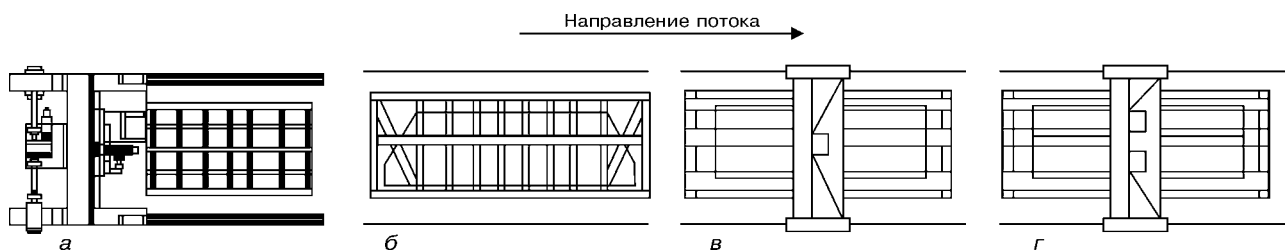


Рис. 5. Схема поточной линии сборки и сварки боковой стены вагона-минераловоза: а — установка сборки и сварки полотна обшивки; б — стенд сборки каркаса боковой стены с полотном; в — установка ДТС полотна с каркасом; г — установка автоматической сварки полотна с обвязками

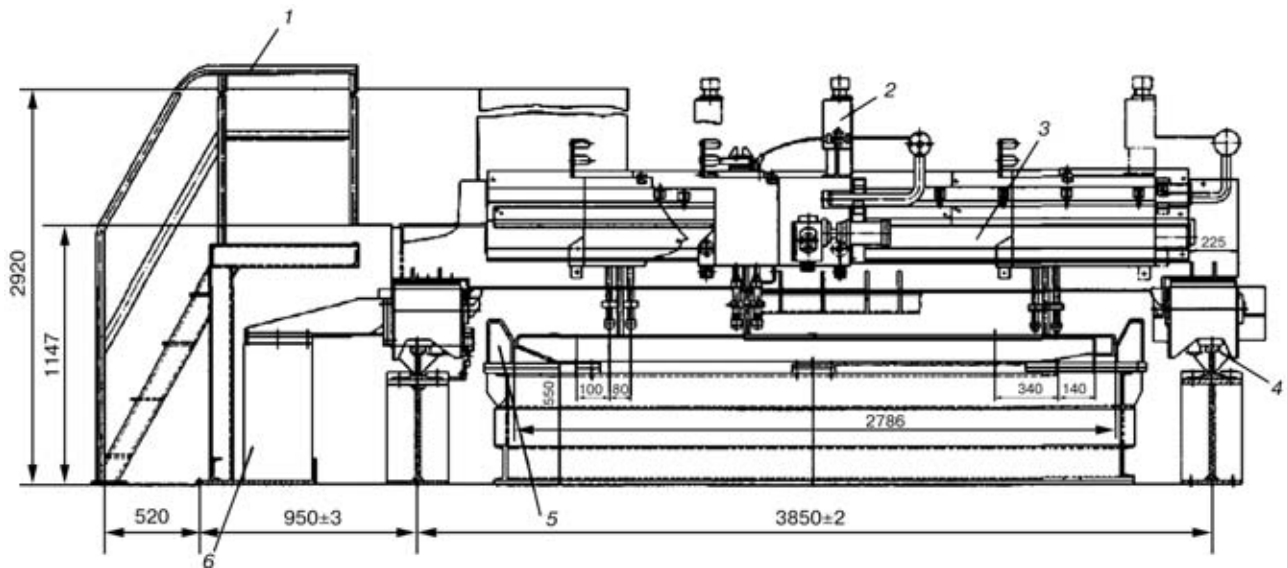


Рис. 6. Установка автоматической ДТС полотнища обшивки с каркасом боковой стены (обозначения см. в тексте)

электродуговыми прихватками, и собранный узел передается по рольгангу на установку автоматической дуговой точечной сварки (ДТС) полотнища обшивки со стойками каркаса боковой стены (рис. 5, в).

Установка, приведенная на рис. 6, состоит из постели 5, портала 3, несущего аппарат 2 двухдуговой точечной сварки А-1731 У4, рельсового пути 4, эстакады 6 и лестничной площадки 1. Постель для изделия выполнена в виде рамы с ложементами, упорами и пневмоприжимами. В торце постели смонтирована площадка 1, используемая для осмотра и обслуживания портала. Портал перемещается по рельсовому пути, вдоль которого размещены конечные выключатели, управляющие величиной шага между точечными швами. В начале работы портал устанавливается в положение, при котором освобождается доступ к постели. Захваты и прижимы на постели переводятся в открытое состояние. Положение поступившей по рольгангу собранной боковой стены фиксируется ловителями и закрепляется пневмоприжимами относительно упоров. Затем к месту сварки первого ряда дугового точечного шва на маршевой скорости 6,6 м/мин подводится портал и включается сварочный автомат, который в течение 5 с выполняет одновременную сварку в CO_2 двух электродзаклепок диаметром 19 мм с автоматической заваркой кратера. После этого сварочная головка с помощью пневмоцилиндра поднимается и автомат перемещается по направляющей, на которой закреплены микровыключатели, контролирующие величину шага перемещения автомата. Далее головка опуска-

ется и производится сварка следующих двух электродзаклепок и т. д. Сварку точечного шва производят на рабочей скорости 3,54 м/мин. После окончания сварки первого точечного шва портал в автоматическом режиме перемещается к следующему ряду и так далее, до полного завершения технологической операции. Затем изделие раскрепляется, кантуется мостовым краном на 180° и передается на установку приварки полотнища обшивки к верхней и нижней обвязкам (рис. 5, з). Она позволяет выполнять автоматическую сварку одновременно двумя сварочными головками, обеспечивающими плотное прилегание кромки привариваемого полотнища к обвязкам и автоматическое направление электрода по оси шва. Сваренная боковая стена передается на стэнд общей сборки кузова вагона.

Торцевая стена вагона-минераловоза (рис. 7) состоит из трех частей: листа обшивки 2 и двух, привариваемых к нему встык, выштампованных листов 1, 5 толщиной 4 мм. Штампованные части используются для улучшения осыпаемости груза и

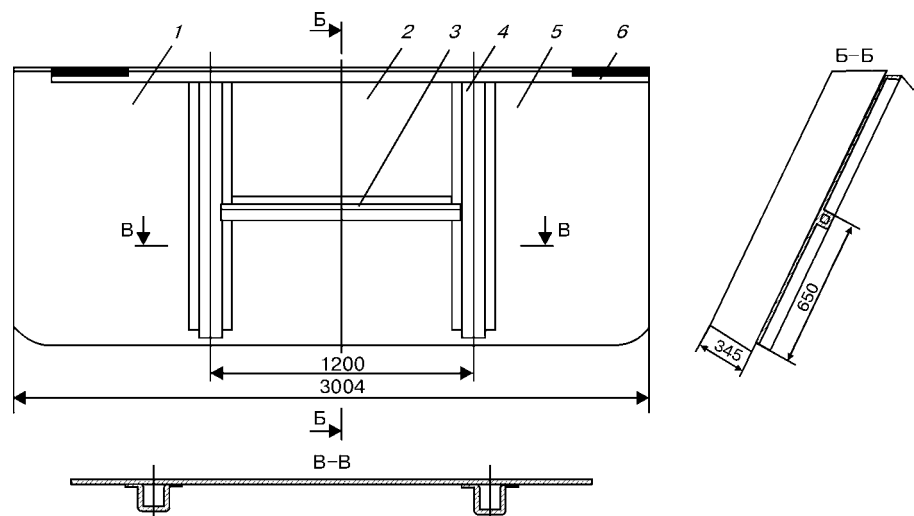


Рис. 7. Торцевая стена вагона-минераловоза (обозначения см. в тексте)

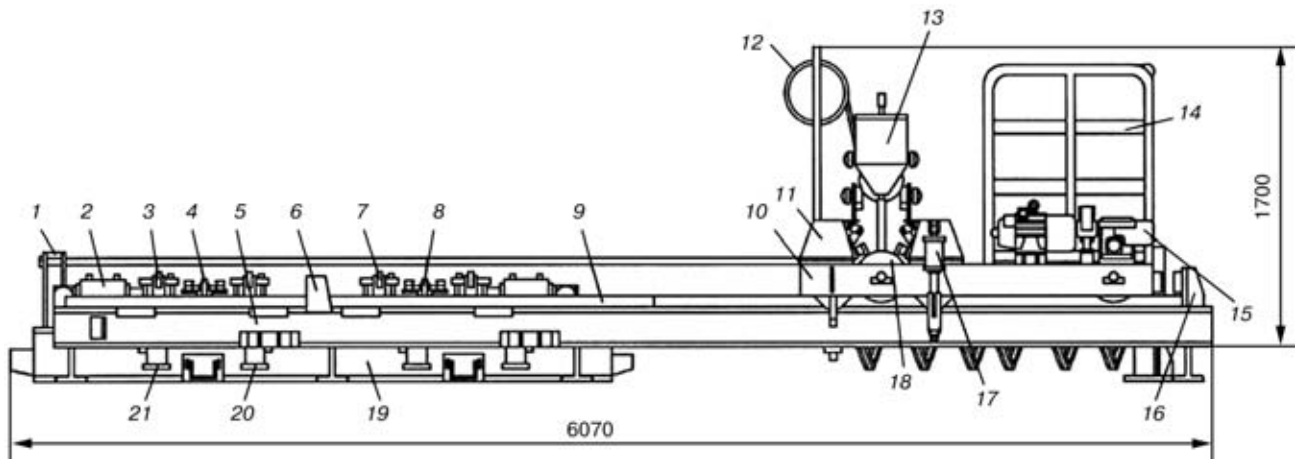


Рис. 8. Установка сборки и автоматической сварки обшивки торцевой стены: 1, 16 – упор; 2 – пневмоцилиндр упорный; 3, 7 – упор откидной; 4, 8 – подушка медная; 5 – стенд; 6 – упор постоянный; 9 – направляющая; 10 – портал; 11 – балка прижимная; 12 – подвод энергопитания; 13 – сварочный аппарат; 14 – площадка для сварщика; 15 – электропривод; 17 – пневмоцентратор; 18 – пневмоприжимы клавишные; 19 – основание; 20 – пневмоприжим; 21 – досылатель

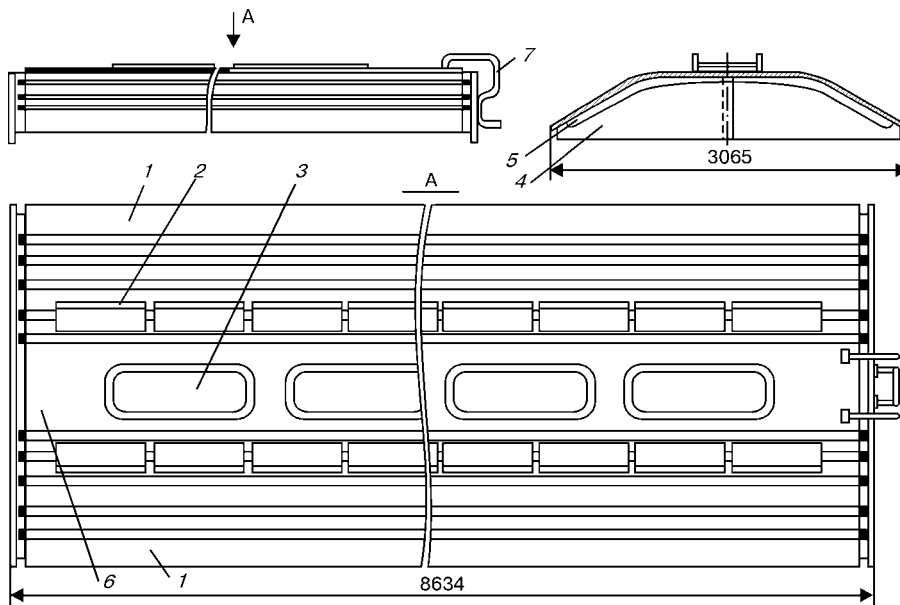


Рис. 9. Крыша вагона-минераловоза: 1 – лист крайний; 2 – настил; 3 – крышка загрузочного люка; 4 – фрамуга; 5 – дуга; 6 – лист средний; 7 – поручень

образования связи в виде стыковых соединений между боковыми и торцевыми стенами. К верхней части обшивки приваривается верхняя обвязка, выполненная в виде полосы 6. Лист обшивки усилен двумя продольными стойками 4 и поясом 3 омега-образного профиля. Производство торцевых стен организовано на специализированном участке, состоящем из трех рабочих мест.

Изготовление узла начинается со сборки и автоматической сварки с обратным формированием двух выштампованных и одного среднего листа между собой на установке (рис. 8), состоящей из стенда 5, портала 10, перемещающегося по направляющим 9, и сварочного трактора 13. На основании стенда 19 закреплены две медные подушки 4, 8 с откидными упорами 3, 7, пневмоприжимы 20 и специальные механизированные досылатели 21 для сведения кромок стыкуемых листов с криволинейными торцами. Портал используется для перемещения сварочного трактора в зону сварки

и надежного поджатия свариваемых стыков к медным подкладкам.

Листы на стенд укладывают по откидным упорам 3, 7 таким образом, чтобы свариваемые кромки располагались над медными прокладками с зазором 5 мм, и фиксировались пневмоприжимами 20. После чего в зону сварки перемещается портал и пневмоцентраторами устанавливается относительно упора 6. Для качественного формирования обратной стороны шва в зазор между кромками свариваемых листов засыпают флюс. Затем досылателем 21 сжимаются торцы стыкуемых листов, а после их фиксации клавишными пневмоприжимами 18 производится

автоматическая сварка односторонним стыковым швом.

Сваренная обшивка раскрепляется и мостовым краном перемещается на позицию сборки обшивки с другими элементами. Собранный узел укладывают на стол манипулятора, где производится его сварка. Готовое изделие предъявляется работникам ОТК и передается на общую сборку кузова вагона.

На рис. 9 представлена конструкция крыши вагона-минераловоза. Она изготавливается на замкнутом комплексно-механизированном участке, включающем три технологические операции и одно складское место. Первоначально листы обшивки крыши раскладываются в виде полотнища, прихватываются между собой и в собранном виде размещаются в стенде, где производится автоматическая сварка одновременно двух нахлесточных швов в CO_2 . Сваренное полотнище укладывается на предварительно установленные и закрепленные в стенде-кантователе дуги 5.

Наиболее высокий уровень механизации труда и оснащенности технологического процесса оборудованием при изготовлении крыш вагонов-хопперов и, в частности, вагонов-цементовозов, достигнут на Крюковском вагоностроительном заводе.

Крыша вагона-цементовоза (рис. 10) состоит из поперечных дуг 5, выполненных из уголка и обшитых сверху листами 4, 7. Листы полотнища обшивки имеют продольные гофры, придающие крыше жесткость и препятствующие скольжению по ней обслуживающего персонала. К крайним дугам с обоих торцов крыши приварены фрамуги 9, с помощью которых крыша соединяется с торцевыми стенами вагона. По оси крыши расположены четыре загрузочных люка 3, которые закрываются крышками со сферической поверхностью и прижимаются пружинящими рычагами. На

средней дуге крыши установлена лестница, которая в нижней части соединяется с вертикальным листом рамы. Лестница предназначена для обслуживания внутренней части вагона. Производство изготовления крыш организовано на поточной линии, состоящей из трех рабочих позиций и двух складских мест. Схема размещения оборудования на поточной линии показана на рис. 11. Сборка крыши начинается с изготовления в кондукторе 2 (рис. 11) дуг и фрамуг, которые передаются в сборочный стенд установки 3. Дальнейшая сборка и автоматическая сварка крыши вагона-цементовоза выполняется на установке (рис. 12), которая состоит из сборочного стенда 4, сварочного 2 и сборочного 6 порталов, подвески для кабелей 1. Вдоль стенда уложены продольные реечные направляющие 5, обеспечивающие перемещение по ним сварочного и сборочного порталов. Сборка крыши начинается с последовательной раскладки по упорам стенда фрамуг и дуг, положение которых фиксируется пневмоцилиндрами. После чего мостовым краном поверх дуг укладываются два крайних листа и прихватываются к ним дуговой сваркой в углекислом газе. Затем укладывается средний лист, который вместе с крайними образует нахлесточное соединение. Первоначально листы обшивки крыши привариваются к дугам точечными швами.

Подгибка полотнища обшивки и ее плотное прилегание к дугам в местах их приварки обеспечивается с помощью сборочного портала 6, оснащенного пневмоприжимами. Автоматическая сварка двух продольных нахлесточных швов выполняется в CO_2 проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм с помощью портала, на котором смонтированы подающие механизмы сварочных полуавтоматов А-1197С. Сварочный портал (рис. 13) обеспечивает надежное поджатие кромок свариваемых внахлестку листов друг к другу. Он состоит из двух тележек 1, 11, балки 10, прижимов 5, ко-

муг и дуг, положение которых фиксируется пневмоцилиндрами. После чего мостовым краном поверх дуг укладываются два крайних листа и прихватываются к ним дуговой сваркой в углекислом газе. Затем укладывается средний лист, который вместе с крайними образует нахлесточное соединение. Первоначально листы обшивки крыши привариваются к дугам точечными швами.

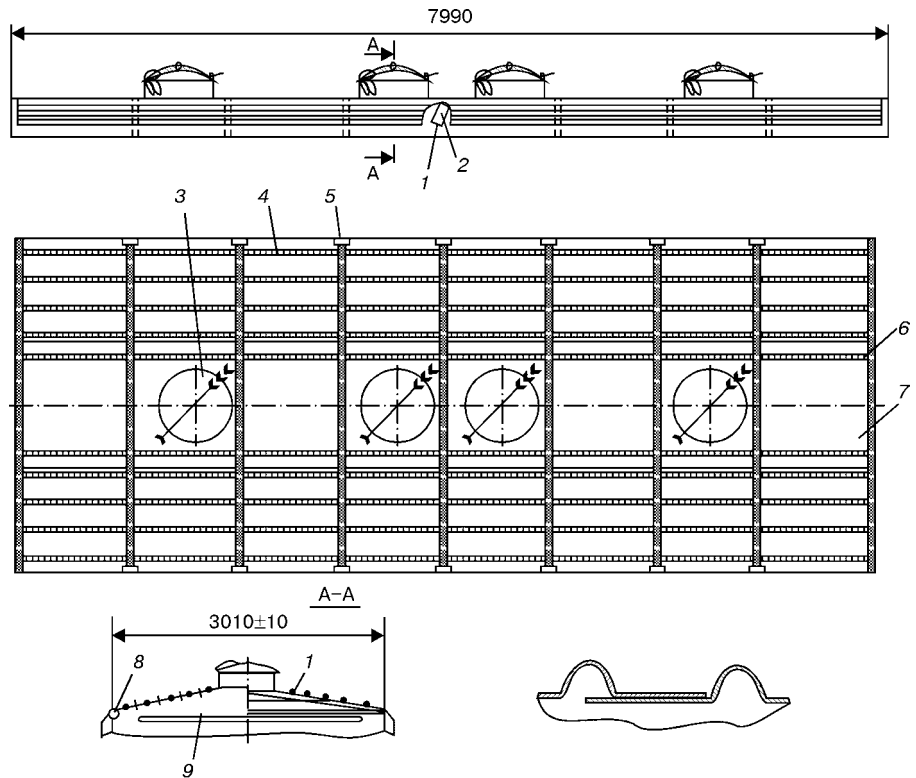


Рис. 10. Крыша вагона-цементовоза: 1 — компенсатор; 2 — распорка; 3 — загрузочные люки; 4 — лист крайний; 5 — дуга; 6, 8 — заглушка; 7 — лист средний; 9 — фрамуга

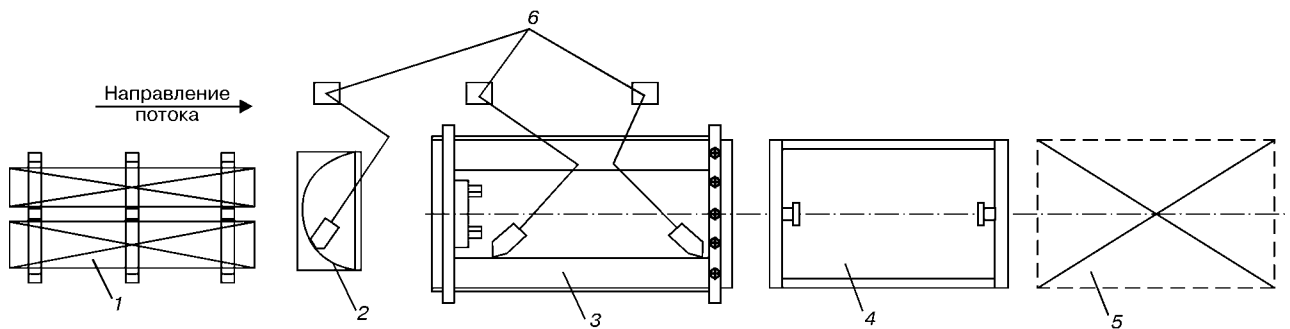


Рис. 11. Схема размещения оборудования на линии изготовления крыш: 1 — складское место для листового проката; 2 — стенд сборки и сварки фрамуг; 3 — установка сборки и сварки; 4 — стенд испытания сварных соединений на плотность; 5 — складское место готовых изделий; 6 — двухплечевые консоли с подающими механизмами сварочных полуавтоматов

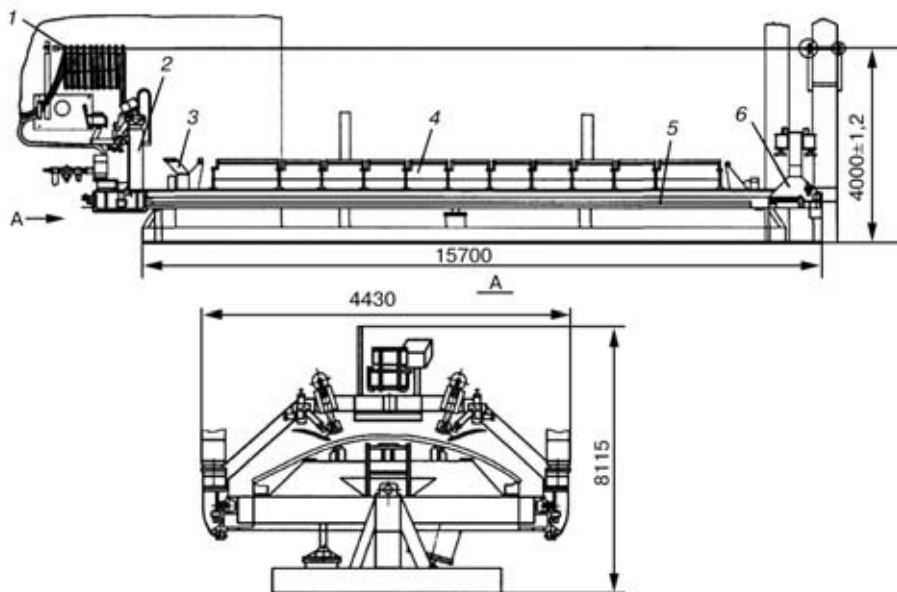


Рис. 12. Установка сборки и автоматической сварки крыши цементовоза: 1 — подвеска для кабелей; 2 — портал сварочный; 3 — кронштейн; 4 — сборочный стенд; 5 — направляющие; 6 — портал сборочный

пирных устройств 2, 9, корректоров положения горелок 3, 8, кресла сварщика 16 и пульта управления 19. Тележки 1, 11 осуществляют перемещение портала по направляющим со сварочной и маршевой скоростью. Синхронность работы приводов тележек обеспечивается электрической схемой управления. Соединительная балка 10 представляет собой сварное соединение коробчатого сечения, на которой смонтированы основные узлы портала.

Для получения минимальных зазоров при сварке нахлесточного соединения листов обшивки используются пневмоприжимы 5, которые имеют угловую, поперечную и высотную корректировки. Направление электрода по оси стыка во время сварки обеспечивается механическим копирным устройством 9, состоящим из подпружиненных роликов 21 и жестко связанных с ними сварочных

горелок 4. Подвод копирных роликов с горелкой к стыку и их отвод осуществляется пневмоцилиндром. Предварительная установка сварочных горелок по оси стыка выполняется корректорами 3, 8. Для создания комфортных условий труда на балке смонтирован стул 16, рядом с которым закреплен пульт управления 19 всеми механизмами установки. Готовое изделие перемещается краном на стенд испытания плотности сварных соединений 4 (см. рис. 11) методом керосиновой пробы, а затем на складское место 5.

Вагон представляет собой цельносварную конструкцию, состоящую из рамы с бункерами, двух боковых и двух торцевых стен, привариваемых к раме и свариваемых между собой, и крыши, привариваемой к стенам. Общая сборка и сварка металлоконструкции вагона осуществляется на участке, состоящем из трех рабочих операций (рис. 14) с помощью электромостового крана. Первоначально на установочные пальцы подъемных опор 2 сборочного стенда (рис. 14, I) укладывается рама с бункерами. После ее выравнивания в горизонтальной плоскости, которое выполняется методом регулировки мерными пластинами, производится ее фиксация.

Положение боковых стен относительно закрепленной рамы определяется нижними ловителями. Вертикальное закрепление боковины осуществляется винтовой стяжкой. Стыковка боковых и торцевых стен между собой выполняется винтовыми распорками, а совмещение торцов — струбцинами.

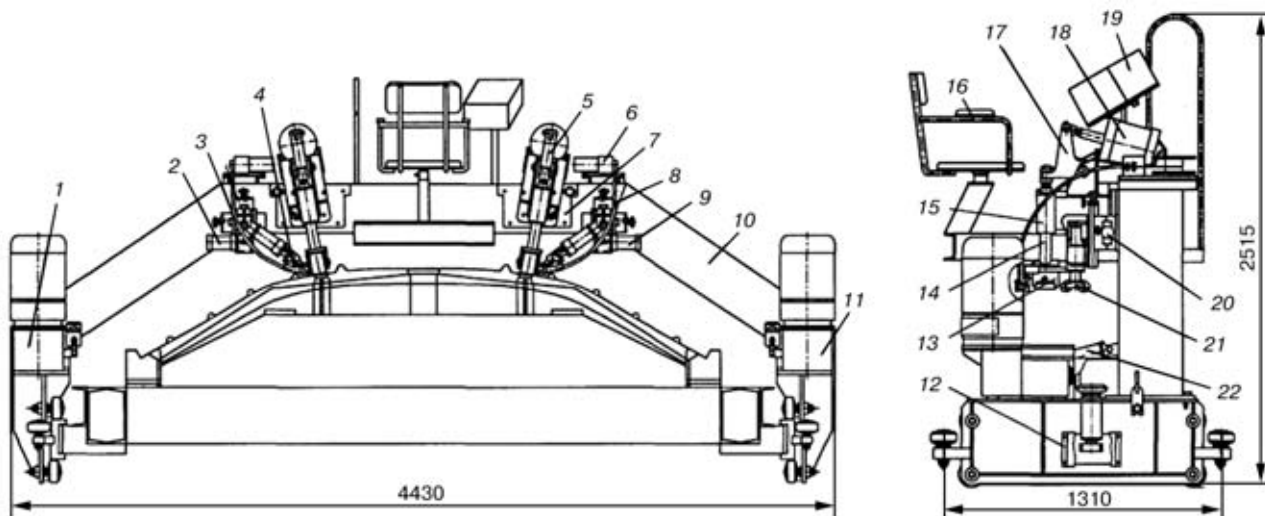


Рис. 13. Портал сварочный: 1, 11 — тележка; 2, 9 — копирное устройство; 3, 8, 20 — корректор; 4 — горелка сварочная; 5 — пневмоприжим; 6 — полуавтомат А-1197С; 7 — фланец; 10 — балка; 12 — кожух; 13 — прижимной ролик; 14 — штанга; 15 — кронштейн; 16 — стул; 17 — рычаг; 18, 22 — пневмоцилиндр; 19 — пульт управления; 21 — копирные ролики

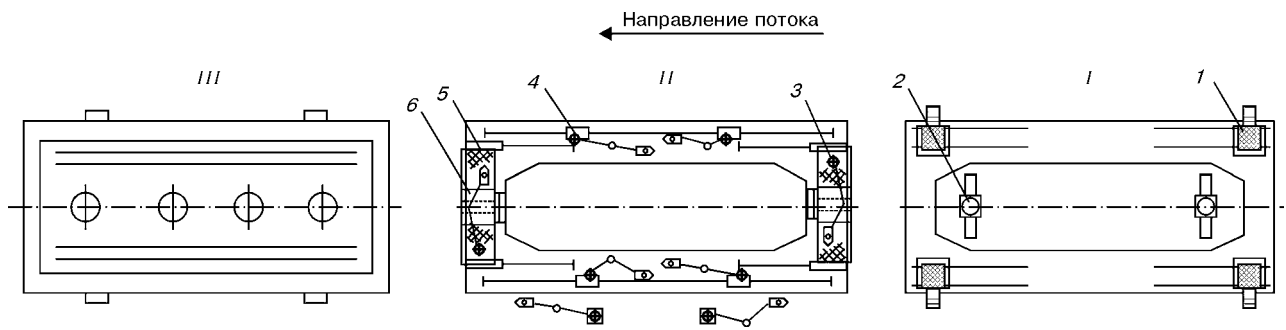


Рис. 14. Схема размещения оборудования на участке сборки металлоконструкции вагона (обозначения см. в тексте)

Работы по сборке верхней части кузова вагона осуществляются с тележек 1, перемещающихся по рельсам, которые уложены вдоль всей длины станда. На тележках смонтированы огражденные подъемные площадки для сборщиков. Собранный на электроприхватках металлоконструкция вагона устанавливается в цапфенный кантователь (рис. 14, II), позволяющий поворачивать изделие на 90° в обе стороны и выбирать наиболее удобное положение для выполнения сварочных работ. Кантователь выполнен в виде двух отдельно стоящих стоек. Стойка 3 установлена неподвижно, 5 — передвижная. На площадках стоек смонтированы поворотные консоли 6 со сварочными полуавтоматами. С обеих сторон вдоль кантователя уложены рельсы, по которым перемещаются электроприводные сварочные консоли 4. После сварки кузов перемещается на следующий стенд (рис. 14, III), где производится установка и приварка к нему

крыши, а далее — на специализированную линию слесарной сборки вагона.

Применение средств комплексной механизации и автоматизации при изготовлении сварных металлоконструкций вагонов-хопперов позволило ОАО «Стахановский вагоностроительный завод» обеспечить высокое качество выпускаемых изделий, их эксплуатационную надежность и повысить производительность труда. При этом численность рабочих была уменьшена на 10 человек.

Принимая во внимание изложенное выше, считаем возможным рекомендовать инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами изготовления различного рода сварных металлоконструкций рамного типа, балок, листовых полотнощ и т. д., рассмотреть целесообразность использования на своих предприятиях технологии и оборудования, внедренного на Стахановском вагоностроительном заводе.

The paper deals with advanced processes of fabrication of welded metal structures for hopper-type carriages and process equipment applied for their implementation. Mechanization and automation of the most labour-consuming operations allows a significant improvement of the labour efficiency and reduction of the cost of carriage manufacture. The described designs of process equipment may be widely used in many mechanical engineering plants in performance of assembly-welding operations.

Поступила в редакцию 25.03.2002



К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИНОВ ПРИ ГАЗОВОЙ РЕЗКЕ И СВАРКЕ

В. А. СЕРГИЕНКО, инж. (НПП «Донмет», г. Краматорск, Украина)

Уточняются особенности применения отдельных специальных терминов в процессах газопламенной обработки металлов, такие, как *проскок пламени*, *хлопок пламени*, *обратный удар*, *обратное возгорание* и *противоток*.

Ключевые слова: газовая резка и сварка, проскок пламени, хлопок пламени, обратный удар, обратное возгорание и противоток

При газопламенной обработке металлов используется оборудование (группа 364500 по ОКП) для процессов резки (газокислородные резаки) и сварки/пайки (газокислородные горелки), а также нагрева и напыления. Кроме того, применяется запорно-регулирующая арматура и оборудование для газопитания и техники безопасности.

Основными конструктивными элементами газокислородных резаков и горелок являются ствол (рукоятка) с вентилями для регулировки подачи горючего газа и кислорода, а также наконечник, состоящий из смесительного устройства (для смешивания горючего газа с кислородом), который соединен с мундштуком, где формируется газокислородная струя (рис. 1, а). На выходе из мундштука газокислородная струя сгорает, образуя рабочее пламя. В общем случае резак можно рас-

сматривать как горелку, пригодную для резки металла, благодаря дополнительному кислородному каналу во внутреннем мундштуке, который проходит по оси рабочего (подогревающего) пламени, формируемого наружным мундштуком (рис. 1, б). При этом нет принципиального различия между способами подготовки и формирования рабочего пламени. Соответственно все термины, рассматриваемые в статье, характерны как для газокислородных резаков, так и для горелок. Поэтому в дальнейшем будем говорить только «горелка», понимая при этом одновременно и «резак».

Разработка, изготовление и использование газопламенного оборудования для ручной резки, сварки и нагрева регламентируется целым рядом нормативных документов, основными из которых являются следующие: ГОСТ 12.2.008-75. «Оборудование и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий»; ГОСТ 1077-79. «Горелки однопламенные

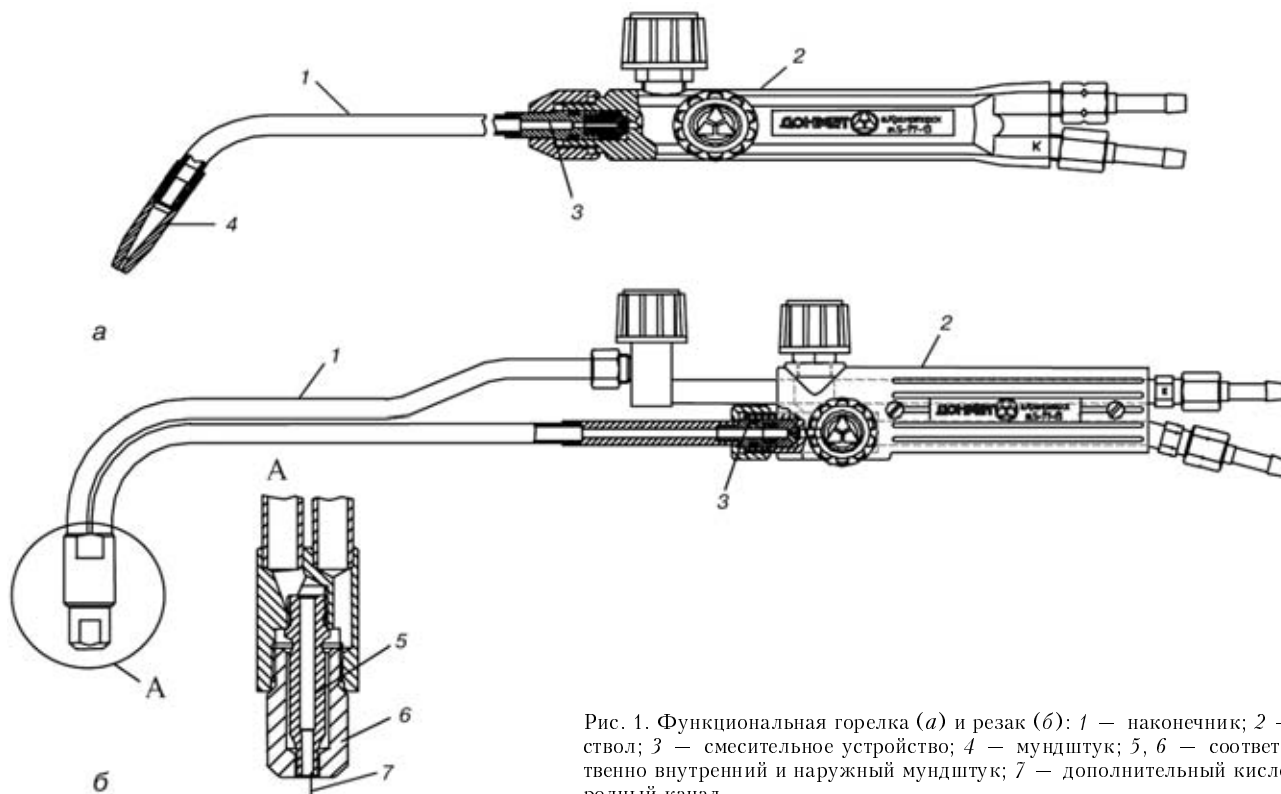


Рис. 1. Функциональная горелка (а) и резак (б): 1 — наконечник; 2 — ствол; 3 — смесительное устройство; 4 — мундштук; 5, 6 — соответственно внутренний и наружный мундштук; 7 — дополнительный кислородный канал

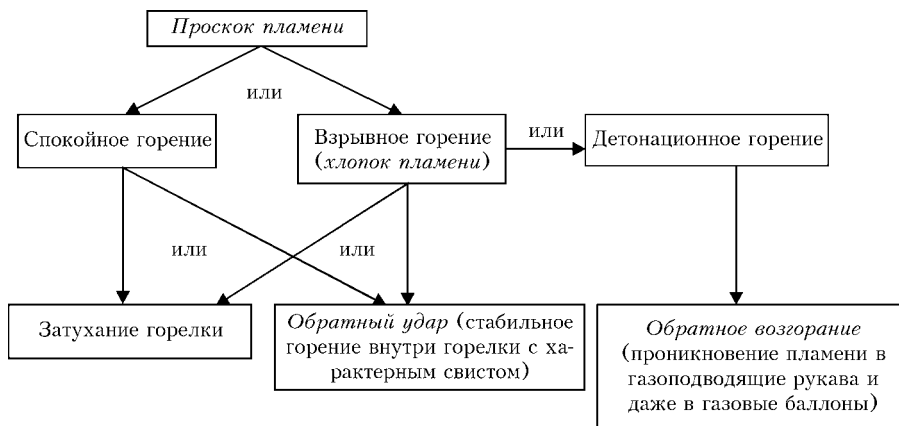


Рис. 2. Развитие процессов, происходящих в горелке при проскоке пламени

универсальные для ацетиленокислородной сварки, пайки и подогрева»; ГОСТ 5191–79. «Резаки инжекторные для ручной кислородной резки»; ГОСТ 29091–91. «Горелки ручные газозвушительные инжекторные»; ДСТУ 2448–94. «Кисневое різання. Вимоги безпеки».

Последний на сегодня является единственным национальным стандартом Украины в данной области. Он обобщает требования более семидесяти нормативных документов, действовавших в СССР, и вводит ряд новых требований к эксплуатации оборудования и аппаратуры кислородной резки. Так, в п. 7.8 впервые введена периодичность выполнения испытаний, ремонтных работ оборудования и аппаратуры кислородной резки и указан их перечень.

На территории Евросоюза руководствуются следующими нормативными документами: ISO 5172–1992. «Горелки ручные газовые для сварки и резки»; ISO 9012–1988. «Газозвушительные горелки»; DIN EN 874: 1995. «Газосварочное оборудование — резак, горелки газокислородные машинные».

В действующих нормах и правилах Украины и России не определены такие термины, как: *проскок пламени, хлопок пламени, непрерывный хлопок, пламя взрывной волны обратного удара, обратный удар, обратное возгорание, противоток*. Эти термины в научно-технической литературе употребляются достаточно давно, одни из них изменили свое первоначальное значение, другие вышли из употребления, третьи зачастую используются с другой смысловой нагрузкой.

Согласно ряду нормативных документов термин *обратный удар пламени* определяется следующим образом: «*Обратным ударом* называется воспламенение горючей смеси в каналах резака или горелки и распространение пламени навстречу потоку горючей смеси. *Обратный удар* характеризуется резким хлопком и исчезновением пламени».

В ГОСТе 29091–91 в п.3.2 дано такое определение: «*Проскок пламени* в горелку — распространение пламени внутри горелки через мундштук с продолжающимся горением внутри горелки... ».

В п.3.2 ГОСТа 5191–79 и ГОСТе 1077–79 термин *обратный удар пламени* используется в следующем контексте: «Конструкция каналов мундштука и смесителя должна препятствовать распространению *обратного удара пламени* в ствол резака и газоподводящие рукава». В п.3.5 ГОСТа 12.2.008–75 — «Конструкция горелок и резаков должна обеспечивать устойчивое горение пламени *без хлопков и обратных ударов* в любом пространственном положении при правильной эксплуатации». В п. 7.10.2 ДСТУ 2448–94

отмечено, что: «Резаки в процессе эксплуатации должны обеспечивать устойчивое горение пламени в любом положении *без хлопков и обратных ударов*».

В проекте ISO 5172–77, изданном на русском языке в 1978 г., были даны несколько другие определения перечисленных выше терминов:

«4.5. Хлопок, обратный удар, противоток

4.5.1. *Хлопок* — проникание пламени внутрь горелки с отрывистым звуком, когда пламя гаснет или возникает вновь у сопла.

4.5.2. *Непрерывный хлопок* — проникание пламени внутрь горелки с непрерывным горением около сопла или ручки. Это сопровождается начальным отрывистым звуком и последующим шипящим звуком от непрерывного горения внутри горелки.

4.5.3. *Обратный удар* — проникание пламени через горелку внутрь рукавов и даже в редуктор. Оно может достигнуть ацетиленового баллона и стать причиной нагрева и разложения содержимого.

4.5.4. *Противоток* — проникание потока газа, находящегося при более высоком давлении, в рукава (меньшее давление). Это может быть вызвано тем, что выходное сопло мундштука закрыто.

Наиболее точные определения, по мнению автора, даны в ISO 5172–1992 (который, к сожалению, не имеет ни официального статуса, ни официального перевода в Украине). В соответствии с ним:

«4.5. Хлопок пламени, обратный удар, обратное возгорание и противоток

4.5.1. *Хлопок пламени* — возврат пламени к резаку, который сопровождается одиночной стрельбой, пламя остается потушенным или заново появляется на выходе из мундштука.

4.5.2. *Обратный удар* — возврат пламени к резаку и его продолжительное горение внутри смесительной трубки или смесителя, причиной которого могут служить начальные одиночные выстрелы, после которых наступает свист (шипение), происходящий от продолжительного горения смеси внутри резака.



4.5.3. *Обратное возгорание* — возврат пламени через резак к шлангам или редукторам. Пламя может пойти и до ацетиленового баллона, что приведет к его нагреву и разложению содержимого.

4.5.4. *Противоток* — возврат газа высокого давления в шланги с газом низкого давления. Это может быть вызвано тем, что входное отверстие сопла может быть заблокировано или закрыто».

Для того чтобы правильно определить указанные выше термины, необходимо рассмотреть физическую сущность процессов, происходящих в горелке при проникновении пламени в ее внутренние каналы. Как известно, в нормальном (рабочем) положении пламя газокислородной смеси горит вне горелки в непосредственной близости на выходе из мундштука. Причины, приводящие к проскоку пламени в горелку, могут быть следующие:

- уменьшение средней скорости (40...200 м/с) истечения газокислородной смеси до критической (15...40 м/с) вследствие частичного или полного перекрытия выхода из мундштука. При этом фронт пламени проникнет в канал мундштука по тонкому ($\cong 0,1$ мм) ламинарному, пристеночному слою газокислородной смеси. На практике перекрытие выхода из мундштука часто происходит из-за сложности (при ручном способе резки и сварки) поддерживать требуемый зазор между торцом мундштука и обрабатываемой поверхностью;

- нагрев мундштука отраженным пламенем горелки до температуры вспышки газокислородной смеси (200...300 °С). Перегрев мундштука характерен при работе в труднодоступных местах или закрытых полостях;

- попадание внутрь мундштука посторонних частиц (брызги металла, окалина), раскаленных до температуры вспышки. Это зачастую происходит при резке загрязненного металла с внутренними порами и полостями.

В общем случае под *проскоком пламени* следует понимать момент воспламенения газокислородной смеси внутри горелки (рис. 2).

После *проскока пламени* возможны следующие пути развития процесса горения внутри горелки: спокойное, взрывное и детонационное горение.

В данной статье не рассматриваются причины, приводящие к тому или иному пути развития процесса горения газокислородной смеси внутри горелки, а описываются лишь их характерные признаки и следствия.

При спокойном горении фронт горения распространяется послонно, с небольшой скоростью, 5...10 м/с. Причем продукты горения движутся в обратную сторону от движения фронта горения. Спокойное горение может либо быстро прекратиться без заметного внешнего проявления, либо пламя стабилизируется внутри смесительного устройства и горит с характерным свистом. Для первого случая нет специального термина и можно говорить о затухании горелки, для второго случая следует говорить об *обратном ударе*.

Взрывное горение сопровождается характерным резким звуковым хлопком (выстрелом). Этот звук раздается от вырывающихся из мундштука продуктов сгорания газокислородной смеси, запол-

нявшей наконечник горелки в момент проскока пламени. Таким образом, под *хлопком пламени* следует понимать взрывное сгорание горючей смеси внутри горелки в пределах ее наконечника. Вследствие *хлопка* пламя может либо погаснуть внутри горелки, либо стабилизироваться внутри смесительного устройства горелки и гореть с характерным свистом (*обратный удар пламени*). Таким образом, под *обратным ударом* следует понимать стабильное горение горючей смеси внутри смесительного устройства горелки.

В случае развития обратного удара существует большая вероятность разрушения (прогара) наконечника горелки в месте смесительной камеры через 5...10 с с момента проскока пламени. Для предотвращения прогара горелки газосварщик должен сразу после обнаружения обратного удара пламени перекрыть кислородный, а затем и газовый вентили.

Взрывное горение (*хлопок пламени*) в длинных трубках (длиной более 10 диаметров) может перерасти в детонационное горение, которое характеризуется тем, что продукты горения движутся в ту же сторону, что и фронт пламени. При этом появляется волна сжатия, повышающая температуру горючей смеси до температуры вспышки. Это приводит к тому, что процесс горения распространяется со скоростью волны сжатия (ударной волны), измеряемой тысячами метров в секунду, а давление повышается в десятки раз. В случае развития детонационного горения ударная волна распространяется через смесительное устройство в рукоятку горелки и далее в газоподводящие рукава, зажигая и разрывая их, и даже может достигнуть газовых баллонов. Такое аварийное развитие ситуации следует классифицировать как *обратное возгорание*.

Фаза горения, называемая *хлопком пламени*, носит моментальный характер и либо заканчивается затуханием горелки, либо переходит в *обратный удар*, либо переходит в *обратное возгорание*. Под *обратным возгоранием* следует понимать детонационное горение с проникновением ударной волны через ствол горелки в газоподводящие рукава и даже в газовые баллоны.

И, наконец, понятие *противоток* не вызывает сложности с его определением и указывает на перетек одного газа в каналы (газовые рукава) с другим газом. На практике *противоток* может возникать или при эксплуатации неисправной горелки с негерметичным прилеганием инжектора к стволу горелки или при засорении мундштука. Явление *противотока* представляется очень опасным, так как в случае проскока пламени существует большая вероятность развития детонационного горения (*обратного возгорания*) с последующими разрушениями оборудования и коммуникаций.

По своей природе не существует конструкции горелок, исключающих возможность *проскока пламени*. Однако можно обеспечить конструктивными мерами заданную вероятность развития процесса *хлопка пламени* по пути прекращения горения внутри горелки. Установка обратных клапанов в газоподводящие рукава позволит исключить *про-*

тивоток, но не защитит при обратном возгорании и не предотвратит *обратный удар пламени*. Сухие пламегасители защищают газоподводящие рукава и газовые баллоны от обратного возгорания, но не предотвращают *обратный удар*.

Из приведенного выше следует, что вместо требования п.7.10.2 ДСТУ 2448–94 и п.3.5 ГОСТ 12.2.008–75 о том, что резаки и горелки в процессе эксплуатации должны гореть «без хлопков и обратных ударов», следует ввести требование, определяющее вероятность наступления обратного удара (стойкость к обратному удару), после определенного количества хлопков. При этом методика испытания на соответствие требованию стойкости от обратного удара приведена в ISO 5172–1992.

Features of application of some special terms in flame processing of metals are determined more precisely, such as *blowback*, *flame kick*, *backflash*, and *backfire and back flow of gas*.

Выводы

1. Необходимо ДСТУ 2448–94 дополнить такими определениями, как *проскок пламени*, *хлопок пламени*, *обратный удар*, *обратное возгорание* и *противоток*, а также дать количественные оценки критерия стойкости к обратному удару пламени резаков и горелок.

2. Целесообразно дополнить п. 3.6 ГОСТа 12.2.008–75 требованием о применении пламегасителей для защиты от обратного возгорания.

3. Представляется целесообразным подвергнуть пересмотру действующие ГОСТ 1077–79 на однопламенные горелки для сварки и ГОСТ 5191–79 на резаки для ручной резки прежде всего в части требований безопасности и определения терминов.

Поступила в редакцию 05.03.2002

Информационная поддержка:

Журналы

«Сварочное производство»

«В мире неразрушающего контроля»

«Сварщик»

«Автоматическая сварка»

«Безопасность труда в промышленности»



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ФОРУМ

V Международная специализированная выставка

II Международная научно-техническая конференция

I Конкурс сварщиков СНГ

СВАРКА. КОНТРОЛЬ. РЕНОВАЦИЯ

V Международная специализированная выставка

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

29 октября–1 ноября 2002 года г. Уфа

Республиканский выставочный комплекс ул. Менделеева, 158

Одновременно пройдут специализированные выставки

«Нефтегаз» и «Химиндустрия»

Тел.: (3472) 52-53-86, 53-41-10, факс: 52-55-93

E-mail: bashexpo@ufanet.ru



О СОСТОЯНИИ ОХРАНЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ В УКРАИНЕ

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

Рассмотрено состояние, перспективы развития и повышения эффективности защиты интеллектуальной собственности в Украине, перечислены первоочередные задачи в этой области.

Ключевые слова: интеллектуальная собственность, авторское и смежные права, право на объект промышленной собственности, права на нетрадиционные объекты интеллектуальной собственности

Под понятием интеллектуальной собственности подразумеваются права человека на результаты его умственной деятельности в научной, художественной, производственной и других областях, являющиеся объектом гражданско-правовых отношений в части права каждого владеть, пользоваться и распоряжаться результатами своей интеллектуальной, творческой деятельности [1]. В соответствии со Стокгольмской конвенцией к интеллектуальной собственности относятся права на литературные, художественные и научные произведения; изобретения во всех областях человеческой деятельности; научные открытия; промышленные образцы; знаки для товаров и услуг (товарные знаки), фирменные наименования и коммерческие обозначения; средства защиты от недобросовестной конкуренции в производственной, научной, литературной и художественной областях.

Перечень конкретных видов исключительных прав, содержащихся в конвенции, имеет приблизительный характер и может быть дополнен другими результатами интеллектуальной деятельности, в том числе и такими, которые нередко имеют большую коммерческую ценность, например, секреты производства (ноу-хау) [1]. Страны-члены Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС) сами определяют перечень охраняемых объектов интеллектуальной собственности. Известны три вида интеллектуальной собственности: авторское и смежные права; право на объект промышленной собственности; права на нетрадиционные объекты интеллектуальной собственности. Авторское право возникает в связи с созданием произведений в области литературы, науки и искусства. Смежные права выдаются для охраны интересов исполнителей, производителей фонограмм и организаций радиопередач.

Объекты промышленной собственности в Украине включают изобретения, полезные модели, промышленные образцы, товарные знаки.

К нетрадиционным объектам интеллектуальной собственности относятся сорта растений, топографии интегральных микросхем, коммерческие

тайны (секреты производства) [1], средства защиты от недобросовестной конкуренции [2].

Наконец, следует различать изобретения и научные открытия. В соответствии с Женевским договором о международной регистрации научных открытий (1978) «научное открытие — это уяснение явлений, свойств или законов материального мира, которые до сих пор не были известны и не допускали проверки, а изобретения — всего лишь новое разрешение отдельных задач, основанное на свойствах или законах материального мира. Изобретение предусматривает новое использование упомянутых свойств и законов, познанных одновременно с открытием или раньше [1].

Права на интеллектуальную собственность стоят выше прав на материальную, поскольку без интеллектуальной материальная собственность — всего лишь груда материала. Законодательством признается право интеллектуальной собственности независимо от гражданства правовладельца. Вместе с тем во всем мире общепринятой является практика поддержания и поощрения национальной интеллектуальной собственности подобно тому, как поддерживается национальный товаропроизводитель. Можно привести и другую параллель. Если государство не может содержать должным образом свою армию, оно будет вынуждено содержать чужую. Видимо, в такой же мере необходимы поддержка и поощрение государством своей национальной интеллектуальной собственности, иначе оно вынуждено будет защищать только чужую (как это, например, происходит сейчас с фонограммами). Таким образом, защита прав интеллектуальной собственности является одним из краеугольных камней государственной политики.

Законодательству в области прав на интеллектуальную собственность в нашей стране уделяется большое внимание. Украина, как и все бывшие советские республики, отказалась от практики выдачи творческим лицам свидетельств об авторстве при сохранении за государством права на результаты интеллектуального труда и возвращается к принятой во всем мире практике защиты права человека на интеллектуальную собственность — продукт его творческой деятельности. В соответствии с международными стандартами разрабатывается комплекс законов, охватывающий все аспекты интеллектуальной собственности.

Первым был принят закон «О собственности» (7 февраля 1991 г.). Затем последовали еще 37 законов и более 100 подзаконных актов: «Об ог-

раничении монополизма и недопущении недобросовестной конкуренции» (1992); «Об охране прав на промышленные образцы» (1993); «Об охране прав на изобретения и полезные модели» (1993); «Об авторском праве и смежных правах» (1993) и т. д.

В стадии разработки находятся другие законодательные акты, в том числе Гражданский кодекс, в котором Книга 4 посвящена интеллектуальной собственности, законы «О порядке получения прав интеллектуальной собственности на объекты, созданные за счет средств госбюджета и государственных целевых фондов»; «О совершенствовании порядка проведения экспертизы заявок на объекты промышленной собственности», в частности, направленное на сокращение сроков проведения экспертизы заявок по сравнению со сроками, установленными в государствах-членах Европейского сообщества; мероприятия по осуществлению механизмов государственной поддержки патентования отечественных объектов интеллектуальной собственности в зарубежных странах; нормативное урегулирование методики оценки стоимости объектов интеллектуальной собственности и др.

Украина является участницей 15 из 26 важнейших международных соглашений и договоров, в том числе Стокгольмской конвенции об учреждении ВОИС (1967), Парижской конвенции об охране промышленной собственности (1883) [2], Договора о патентной кооперации (РСТ) (1970), Мадридского соглашения о международной регистрации знаков (1891) и др.

В ближайшем будущем предусматривается присоединение Украины к более чем десяти международным договорам, в частности, Международной конвенции об охране прав исполнителей, производителей фонограмм и организаций вещания (Рим, 1961), Договора ВОИС об авторском праве (Женева, 1996), Женевского акта Гаагской конференции о международной регистрации промышленных образцов (Женева, 1999), Договора о патентном праве (Женева, 2000) и др.

Осуществляются мероприятия по имплементации Временного соглашения в вопросах, связанных с торговлей между Украиной и Евросоюзом в части взаимного обеспечения охраны прав на объекты интеллектуальной собственности, а также соответствующих положений Генерального соглашения о тарифах и торговле (ГАТТ) и входящего в него Соглашения о торговых аспектах прав интеллектуальной собственности (TRIPS), что является одним из ключевых условий вступления Украины во Всемирную торговую организацию (ВТО).

Помощь Украине в разработке нормативно-правовой базы в области охраны интеллектуальной собственности оказывают ООН, Евросоюз, а также передовые в технологическом отношении страны. Этой проблеме, в частности, был посвящен «круглый стол», состоявшийся в Киеве 31 октября 2001 г., организованный Украинским центром экономических и политических исследований им. А. Разумкова, в котором приняли участие около 200 представителей органов государственного управления, посольств нескольких стран, организаций

сферы патентования и регистрации авторских прав, Национальной академии наук и негосударственных научно-исследовательских организаций, ведущих СМИ.

Упомянутому «круглому столу» предшествовала консультативная встреча (практический семинар) в Украине консультативной группы по охране и имплементации прав интеллектуальной собственности Экономической комиссии для Европы (ЭКЕ) ООН. Практический семинар состоялся в Киеве 23–24 октября 2001 г. Со стороны консультативной группы ЭКЕ ООН в семинаре участвовали представители международных фирм и объединений, имеющих коммерческие интересы в Украине, с украинской стороны — представители государственных структур, неправительственных и общественных организаций.

Представителей консультативной группы прежде всего интересовала защита со стороны государственных структур Украины интеллектуальной собственности иностранных фирм, осуществляющих в стране коммерческую деятельность. Наибольшее внимание было уделено защите аудио- и видеопродукции, произведенной в Европе и США. Государственные органы Украины слабо контролируют рынок с точки зрения защиты интеллектуальной собственности. Консультативной группе неизвестно ни одного случая судебного процесса по поводу нарушения прав интеллектуальной собственности. Ее интересовал также вопрос подготовки в Украине кадров для защиты интеллектуальной собственности. Представители группы ознакомили присутствующих с положительным опытом внедрения такой практики в Польше, Венгрии и Болгарии, представители Украины изложили свою точку зрения на обсуждаемую проблему.

Украина — страна с переходной экономикой, а не развивающаяся. Она характеризуется мощным научным и промышленным потенциалом, а также развитой инфраструктурой. Рынок аудио- и видеопродукции занимает в Украине незначительный объем, доля украинской продукции, в том числе пиратской, здесь не превышает 10%. Много продукции поступает из России и других сопредельных стран. Следует заметить, что пиратство — проблема неоднозначная и сложная. Необходим всесторонний анализ и комплексное решение прежде всего его социальной причины. Известно, что уровень зарплаты в Украине — один из самых низких в мире. До сих пор здесь должным образом не оценивается интеллектуальный труд, а интеллектуальная собственность не считается нематериальным достоянием. При образовании новых фирм, товариществ интеллектуальная собственность в виде разработанной информации, знаний, квалификаций, способностей практически не принимается в расчет. О неуважении к интеллектуальному труду свидетельствуют случаи, когда фирма, заключив с институтом (автором) договор о совместной работе, разрывает его сразу после получения ключевой информации (чертежей, технологий, состава и пр.).

Многие западные фирмы бесплатно пользуются интеллектуальной собственностью Украины, что, несомненно, является пиратством. Вот некоторые



его разновидности: использование украинских ученых и специалистов с их «приданным» — свежими идеями, ноу-хау, накопленными знаниями и навыками, причем за существенно меньшую плату, чем для своих сотрудников; využívание методом интерактивного общения ключевой информации без последующего заключения контракта, т. е. бесплатно и др. Зарубежный инвестор не заинтересован поднимать украинское высокотехнологическое производство, чтобы не иметь сильного конкурента. В большинстве стран наиболее крупным инвестором является внутренний в виде отечественного капитала и денежных сбережений населения. Поэтому ключом к решению указанной проблемы является повышение статуса интеллектуальной собственности и решение важной социальной проблемы — достойной оплаты интеллектуального труда.

Что касается подготовки и повышения квалификации кадров, украинские участники семинара рассказали своим визави о существовании стройной и всеохватной системы «всеобуча» в бывшем Советском Союзе: широкой системе общественных организаций ВОИР, молодежной организации изобретателей и рационализаторов, функционировании на предприятиях инновационных подразделений БРИЗ. После распада СССР все это рухнуло. Однако в Украине удалось сохранить Харьковский межотраслевой институт повышения квалификации кадров по новым направлениям развития техники и технологии при Харьковском национальном политическом институте. В Киеве при Госдепартаменте интеллектуальной собственности создан Институт интеллектуальной собственности и права. В восьми вузах Украины введена специализация по охране интеллектуальной собственности. В школах планируются модульные курсы «Введение в интеллектуальную собственность». В порядке эксперимента в школе № 41 г. Киева ввели такие курсы для 5–11-х классов. На их основе будет создано учебное пособие для школьников. Работой руководит Министерство образования и науки.

В заключительной дискуссии обсуждались такие вопросы: правомерность внезапных проверок (нужны веские основания, прежде всего, заявление потерпевшего); «коротких» патентов, т. е. патентов, зарегистрированных без проведения экспертизы по существу сроком на 6 лет (в Западной Европе они непопулярны, стоимость их нулевая, и полезны они лишь для временной защиты интеллектуальной собственности в период, предшествующий завершению заявки по существу) и др.

The state-of-the-art and prospects for development and increase of the efficiency of innovation activity in the field of welding and related technologies in Ukraine are considered.

Выводы

1. В связи с ожидаемой интеграцией Украины в Евросоюз и вступлением ее во ВТО роль и значение интеллектуальной собственности в стране будет повышаться.

2. Сварка и смежные технологии — развивающиеся отрасли экономики, поэтому здесь объем интеллектуальной собственности будет неуклонно возрастать. Для этого необходимо сделать инвентаризацию интеллектуального продукта, произведенного и вырабатываемого в стране; разработать новую стратегию и тактику развития упомянутых отраслей в научно-исследовательских и проектных институтах и подразделениях с продуманной программой поиска нетрадиционных и коммерчески привлекательных технических решений. Потребуется выполнить системный анализ накопленной научно-технической информации с установлением «белых пятен» (областей вероятных новых технических решений), разработать ориентир — программы с учетом последних достижений мировой науки и техники.

3. Украина по-прежнему обладает мощным научным и техническим потенциалом в области технологий, оборудования и материалов для сварки и смежных технологических процессов. Чтобы сохранить и расширить позиции Украины на мировом рынке в указанной сфере, необходимы разработки и приоритетное развитие новых способов сварки, оборудования и материалов.

4. Необходим «всеобуч» — переобучение нынешнего и воспитание нового поколения специалистов и менеджеров, занимающихся инновационной деятельностью в области сварки и смежных процессов.

5. Необходимо поднять значение интеллектуальной собственности и повысить статус творческих работников, производящих интеллектуальный продукт, а также менеджеров, обеспечивающих производство и распространение (продажу) такого продукта, защиту права собственности на него.

6. Необходимо активнее продвигать интеллектуальную собственность на мировой рынок.

7. Следует делегировать украинских представителей в международные организации, определяющие политику развития и защиты интеллектуальной собственности, в частности в области сварки и смежных процессов.

1. *Интеллектуальна* власність в Україні: правові засади та практика: Наук.-практ. вид. В 4 т. Т. 1: Право інтелектуальної власності / С. О. Довгий, В. С. Дроб'язко, В. О. Жаров та ін. — К.: Ін Юре, 1999. — 500 с.

2. *Интеллектуальна* власність в Україні: правові засади та практика: Наук.-практ. вид. В 4 т. Т. 3: Промислова власність / Г. О. Андрощук, С. О. Довгий, В. С. Дроб'язко та ін. — К.: Ін Юре, 1999. — 656 с.

Поступила в редакцию 05.12.2001,
в окончательном варианте 08.01.2002



УДК 621.791.052:539.3

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАПЛАВКЕ ВАЛИКА НА ПЛАСТИНУ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Н. О. ЧЕРВЯКОВ, инж., чл.-кор. НАН Украины К. А. ЮЩЕНКО
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что при наплавке на никелевый сплав максимальные продольные растягивающие напряжения достигают предела текучести материала. В случае наплавки с предварительным подогревом до 900 °С происходит снижение остаточных напряжений на 30 %.

Ключевые слова: высокопрочные никелевые сплавы, остаточные напряжения, метод сеток, предел текучести, подогрев

При производстве нагруженных узлов и деталей, эксплуатирующихся при высоких температурах, широкое применение находят никелевые дисперсионно-твердеющие сплавы с γ -упрочнением. Однако они имеют неудовлетворительную свариваемость из-за склонности к образованию трещин при сварке плавлением и последующей термообработке.

При изготовлении узлов газотурбинных двигателей с целью снижения чувствительности к образованию дефектов при сварке и обеспечения требуемых свойств сварных соединений никелевых сплавов, все чаще в качестве сопутствующей технологической операции применяется высокотемпературный подогрев. Его роль в образовании трещин в соединениях при сварке плавлением исследована мало. Положительное влияние подогрева связывается с релаксационными процессами как во время сварки, так и при охлаждении.

Практический интерес представляет исследование характера распределения остаточных сварочных напряжений при сварке с подогревом и при комнатной температуре. Наиболее часто для определения сварочных напряжений используются экспериментальные механические методы, основанные на измерении перемещений, вызванных снятием закрепления с элементов конструкции с остаточными напряжениями. Эти методы дают более высокую точность измерения по сравнению с физическими, использующими связь между остаточными напряжениями и некоторыми физическими свойствами материалов [1, 2].

В качестве приборов, измеряющих перемещение, используют механические, в частности деформометры, и тензорезисторы, а также различного рода делительные сетки и хрупкие покрытия. При использовании деформометров (в соответствии с их конструкцией) для измерений в пластине высверливают базовые отверстия. Учитывая сложности, связанные с механической обработкой никелевых сплавов, и особенности их структурного состояния, для определения остаточных напряжений использовался метод сеток [3].

Суть этого метода состоит в том, что на поверхность материала наносится сетка с заданными параметрами. В процессе деформирования образца сетка искривляется таким же образом, что и поверхность. Измерив искривления элементов сетки и обработав полученные результаты, можно определить величину деформации исследуемого объекта. Преимуществом этого метода является наглядность, достоверность, простота.

При исследовании использовали сетку из системы взаимно перпендикулярных линий, направления которых совпадают с направлениями выбранных осей координат. Сетку наносили с двух сторон пластины алмазным инструментом, обеспечивающим толщину линии 0,010 мм. Перед наплавкой валика поверхность пластины полировали, затем на нее наносили сетку с расстоянием между линиями 2 мм на базе 50 мм. Расстояние между линиями сетки вдоль оси OX перед разрезкой и после тщательно измеряли с помощью инструментального микроскопа БМИ-1 с продольным и поперечным ходом предметного стола и микрометрическими винтами (цена деления 0,005 мм). Погрешность измерения на выбранной базе не превышала 10 %. Использовалось 10-кратное увеличение. Разрезку пластины выполняли на электроэрозионном вырезном станке с ЧПУ (модель 4532Ф3). В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду с антикоррозионными присадками.

Отработку методики исследования продольных остаточных напряжений выполняли на пластине (размер 140×50×4 мм) из высоколегированной стали с пределом текучести 250 МПа. Автоматическую аргодуговую наплавку вольфрамовым электродом пластины в незакрепленном состоянии выполняли по центру на следующем режиме: $I_{св} = 80$ А; $U_d = 25...26$ В; $v_{св} = 4$ мм/ч. После наплавки с проплавлением и полного охлаждения пластину разрезали на электроэрозионной установке, обеспечивающей минимальные вносимые деформации и нагрев изделия. Ширина реза составляла 1...1,5 мм.

Разность между размерами ячеек сетки до разрезания пластины и после дает упругую составляющую деформации $\epsilon = \epsilon_{упр}$. Учитывая, что исследуются пластины небольшой ширины и толщины, влияние напряжения σ_y принимается незначительным, а продольные остаточные напряжения для случая одноосного напряженного состояния подсчитываются по формуле

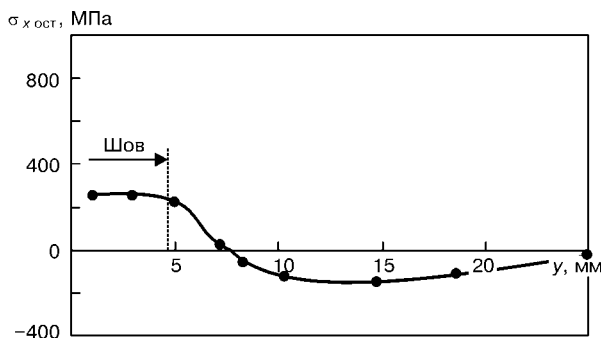


Рис. 1. Остаточные напряжения в пластине из стали X20Ni16Ag6 после наплавки валика

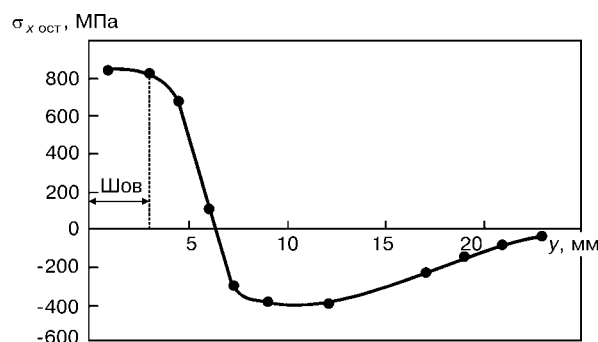


Рис. 2. Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава после наплавки валика

© Н. О. Червяков, К. А. Ющенко, 2002

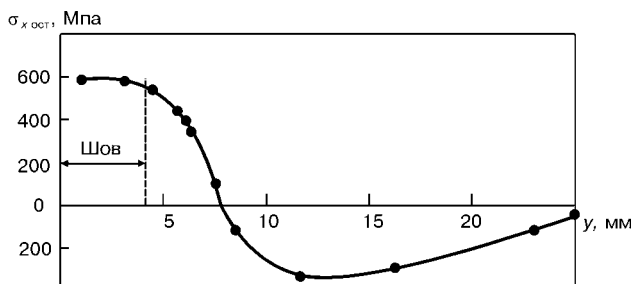


Рис. 3. Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава при сварке с предварительным подогревом

$$\sigma_{\text{ост}} = \epsilon_x E = \frac{n_1 - n_2}{B} E,$$

где $n_1 - n_2$ — разность между размерами сетки в продольном направлении до разрезания пластины и после; E — модуль упругости материала; B — база измерения.

Максимальные растягивающие напряжения, примерно равные пределу текучести свариваемого металла, возникают в шве и вблизи него (рис. 1). При переходе от шва к околошовной зоне они постепенно уменьшаются, меняют знак и становятся сжимающими.

Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава системы легирования Cr-Co-W-Al-Ti с пределом текучести 850 МПа определяли по приведенной выше методике. Аргодуговую наплавку без присадки на пластине из никелевого сплава размером 105×50 мм и толщиной 3 мм выполняли на следующем режиме: $I_{\text{св}} = 60$ А; $U_{\text{д}} = 10,5$ В; $v_{\text{св}} = 6$ м/ч.

It is shown that cladding on a nickel alloy induces maximum longitudinal tensile stresses which amount to a yield point of the material. Cladding with preheating to 900 °C results in a decrease of 30 % in residual stresses.

Поступила в редакцию 10.07.2001

УДК 621.791.92

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ СТАЛИ М76 ПОСЛЕ НАПЛАВКИ АУСТЕНИТНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Я. П. ЧЕРНЯК, Г. В. БУРСКИЙ, инженеры, В. К. КАЛЕНСКИЙ, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что с увеличением погонной энергии при наплавке образцов из стали М76 проволокой типа ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ работа разрушения металла ЗТВ повышается. Соответственно увеличивается и уровень сопротивляемости металла ЗТВ образованию холодных трещин.

Ключевые слова: наплавка, зона термического влияния, погонная энергия, термические циклы, холодные трещины

При восстановительной наплавке изношенных боковых поверхностей желобчатых трамвайных рельсов из стали М76 аустенитными проволоками без предварительного подогрева, под первым наплавленным валиком на границе сплавления или в металле ЗТВ (вблизи от этой границы) возникали холодные трещины типа откол. Исключить их образование удалось при наплавке первого валика на повышенной погонной энергии [1]. Чтобы обосновать необходимость этой особенности технологии наплавки рельсов следовало получить количественную оценку сопротивляемости металла ЗТВ стали М76 образованию холодных трещин после наплавки аустенитной проволокой на разных погонных энергиях.

Максимальные растягивающие напряжения, достигающие предела текучести, образуются в шве и вблизи него (рис. 2).

При сварке с предварительным подогревом пластину из никелевого сплава указанных размеров нагревали в печи до температуры 900 °C (при такой температуре повышаются характеристики пластичности исследуемого сплава), выдерживали там в течение получаса, после чего вынимали и по ней выполняли наплавку. Затем пластину полировали, на нее наносили сетку, разрезали и по формуле подсчитывали остаточные напряжения. Из рис. 3 видно, что с применением предварительного подогрева происходит снижение уровня максимальных растягивающих напряжений на 30 % и увеличивается зона их действия.

Выводы

1. Отработана методика определения остаточных напряжений в никелевом сплаве с использованием метода сеток.

2. Установлено, что при аргодуговой наплавке никелевого сплава максимальные растягивающие напряжения достигают предела текучести материала. В случае применения предварительного подогрева происходит снижение растягивающих продольных остаточных напряжений на 30%.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: Изд-во ИНДПРОМ, 1998. — 640 с.
2. Masubuchi K. Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences. — Pergamon press, 1980. — 642 p.
3. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др.: Справ. пособие. — Киев: Наук. думка, 1981. — 585 с.



Таблица 1. Химический состав стали М76 и металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ

Материал	Q, кДж/см	Массовая доля элементов, %								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P
Сталь М76		0,76	0,33	0,80	—	—	—	—	0,021	0,017
Нижний валик	12,8	0,453	0,52	9,42	10,34	1,35	0,44	0,26	0,026	0,032
Нижний валик	28,7	0,440	0,56	9,38	10,02	1,25	0,37	0,21	0,026	0,030
Верхний валик	12,8	0,310	0,64	13,05	13,52	1,71	0,53	0,29	0,028	0,024

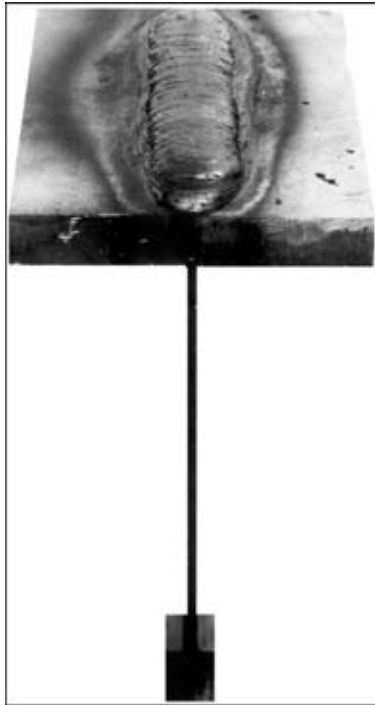


Рис. 1. Образец, наплавленный двумя валиками

изготовлены технологические планки с прямоугольным отверстием для установки вставки. Планки и вставки в сборе устанавливали в кондукторе, обеспечивающем их жесткое закрепление, после чего собранный образец наплавляли. Наплавку вели на постоянном токе обратной полярности одной дугой, опытной порошковой проволокой ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ под флюсом АН-26П. На образец последовательно друг на друга на разных режимах накладывали два валика (рис. 1). Химический состав образцов из стали М76 и наплавленного металла приведен в табл. 1. Запись термических циклов проводили самопишущим прибором КСП-4 с использованием хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных в основном металле на уровне предполагаемой границы сплавления.

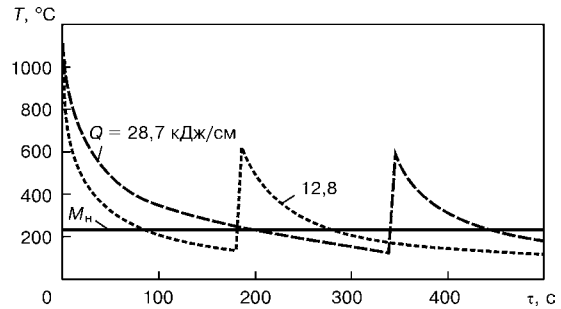


Рис. 2. Термические циклы наплавки с разными значениями погонной энергии

В работе [1] было установлено, что для стали М76 температура начала мартенситного превращения $M_n = 230^\circ\text{C}$ и показано, что для получения в металле ЗТВ относительно благоприятной структуры с микротвердостью около $HV\ 350$ ($P = 1\ \text{кгс}$, $t = 10...15\ \text{с}$) нужно уменьшить скорость охлаждения стали после наплавки. Для этого требуется увеличить время достижения температуры M_n в металле ЗТВ до $150...250\ \text{с}$. Основываясь на этих данных, нижние валики наплавляли на двух режимах. Судя по записанным термическим циклам (рис. 2), первый режим с погонной энергией $Q = 12,8\ \text{кДж/см}$ после наплавки обеспечивал охлаждение металла ЗТВ до температуры M_n за $90\ \text{с}$, второй ($Q = 28,7\ \text{кДж/см}$) — за $200\ \text{с}$. Наплавку верхних валиков, необходимых для частичного отпуска ЗТВ, вели на малой погонной энергии $Q = 12,8\ \text{кДж/см}$ (рис. 2). Ее рассчитывали по формуле: $Q = \frac{IU}{1000v_n}$ кДж/см, где v_n — скорость наплавки, см/мин.

После наплавки и охлаждения на воздухе до $60...70^\circ\text{C}$ каждый образец с закрепленным на вставке пьезодатчиком разрушали в испытательную установку и подвергали действию постоянно действующей растягивающей удельной нагрузки $P_{уд}$. Образцы выдерживали под нагрузкой до разрушения. Если они не разрушались, по истечении $24\ \text{ч}$ нагрузку снимали. Экспериментальные данные получали на самописце в виде кривых замедленного разрушения в координатах перемещение — время (рис. 3). На них зафиксировано удлинение образцов вследствие микропластических деформаций и отдельные импульсы АЭ повышенной амплитуды, сигнализирующие о мгновенном освобождении упругой энергии в результате образования и роста микро-

Таблица 2. Влияние режимов наплавки на сопротивляемость образцов из стали М76 замедленному разрушению

Образец	Валик	v_n^* , м/ч	Q, кДж/см	$\omega_{з/2}$, °C/с	$P_{уд}$, МПа	$A_{з.т.}$, Дж/м ²	$A_{уд.}$, Дж/м ²
1	Нижний	36,8	12,8	2,5	380	9,1	39,9
	Верхний	36,8	12,8	1,4	(62 % от σ_T)		
2	Нижний	17,2	28,7	1,2	380	13,7	Не разрушился
	Верхний	36,8	12,8	1,1	(62 % от σ_T)		
3	Нижний	17,2	28,7	1,2	537	48,3	112,4
	Верхний	36,8	12,8	1,1	(88 % от σ_T)		

*Остальные параметры режима наплавки: $I = 400...425\ \text{А}$, $U = 32\ \text{В}$.

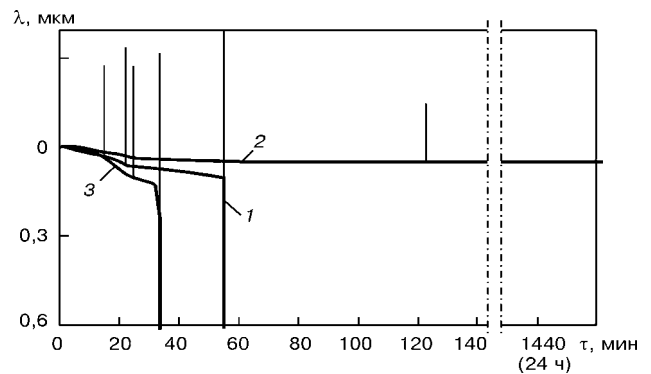


Рис. 3. Кривые замедленного разрушения образцов: 1 — наплавка нижнего валика на погонной энергии $Q = 12,8\ \text{кДж/см}$ при $P_{уд} = 380\ \text{МПа}$; 2 — $Q = 28,7\ \text{кДж/см}$, $P_{уд} = 380\ \text{МПа}$; 3 — $Q = 28,7\ \text{кДж/см}$, $P_{уд} = 537\ \text{МПа}$

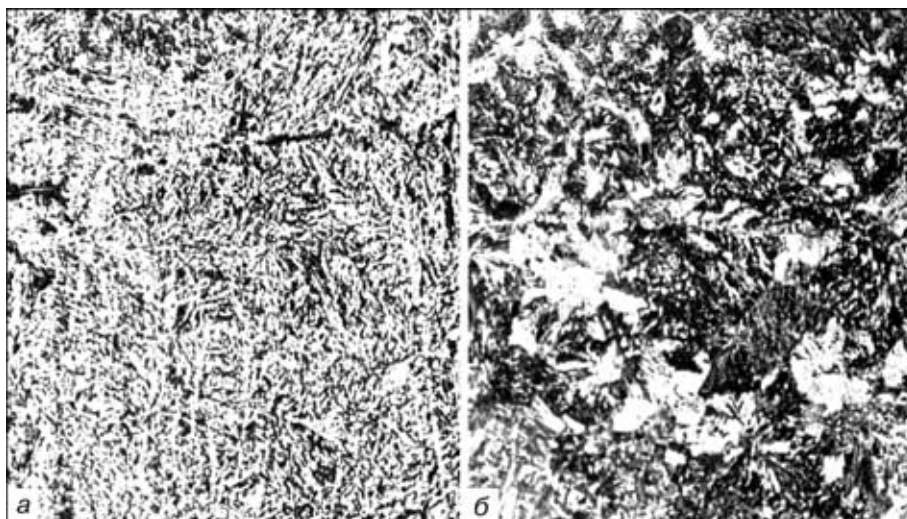


Рис. 4. Микроструктура металла ЗТВ, полученная при наплавке проволокой ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ ($\times 500$): а — $Q = 12,8$ кДж/см; б — 28,7

трещин [8]. Параметры и результаты экспериментов систематизированы в табл. 2.

Из рис. 3 видно, что микротрещины в образцах образуются под воздействием нагружения после различной пластической деформации. Удельная работа, идущая на деформацию металла до момента зарождения трещины $A_{з.т}$, для образцов, наплавленных на погонной энергии 12,8 и 28,7 кДж/см, составляет 9,1 и 13,7 Дж/м² соответственно. Невысокие показатели $A_{з.т}$ и удельной работы разрушения $A_{уд}$ (работа, затрачиваемая на микропластическую деформацию, возникновение и рост микротрещин до образования очага разрушения) говорят о низкой способности металла ЗТВ к пластической деформации. Скорость охлаждения металла ЗТВ образца 1 в интервале 300...200 °С ($\omega_{3/2}$) при наплавке нижнего валика составляет 2,5 °С/с. При этом структура металла ЗТВ состоит из отпущенного мартенсита (рис. 4, а). Его микротвердость достигает $HV 408$ ($P = 1$ кгс, $t = 10...15$ с). Удельная работа разрушения металла ЗТВ (при нагрузке $0,62\sigma_t$), составляет 39,9 Дж/м². Увеличение погонной энергии до 28,7 кДж/см при наплавке нижнего валика уменьшает (образец 2 и 3) скорость охлаждения в интервале 300...200 °С до 1,2 °С/с, а максимальную микротвердость до $HV 351$. В металле ЗТВ образуется структура, состоящая из бейнита и перлита (рис. 4, б). Нагрузка, равная $0,62\sigma_t$ оказалась недостаточной для разрушения образца, поскольку в результате микропластических деформаций и образования микротрещин произошла релаксация напряжений. Образец разрушился при увеличении нагрузки до $0,88\sigma_t$, а работа разрушения составила 112,4 Дж/м².

Таким образом, наплавка нижнего валика на погонной энергии 28,7 кДж/см повышает работу разрушения металла ЗТВ образцов, наплавленных проволокой ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ, почти в три раза. Это подтверждает выводы, сделанные в работе [1] и дает основание утверждать, что увеличение погонной энергии при наплавке нижнего валика при-

водит к существенному повышению уровня сопротивляемости металла ЗТВ стали М76 образованию холодных трещин типа откол.

1. Влияние погонной энергии на образование отколов в ЗТВ высокоуглеродистой стали М76 при наплавке аустенитными проволоками // В. К. Каленский, Я. П. Черняк, В. Г. Васильев, Т. Г. Соломийчук // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 11–14.
2. *VdLinden H., Schonherr W.* Compilation of cold cracking test. — S. l., [1972]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-779-72).
3. *Granjon H.* The implant method for studying weldability of high strength steel // Metal Constr. and Brit. Weld. J. — 1969. — № 11. — P. 509–515.
4. *Стеренбоген Ю. А.* Некоторые факторы, определяющие стойкость металла ЗТВ мартенситных сталей против образования холодных трещин // Автомат. сварка. — 1986. — № 6. — С. 5–8.
5. Усовершенствованная методика оценки сопротивляемости металла ЗТВ замедленному разрушению / Г. В. Бурский, М. М. Савицкий, О. И. Олейник // Там же. — 1999. — № 4. — С. 31–34.
6. *Стеренбоген Ю. А., Бурский Г. В.* Метод оценки стойкости ЗТВ сварных соединений высокопрочных сталей против образования холодных трещин // Там же. — 1987. — № 3. — С. 1–5.
7. *Стеренбоген Ю. А., Бурский Г. В.* Оценка сопротивляемости металла ЗТВ среднедегированных высокопрочных сталей замедленному разрушению // Там же. — 1990. — № 8. — С. 33–35.
8. Акустико-эмиссионный контроль соединений, выполненных лазерной сваркой / О. А. Бартевев, Ю. И. Кутанов, В. А. Хамитов, Ю. Ф. Волков // Там же. — 1988. — № 9. — С. 71–73.

It is found that the impact energy of the HAZ metal becomes greater with increase of the heat input in surfacing of samples of steel M76 with wire of PP-Np-06G13Kh13N2MF type. The level of the HAZ metal resistance to cold cracking increases accordingly.

Поступила в редакцию 26.02.2002



Разработано в ИЭС

РЕЗОНАНСНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ИСТОЧНИК РСИ-110

В ИЭС им. Е. О. Патона был разработан опытный образец резонансного сварочного источника РСИ-110, внешний вид которого показан на рис. 1. В нем предусмотрена ступенчатая регулировка сварочного тока, а также тепловая защита сварочного трансформатора и емкостного реактора, выполненная на основе биметаллических термоконтактов. При превышении установленных температур источник отключается от питающей сети с помощью триака ТС-142-25. Высокая продолжительность работы достигнута за счет принудительного охлаждения трансформатора и реактора.

Технические характеристики РСИ-110

Напряжение питающей сети, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Максимальный первичный ток, А	15
Максимальный вторичный ток, А	130
Номинальный вторичный ток, А	110
Способ регулировки сварочного тока	ручной
	(3 ступени)
Напряжение холостого хода по ступеням	
регулирования, В	38
Пределы изменения сварочного тока	
по ступеням, А	30...60
	50...90
	80...130
Продолжительность работы (ПР), %	
на пределе 1	60
на пределе 2	40
на пределе 3	30
Коэффициент полезного действия	0,8
Коэффициент мощности, cos φ	0,95
Максимальная масса устройства, кг	12

Известно [1, 2], что РСИ выполняются на трансформаторах с развитым магнитным рассеянием, когда в качестве одного из реактивных элементов служит индуктивность рассеяния, а другого — емкостной реактор, выполненный на базе некоторого набора электролитических конденсаторов со встречно-последовательным их соединением. Такое включение конденсаторов, как известно, может работать в цепях переменного тока. Для регулировки сварочного тока в таких устройствах необходимо согласовано изменять как параметры емкостного реактора C_p , так и индуктивность рассеяния сварочного трансформатора (ТС) (рис. 2). Первичная обмотка выполнена с отводами и ее секции расположены на обоих стержнях магнитопровода. Вторичная обмотка w_2 расположена только на одном стержне. Выводы первичной обмотки коммутируются переключателем режимов (ПР) типа ПКУ. В сварочных трансформаторах такого исполнения напряжение холостого хода, действующее на обмотке w_2 , практически не зависит от положения ПР [3]. Индуктивность рассеяния, в зависимости от того, какая часть секции $w_{1,1}$ или $w_{1,2}$ включена, в значительной мере изменяется при смене контактных групп 1–2–3. Наибольшему индуктивному сопротивлению рассеяния ($X_L = \max$) соответствует положение, когда включены контакты 1 и полностью задействована секция $w_{1,1}$, и наоборот, $X_L = \min$, когда включена секция $w_{1,2}$ (контактная группа 3).

В РСИ ток во вторичном контуре может быть определен следующим образом:

Выбор режимов сварки

Номер контрольной группы	Положение ПР			
	0	1	2	3
1	0	1	0	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	1
4	0	0	1	1
5	0	0	0	1
I (А)	0	30...60	50...90	80...130



Рис. 1. Внешний вид устройства РСИ-110

$$I_2 = U_c / X_c = (\omega C_p U_c = 2\pi f C_p U_c, \quad (1)$$

где U_c — напряжение, действующее на реакторе; X_c — емкостной импеданс реактора; f — частота питающей сети; ω — круговая частота.

При согласованной регулировке режимов РСИ по мере увеличения жесткости ТС должны включаться дополнительные секции емкостного реактора, которые коммутируются соответствующими контактами 4, 5. В этом случае емкость реактора может быть определена следующим выражением:

$$C_p = C_0 + \Sigma C_j, \quad (2)$$

где C_0 — постоянно включенная часть емкостного реактора; C_j — отдельно подключаемые секции. Таким образом ток во вторичном контуре устройства можно задать следующим соотношением:

$$I_2 = 2\pi f (C_0 + \Sigma C_j) U_c. \quad (3)$$

Если для C_p использовать размерность в микрофарадах, можно получить расчетные формулы для промышленных частот 50 и 60 Гц

$$I_{2(50)} = 3,14 \cdot 10^{-4} (C_0 + \Sigma C_j) U_c,$$

$$I_{2(60)} = 3,77 \cdot 10^{-4} (C_0 + \Sigma C_j) U_c.$$

Приведенные выражения позволяют рассчитывать режимы работы в зависимости от реактивных элементов, входящих в их состав (см. таблицу).

Для одного из вариантов РСИ (см. рис. 2), в котором осуществляется согласованная коммутация реактивных сопротивлений, была достигнута глубина регулирования сварочного

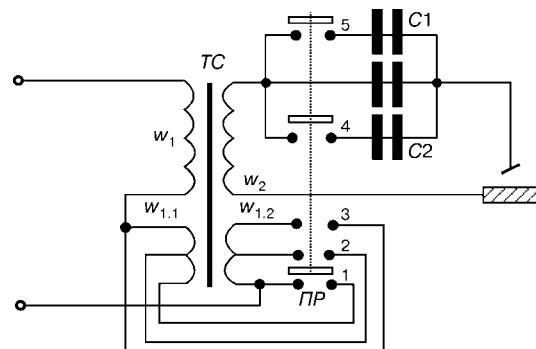


Рис. 2. Схема РСИ с согласованной регулировкой сварочного тока



тока в диапазоне 30... 180 А. Поскольку напряжение холостого хода во всем диапазоне сварочных токов было постоянным и составляло 38 В, стабильность горения дуги и легкость ее возбуждения наблюдалась во всем диапазоне рабочих токов.

Испытания по электромагнитной совместимости показали полное соответствие требованиям норм Европейских нормалей.

За дополнительной информацией обращаться по тел.: (044) 261 51 02, Коротынский А. Г.

1. Лебедев В. К., Коротынский А. Е. Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью // Автомат. сварка. — 1994. — № 12. — С. 47–48.
2. Paton V. E., Korotynskij A. E., Skopjuk M. J. Programowalne interfejs MacLab do tworzenia systemow informacyjno-pomiarowych w spawalnictwie // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. — 1997. — № 3. — S. 27–30.
3. Лебедев В. К., Сидоренко М. Н. Расчет индуктивности рассеяния сварочных трансформаторов с ярмовым магнитным рассеянием // Автомат. сварка. — 1950. — № 2. — С. 90–100.

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Институт электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины**

И. А. Гончаров (ИЭС) защитил 29 мая 2002 г. кандидатскую диссертацию на тему «Разработка низководородных сварочных флюсов марганцесиликатного типа».

В работе показано, что марганцесиликатные плавненные флюсы содержат значительное количество водорода в форме ОН-групп, который выделяется при нагреве выше температуры 800 °С, причем основная часть гидроксильных групп выделяется при температурах нагрева, близких к температуре плавления флюса (около 1000... 1100 °С). Компоненты шихты, используемые при изготовлении сварочных плавненных флюсов, вносят до 10⁴ см³ потенциального водорода на 100 г выплавленного флюса и являются основным источником поступления водорода во флюс в процессе его производства. При увеличении температуры шлакового расплава с 1400 до 1700 °С содержание водорода в нем снижается с 40,6 до 6,9 см³/100 г. Однако при мокрой гра-

нуляции расплава в зернах флюса образуются микропустоты, заполняемые молекулами воды, что приводит к росту содержания водорода во флюсе. Для получения низководородных сварочных плавненных флюсов необходимо доводить шлаковый расплав до температуры 1700 °С и исключить его контакт с водой при грануляции.

Диссертантом на основе исследования термической десорбции с хроматографическим анализом водорода и газов, содержащих водород, уточнено распределение форм существования водорода в марганцесиликатных плавненных флюсах. Им установлена количественная зависимость содержания диффузионного водорода в наплавленном металле при сварке под указанными флюсами от содержания растворенного в нем водорода. Показано, что при превышении водорода в металле шва свыше 12... 14 см³/100 г в нем образуются поры.

Полученные результаты явились основой разработки низководородных сварочных флюсов и использованы при промышленном производстве флюсов АН-60СМ, АН-68СМ и АН-68.

УДК 621.791(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Способ центровки двух профильных заготовок, в частности, двух рельсов в машине для стыковой контактной сварки, при котором положение зажатых концов свариваемых заготовок корректируют с помощью сервомеханизмов по сигналу рассогласования, характеризующему смещение осей стыкуемых заготовок. Приведены отличительные признаки способа. Патент Украина 42022: С. И. Кучук-Яценко, В. П. Кривонос (ИЭС им. Е. О. Патона) [9].

Устройство для симметрирования однофазной нестационарной нагрузки, создаваемой контактной стыковой машиной, содержащее трансформатор тока, включенный в первичную цепь сварочного трансформатора, а также модуль реактивных элементов, состоящий из конденсатора реактивной мощности, включенного параллельно первичной обмотке сварочного трансформатора, и симметрирующего устройства, содержащего последовательно соединенные конденсатор и дроссель, общая точка которых подключена к свободной фазе, а две другие точки к фазам нагрузки. Приведены отличительные признаки устройства. Патент Украина 41994. В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. П. Кривонос (ИЭС им. Е. О. Патона) [9].

Источник электропитания электронно-лучевой установки, отличающийся тем, что в него дополнительно введены датчик тока дросселя, запоминающий элемент, схема сравнения и резистор, причем выход схемы сравнения соединен с третьим

входом комбинационной схемы, вход записи запоминающего элемента соединен с выходом триггера, информационный вход запоминающегося элемента соединен с выходом датчика тока, а резистор включен последовательно с разрядным диодом. Патент Украина 41942. В. П. Вознюк, А. М. Иванов, Ю. В. Козлов и др. (АОЗТ Фико) [9].

Способ многодуговой сварки одновременно несколькими раздельными дугами, горящими между изделием и электродами, при котором к каждому источнику сварочного тока подключают аппарат для облегчения зажигания дуги и повышения ее устойчивости, отличающийся тем, что прохождение сварочного тока вместе с импульсами аппарата осуществляют через последовательно соединенные элементы цепи первый электрод — первая дуга — изделие — вторая дуга — второй электрод. Патент Украина 42790. В. Н. Виноградов, В. А. Луценко, Е. И. Виногреева [10].

Сварочный комплекс для контактной стыковой сварки трубопроводов на трубоукладочном стане, состоящий из связанных между собой кинематически вспомогательной технологической линии сварки труб в секции, содержащей частные устройства, сварочную машину с внутренним гратоснимателем, наружный гратосниматель, установку неразрушающего контроля стыков, и основной технологической линии сварки секций в нитку трубопровода, включающей кантователь подачи труб, сварочную машину с внутренним гратоснимателем, наружный гратосниматель, установку неразрушающего контроля стыков. Приведены отличительные признаки комплекса. Патент

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украина «Промислова власність» за 2001 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



Украина 42723. С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов, А. С. Никитин и др. (ИЭС им. Е. О. Патона) [10].

Керамический припой для пайки керамики с керамикой, включающий SiO₂, CaO, Al₂O₃, добавку металла из группы Mn, Fe, Co, Cr, отличающийся тем, что он дополнительно содержит эвтектическую смесь BaO и V₂O₅ при следующем соотношении компонентов, мас. %: 48...58 SiO₂, 15...25 CaO, 10...13 Al₂O₃, 1...3 добавка металла из группы Mn, Fe, Co, Cr, 12...15 эвтектическая смесь BaO и V₂O₅. Патент Украина

42729. П. Г. Рабинков, П. П. Криворучко, В. В. Мартыненко, И. С. Шакицева [10].

Способ дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, отличающийся тем, что частоту чередования импульсов подачи разных газов или их смесей выбирают равной или близкой к собственной частоте колебаний расплавленного объема сварочной ванны. Патент Украина 43424. Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, П. П. Шейко и др. [11].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*



(Германия) 2001. — № 1 (нем. яз.)

Пришло новое поколение. Ручная сварка, с. 10–11.

Выше эффективность и надежность. Автоматизированная сварка, с. 12–13.

Легкая конструкция АУДИ А2 — со сваркой Al никаких проблем, с. 14–15.

Ремонт судов в Риге — сварка на верфи. Schiffsreparatur in Riga, с. 17.

Плазменная сварка с формированием канала проплавлением, с. 18.



(Австралия), 2001. — Vol. 46, Fourth Quarter (англ. яз.)

Планирование стратегии вашего маркетинга на 2002 год, с. 6.

Образование, обучение, аттестация и сертификация в области сварки, с. 7–10.

Aitken В. Нержавеющая сталь и необходимость ее очистки, с. 22–24.

Переносной механический станок для резки и механической обработки труб, с. 26–27.

Watson K.B., Cannon B.G., Besman M., Li H. Сварочные расходные материалы для оцинкованных колов, с. 33–39.

Nguyen N.T., Mai Y.W., Ohata A. Модель нового гибридного источника тепла в виде двойного эллипсоида для моделирования сварочной ванны, с. 39–46.



(Румыния), 2001. — № 3 (рум., англ. яз.)

Cioclov D. Вероятностный подход к механике разрушения при оценке надежности сосуда давления, с. 5–12.

Dmytrakh I., Pluvineau G. Усталость асимметричных сварных соединений из стали под воздействием разных электрохимических сред, с. 13–18.

Markocsan N., Rotaru F., Fogarassy P. Плазменно-термическое напыление некоторых керамических биоматериалов на титановую основу, с. 19–24.

Деятельность МИС, с. 25–26.

Деятельность Национального института сварки Румынии ISIM — Intern, с. 33.

Научно-исследовательские проекты, с. 34–37.

JOURNAL OF JAPAN INSTITUTE OF LIGHT METALS (Япония), 2001. — Vol. 51, № 9 (яп. яз.)

Koga N., Paisarn R. Применение инструментов с углеродным упрочняющим покрытием для глубокой вытяжки листов из магниевого сплава AZ31, с. 441–445.

Oki T., Matsugi K., Hatayama T., Yanagisawa O. Влияние структуры предварительного спекания на скорость спекания

на завершающем этапе горячего изостатического прессования чистого титана, с. 446–451.

Koga N., Hato K., Paisarn R. Обрезка и зачистка листов магниевого сплава AZ31, с. 452–456.

Nishida T., Mitsutani J., Mutoh Y. et al. Влияние анодного покрытия на усталостные характеристики при фреттинг-коррозии алюминиевого сплава 6063, с. 457–463.

Maesono A. Термический калориметрический анализ, с. 464–476.

Shimizu S. Прессовый цех, с. 477–485.

JOURNAL OF LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония), 2001. — Vol. 39, № 1 (яп. яз.)

Специальный выпуск

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (FSW)

Baba Y. Предисловие к специальному выпуску, посвященному FSW, с. 5.

Enomoto M. Свойства нахлесточных соединений алюминиевого сплава A6061, выполненных FSW, с. 6–9.

Hori H. et al. Прочность соединений толстолистового материала, выполненных FSW, с. 10–14.

Sato Y.S., Kokawa H. Микроструктура металла шва на алюминиевых сплавах, сваренных FSW, с. 15–21.

Kumagi M., Tanaka S. Применение FSW для производства сварных конструкций из алюминиевых сплавов, с. 22–28.

Takai H. et al. Применение FSW в вагоностроении, с. 29–31.

Midling O.T., Kvale J.S., Oma S. Применение FSW для производства заготовок панелей судов типа «катамаран», с. 32–36.

Японский промышленный стандарт «Проволока и присадочные прутки для сварки алюминия и его сплавов», с. 37–38.

Работа в полевых условиях. Сварка алюминия, с. 39–40.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 41–43.

(Япония), 2001. — Vol. 39, № 2 (яп. яз.)

Производство алюминия в 2000 г., с. 55–65.

Sato T. Четверть века производства крупногабаритных алюминиевых пресс-профилей. Ч. 2, с. 66–77.

Morikawa K., Ohue Y., Tsujino R., Ogawa K. Влияние контактного метода измерения на время предварительного нагрева и прочность соединений нержавеющей стали SUS304 с алюминиевыми сплавами A6061 и A2027 при сварке трением, с. 78–81.

Watanabe T. Эвтектическое соединение медных и алюминиевых трубок, с. 82–90.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 93–94.

(Япония), 2001. — Vol. 39, № 3 (яп. яз.)

Технологии соединения легких металлов в авиакосмической промышленности, с. 107–117.

Sato T. Четверть века производства крупногабаритных алюминиевых пресс-профилей. Ч. 3, с. 118–124.

* Раздел подготовлен сотрудниками Научно-технической библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 227 07 71, НТБ ИЭС).



Tanabe Z., Matsumoto F. Проблемы стойкости алюминиевых сплавов к атмосферным воздействиям, с. 125–132.

Sawai T., Ogawa K., Yamaguchi H. et al. Оценка зависимости погонной энергии от характеристик соединений алюминиевого сплава 5056, выполненных сваркой трением. Ч. 2. Влияние диаметра основного металла на тепловложение, с. 133–141.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 142–144.

(Япония), 2001. — Vol. 39,
№ 4 (яп. яз.)

Tohma K. Механизм коррозии Al–Si припоев для высоко-температурной пайки, с. 157–165.

Sato T. Четверть века производства крупногабаритных алюминиевых сплавов CO₂-лазером с использованием присадочной проволоки — механизм образования AlN и характеристики плавления, с. 185–191.

Miyajima T. Краска для днищ судов и загрязнение окружающей среды, с. 176–184.

Takahashi K., Kumagai M., Katayama S., Matsunawa A. Сварка алюминиевых сплавов CO₂-лазером с использованием присадочной проволоки — механизм образования AlN и характеристики плавления, с. 185–191.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 193–195.

(Япония), 2001. — Vol. 39,
№ 5 (яп. яз.)

Yamaoka H. Контроль микроструктуры металла шва, выполненного лазерной сваркой на алюминиевом сплаве, с. 209–215.

Tjhma K. Коррозионная стойкость листовых припоев из алюминиевых сплавов, с. 216–221.

Ooka N., Hirasawa H. Неразрушающий контроль металла шва по ISO/DIS 17635. Общие правила для металлических материалов, с. 222–227.

Kato K., Ooka N. Влияние рассеянного излучения на одностороннее изображение двойной стенки при рентгеновской радиографии. Оценка качества изображения с помощью контрастного индикатора, с. 228–235.

Takeshita K., Tsunada T. Высокотемпературная пайка сопротивлением титановых сплавов титановыми припоями с оловянным гальваническим покрытием, с. 236–243.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 244–245.

(Япония), 2001. — Vol. 39,
№ 6 (яп. яз.)

Деятельность Японского общества по сварным конструкциям из легких металлов за 2000 г.

(Япония), 2001. — Vol. 39,
№ 7 (яп. яз.)

Okui N., Tsuchiya. Производство танкеров для природного сжиженного газа блочного типа из алюминиевых сплавов, с. 309–320.

Nakajima Y., Matsumoto F. Усовершенствование алюминиевых теплопроводов, с. 321–327.

Tong H., Ueyama T. Повышение производительности и качества сварки тонколистовых алюминиевых сплавов при использовании систем для импульсной сварки МИГ на переменном токе. Ч. 1. Разработка источников для импульсной сварки МИГ на переменном токе со встроенным интерфейсом для робота, с. 328–334.

Iwata T., Matsuoka K. Прочность угловых соединений титана, с. 335–341.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 342–343.

(Япония), 2001. — Vol. 39,
№ 8 (яп. яз.)

Mita T. Импульсная сварка МИГ алюминия со стабилизированным напряжением, с. 355–365.

Yasuda K. Цифровые способы определения квалификации и их применение, с. 366–375.

Tong H., Ueyama T., Ushio M. Повышение производительности и качества сварки тонколистовых алюминиевых сплавов при использовании систем для импульсной сварки МИГ на

переменном токе. Ч. 2. Характеристики процесса импульсной сварки МИГ на переменном токе, с. 376–382.

Takeshita K., Ohashi M., Kobayashi K.F. Оценка прочности соединений титановых сплавов, выполненных пайкой сопротивлением, по результатам измерения электрического тока, с. 383–391.

Вопросы и ответы. Соединение легких металлов, с. 392.

JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY
(Япония), 2001. — Vol. 70,
№ 8 (яп. яз.)

Механизм порообразования при лазерной сварке, способы его уменьшения и предупреждения, с. 3.

РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ СВАРКА

1. **Yuki M., Arakawa T.** Неразрушающий контроль и ремонтная сварка, с. 4–7.

2. **Anzai T.** Способы ремонтной сварки оборудования химических заводов, с. 8–11.

3. **Kawano S.** Способы ремонтной сварки конструкций ядерных реакторов, выполненных из гелийсодержащих материалов, с. 12–15.

4. **Nanjo A., Yumikura K.** Способ ремонтной сварки мостов на примере автострады Осака–Кобэ, с. 16–19.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. **Masuyama F.** Основные направления разработки экологически чистых материалов. Материалы для сосудов сверхвысокого давления, с. 20–25.

2. **Abe F.** Повышение прочности ферритных сталей для тепловых электростанций, с. 26–31.

3. **Nakagawa K.** Коррозионная стойкость сталей для судов сверхвысокого давления, с. 32–35.

4. **Ogawa K.** Сварка труб из высокопрочных сталей для котлов сверхвысокого давления тепловых электростанций, с. 36–40.

Toyota M. Повышение прочности сварных соединений. Ч. 2. Обеспечение прочности конструкций по результатам анализа механических свойств шва, с. 41–44.

Ohji T. Современное программное обучение инженеров-сварщиков, с. 45–51.

KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT
(Япония), 2001. — № 45 (англ. яз.)

Midorikawa S., Yamada T., Nakazato K. Разработка технологий модификации поверхности с помощью процесса термического напыления валков для сталелитейного производства, с. 57–63.



(Германия), 2001. —
№ 9 (нем. яз.)

Irmer W., Karpenko M. Автогенная плазменная и лазерная резка кислородом в качестве режущего газа, с. 340–342, 344.

Sreiber F., Honeck H. Мобильная ручная плазменно-порошковая наплавка, с. 346, 348–349.

Hinneberg D., Tessin F. МАГ-сварка стыковых и угловых швов сверху вниз в судостроении, с. 350, 352–353.

Инновационный форум исследовательского DVS «Сварка и родственные способы», с. 354, 357–358, 360–362.

Braun J., Wilde E., Ruckert R. Сварка под флюсом в судостроении, с. 364, 366–367, 369.

Middeldorf K. Прогресс знаний ведет к инновациям, с. 370, 373–376.

Rech G., Herrmann J. Индуктивная термообработка рельсов, с. 378, 381–382.

Bonalumi P., Crosta L. Установка для обессеривания выхлопных газов, с. 384, 388–389.

(Германия), 2001. —
№ 12 (нем. яз.)

Niedermayer G., Wege S. Новый способ испытания для оценки соединения в процессе пайки оплавлением, с. 472–473.



Обзор выставки в Эссене, с. 474–476, 478–480, 482–486, 488, 490–492, 493–500, 502–514.

Уровень развития и результаты практических исследований (доклад на конференции в Эссене 09.01), с. 522, 524–535.

(Германия), 2002. —
№ 1 (нем. яз.)

Шестидесятилетие профессора фон Хофе, с. 1.

Neubert G., Zinke M., Schroder J. Исследование стабильности процесса при сварке в защитных газах высоколегированной электродной проволокой, с. 8–10, 12.

Heuser H. Дуговая сварка нержавеющей сталей, с. 13–15.

Hellmich J. Сварка под флюсом с цифровым регулированием, с. 16, 18–19.

Trommer G. Сварка двумя электродными проволоками, с. 20–23.

Zwatz R. Сварка в строительстве, с. 26–30.

*QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN
WELDING SOCIETY (Япония), 2001. —
Vol. 19, № 4 (яп. яз.)*

Sawai T. et al. Оценка прочности соединений углеродистой стали S15CK, выполненных сваркой трением по погонной энергии, с. 581–590.

Hiraga H. et al. Влияние длины волны лазерного излучения и защитного газа при лазерной сварке тонколистовых магниевых сплавов, с. 591–599.

Seto N. et al. Механизмы порообразования при сварке CO₂-лазером нержавеющей стали и способы его подавления, с. 600–609.

Hirata H. et al. Влияние химического состава стали на состояние поверхности обратного валика при сварке ТИГ. Ч. 4. Влияние химического состава на свариваемость высоколегированной стали, с. 610–619.

Utsumi A. et al. Влияние направления сварки на поведение дуги ТИГ. Ч. 4. Изучение комбинированных лазерно-дуговых способов высокоскоростной поверхностной обработки, с. 620–627.

Yamamoto T. et al. Модель сварки МАГ, с. 628–633.

Hasegawa M. et al. Изучение сварки трением полиэтилена, с. 634–640.

Fukumoto I. et al. Молекулярно-динамический анализ явления абляции при использовании лазера с пикосекундным импульсным излучением. Ч. 2. Модель обработки материалов лазером со сверхкоротким импульсным излучением, с. 641–648.

Ohmura E. et al. Трехмерная молекулярно-динамическая модель лазерной абляции монокристаллического кремния. Ч. 3. Модель обработки материалов лазером со сверхкоротким импульсным излучением, с. 649–655.

Yamaguchi T. et al. Влияние изменения количества растворенного магния на ударную вязкость сплава A5083 при сварке с высокой плотностью энергии, с. 656–663.

Hirata H. et al. Изучение механизма трещинообразования в металле шва на сплаве инвар. Ч. 1. Сварка Fe–36 % Ni сплава инвар, с. 664–672.

Hirata H. et al. Изучение механизма подавления трещинообразования в металле шва на сплаве инвар. Ч. 2. Сварка Fe–36 % Ni сплава инвар, с. 673–679.

Hirata H. Изучение влияния углерода и ниобия на образование кристаллизационных трещин в сплаве инвар. Ч. 3. Сварка Fe–36 % Ni сплава инвар, с. 680–687.

Saito S., Onzawa T. Высокотемпературный предел прочности паяных соединений нержавеющей стали, выполненных припоями на Ni–Cu основе, с. 688–692.

Shimura J., Higuchi I., Sawa T. Анализ методом конечных элементов характеристик напряжения под действия изгибающего момента при ударе в клеевых разнородных соединениях с косым стыком, с. 693–701.

Suita Y. et al. Статистические характеристики сварочных параметров и деформаций при стыковой сварке с подкладками. Ч. 2. Статистическая обработка сварочных деформаций, с. 702–708.

Kayamori Y. et al. Влияние толщины листа на характеристики миницикловой усталости дефектных сварных соединений. Ч. 2. Изучение допустимых размеров кольцевого шва на трубах газопроводов, с. 709–716.

Hiraga H. et al. Сварка нержавеющей стали с чистым титаном Nd:ИАГ лазером, с. 717–726.