

# Ежемесячный научно-технический и производственный журнал



№ 11 (584)  
декабрь 2001

Издается с марта 1948

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, Ю. Я. Гречкий,  
В. Н. Замков, А. Т. Зельниченко,  
А. Я. Ищенко, С. И. Кучук-Яценко,  
Ю. Н. Ланкин,  
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),  
В. Н. Липодиаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, 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. Арака (Япония),  
Н. П. Алешин (Россия),  
И. Гриняк (Словакия),  
У. Дилтей (Германия),  
Е. А. Дорошкевич (Беларусь),  
П. Зайффарт (Германия),  
А. С. Зубченко (Россия),  
К. Иноуэ (Япония),  
К. Мацубути (США),  
Н. И. Никифоров (Россия),  
Б. Е. Патон (Украина),  
Я. Пилиярчик (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;  
tomik@mac.relc.com  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:  
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр,  
Г. В. Ольшевская

Электронная верстка:  
И. С. Баташева, И. Р. Наумова,  
И. В. Петушкив, Т. Ю. Снегирева  
Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ 4788 от 09.01.2001  
Журнал входит в перечень  
утверженных ВАК Украины изданий  
для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<b>Махненко В. И., Бут В. С., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Пивторак Н. И.</b>	Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов .....	3
<b>Каленский В. К., Черняк Я. П., Васильев В. Г., Соломийчук Т. Г.</b>	Влияние погонной энергии на образование отков при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками .....	11
<b>Рябов В. Р., Муравейник А. Н., Будник В. П., Бондарев Андр. А., Моннен М.М., Полькин И. С., Конкевич В. Ю., Трубкина Е. М.</b>	Исследование свариваемости дисперсно-упрочненного композиционного материала Al + SiC .....	15
<b>Замков В. Н., Великоиваненко Е. А., Сабокарь В. К., Вржижевский Э.Л.</b>	Выбор температуры предварительного подогрева γ-алюминия титана при ЭЛС .....	20
<b>Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.</b>	Влияние поверхностного натяжения сварочных шлаков солеоксидной системы на показатели сварочно-технологических свойств самозащитной порошковой проволоки .....	24
<b>Хаскин В. Ю., Шелягин В. Д., Гаращук В. П., Сидорец В. Н., Сахарнов А. В., Гончаренко Е. И.</b>	Лазерная сварка стыковых соединений с высокочастотным подогревом кромок .....	28

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<b>Лебедев В. К., Письменный А. А.</b>	Системы питания машин для контактной сварки .....	32
<b>Бернадский В. Н.</b>	Промышленные роботы в современном производстве .....	37
<b>Ефименко Н. Г., Калин Н. А.</b>	Расчет оптимального содержания углерода и марганца в электродных покрытиях ильменитового вида .....	43
<b>Коротынский А. Е.</b>	Функциональная и тестовая диагностика сварочного оборудования .....	47
<b>Матвиенко В. Н., Степнов К. К., Иванов В. П., Заварика Н. Г., Олдаковский А. И., Ермолов В. П.</b>	Освоение технологии изготовления холоднокатаной легированной наплавочной ленты в ОАО «ММК им. Ильича» .....	51

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<b>Михеев П. П., Войтенко О. В.</b>	Роль уменьшения концентрации напряжений при высокочастотной проковке в повышении сопротивления усталости сварных соединений .....	53
<b>Цыбулькин Г. А.</b>	Робастный цифровой сенсор для дуговой сварки .....	55
Информация пресс-группы ИЭС .....	57	
Патенты в области сварочного производства .....	57	
По зарубежным журналам .....	58	

### ХРОНИКА

«СЭЛМЕ» — 55 лет .....	62
Космические технологии — на службу обществу .....	63
Международная научно-методическая конференция «Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров» .....	64
Лакомскому — 75 .....	66
Наши поздравления .....	67

### РЕКЛАМА .....

Главные спонсоры журнала: ОАО «Фирма СЭЛМА»



Каховский завод электросварочного оборудования

Новокраматорский машиностроительный завод



# Monthly Scientific-Technical and Production Journal

## Avtomicheskaya Svarka

№ 11 (584)

November 2001

Published since March, 1948

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, Yu.Ya.Gretskii, 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.P.Mojsov,  
V.F.Moshkin, O.K.Nazarenko,  
V.V.Peshkov, I.K.Pokhodnya,  
I.A.Ryabtsev, Yu.A.Sternbogen,  
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.Hrivenak (Slovakia),  
U.Diltey (Germany),  
E.A.Doroshkevich (Belarus),  
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  
tomik@mac.relc.com  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:  
E.N.Kazarova, V.I.Kotiyar,  
G.V.Olshevskaya  
Electron galley  
I.S.Batasheva, I.R.Naumova,  
I.V.Petushkov, T.Yu.Snegireva

## CONTENTS

### SCIENTIFIC

<b>Makhnenko V.I., Boot V.S., Velikoivanenko E.A., Rozynka G.F., Pivtorak N.I.</b>	Mathematical modelling of pitting defects in operating oil and gas pipelines and development of a numerical method of evaluation of allowable conditions of arc repair welding of defects .....	3
<b>Kalensky V.K., Chernyak Ya.P., Vasiljev V.G., Solomiychuk T.G.</b>	Effect of energy input on the formation of spalling in hardfacing of high-carbon steel with austenitic wires .....	11
<b>Ryabov V.R., Muraveinik A.N., Budnik V.P., Bondarev And.A., Monnen M.M., Polkin I.S., Konkevich V.Yu., Trubkina E.M.</b>	Investigation of weldability of dispersion-strengthened composite material Al+SiC .....	15
<b>Zamkov V.N., Velikoivanenko E.A., Sabokar V.K., Vrzhizhevsky E.L.</b>	Selection of preheating temperature of titanium $\gamma$ -aluminide in EBW .....	20
<b>Shlepakov V.N., Naumeiko S.M.</b>	Effect of surface tension of welding slags of salt-oxide system on the characteristics of welding-technological properties of self-shielding flux-cored wire .....	24
<b>Khaskin V.Yu., Shelyagin V.D., Garashchuk V.P., Sidorets V.N., Sakharnov A.V., Goncharenko E.I.</b>	Laser welding of butt joints with a high-frequency preheating of edges .....	28

### INDUSTRIAL

<b>Lebedev V.K., Pismenniy A.A.</b>	Supply systems of resistance welding machines .....	32
<b>Bernadsky V.N.</b>	Industrial robots in advanced manufacturing .....	37
<b>Efimenko N.G., Kalin N.A.</b>	Calculation of optimum content of carbon and manganese in electrode coatings of an ilmenite type .....	43
<b>Korotynsky A.E.</b>	Functional and test diagnostics of welding equipment .....	47
<b>Matvienko V.N., Stepnov K.K., Ivanov V.P., Zavaryka N.G., Oldakovskiy A.I., Ermolov V.P.</b>	Main technologies in manufacture of a cold-rolled alloyed surfacing strip in OJSC «Iljich MMW» .....	51

### BRIEF INFORMATION

<b>Mikheev P.P., Voitenko O.V.</b>	Role of stress concentration decrease in high-frequency peening for increasing fatigue resistance of welded joints .....	53
<b>Tsybulkin G.A.</b>	Robust numerical sensor for arc welding .....	55
Information of press-group of the E.O.Paton Electric Welding Institute .....		57
Patents in the field of welding .....		57
Review of foreign journals .....		58

### NEWS

<b>«SELMA»</b> is 55 .....	62
Space technologies — for the mankind welfare .....	63
International Scientific-Methodological Conference «Modern Problems of Welding and Allied Technologies, Improvement of Training» .....	64
Lakomsky is 75 .....	66
Our congratulations .....	67

### ADVERTISING .....

68

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

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact:  
tel.: (380 44) 227 67 57, fax: (380 44) 227 46 77, E-mail: tomik@mac.relc.com



УДК 621.791.72.052:620.191.33.001.18:681.3:06

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЗВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В ДЕЙСТВУЮЩИХ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДАХ И РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО, В. С. БУТ**, канд. техн. наук,  
**Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,  
**Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена возможность заварки дефектов язвенной коррозии диаметром 12...20 мм на наружной поверхности стенки трубы магистрального нефте- и газопровода из стали 17Г1С без его остановки. Изложена общая методика выбора режимов дуговой заварки дефекта, при которых исключается прожоги и разрушение в зоне сварки по механизму пластической неустойчивости при высоких температурах и за счет холодных (водородных) трещин.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, термодеформационные процессы, трубопровод, давление, язвенные дефекты, заварка дефектов, пластическая неустойчивость, микроструктурное состояние, время охлаждения, остаточные напряжения, холодные трещины

Проблема безопасной заварки отдельных коррозионных дефектов на наружной поверхности стенки трубы без остановки трубопровода привлекает пристальное внимание специалистов разных стран. На протяжении последних 30 лет в этом направлении было выполнено ряд фундаментальных разработок (например в Эдиссоновском институте сварки (США) и пр.), нашедших отражение в соответствующих документах [1 и др.]. Однако достаточно большие сложности, возникающие при воспроизведении реальной ситуации действующего трубопровода (геометрические факторы, условия обтекания внутренней поверхности транспортируемой средой и т.д.) на макете, не позволяют исчерпывающе ответить на вопросы о создании безопасной технологии заварки дефектов.

В этой связи особое значение приобретают расчетные методы, основанные на математическом моделировании термодеформационных процессов при заварке дефектов в трубопроводах с учетом действующего давления и теплообмена с потоком нефти или газа. Следует отметить, что принятые в работе [2] допущение, что температура на внутренней поверхности стенки трубы при заварке дефекта постоянна и равна температуре транспортируемой среды, является достаточно грубым с позиций безопасности ремонта.

Более обоснован подход, в котором тепловое состояние оценивается с учетом конвективного теплообмена на внутренней поверхности трубопровода в зависимости от соответствующих параметров транспортируемой среды, как это было сделано в [3] при наплавке тонкостенных труб.

В настоящей работе при моделировании температурных полей при заварке язвенного дефекта

в стенке магистрального трубопровода под давлением используется геометрическая схема заварки каверны из [2], показанная на рис. 1, которая принята с учетом конвективного теплообмена на внутренней поверхности. Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha_k$  определяли, как и в [3], с помощью критериальных соотношений [4] через соответствующие числа — Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr), обобщающие экспериментальные данные об обтекании стенки потоком жидкости или газа при локальном нагреве стенки с диаметром пятна нагрева  $D$ .

Результаты расчета коэффициента теплообмена  $\alpha_k$  для случаев транспортировки нефти и газа в зависимости от скорости их транспортировки  $W$  и давления  $P$  в трубе при  $D < 50$  мм для рассматриваемых случаев приведены в табл. 1. При этом температура транспортируемой среды принималась равной 40 °C.

Приведенный в табл. 1 диапазон скоростей не в равной степени приемлем для нефти и газа в магистральных трубопроводах с диаметром  $2R =$

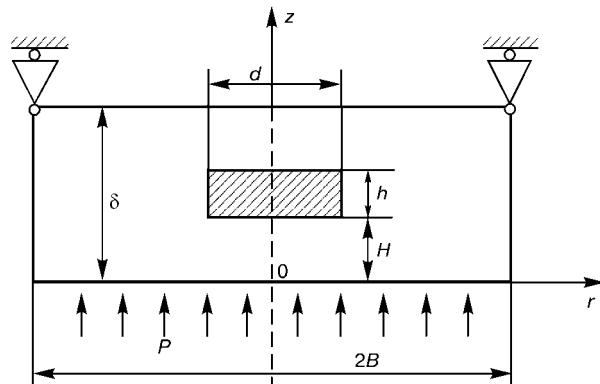


Рис. 1. Схема заварки каверны стенки трубы:  $d$  — диаметр каверны;  $h$  — толщина наплавленного слоя;  $H$  — толщина перемычки;  $\delta$  — толщина стенки трубы;  $P$  — давление в трубе;  $B$  — см. в тексте

© В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, 2001



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Таблица 1. Результаты расчета коэффициента теплообмена  $\alpha_k$

W, м/с	$\alpha_k$ , Дж/(см <sup>2</sup> ·с·°C)						
	нефтепровод		газопровод				
	0...10 МПа	0,1 МПа	1,0 МПа	2,0 МПа	4,0 МПа	8,0 МПа	10,0 МПа
2	0,0650	0,0058	0,0108	0,0138	0,0167	0,0208	0,0225
6	0,1571	0,0117	0,0242	0,0304	0,0388	0,0496	0,0538
10	0,2367	0,0163	0,0354	0,0450	0,0579	0,1263	0,1367
20	—	0,0267	0,0596	0,0763	0,0996	0,1263	0,1367

= 1000 мм. Для нефти значения  $W$  обычно находятся в пределах 2...3, для газа — 6...10 м/с.

Тем не менее, данные табл. 1 дают достаточно полное представление о значениях  $\alpha_k$  при характерных скоростях нефти и газа.

Для наружной поверхности трубы использовались традиционные данные о теплообмене с воздухом при  $\alpha_k = 0,00208$  Дж/(см<sup>2</sup>·с·°C).

Тепловую мощность  $q_u$  сварочной дуги вводили через присадочный металл при заполнении им завариваемой каверны, а также с помощью распределенного потока тепла непосредственно от дуги. Значения  $q_u$  определяли по сварочным параметрам дуги

$$q_u = 0,24U_d I_{cv} \eta_u \quad [\text{Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C})], \quad (1)$$

где  $U_d$  — напряжение на дуге;  $I_{cv}$  — сварочный ток;  $\eta_u$  — эффективный КПД нагрева изделия. В случае ручной сварки электродами с покрытием типа УОНИ принимали  $U_d = 26$  В,  $\eta_u = 0,8$ .

Тепло  $q_s$ , вносимое присадочным материалом за 1 с, определяется температурой  $T^*$  и объемной скоростью его поступления, равной

$$q_s = \frac{\alpha_u I_{cv}}{3600\gamma},$$

где  $\alpha_u$  — коэффициент наплавки;  $\gamma$  — удельная масса материала.

При  $T^* \approx 2100$  °C,  $\alpha_u = 10$  г/(A·ч) и скрытой теплоте плавления  $\kappa \approx 2080$  Дж/см<sup>3</sup> получим

$$q_s = \frac{\alpha_u I}{3600\gamma} (T^* c\gamma + \kappa) = 4,576 I_{cv} \quad [\text{Вт}], \quad (2)$$

где  $c\gamma$  — объемная теплоемкость ( $c\gamma \approx 5,2$  Дж/(см<sup>3</sup>·I<sub>cv</sub>·°C)).

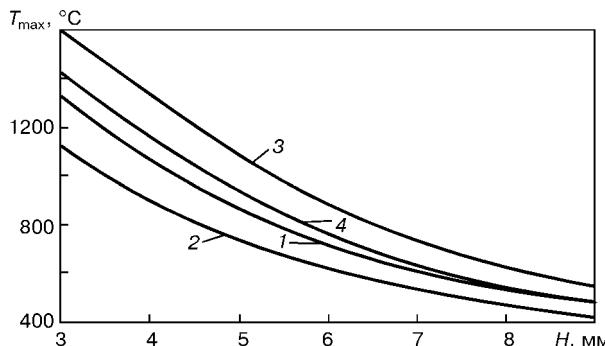


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности трубы ( $z = 0$ ) на оси  $r = 0$  от  $H$  и режима сварки: 1, 2 —  $I_{cv} = 90$ ; 3, 4 — 140 А; 1, 3 —  $W = 2$ ; 2, 4 — 6 м/с ( $D = 1020$  мм;  $\delta = 11$  мм;  $d = 29$  мм)

Таблица 2. Механические и теплофизические свойства стали 17Г1С

$T, ^\circ\text{C}$	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-3}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Коэффициент относительного температурного удлинения $\alpha \cdot 10^6, 1/\text{°C}$	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(см·°C)	Объемная теплоемкость $c\gamma$ , Дж/(см <sup>3</sup> ·°C)
20	1,97	435	11,4	40	3,79
100	1,97	425	11,4	40	3,85
150	1,99	420	11,8	40	3,99
200	2,01	410	12,2	39	4,23
250	1,98	395	12,4	39	4,26
300	1,95	365	12,6	38	4,41
350	1,92	350	12,9	37	4,58
400	1,88	340	13,0	36	4,77
450	1,84	310	13,5	35	5,04
500	1,80	275	13,8	34	5,32
550	1,75	250	13,8	33	5,67
600	1,69	210	13,9	32	6,00
650	1,63	160	14,0	30	6,30
700	1,56	130	14,1	29	6,59
750	1,46	80	16,0	29	11,17
800	1,35	30	18,3	26	6,58
850	1,30	10	18,5	26	5,83
900	1,25	5	18,7	26	5,04
950	1,25	2	19,0	27	4,25
1000	1,25	1	19,4	28	5,04
1050	1,25	1	19,4	28	5,08
1100	1,25	1	19,5	29	5,09
1150	1,25	1	19,5	30	5,17
1200	1,25	1	19,5	30	5,25

Видно, что при  $q_u = 20,8 \cdot I_{cv}$  Вт  $q_s$  составляет чуть больше 20 %, что характерно для дуговой сварки плавлением [5].

Заварка каверны (см. рис. 1) производится дискретно слоями высотой  $h$  не более 2 мм; после каждого слоя необходимо сделать перерыв до полного их остывания. Наиболее ответственным является выполнение первого слоя.

Учитывая локальность нагрева и реальную кривизну стенки трубы температурное поле определяли путем решения осесимметричной задачи теплопроводности для стальной пластины толщиной  $\delta$  с каверной диаметром  $d$  и глубиной  $\delta - H$  (см. рис. 1) при заполнении каверны слоем жидкого металла высотой  $h$  с температурой  $T^*$  в этот период времени  $t_0$  при воздействии теплового потока дуги, равного  $q_u - q_s$ .

Время  $t_0$  находилось по заданным значениям  $h, D, \alpha_u, I_{cv}$ :

$$t_0 = \frac{\pi d^2 h \gamma}{4\alpha_u I_{cv}} 3600 \quad [\text{с}]. \quad (3)$$

Решение нестационарной задачи теплопроводности при указанных условиях осуществлялось численно по программе, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона. При этом учитывали зависимость от температуры теплофизических коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и объемной теплоемкости  $c\gamma$  (табл. 2).

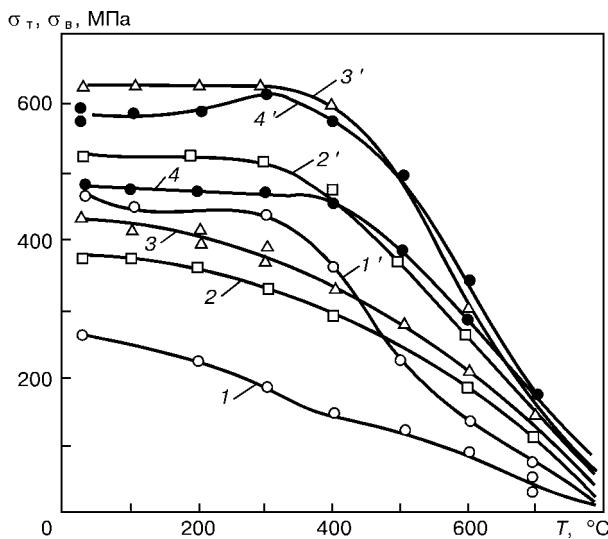
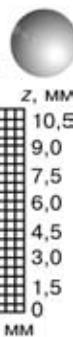


Рис. 3. Влияние нагрева на прочностные характеристики исследуемых сталей: 1, 1' — сталь 20; 2, 2' — 14ХГС; 3, 3' — 17Г1С; 4, 4' — X60; 1—4 —  $\sigma_t$ ; 1—4' —  $\sigma_b$

Результаты численных решений для конкретных исходных данных относительно температур  $T(r, z, t)$  в первую очередь использовали для оценки риска образования прожога при  $P = 0$ .

Критерием отсутствия такого дефекта является условие

$$T_{\max}(r, 0) < T_s,$$

где  $T_{\max}(r, 0)$  — максимальная температура на внутренней поверхности  $z = 0$ ;  $T_s$  — температура солидуса указанного сплава.

На рис. 2 приведены расчеты указанных температур  $T_{\max}(r, 0)$  для труб из стали типа 17Г1С ( $\delta = 11$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 2$  мм) при  $I_{\text{св}} = 90$  и 140 А в зависимости от значений минимальной толщины  $H$  в каверне и скорости прокачиваемой нефти. Определено, что условия заварки ( $h, I_{\text{св}}, H, W$ ) весьма существенно влияют на  $T_{\max}(r, 0)$ .

Если в качестве  $T_s$  принять температуру 1420 °C, то при  $I_{\text{св}} = 140$  А и  $W = 2$  м/с критические значения  $H_{\text{кр}} = 3,5$  мм, а при  $I_{\text{св}} = 90$  А  $H_{\text{кр}} = 2,5$  мм.

Для оценки критического состояния при наличии внутреннего давления рассматривали упругопластическое деформирование зоны завариваемого дефекта, связанное с нестационарным температурным полем  $T(r, z, t)$  и давлением  $P$ .

Решение велось путем последовательного развития упругопластических деформаций, начиная с момента начала нагрева до полного остывания. Так же, как и в случае расчета температур, использовали схему круглой пластины толщиной  $\delta$  и диаметром  $2R$  с шарнирно опертными кромками  $r = B$  и поперечной нагрузкой  $P$ . Радиус  $B$  выбирали из условий, что в зоне образования дефекта напряжения от давления близки к таковым в трубопроводе с толщиной стенки  $\delta$ , диаметром  $2R$  и внутреннем давлением  $P$ , т. е. по [6]

$$B = \sqrt{R\delta} \left[ \frac{8}{3(3+\nu)} \right]^{0.5} \approx 0.9 \sqrt{R\delta},$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

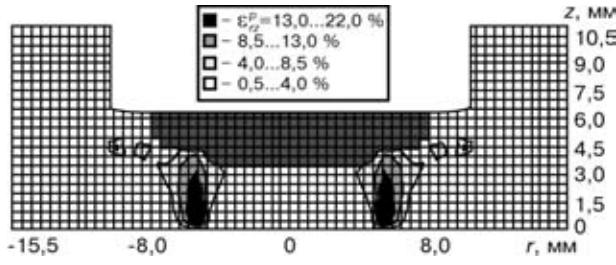


Рис. 4. Распределение пластических деформаций  $\epsilon_{ij}^p$  в момент времени, предшествующий наступлению предельного состояния для следующего варианта (труба размером 11×1020 мм;  $d = 20$  мм;  $I_{\text{св}} = 140$  А)

В результате решения уравнения на каждом шаге прослеживания получали данные о тензорах напряжений  $\sigma_{ij}(r, z, t)$  и деформаций  $\epsilon_{ij}(r, z, t)$ , а также о векторе перемещений  $U_i(r, z, t)$  при  $i = r, z, \beta$ . При этом использовали методику из работ [7, 8].

Необходимые для расчета значения упругих характеристик  $E, v$  и предела текучести  $\sigma_t$  даны в табл. 2 и на рис. 3. Таким образом, прослеживается развитие напряжений  $\sigma_{ij}$  и пластических деформаций  $\epsilon_{ij}^p$  при различном давлении  $P$  (рис. 4), т. е. рассматриваются варианты заварки дефекта при  $P = 0, 2$  МПа и т. д. При некотором  $P = P_{\text{кр}}$  и времени нагрева  $t = t_{\text{кр}}$  наступает критическое состояние пластической неустойчивости, характеризуемое высоким уровнем пластических деформаций  $\epsilon_{rz}^p$  в сечении  $r = r^*$ , как показано на рис. 4. Положение сечения  $r = r^*$  определяется распределением температур и напряжений. Нетрудно видеть, что полученному предельному состоянию достаточно хорошо соответствует известная баттлевская модель [9].

На рис. 5 приведены результаты расчета критических значений  $P_{\text{кр}}$  для трубы из стали 17Г1С с толщиной стенки  $\delta = 11$  мм в зависимости от значений  $H$  при различных сварочном токе и скорости транспортировки.

Из полученных данных видно, что критическое давление  $P_{\text{кр}}$  монотонно возрастает с увеличением значений  $H$  до определенных пределов, выше которых рассматриваемый механизм разрушения при указанных значениях  $I_{\text{св}}, d, W$  в трубах из сталей типа 17Г1С не реализуется, поскольку резко снижается средняя температура по толщине  $H$  и ниже температуры 700...800 °C возрастает предел текучести материала  $\sigma_t$ . Уменьшение диаметра каверны от 20 до 12 мм примерно на 1 мм снижает указанные значения  $H$  от 5...6 (при  $d = 20$  мм) до 4...5 мм (при  $d = 12$  мм).

Данные рис. 6 аналогичны таковым рис. 5, а, но при толщине стенки трубы  $\delta = 18$  мм. Из рисунка видно, что увеличение толщины стенки от 11 до 18 мм при неизменных прочих параметрах практически не изменяет критических значений  $P_{\text{кр}}$  и  $H$  при  $I_{\text{св}} = 90$  А и примерно на 1 мм увеличивает критические значения  $H$  при  $I_{\text{св}} = 140$  А, что связано с тепловым состоянием перемычки, т. е. в случае малых сварочных токов толщина стенки трубы не оказывает заметного влияния на температурное поле в перемычке при высоких температурах.

**Таблица 3. Расчетные данные о  $\Delta t_{\text{б/б}}$  в зоне заваренного дефекта**

z, мм	Без предварительного подогрева										С предварительным подогревом при $T_0 = 150^\circ\text{C}$																		
	при различных $l$ , мм					0					0,5					1,5													
	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5				
0	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5			
11,0	6,8	6,8	6,8	6,7	6,6	6,5	6,3	6,0	5,5	4,9	4,0	6,5	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3			
10,5	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,5	6,3	6,0	5,5	4,9	6,7	6,5	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3			
10,0	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,5	6,3	6,0	5,6	4,9	7,8	0	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3			
9,5	6,9	6,9	6,8	6,8	6,7	6,6	6,4	6,1	5,7	5,1	8,4	0	0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4			
9,0	7,0	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,7	6,5	6,2	5,8	8,8	14,0	0	0	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4			
8,5	7,1	7,1	7,0	6,9	6,8	6,6	6,4	6,4	8,8	5,2	9,0	0	0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5			
8,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1	7,0	6,9	8,6	6,2	5,3	6,9	0	0	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7			
7,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	9,1	6,9	6,3	7,3	7,0	0	0	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8		
7,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,5	7,3	7,0	6,5	8,8	12,1	0	0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0		
6,5	8,3	8,3	8,4	8,4	7,7	7,7	7,6	7,4	7,2	9,5	4,6	7,2	0	0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	
6,0	7,9	7,9	7,9	7,9	7,8	7,8	7,6	7,5	5,9	4,8	5,4	0	0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6		
5,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	0	0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	
5,0	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	7,0	6,7	6,2	8,0	8,1	0	0	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
4,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,6	8,7	7,1	7,1	6,9	8,8	0	0	0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	
4,0	8,8	8,8	8,8	8,9	9,1	9,1	7,2	7,2	7,2	7,1	0	0	0	0	0	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
3,5	9,6	9,6	9,6	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	0	0	0	0	0	0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
3,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,5	7,8	0	0	0	0	0	0	11,8	11,8	11,8	12,0	12,3	9,6	9,7	9,9	0	0	0	0	0	
2,5	7,2	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0	12,0	12,0	12,1	12,4	9,4	9,6	9,8	10,2	0	0	0	0	0	
2,0	7,3	7,3	7,3	7,4	7,4	7,6	8,0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,3	12,3	12,5	9,4	9,5	9,6	9,9	0	0	0	0	0		
1,5	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,8	12,8	9,3	9,4	9,5	9,6	10,0	0	0	0	0	0		
1,0	7,4	7,4	7,4	7,4	7,6	7,6	7,9	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,3	9,4	9,5	9,7	10,1	0	0	0	0	0		
0,5	7,4	7,4	7,5	7,7	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,4	9,4	9,5	9,7	10,2	0	0	0	0	0		
0	7,5	7,5	7,6	7,7	8,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,4	9,4	9,6	9,7	10,3	0	0	0	0	0		



**Таблица 4. Расчетные данные об относительных массовых долях мартенсита в зоне заваренного дефекта**

z, мм	Без предварительного подогрева										С предварительным подогревом при $T_b = 150$ °С																			
	при различных $l$ , мм					Без предварительного подогрева					С предварительным подогревом при $T_b = 150$ °С																			
0	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5				
11,0	0,38	0,38	0,39	0,40	0,42	0,46	0,50	0,58	0,69	0,85	0,42	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,22	0,08	0		
10,5	0,38	0,38	0,39	0,40	0,42	0,45	0,50	0,58	0,69	0,39	0,42	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,22	0,08	0	
10,0	0,38	0,38	0,38	0,38	0,40	0,42	0,45	0,50	0,57	0,69	0,26	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,21	0,08	0	
9,5	0,37	0,37	0,37	0,38	0,39	0,41	0,44	0,49	0,56	0,66	0,21	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,15	0,20	0	0	
9,0	0,35	0,35	0,36	0,36	0,38	0,40	0,43	0,47	0,53	0,18	0,02	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,04	0	0		
8,5	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,38	0,40	0,44	0,18	0,63	0,16	0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,20	0	0	0		
8,0	0,32	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,37	0,19	0,46	0,62	0,37	0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,12	0,18	0	0		
7,5	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,15	0,37	0,45	0,31	0,35	0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,11	0,06	0	0		
7,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,32	0,35	0,43	0,17	0,04	0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,01	0	0		
6,5	0,21	0,21	0,27	0,27	0,28	0,30	0,33	0,13	0,74	0,32	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,38	0		
6,0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,28	0,29	0,52	0,72	0,60	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,15	0		
5,5	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,41	0,50	0,30	0,24	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,18	0,12		
5,0	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,36	0,39	0,47	0,24	0,23	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,14	0,17	0,03	0	
4,5	0,20	0,20	0,20	0,19	0,18	0,33	0,34	0,37	0,17	0	0	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,12	0,13	0,06	0	
4,0	0,17	0,17	0,17	0,15	0,33	0,32	0,33	0,33	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,12	0,12	0	0	0	
3,5	0,12	0,12	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,11	0,10	0	0	
3,0	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,29	0,26	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,11	0	0	0	
2,5	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,11	0	0	0
2,0	0,32	0,32	0,31	0,30	0,28	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,11	0	0	0
1,5	0,31	0,31	0,30	0,29	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,12	0,11	0	0	0
1,0	0,30	0,30	0,30	0,28	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,11	0	0	0
0,5	0,30	0,30	0,29	0,27	0,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,10	0	0	0
0	0,29	0,29	0,28	0,27	0,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,09	0	0	0

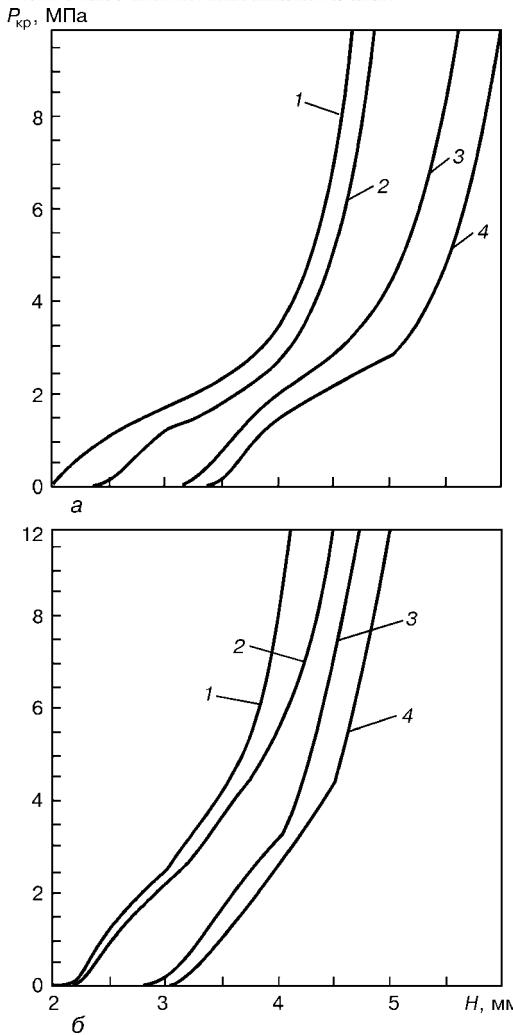


Рис. 5. Зависимость критического давления  $P_{kp}$  от  $H$  при заварке каверны  $d = 20$  (а) и  $12$  мм (б) в трубе нефтепровода диаметром  $1020$  мм с толщиной стенки  $\delta = 11$  мм: 1, 2 —  $I_{cb} = 90$ ; 3, 4 —  $140$  А; 1, 3 —  $W = 6$ ; 2, 4 —  $2$  м/с

Из изложенного выше следует, что при ремонте нефтепровода под давлением, связанным с заваркой отдельных язвенных дефектов, разрушение перемычки толщиной  $H$  и диаметром  $d$  при сварке отдельными слоями высотой  $h$  по механизму пластической неустойчивости зависит от конкретных значений исходных параметров (см. рис. 3, 4), в частности от скорости потока нефти и его давления.

В газопроводах наблюдается примерно аналогичная картина. Однако в этом случае процесс усложняется из-за зависимости интенсивности теплообмена между стенкой и транспортируемой средой от давления в трубопроводе (см. табл. 1).

Приведенные на рис. 7 результаты расчетов при скорости  $W = 6$  и  $20$  м/с, показали, как зависит критическое давление в случае изменения значений  $H$  при различных режимах заварки ( $h = 2$  мм) и диаметрах каверны. Зависимость указанных выше условий теплоотвода от давления приводит к немонотонному изменению  $P_{kp}$  в зависимости от значений  $H$  при малых давлениях.

Наряду с рассмотренным выше следует учитывать еще возможность разрушения металла из-за так называемых водородных (холодных) трещин

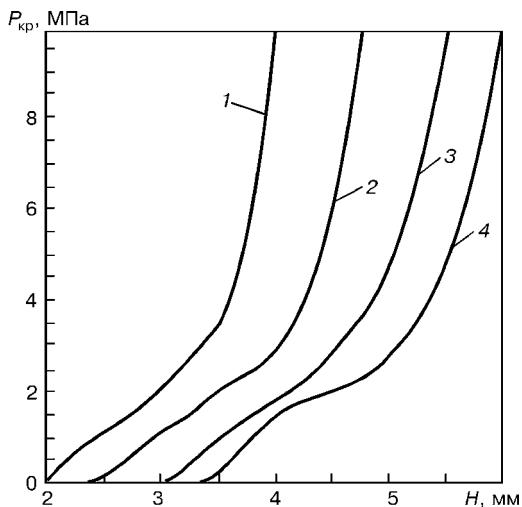


Рис. 6. Зависимость  $P_{kp}$  от  $H$  при заварке каверны  $d = 20$  мм нефтепровода диаметром  $1440$  мм с толщиной стенки  $\delta = 18$  мм (см. обозначения рис. 5)

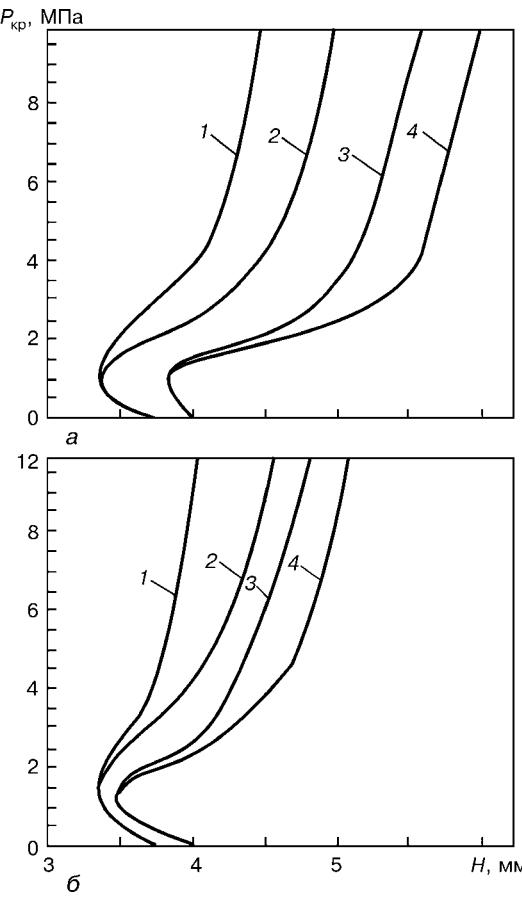


Рис. 7. Зависимость  $P_{kp}$  от  $H$  в трубе газопровода размером  $18 \times 1420$  мм при заварке каверны  $d = 20$  (а) и  $12$  мм (б): 1, 2 —  $I_{cb} = 90$ ; 3, 4 —  $140$  А; 1, 3 —  $W = 20$ ; 2, 4 —  $6$  м/с

или трещин, возникающих в результате быстрого охлаждения при сварке в указанных выше условиях.

Быстрое охлаждение металла способствует появлению закалочных структур, что в сочетании с определенным содержанием диффузионного водорода и растягивающими напряжениями может создавать условия для образования водородных трещин. С учетом значительной роли сварочных напряжений и структурного состояния в образо-

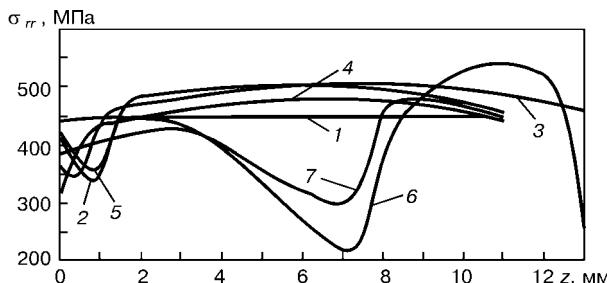


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{rr}$  в зависимости от  $z$  при  $r = 0$  при различных вариантах заварки каверны при  $2R = 1020$  мм,  $d = 20$  мм,  $\delta = 11$  мм: 1 — заполнение каверны в один слой ( $h = 6$  мм); 2 — то же в три слоя с  $h = 2$  мм каждый (основной вариант); 3 — то же в два слоя с  $h = 4$  мм каждый; 4 — заполненные каверны с предварительным подогревом при  $T_0 = 150$  °С; 5 — заполнение каверны по основному варианту при  $P = 0$ ; 6 — заполнение каверны по основному варианту после наложения отжигающего валика; 7 — то же после механического удаления отжигающего валика

вании водородных трещин рассматривались различные варианты заварки каверны, а также их влияние на уровень остаточных окружных напряжений и наличие закалочных микроструктур, определяющих риск образования холодных трещин.

При расчете микроструктурного состояния металла шва и околошовной зоны принимали, что химический состав присадочного материала и основного металла одинаков и соответствует составу стали 17Г1С (ГОСТ 19281-89), мас. %: С 0,15...0,20; Si 0,4...0,6; Mn 1,15...1,6; Cr 0,3; Ni 0,3; Cu < 0,3; P < 0,035; S < 0,040; N > 0,008; As < 0,08.

Использовали диаграмму анизотермического распада аустенита конкретной стали [10], имеющей химический состав в указанном диапазоне. Характерным параметром, определяющим термический цикл охлаждения и распада аустенита, является время  $\Delta t_{8/5}$ , соответствующее охлаждению определенной точки, нагреваемой выше  $A_c$  в интервале температур 850...500 °С.

Для варианта нефтепровода  $2R \times \delta = 11 \times 1020$  мм при заварке каверны ( $d = 20$  мм,  $H = 5$  мм) без подогрева и с подогревом до  $T_0 = 150$  °С при  $h = 2$  мм,  $I_{\text{св}} = 90$  А с помощью расчетов получена информация относительно времени пребывания  $\Delta t_{8/5}$  металла шва и околошовной зоны в интервале температур 850...500 °С (табл. 3 и рис. 8), а также соответствующие микроструктуры (табл. 4). Исходная микроструктура основного материала включала 60 % бейнита и 40 % феррит-перлита. Было определено, что при заварке без подогрева для основного объема металла, нагреваемого выше 850 °С,  $\Delta t_{8/5} \approx 6...8$  с.

На поверхности трубы имеется зона  $r \approx 9,5$  мм, где  $\Delta t_{8/5} \approx 4$  с. Здесь микроструктура в основном представляет собой 70 % бейнита и 30 % мартенсита. Однако в указанных отдельных зонах содержание мартенсита достигает 70 и даже 85 %, что при значительных растягивающих остаточных напряжениях  $\sigma_{rr}$  может приводить к образованию холодных трещин вблизи границы сплавления с основным металлом ( $r \approx 6,5...10,5$  мм).

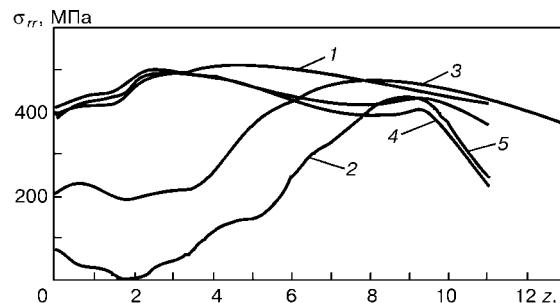


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{rr}$  в зависимости от  $z$  при  $r = 10$  мм при различных вариантах заварки каверны при  $2R = 1020$  мм,  $\delta = 11$  мм,  $d = 20$  мм: 1—3 — см. объяснения рис. 8; 4 — заполнение каверны по основному варианту после наложения отжигающего валика; 5 — то же после механического удаления отжигающего валика

Использование предварительного местного подогрева до 150 °С увеличивает  $\Delta t_{8/5}$  до 10...11 с. Минимальные значения  $\Delta t_{8/5} \approx 8$  с при  $r \approx 9,5$  мм, что существенно сказывается на микроструктуре. Содержание мартенсита не превышает 22 %. Основная масса объема в зоне заваренного дефекта имеет бейнитную структуру с содержанием мартенсита около 10...15 %. Это значительно снижает вероятность образования холодных трещин при наличии растягивающих остаточных напряжений.

Представление об изменении остаточных окружных  $\sigma_{\theta\theta}$  и радиальных  $\sigma_{rr}$  напряжениях в заваренной каверне дает рис. 8 и 9. Здесь приведены значения  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr}$  по толщине δ вдоль оси  $z$  при  $r = 0$  и 10 мм в зависимости от различных условий заварки каверны в трубе нефтепровода размером 11×1020 мм из стали 17Г1С при  $I_{\text{св}} = 90$  А,  $d = 20$  мм,  $H = 5$  мм.

Из изложенного выше следует, что уровень остаточных напряжений при заварке каверны довольно стабилен к технологическим условиям, что характерно для сварки рассматриваемых сталей [7].

Существенно снизить остаточные напряжения возможно при начальном подогреве приблизительно до 300 °С [7], что в действующем трубопроводе нецелесообразно.

## Выводы

1. Язвенные одиночные дефекты могут быть зарваны в действующих газо- и нефтепроводах с помощью ручной дуговой сварки на щадящих режимах при достаточной толщине притупления  $H$ , исключающих образование разрушения перемычки в процессе сварки по механизму пластической неустойчивости под давлением.

2. При заварке язвенного дефекта в трубопроводах из отечественных трубных сталей возникает проблема появления холодных (водородных) трещин. С целью предупреждения этих дефектов необходимо использовать технологические мероприятия для снижения содержания водорода в зоне сварки. Для снижения содержания неблагоприятных структур (мартенсита, низкотемпературного бейнита), от которых зависит образование холодных трещин, можно применять подогрев до 150 °С.

- API Standard 1104. Welding of pipelines and related facilities. Appendix 13-Servis Welding. — American Petroleum Institute. — Sept., 1999.



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2. Разработка режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением / Я. И. Бурак, В. Х. Галюк, А. С. Джарджиманов и др. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. — М., 1981. — Вып. 1. — С. 13–16.
3. Numerical analysis of residual stress distribution in tubes with spiral weld cladding / B. Taliat, T. Zacharia, X.-L. Wang, I. R. Keizer et al. // Welding J. — 1998. — P. 328–335.
4. Исаченко В. П., Осипов В. А., Сухомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 486 с.
5. Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. — М.: Машиностроение, 1964. — 256 с.
6. Прочность, устойчивость, колебания: Справоч.: В 2 т. / Под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968. — 832 с.
7. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
8. Numerical methods of the predictions of welding stresses and distortions / V. I. Makhnenko, E. A. Velikovyanenko, V. E. Pochinok et al. // Welding and surfacing reviews / Ed. by B. E. Paton. — Hardwood: Hardwood acad. publ., 1999. — 150 p.
9. Даффи Ф., Эйбере Р., Макси У. О поведении дефектов в сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления материала хрупкому разрушению. — М.: Мир, 1972. — С. 301–332.
10. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Großer Atlas SchweißTU-Schaubilder. — Dusseldorf: Dt. Verl. Fur Schweißtechnik, DVS-Verl., 1992. — 178 S.

The article considers the possibility of welding repair of pitting corrosion defects 12...20 mm in diameter on the outside surface of walls of a main oil pipeline of steel 17G1S without interruption of its operation. Described is the general procedure for selection of parameters of arc welding of a defect, which eliminate burn-through and fracture in the welding zone by the mechanism of plastic instability at high temperatures and due to cold (hydrogen) cracks.

Поступила в редакцию 27.10.2000



## КАХОВСКИЙ ЗАВОД ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

предлагает однопостовые однофазные трансформаторы  
для ручной электродуговой сварки

Параметр	ТДМ-259	КИ-009-315	КИ-002-500
Напряжение сети (50 Гц), В	380	380	380
Диапазон сварочного тока, А	90...250	60...315	100...500
Сварочный ток, А	ПН 20 % 250	ПН 60 % 315	ПН 60 % 500
Масса, кг	63	102	171

Тел.: (05536) 3-34-52, 3-31-65  
Факс: (05536) 4-10-41, 4-25-90  
E-mail:info@kzeso.com

Адрес:  
Украина, 74800, г. Каховка,  
ул. Пушкина, 109



ТДМ-259

КИ-009-315

КИ-002-500



УДК 621.791.92.04

# ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТКОЛОВ ПРИ НАПЛАВКЕ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

**В. К. КАЛЕНСКИЙ**, канд. техн. наук, **Я. П. ЧЕРНЯК**, инж., **В. Г. ВАСИЛЬЕВ**, канд. техн. наук,  
**Т. Г. СОЛОМИЙЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На примере многослойной восстановительной наплавки изношенных боковых поверхностей желобчатых трамвайных рельсов аустенитными проволоками типа ПП-06Х15Г15Н2МФ показано, что выполнение наплавки первого валика одной дугой с погонной энергией 28...30 кДж/см исключает образование отколов в металле ЗТВ трудносвариваемой высокоуглеродистой стали М-76.

*Ключевые слова:* наплавка, износ, восстановление, металл ЗТВ, отколы, двух- и однодуговой процессы, термические циклы, структура, твердость

Настоящая работа выполнена на примере восстановительной наплавки изношенных рельсов.

Трамвайные рельсы и колеса, работая в паре, изнашивают друг друга. Наиболее интенсивно этот процесс идет на криволинейных участках пути, где устанавливаются желобчатые рельсы. Изнашиваются преимущественно внутренние боковые поверхности головки и губы рельсов.

Перед специалистами ИЭС им. Е. О. Патона была поставлена задача разработать технологию восстановительной наплавки боковых поверхностей изношенных рельсов на действующей трамвайной колее без применения предварительного и сопутствующего подогрева.

Рельсы в основном изготавливают из трудносвариваемой стали М-76 (ГОСТ 24182-80) с массовой долей углерода 0,69...0,82 %. В настоящей работе использовали рельсы из стали М-76, содержащей, мас. %: С 0,76; Mn 0,80; Si 0,33; S 0,021, P 0,017. При дуговой наплавке рельсов из этой стали плавящимся электродом в угол массовая доля углерода в первом наплавленном валике за счет перемешивания с основным металлом может достигать 0,45 %. Чтобы избежать образования хо-

лодных и горячих трещин при таком содержании углерода, наплавку проволоками ферритно-перлитного класса на практике выполняют с обязательным предварительным подогревом и замедленным охлаждением [1, 2]. Поскольку техническим заданием применение подогрева исключалось, в настоящей работе при наплавке использовали стандартные проволоки аустенитного класса марок Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х21Н10Г6 и опытную порошковую проволоку типа ПП-06Х15Г15Н2МФ. Известно [3, 4], что при использовании проволок аустенитного класса, имеющих пониженную температуру плавления, зона термического влияния (ЗТВ) меньше перегревается, а поступление в нее водорода из наплавленного металла резко сокращается.

Близкие к вертикальным изношенные внутренние поверхности наплавляли горизонтальными валиками. Их накладывали друг на друга и подформовывали флюсом АН-72, засыпанным в желоб рельса. Режим наплавки был следующим: сварочный ток  $I_{\text{св}} = 350 \dots 450 \text{ A}$ ; напряжение на дуге  $U_d = 30 \dots 32 \text{ В}$ ; скорость наплавки  $v_h = 28 \dots 42 \text{ м/ч}$ ; постоянный ток; обратная полярность; внешняя характеристика жесткая. Поперечный макрошлиф губы рельса, наплавленной указанным способом, показан на рис. 1.

При изучении макро- и микрошлифов было установлено, что во всех случаях без исключения под первым наплавленным валиком на границе



Рис. 1. Макрошлиф наплавленной губы рельса

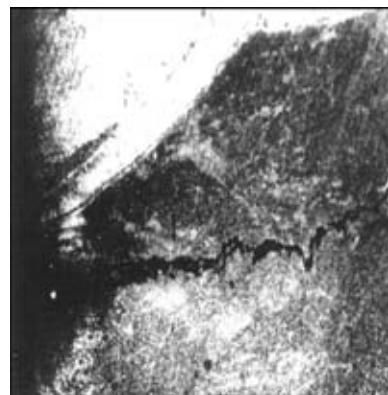


Рис. 2. Откол под первым наплавленным валиком ( $\times 50$ )

© В. К. Каленский, Я. П. Черняк, В. Г. Васильев, Т. Г. Соломийчук, 2001

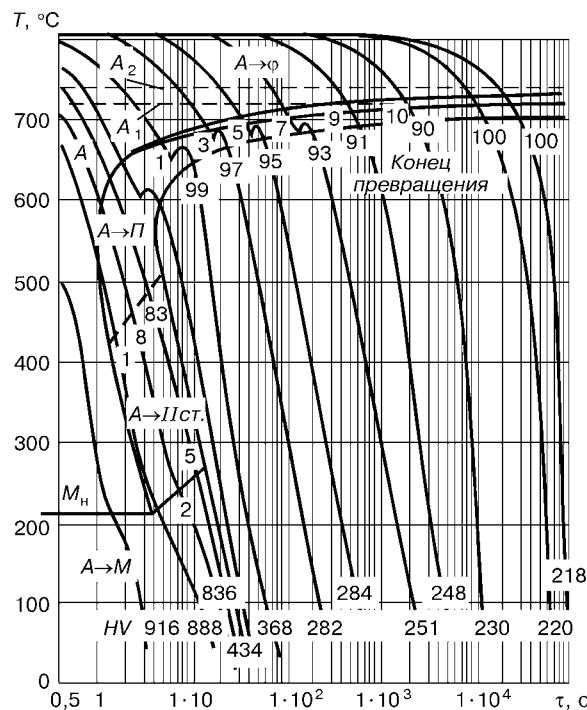


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма превращений аустенита в стали У8, мас. %: С 0,76; Si 0,20; Mn 0,29

сплавления или в металле ЗТВ, вблизи от этой границы, по длине наплавленного участка наблюдалось образование холодных трещин типа отколов (рис. 2). Их глубина составляла от 4 до 8 мм, а раскрытие достигало 0,4 мм. Изменяя параметры режима наплавки в указанных выше пределах, избавиться от них не удалось. Однако необходимо отметить, что в металле ЗТВ последующих валиков трещины отсутствовали, видимо, потому, что они наплавлены на основной металл, который был уже подогрет теплом первого валика.

Наиболее вероятная причина появления отколов под первым валиком — наличие сварочных и структурных напряжений, возникающих на границе сплавления из-за почти двухкратной разницы между коэффициентами линейного расширения (КЛР) аустенитного наплавленного металла и высокоуглеродистой перлитной стали М-76, в металле

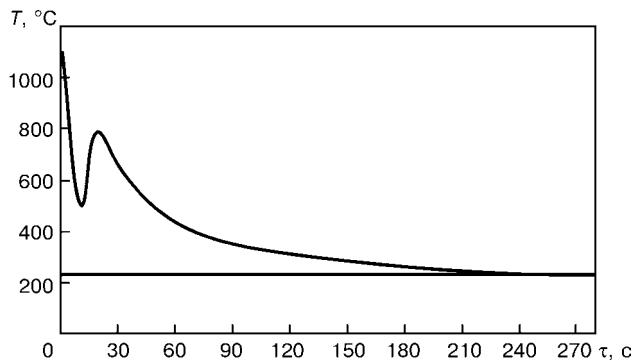


Рис. 5. Кривая термического цикла, полученная при двухсторонней наплавке первого валика с  $Q = 33,56 \text{ кДж/см}$

ЗТВ которой образовались непластичные структуры.

Настоящее исследование было предпринято с целью исключить появление отколов. На первом его этапе определяли влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита в стали М-76. С этой целью на быстродействующем дилатометре конструкции ИЭС им. Е. О. Патона имитировали сварочный термический цикл, при котором скорость охлаждения в интервале температур 600...500 °C составляла  $w_{6-5} = 36, 20 \text{ и } 8,5 \text{ °C/c}$ . При  $w_{6-5} = 36 \text{ и } 20 \text{ °C/c}$  аустенит в стали полностью превращается в мартенсит. Температура начала мартенситного превращения составляет около 230 °C. При скорости охлаждения 8,5 °C/c мартенситному превращению  $M_h$  предшествует незначительное частичное промежуточное превращение аустенита в перлит.

Следует отметить, что сталь М-76 по составу очень близка стали У8, близки также и температурные интервалы превращений в этих сталях, а точки  $M_h$  совпадают полностью. Поскольку в литературе мы не нашли достаточно подробной термокинетической диаграммы распада аустенита в стали М-76, то в настоящей работе руководствовались известной [5] диаграммой превращения аустенита в стали У8 (рис. 3). Из нее следует, чтобы получить в металле ЗТВ относительно благоприятную структуру с твердостью около HV 350 ( $P = 10 \text{ H}$ ,  $t = 10\ldots15 \text{ с}$ ) нужно «выйти» из мар-

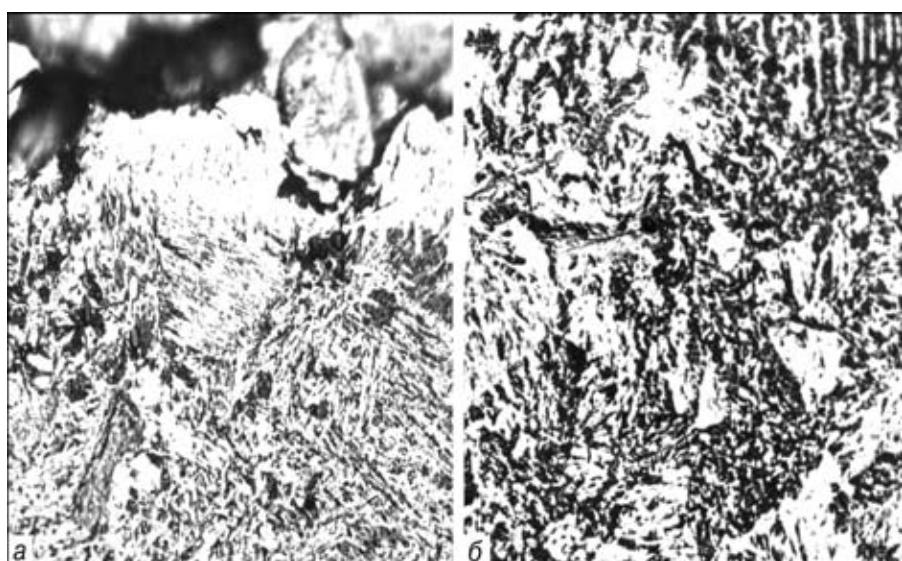


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла ЗТВ, полученная при двухсторонней наплавке первого валика:  $a - Q = 19,41$ ;  $b - 33,56 \text{ кДж/см}$

**Таблица 1. Влияние погонной энергии на образование отколов под первым валиком при двухдуговой наплавке\***

№ опыта	Валик	Количество дуг	$I_{cb}$ , А	$v_h$ , м/ч	$Q$ , кДж/см	$w_{3-2}$ , °C/c	Максимальная твердость ЗТВ, HV <sub>1</sub>	Наличие отколов
1	Первый,	2	620*	36,8	19,41	1,05	413	Есть
	остальные	1	350	36,8	10,96	Не опр.	—	
2	Первый,	2	620*	24,8	28,80	0,70	378	Нет
	остальные	1	350	36,8	10,96	Не опр.	—	
3	Первый,	2	620*	21,8	33,56	0,40	348	»
	остальные	1	350	36,8	10,96	Не опр.	—	

\* Суммарный ток на двух дугах; напряжение на дуге составляет 32 В.

**Таблица 2. Влияние погонной энергии на образование отколов под первым валиком при однодуговой наплавке\***

№ опыта	Валик	$v_h$ , м/ч	$Q$ , кДж/см	$w_{3-2}$ , °C/c	Максимальная твердость ЗТВ, HV	Наличие отколов
4	Первый,	36,8	11,59	1,25	408	Есть
	остальные	36,8	11,59	»	—	
5	Первый,	19,2	22,20	0,85	368	Нет
	остальные	36,8	11,59	»	—	
6	Первый,	15,2	28,05	0,50	352	»
	остальные	36,8	11,59	»	—	

\* Остальные параметры режима наплавки составляют:  $I_{cb} = 370$  А;  $U_d = 32$  В.

тенситной области. Для этого требуется уменьшить скорость охлаждения стали после наплавки, т. е. увеличить время охлаждения металла ЗТВ до 150...250 с. Известно, что эффективным способом снижения скорости охлаждения металла ЗТВ является двухдуговая наплавка [6, 7]. Изменяя параметры режима наплавки на каждой дуге, а также расстояние между ними, можно в широких пределах регулировать характеристики термического цикла.

В нашем случае наплавку первого валика выполняли двумя, последовательно расположеннымми, расщепленными проволоками, которые подключали к одному источнику питания. Для проведения опытов была выбрана порошковая проволока типа

ПП-06Х15Г15Н2МФ. При этом руководствовались следующими соображениями:

металл, полученный при наплавке этой проволокой, имеет самый большой КЛР ( $23 \cdot 10^{-6}$  в интервале 0...1000 °C) и, следовательно, в большей степени склонен к образованию отколов;

он содержит минимальное количество никеля, дефицитного в Украине;

его твердость после наплавки, составляющая около HRC 22, после наклепа колесами трамвая увеличивается до HRC 52, что повышает износостойкость наплавленных рельсов в несколько раз.

В опытах использовали плавленый пемзовидный флюс АН-72. Перед наплавкой флюс и проволоку тщательно прокаливали в печи. Начинали наплавку при температуре 10 °C. Расстояние между дугами при наплавке первого валика устанавливали равным 90 мм. Второй и последующие валики наплавляли одной электродной проволокой. В общей сложности

на каждый образец наплавляли по пять валиков с интервалом 10 мин после наплавки каждого. Погонную энергию рассчитывали по формуле

$$Q = \frac{60I_{cb}U}{1000v_h} \text{ [кДж/см]},$$

где  $v_h$  — скорость наплавки, см/мин.

Запись термических циклов осуществляли самопишущим прибором КСП-4 с использованием хромель-алюмелевых термопар, зачеканных в основном металле на уровне предполагаемой границы сплавления. Результаты проведенных опытов приведены в табл. 1.

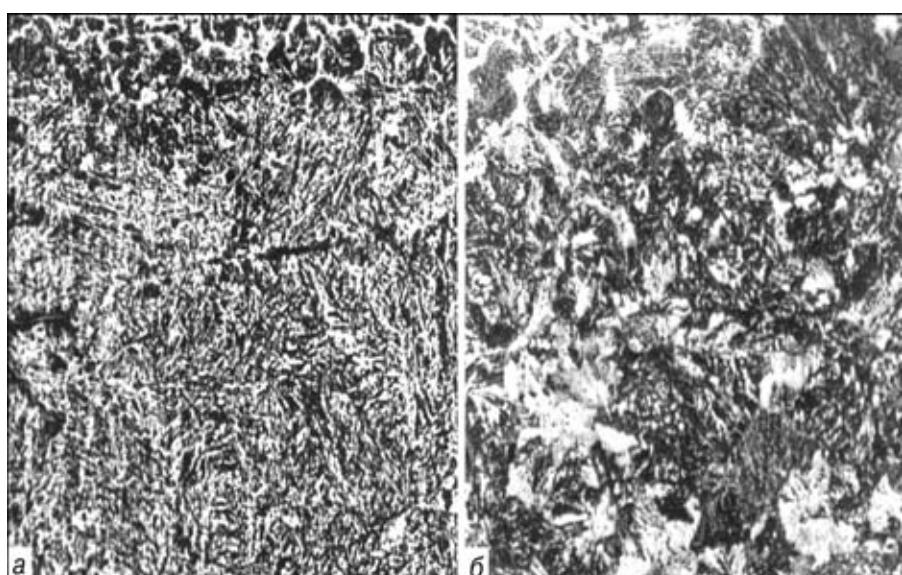


Рис. 6. Микроструктура (X500) металла ЗТВ, полученная при однодуговой наплавке первого валика: *a* —  $Q = 11,59$ ; *b* —  $28,05$  кДж/см

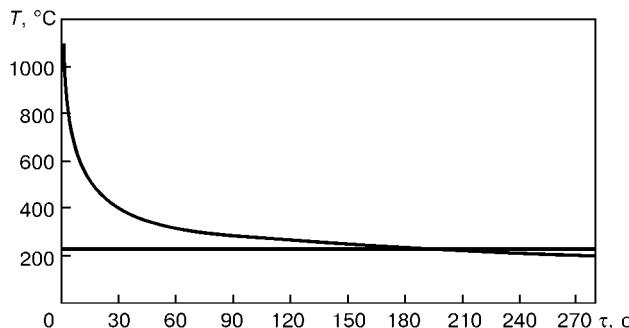


Рис. 7. Кривая термического цикла, полученная при однодуговой наплавке первого валика с  $Q = 28,05 \text{ кДж/см}$

С помощью металлографических исследований установлено, что под первым наплавленным валиком структура металла ЗТВ вблизи границы сплавления в образце, полученным в опыте № 1, практически полностью состоит из отпущеного мартенсита (рис. 4, а). Его твердость достигает  $HV 413$ . На границе сплавления виден откол. С увеличением погонной энергии доля мартенсита отпуска уменьшается и в структуре металла ЗТВ образуются бейнит и даже перлит (рис. 4, б).

На рис. 5 приведена кривая термического цикла, полученная в опыте № 3 при двухдуговой наплавке первого валика, обеспечивающего отсутствие трещин в ЗТВ основного металла.

Таким образом, применение двухдуговой наплавки позволяет решить проблему наплавки трамвайных рельсов без предварительного подогрева и отколов в металле ЗТВ под первым валиком. Однако этот способ наплавки заметно усложняет технологический процесс, поскольку рабочему уследить за двумя проволоками труднее, чем за одной (следует учитывать, что наплавка рельсов должна производиться на улице в ночное время, когда трамвайное движение прекращается).

В связи с изложенным выше мы остановились на наплавке первого валика одной проволокой. В остальном методика наплавки и записи термических циклов остались прежними. Результаты второй серии опытов приведены в табл. 2.

Наплавка на малой погонной энергии (опыт № 4) так же, как и при двухдуговом способе, приводит к возникновению откола. В металле ЗТВ

It is shown by an example of multilayer restoration surfacing of worn out side surfaces of tram guard rails, using austenitic wires of the 06Kh15G15H2MF type, that deposition of the first bead by one arc with a heat input of  $28...30 \text{ kJ/cm}$  eliminates spallings in the HAZ of hard-to-weld high-carbon steel M-76.

образуется мартенсит, который при наложении последующих валиков подвергается отпуску (рис. 6, а). Его твердость составляет  $HV 408$ . Увеличение погонной энергии при наплавке первого валика до  $28,05 \text{ кДж/см}$  уменьшает скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур  $300...200^\circ\text{C}$  до  $0,50^\circ\text{C/s}$ , а максимальную твердость — до  $HV 352$ . Отколы при этом исключаются. Структура металла ЗТВ состоит из бейнита и перлита (рис. 6, б). Благодаря уменьшению тепловложения при однодуговой наплавке структура его заметно измельчается по сравнению с двухдуговой.

На рис. 7 показана кривая термического цикла, полученная при однодуговой наплавке первого валика, обеспечивающего отсутствие трещин в металле ЗТВ основного металла.

Таким образом, чтобы исключить образование отколов в металле ЗТВ рельсов из стали М-76 при наплавке проволоками аустенитного класса, первый валик следует наплавлять одной дугой при погонной энергии  $28...30 \text{ кДж/см}$ .

Порошковая проволока ПП-06Х15Г15Н2МФ сравнительно дорогая, однако ее применение для наплавки экономически оправдано. Расчеты, при которых не учитывалось повышение износостойкости рельсов, показали, что расходы на восстановительную наплавку рельсов с применением указанной проволоки в 3...4 раза меньше, чем на замену изношенных рельсов новыми.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
2. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
4. Козлов Р. А. Сварка теплостойчивых сталей. — М.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
5. Потов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
6. Метелев А. В., Горбачев Ю. И. Регулирование термического цикла двухдуговой сварки закаливающихся сталей // Свароч. пр-во. — 1984. — № 2. — С. 4–5.
7. Бурский Г. В., Савицкий М. М., Новикова Д. П. Сопротивляемость ЗТВ сварных соединений закаливающихся высокопрочных сталей замедленному разрушению при двухдуговой сварке // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 12–15.

Поступила в редакцию 16.07.2001



УДК 621.791.72.01:621.375.826;669-419

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Al+SiC

**В. Р. РЯБОВ**, д-р техн. наук, **А. Н. МУРАВЕЙНИК**, инж., **В. П. БУДНИК**, канд. техн. наук, **Андр. А. БОНДАРЕВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**М. М. МОННЕН**, д-р (Ун-т Монпейе, Франция),  
**И. С. ПОЛЬКИН**, **В. Ю. КОНКЕВИЧ**, доктора техн. наук, **Е. М. ТРУБКИНА**, инж. (АОА ВИЛС, РФ)

Исследовано влияние нестационарных источников нагрева при электронно-лучевой, лазерной и аргонодуговой сварке на структурные изменения в матрице, характер поведения и распад упрочняющих частиц в литом алюмокомпозите с дисперсными керамическими частицами SiC. Предложена технология аргонодуговой сварки композиционного материала AMg5 + 12 % SiC.

**Ключевые слова:** дисперсно-упрочненный композиционный материал, матрица, упрочняющие частицы, включения, структура, эвтектика, твердость, сварка, присадочная проволока, прочность

Литые композиты на основе алюминиевых сплавов, армированные керамическими частицами SiC и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , являются перспективными конструкционными материалами, поскольку имеют высокие значения прочности, жесткости, жаропрочности, размерной стабильности и хорошее сопротивление износу. Благодаря относительной дешевизне и простоте способов производства они становятся в машиностроении серьезными конкурентами традиционным сплавам. Однако успешное применение в современных конструкциях композиционных материалов (КМ) в значительной мере зависит от их свариваемости [1]. В этой связи для КМ на основе алюминия актуальным остается применение традиционных методов сварки плавлением с использованием широко распространенного технологического оборудования.

Для выбора наиболее рационального способа сварки плавлением исследовали влияние нагрева при лазерной, электронно-лучевой (ЭЛС) и аргонодуговой (АДС) сварке дисперсно-упрочненного композита Al25 + 18 % SiC на структурные изменения в матрице, характер взаимодействия армирующих частиц с алюминиевым расплавом с целью определения факторов, влияющих на формирование сварного соединения. Микроструктуру композита в исходном состоянии и после сварки изучали на металлографических шлифах образцов до и после химического травления в растворе реактива Келлера. Их предварительную подготовку к исследованиям осуществляли шлифованием на алмазных эластичных дисках различной зернистости [2]. Измерение твердости образцов проводили на приборе «Роквелл» при нагрузке  $F = 600$  Н, микротвердости — на приборе ПМТ-3 при  $F = 0,1$  Н, а определение элементного состава матрицы и армирующих фаз — на рентгеновском микроанализаторе «Самебах».

Исследуемый композит был изготовлен литейным методом — механическим замешиванием тугоплавких частиц карбида кремния SiC в расплав материала матрицы. В качестве основы в композите использовали сплав Al25 со следующей массовой долей, %: кремния 11...13; меди 1,5...3,0; магния 0,85...1,35; марганца 0,3...0,6; никеля 0,8...1,3; титана 0,05...1,2; хрома < 0,2; железа < 0,8; цинка < 0,5; скандия < 0,02; олова < 0,1; алюминия — остальное. Он относится к поршневым силуминам и является высоколегированным литейным сплавом. Объемная доля армирующих частиц SiC в композите составляла 18 %.

В исходном состоянии основными структурными составляющими композита (рис. 1) являются упрочняющие частицы SiC, дендриты  $\alpha$ -твердого раствора алюминия и дисперсная (Al + Si) эвтектика. При тонком внутреннем строении колонии основной эвтектики имеют более крупные размеры. Внутри них обнаруживаются включения многокомпонентных эвтектик  $\text{FeNiAl}_9 + \text{Al}_\alpha$ ,  $\text{CuNiAl} + \text{Al}_\alpha$ ,  $\text{CuSi}_4\text{Mg}_5\text{Al}_4 + \text{Al}_\alpha$  и др. Армирующие частицы карбида кремния имеют серый цвет, угловатую форму и размеры 5...15 мкм. Они неравномерно распределены в объеме матрицы (расстояние между отдельными частицами варьируется от 3 до 50 мкм).

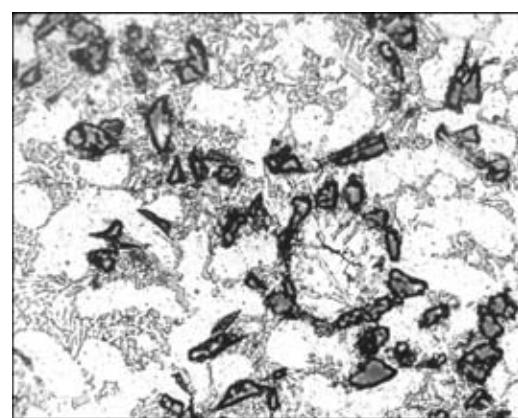


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 600$ ) композита Al25 + 18 % SiC

© В. Р. Рябов, А. Н. Муравейник, В. П. Будник, Андр. А. Бондарев, М. М. Моннен, И. С. Полькин, В. Ю. Конкевич, Е. М. Трубкина, 2001

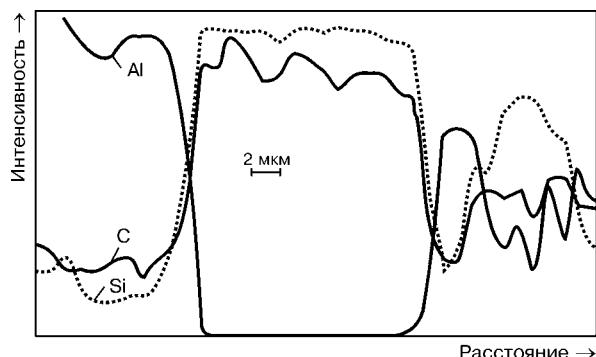


Рис. 2. Характер распределения интенсивности излучения элементов в композите Al25 + 18 % SiC (исходное состояние)

и преимущественно располагаются в эвтектиках. По-видимому, при затвердевании композита эти частицы не становятся центрами кристаллизации для дендритов, а оттесняются растущей твердой фазой в междендритные пространства.

В исходном состоянии в композите методами световой металлографии пор, несплошностей, продуктов химического взаимодействия на межфазной поверхности частица – матрица не обнаружена (рис. 1).

На рис. 2 представлен характер распределения интенсивности излучения элементов в композите Al25 + 18 % SiC при сканировании электронным зондом последовательно твердого раствора алюминия, частиц SiC и эвтектики. По данным микрорентгеноспектрального анализа серые армирующие частицы SiC имеют следующую массовую долю, %: кремния 71,4; алюминия 1,5; магния 0,026; марганца 0,04; железа 0,016; никеля 0,03; меди 0,076; углерода 26,6 (по разности). Плотность композита довольно хорошая – имеются лишь единичные микропоры. Его твердость в исходном состоянии составляет HRB 106...107.

На образцах исследуемого композита толщиной 5 мм методом металлографии изучали проплавы, выполненные электрической дугой в аргоне ( $I_{cb} = 120$  А), излучением CO<sub>2</sub>-лазера ( $P = 2,7$  кВт,  $v_{cb} = 72$  м/ч), а также электронным лучом ( $P =$

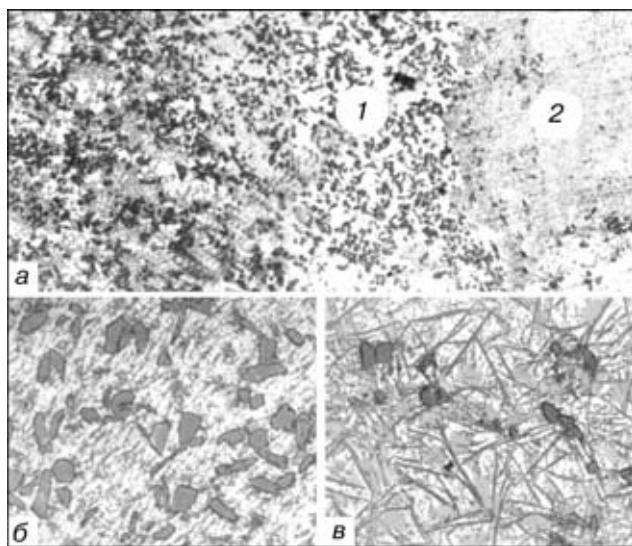


Рис. 3. Структура шва при проплавлении лазерным лучом композита Al25 + 18 % SiC (а, X100); б – периферия шва (область 1); в – центр шва (область 2), X600

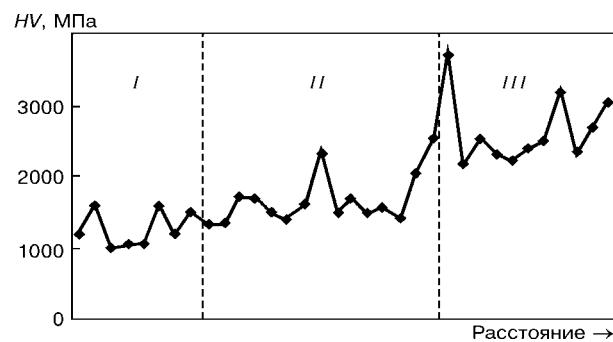


Рис. 4. Микротвердость шва при лазерном проплавлении композита Al25 + 18 % SiC: I – зона основного металла; II – периферия; III – центр шва

$= 1,8$  кВт,  $v_{cb} = 60$  м/ч). Исследования показали, что при лазерном проплавлении в условиях высоких скоростей охлаждения наблюдается значительно более измельченная структура матрицы в металле шва, чем в основном металле. В ней присутствуют мелкие дендриты твердого раствора алюминия и тонкая эвтектика с дисперсными включениями (рис. 3, б, в). Следует отметить, что по характеру распределения армирующей фазы отдельные участки проплава заметно отличаются (рис. 3, а). Так, узкий участок шва, примыкающий к линии сплавления, почти свободен от частиц SiC, что может быть связано с началом кристаллизации сварочной ванны и оттеснением этих частиц растущими дендритами  $\alpha$ -твердого раствора. Далее идет широкая область проплава, в которой темносерые частицы SiC расположены более равномерно, чем в структуре исходного композита. А в центре шва почти по всей глубине проплава они присутствуют лишь на отдельных участках. В этой части наблюдается образование новых фаз – значительное количество хаотично расположенных игольчатых включений и крупных глобулей светло-серой фазы. Встречается и комплексное выделение этих двух фаз (рис. 3, в).

Как видно из рис. 4, при лазерном проплавлении микротвердость металла шва выше, чем основного металла. Однако в самом металле шва наблюдается различие в ее значениях на периферии и в центральной части. В последней микротвердость тех участков, где обнаружены образования новых фаз, достигает 2500 МПа, а в местах скопления включений она превышает 3000 МПа.

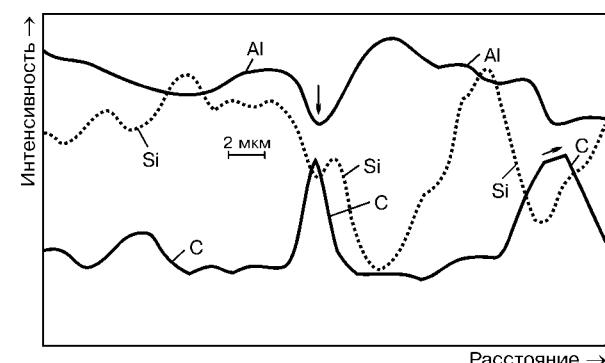


Рис. 5. Характер распределения элементов в центральной области шва при лазерном проплавлении композита Al25 + 18 % SiC (斯特релкой отмечено игольчатое включение)

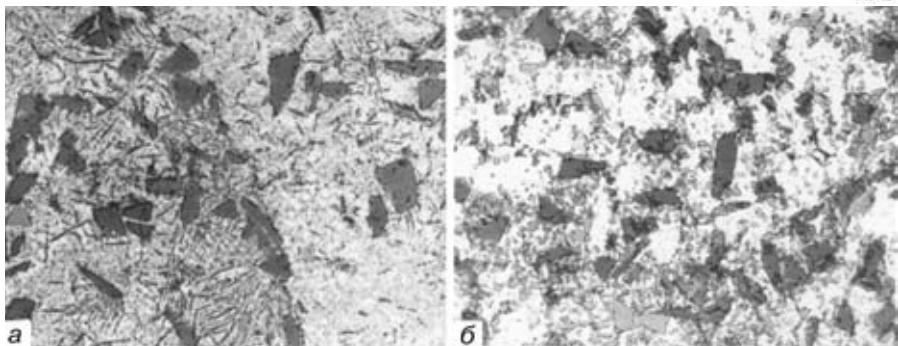
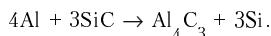


Рис. 6. Микроструктура шва ( $\times 600$ ) при ЭЛС (а) и АДС (б) проплавлении композита Al25 + 18 % SiC

Анализ кривых распределения элементов в металле шва (рис. 5) показал, что при сканировании электронным зондом игольчатых включений фиксируется увеличение массовой доли углерода и одновременное ее снижение у кремния и алюминия по сравнению с таковыми в твердом растворе. Вероятно, игольчатые включения — это фаза  $Al_4C_3$ , а светлые глобулы — кристаллы кремния, так как химическое взаимодействие между карбидом кремния и алюминиевым расплавом начинается при температурах выше 660 °С и осуществляется по реакции [3, 4]



При высоких температурах ( $> 800$  °С) это взаимодействие может происходить до полной деградации частиц SiC [4]. По-видимому, именно в центральной части шва, непосредственно под лазерным лучом, где при проплаве отмечается максимальная температура, происходит интенсивная диссоциация частиц SiC.

Электронный луч обеспечивает более глубокое проплавление композита, чем лазерный. В обоих случаях литой металл в шве кристаллизуется с образованием дисперсной структуры, но при лазерном проплавлении степень дисперсности эвтектических выделений и дендритов твердого раствора алюминия больше.

При электронно-лучевом проплавлении армирующие частицы SiC почти равномерно распределяются в матрице металла шва. Исключением является небольшой участок в центральной части ближе к поверхности шва, где обнаружены короткие и тонкие игольчатые включения  $Al_4C_3$ , располагающиеся, как правило, вокруг частиц SiC (рис. 6,

а). Очевидно, в этой области происходит взаимодействие алюминиевого расплава с этими частицами по приведенной выше реакции. Оно менее интенсивно, чем при воздействии лазерным лучом, поскольку меньше область взаимодействия, в которой наблюдается образование включений новой фазы. На рассматриваемом участке игольчатые включения более тонкие и короткие, чем в случае лазерного проплавления, а избыточные кристаллы кремния отсутствуют, что характерно для дозвтектического алюминиевого сплава и свидетельствует о переходе в расплав небольшого количества кремния. Микротвердость на различных участках шва изменяется мало и составляет  $HV 1500\ldots 1700$  МПа.

При аргонодуговом проплавлении композита Al25 + 18 % SiC сварочная ванна характеризуется большой вязкостью. В структуре шва при перекристаллизации изменяется характер эвтектических выделений. Вместо тонкодифференцированных объемных эвтектических колоний, как в основном металле, в металле шва наблюдается целая гамма эвтектик различной формы кристаллизации и более равномерное их рассредоточение (рис. 6, б). Следует отметить и более равномерное расположение в металле шве армирующих частиц SiC. Микротвердость металла шва немного увеличивается и достигает  $HV 1500\ldots 2000$  МПа при микротвердости основного металла  $HV 1000\ldots 1500$  МПа.

Таким образом, характер кристаллизации сварных швов и стойкость армирующих частиц в алюминиевом расплаве при сварке определяется в основном температурно-временными условиями процесса проплавления, связанными с его основными параметрами (интенсивностью теплового источника, скоростью сварки, условиями теплоотвода из зоны плавления), а также теплофизическими свойствами свариваемого металла.

Полученные результаты позволили определить условия проведения и режимы АДС композита

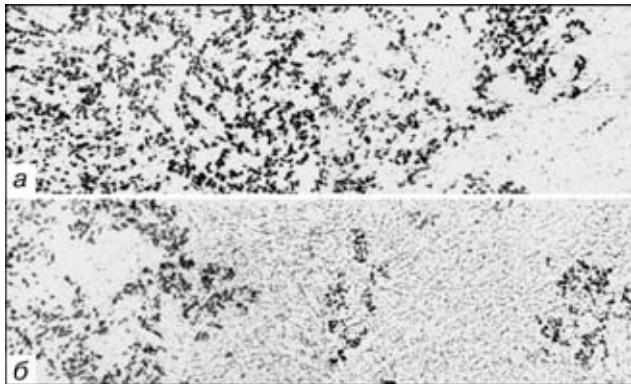


Рис. 7. Структура шва ( $\times 100$ ) сварного соединения композита AMг5 + 12 % SiC, полученного АДС с присадочной проволокой СwAMг63 (а) и СwAK5 (б)

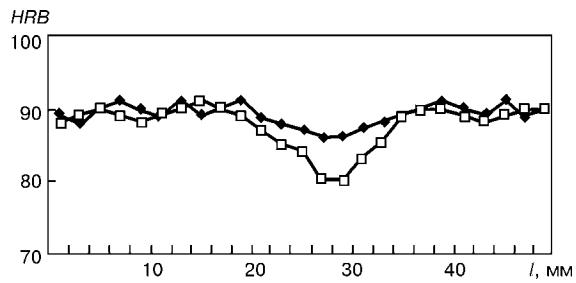


Рис. 8. Распределение твердости в соединении композита АМг5 + 12 % SiC, выполненного АДС с присадочной проволокой СwAMг63 (□); СwAK5 (◆) ( $l$  — длина исследуемого участка)



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Прочность композита АМг5 + 12% SiC и его сварных соединений, выполненных АДС с различными присадочными проволоками

Объект исследования	Номер образца	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Среднее значение $\sigma_{cp}$ , МПа	Область разрушения
АМг5 + 12 % SiC (основной металл)	1	273,0	278,4	—
	2	273,8		
	3	288,4		
Сварное соединение (АДС, проволока СвАМг63)	4	290,0	267,9	Зона сплавления
	5	271,8		
	6	241,8		
То же (АДС, проволока СвАК5)	7	183,5	175,3	Шов
	8	180,7		
	9	161,6		

АМг5 + 12 % SiC, изготовленного литейным способом с последующим прессованием и прокаткой [5]. На образцах этого опытного сплава толщиной 3 мм способом АДС неплавящимся электродом на переменном токе были получены соединения с полным проваром и нормальным формированием шва. Для сварки использовали специальную лабораторную установку ( $v_{cb} = 10 \dots 12 \text{ м/ч}$ ,  $I_{cb} = 150 \text{ A}$ ) и источник питания ИСВУ-315.

Сварку стыковых соединений указанного композита выполняли в аргоне с использованием присадочных проволок СвАМг63 и СвАК5. Первая выбрана с целью повышения прочности шва, вторая — улучшения текучести сварочной ванны. В обоих случаях получены сварные соединения с полным проваром и нормальным формированием обратного валика. При этом структура алюминиевого сплава (матрицы) во всех швах имеет типичную для литого состояния дендритную структуру с высокой дисперсностью выделений избыточных фаз по границам. В центре швов наблюдаются равноосные кристаллы, которые несколько вытянуты у линии сплавления в направлении кристаллизации (рис. 7). Количество дисперсных выделений по границам в металле швов больше при сварке с использованием проволоки СвАК5, чем проволоки СвАМг63, что, по-видимому, связано с дополнительным введением кремния и увеличением количества эвтектических выделений. Поры встречаются во всех швах независимо от типа присадочной проволоки, но их значительно больше в швах с СвАК5, чем в случае СвАМг63. Независимо от вида проволоки армирующая фаза в металле швов распределена неравномерно, а его твердость ниже твердости основного металла композита, что связано с использованием неармированной присадки и разбавлением основного металла присадочной проволоки. Характер распределения твердости в сварных соединениях композита, выполненных АДС с присадкой СвАК5 и СвАМг63, приведен на рис. 8.

В швах, сваренных с присадкой СвАК5, наблюдается значительная неоднородность распределения армирующего наполнителя. В них крупные области, свободные от частиц SiC, располагаются как в центре шва, так и непосредственно у линии сплавления (рис. 7, б), а в корне шва обнаружено скопление армирующих частиц. Очевидно, значительная пористость и неоднородность распределения армирующего наполнителя оказывают большое влияние на твердость металла швов, выполненных

с присадкой СвАК5 (рис. 8), а следовательно, и на прочностные характеристики этих сварных соединений (таблица).

Более равномерное распределение армирующего наполнителя и хорошая его насыщенность, особенно вдоль линии сплавления, зафиксирована в металле швов с присадкой СвАМг63 (рис. 7, а), что обеспечивает и более высокую их твердость. Однако в центре шва насыщенность матрицы армирующими частицами меньше — наблюдается чередование областей, свободных от частиц SiC, и их скоплений. Соответственно несколько снижается и твердость металла в центральной части шва (рис. 8). Активного взаимодействия на границе частица — матрица с образованием кристаллов  $\text{Al}_4\text{C}_3$  в швах сварных соединений композита методами оптической металлографии не обнаружено.

Механические испытания на растяжение сварных соединений композита АМг5 + 12 % SiC проводили на плоских образцах с усилием и проплавом обратной стороны шва. Установлено, что прочность сварных соединений композита существенно зависит от выбора присадочной проволоки: самой низкой прочностью отличаются сварные соединения, выполненные с присадкой СвАК5, у которых разрушение происходит преимущественно по шву. Это можно объяснить повышенной пористостью таких швов и неоднородностью распределения армирующего наполнителя. Прочность сварных соединений, выполненных с присадкой СвАМг63, на 80...100 МПа выше прочности образцов, полученных с присадкой СвАК5 (таблица). Временное сопротивление разрыву сварных соединений композита АМг5 + 12 % SiC с присадкой СвАМг63 составляет 85 % прочности основного материала.

## Выводы

1. Рассмотрено влияние нестационарного нагрева на структурные изменения в матрице, характер поведения и распад упрочняющих частиц при лазерной сварке, ЭЛС и АДС дисперсно-упрочненного КМ Аl25 + 18 % SiC. Установлено, что при лазерной сварке образцов толщиной 5 мм, по сравнению с ЭЛС степень распада частиц SiC увеличивается, образуя достаточно пересыщенный твердый раствор, что ведет к повышению твердости металла шва и снижению прочностных свойств сварных соединений.



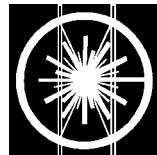
2. Показано, что в результате снижения температуры и скорости кристаллизации металла сварочной ванны удается значительно уменьшить распад упрочняющих частиц в КМ.
3. При АДС композита АМг5 + 12 % SiC в аргоне присадочными проволоками СвАК5, и СвАМг63 швы с присадкой СвАМг63 имеют большую прочность и более равномерное распределение армирующего наполнителя.
1. Крейдер К. Композиционные материалы с металлической матрицей / Пер., с англ.: В 8 т. — М.: Машиностроение, 1978. — 504 с., Т. 4: Композиционные материалы.

Investigated is the effect of non-stationary heat sources in electron beam, laser and argon-arc welding on structural changes in the matrix, behaviour and decomposition of strengthening particles in a cast aluminium composite material with dispersed ceramic particles SiC. The technology is suggested for argon-arc welding of the SiC composite material.

Поступила в редакцию 18.10.2000,  
в окончательном варианте 05.03.2001



## УВАЖАЕМЫЕ ГОСПОДА!



5. Konferenz  
Strahltechnik  
**2001**

27-28 ноября 2001 г. в Учебно-исследовательском институте (SLV), г. Галле состоится 5-я конференция "Лучевая техника". Эта конференция, которую SLV проводит вместе с Германским обществом сварки и родственных процессов (DVS), предоставит конструкторам, разработчикам и инженерам-производственникам возможность, прослушав доклады в 8 секциях и участвуя в дискуссиях, получить информацию о последних практических разработках и результатах научных исследований в области лучевых технологий.

Настоящая конференция продолжает тенденции прежних конференций в Карлсруэ, Эссене и в мае 1996 г. в Галле будет способствовать тому, что бурно развивающиеся лучевые процессы займут свое достойное место в производстве.

Учитывая прогресс в развитии электронно-лучевого и лазерного способа и аппаратуры по прошествии пяти лет позволит произвести сравнение электроннолучевой обработки с обработкой лазерным лучом на международном уровне.

Тематика конференции соответствует таким проблемам, как применение электронного и лазерного луча, гибридная сварка, концепция производства и стандартизация, подготовка кадров и обеспечение качества. Впервые будет обсуждаться вакуумная ЭЛС, кроме того, после ряда докладов состоится дискуссия по лучевым технологиям со специалистами из Восточной Европы.

На выставке во время конференции будут представлены известные экспоненты от промышленности и исследовательских центров.

Приглашаем на 5-ю конференцию "Лучевая техника" всех представителей прикладных исследований и разработок, всех коллег из промышленности, которые уже применяют или планируют применение лучевых технологий.

За справками обращаться по тел.: (49 0345) 52 46-4 14,  
(49 0345) 52 46-4 18  
[www.slv-halle.de](http://www.slv-halle.de)



## ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА $\gamma$ -АЛЮМИНИДА ТИТАНА ПРИ ЭЛС

В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, В. К. САБОКАРЬ, канд. техн. наук, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализировано развитие упругопластических деформаций при сварочном нагреве и охлаждении образцов  $\gamma$ -сплава алюминида титана расчетными методами. Определен уровень остаточных продольных напряжений в пластинах сплава толщиной 5...17 мм при ЭЛС в зависимости от температуры предварительного подогрева и отжига сварных соединений после сварки. Установлено, что предупреждение образования поперечных трещин в швах сплава 47ХД, выполненных однопроходной ЭЛС на металле толщиной до 17 мм включительно, обеспечивается предварительным подогревом образцов до 400...500 °C и отжигом сварных соединений в интервале температур 800...900 °C в течение 10...15 мин.

**Ключевые слова:** алюминид титана, холодные трещины, температурные поля, упругопластические деформации, напряжения, предварительный подогрев, отжиг

Интерес к  $\gamma$ -сплавам на основе алюминида титана TiAl продиктован их уникальными свойствами. Они обладают высокими жаропрочностью и жаростойкостью и одновременно относительно низкой плотностью (3,8...3,9 г/см<sup>3</sup>) [1, 2]. Но при нормальной температуре эти сплавы имеют низкую пластичность ( $\delta \leq 2\%$ ), что значительно усложняет их технологическую обработку и тормозит промышленное применение. Поэтому широкое использование  $\gamma$ -алюминидов титана в конструкциях различного назначения в значительной мере будет определяться созданием эффективных процессов их обработки, в том числе и сварки.

В связи с низкой пластичностью (вплоть до температуры 700 °C)  $\gamma$ -сплавы весьма чувствительны к напряжениям, появляющимся в условиях неравномерного нагрева при сварке, и склонны к возникновению холодных поперечных трещин в сварных соединениях (рис. 1). Для предотвращения их образования предлагается [3, 4] предварительный подогрев образцов — этот метод уменьшает скорость нарастания временных напряжений при сварке и снижает уровень остаточных сварочных напряжений. Но в литературе отсутствуют однозначные рекомендации по выбору температуры предварительного подогрева. В работах [3, 4] указан лишь интервал возможных ее значений (от 250 до 650 °C) без каких-либо дополнительных уточнений.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы определить минимальное значение температуры предварительного подогрева  $T_{\text{п}}$ , при которой в сварных соединениях  $\gamma$ -алюминидов титана не возникают трещины. С помощью численных методов расчета решены задачи термопластичности, прослежено развитие упругопластических деформаций при сварочном нагреве и охлаждении [5].

Исследования проводили на образцах сплава 47ХД [1], вырезанных из слитка и подвергнутых изостатической обработке при температуре 1260 °C

© В. Н. Замков, Е. А. Великоиваненко, В. К. Сабокарь, Э. Л. Вржижевский, 2001

и давлении 171 МПа в течение 4 ч и последующему стабилизирующему отжигу при  $T_o = 1015$  °C (50 ч). Сварку и предварительный подогрев пластин осуществляли электронным лучом в установке УЛ-144, снабженной источником питания ЭЛА-60/60.

Для расчетов были приняты следующие характеристики сплава: временное сопротивление разрыву  $\sigma_b = 480 \dots 540$  МПа при нормальной температуре; модуль нормальной упругости  $E = 1,6 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  (по данным [6]); коэффициент поверхностной теплоотдачи в вакууме  $\alpha = 21,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Зависимости удельной теплопроводности сплава 47ХД от температуры определяли экспериментально (рис. 2).

Предварительно на образцах № 1 (рис. 3) толщиной 5 мм сделали сквозные наплавки с замером термического цикла. Опытным путем установили, что минимальное значение  $T_{\text{п}}$ , при котором не возникают трещины, составляет 400 °C. Исходя из этого и используя схемы, представленные на рис. 3, выполнили расчеты температурных полей. При этом рассматривали два варианта сварки: мощным быстродвижущимся линейным источником, (образцы № 1, 2) и неподвижным круговым источником, действующим кратковременно (образцы № 3).

Полагая, что при электронно-лучевом нагреве плоские образцы прогреваются равномерно по всей толщине металла, в расчетах приняты средние зна-

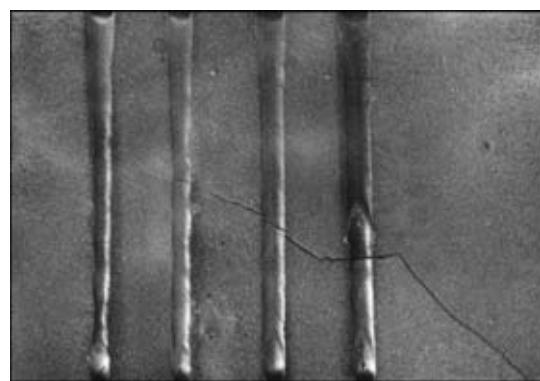


Рис. 1. Холодные трещины в сварном образце сплава 47ХД, выполненному ЭЛС без предварительного подогрева

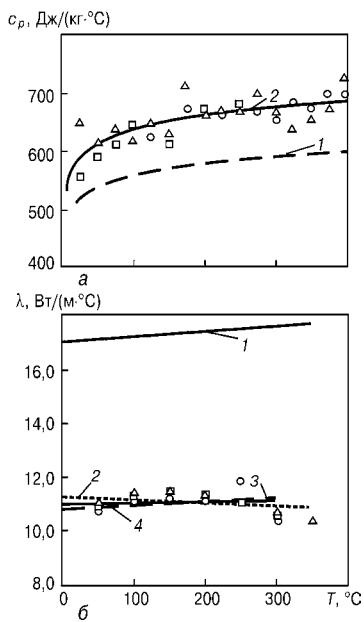


Рис. 2. Зависимость теплофизических характеристик сплавов от температуры: *а* – удельной теплопемкости  $c_p$  (1 – ВТ-0, 2 –  $\gamma$ -сплав 47ХД); *б* – теплопроводности  $\lambda$  (1 – ВТ-0; 2–4 –  $\gamma$ -сплав 47ХД) (по трем экспериментам)

чения температуры в процессе движения источника нагрева вдоль оси  $y$ . Эти же значения температур были использованы затем при решении задачи термопластичности в рамках модели плоского напряженного состояния [5]. Температурные поля определяли численным методом, последовательно прослеживая развитие нагрева и охлаждения во времени, начиная с начального состояния. Пространственную область решения задачи распространения тепла представляли конечными элементами прямоугольной формы со следующими размерами:  $\Delta x = 1,0$  мм,  $\Delta y = 3,5$  мм для образцов № 1;  $\Delta x = 1,0$  мм,  $\Delta y = 5$  мм,  $\Delta z = 1,0$  мм для образцов № 2;  $\Delta r = 0,5$  мм,  $\Delta z = 1,0$  мм для образцов № 3.

Расчеты температурных полей выполняли для сварки соответственно с  $T_{\text{п}} = 300, 400$  и  $500$  °C. С помощью полученных результатов установили характер изменения температуры вдоль оси шва, особенности формирования продольных временных и остаточных напряжений  $\sigma_{yy}$ . В качестве примера на рис. 4 представлены соответствующие данные для образцов № 1. Относительно низкая теплопроводность сплава способствует сохранению неравномерности температурного поля в пластине в течение длительного времени после окончания процесса сварки. Поэтому рост временных напряжений в металле шва происходит по мере остывания образца вплоть до начальной температуры  $T_{\text{п}}$  (рис. 5). Уровень остаточных растягивающих напряжений вдоль шва при  $T_{\text{п}} = 400$  °C составляет  $\approx 420$  МПа и не превышает временное сопротивление разрыву сплава при нормальной температуре. Этим и объясняется отсутствие трещин в образцах № 1, сваренных с предварительным подогревом до  $T_{\text{п}} = 400$  °C.

Анализ кинетики изменения пластических деформаций и временных растягивающих напряжений у образцов № 1 в среднем сечении сварного

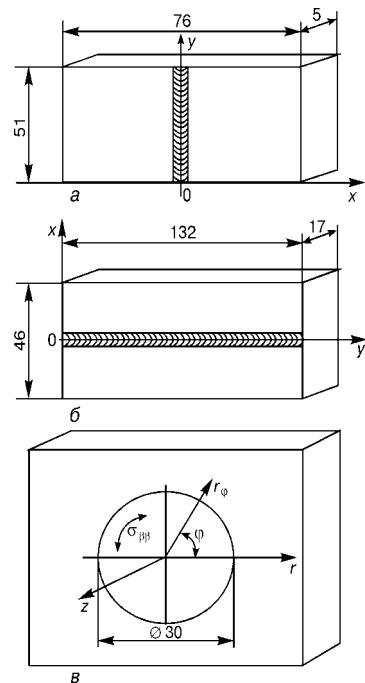


Рис. 3. Размеры образцов № 1–3 (*а*–*в*) и схемы расчета

шва на стадии охлаждения (рис. 5, *а*) свидетельствует о том, что повышение значений  $T_{\text{п}}$  от  $300$  до  $500$  °C существенно смещает процесс активного продольного деформирования в область более высоких температур. Так, если при  $T_{\text{п}} = 300$  °C деформирование со скоростью более  $0,1 \cdot 10^{-5} 1/\text{°C}$  заканчивается при  $T < 350$  °C, то при  $T_{\text{п}} = 400$  и  $500$  °C это происходит уже соответственно при  $T = 500$  и  $750$  °C. Заметное уменьшение уровня временных и остаточных напряжений  $\sigma_{yy}$  имеет место только при  $T_{\text{п}} = 500$  °C. Учитывая почти полное отсутствие пластического течения сплава при температуре ниже  $500...600$  °C, можно считать, что  $T_{\text{п}} = 400$  °C является той минимальной температурой предварительного подогрева, при которой рост пластических деформаций растяжения заканчивается при  $T > 500$  °C, а максимальный уровень напряжений  $\sigma_{yy}$  не превышает 420 МПа. Таким образом, предварительный подогрев до  $400...500$  °C является эффективным методом снижения риска возникновения поперечных трещин при ЭЛС сплава 47ХД. Расчеты показали, что уровень возникающих в процессе сварки поперечных напряжений  $\sigma_{xx}$  значительно ниже продольных, поэтому их роль в образовании трещин можно не учитывать.

Увеличение толщины свариваемых пластин до 17 мм (см. рис. 3, образец № 2), а следовательно, и погонной энергии при сварке не оказывает существенного влияния на процессы пластической деформации и формирование временных и остаточных напряжений. Можно лишь отметить, что в этом случае активное деформирование свариваемых пластин заканчивается при более низкой температуре, чем при сварке образцов № 1. Для образцов № 2 эта температура равна 350, 475 и 630 °C соответственно при температуре предварительного подогрева  $T_{\text{п}} = 300, 400$  и  $500$  °C. У

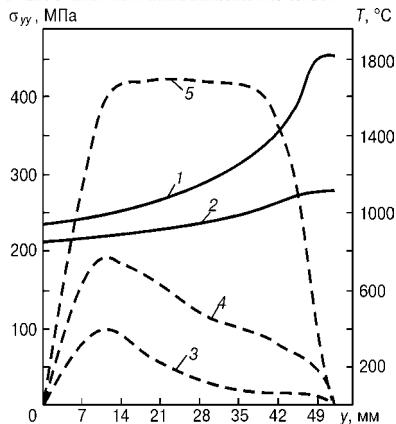


Рис. 4. Распределение температуры (сплошные кривые) и продольных напряжений  $\sigma_{yy}$  (штриховые) по оси шва в образцах № 1 (см. рис. 3) после ЭЛС: 1, 3 — спустя 7, 8 с; 2, 4 — 11, 4 с; 5 — после остыивания;  $T_n = 400$  °C

этих же образцов значительно ниже, чем у образцов № 1, и уровень остаточных напряжений (рис. 5).

Результаты расчетов проверяли экспериментально. Была осуществлена сварка контрольных образцов № 2 с предварительным подогревом до 400 и 500 °C.

Внешний осмотр и рентген-контроль сварных соединений не выявили каких-либо дефектов, в частности трещин. Механические испытания показали, что сварные соединения, выполненные с предварительным подогревом до 400 °C, имеют предел прочности 330...350 МПа. При  $T_n = 500$  °C временное сопротивление разрыву сварного соединения  $\sigma_b = 520$  МПа, т. е. его прочность равна прочности основного металла. Такое различие в значениях  $\sigma_b$  обусловлено, по-видимому, более высоким уровнем остаточных напряжений после сварки с предварительным подогревом до  $T_n = 400$  °C. Менее значительные, но достаточно высокие остаточные напряжения сохраняются и в образцах, сваренных с предварительным подогревом до  $T_n = 500$  °C (рис. 5). Поэтому дальнейшие исследования были направлены на поиск параметров термической обработки сварных соединений, способствующих снижению уровня остаточных напряжений. Расчетными методами рассматривали два варианта условий охлаждения после отжига при  $T_o = 880$  и 1000 °C. Первый — это нагрев сварных соединений электронным лучом, выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение непосредственно в сварочной камере ( $\alpha = 42,0$  Вт/(м<sup>2</sup>.К)). Второй вариант — то же с охлаждением вне сварочной камеры при отсутствии воздушных потоков ( $\alpha = 21,0$  Вт/(м<sup>2</sup>.К)), т. е. отжиг в печи. Результаты расчета показали, что для сварных соединений сплава 47ХД более благоприятным является первый вариант. Согласно данным, представленным на рис. 6, термическая обработка сварных соединений электронным пучком в сварочной камере позволяет снизить остаточные напряжения в два и четыре раза соответственно после отжига при температуре 880 и 1000 °C.

Полученные данные позволяют утверждать, что для предупреждения образования поперечных трещин в швах сплава 47ХД, выполненных одноп-

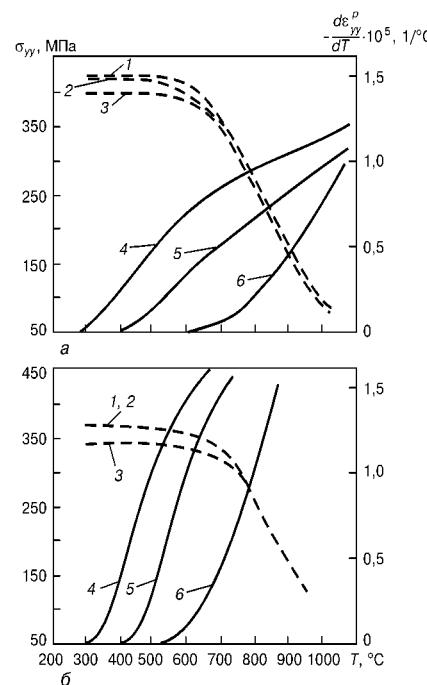


Рис. 5. Распределение по оси шва в образцах № 1 (а) и 2 (б) продольных напряжений (штриховые линии) и скорости изменения пластических деформаций (сплошные) после ЭЛС на стадии охлаждения при  $T_n = 300$  (1, 4); 400 (2, 5); 500 °C (3, 6)

роходной ЭЛС на металле толщиной до 17 мм включительно, необходим предварительный подогрев образцов до 400...500 °C и отжиг сварных соединений в интервале температур 800...900 °C в течение 10...15 мин. Нагрев образцов перед сваркой и отжиг сварных соединений следует осуществлять в сварочной камере, используя в качестве источника тепла сканирующий электронный пучок. Временное сопротивление разрыву сварных соединений, выполненных по этой технологии, составляет 460...520 МПа.

Представляло также интерес определение возможности и условий предотвращения трещин при выполнении ремонтной сварки на деталях из сплава 47ХД с целью устранения, например, поверхностных дефектов. Для этого были проведены соответствующие расчеты, основанные на предположении, что источником тепла в данном случае является неподвижный кратковременно действующий круговой источник нагрева (см. рис. 3, образец № 3). Естественно, что при такой схеме нагрева в образце будет формироваться более жесткое напряженное состояние, чем при сварке пластин линейным быстродвижущимся источником. В этом случае вероятно возникновение радиальных трещин под действием напряжений  $\sigma_{\beta\beta}$  (см. рис. 3).

Кинетика роста временных напряжений  $\sigma_{\beta\beta}$  в зоне сплавления ( $z = 0$ ,  $r = 15$  мм) на стадии охлаждения и скорость изменения окружных пластических деформаций в зависимости от температуры представлены на рис. 7. Как видно из полученных зависимостей, в данном случае температура предварительного подогрева  $T_n$  должна быть не менее 600 °C, а после сварки, безусловно, необходим отжиг, поскольку даже при  $T_n = 700$  °C в образце сохраняется высокий уровень остаточных

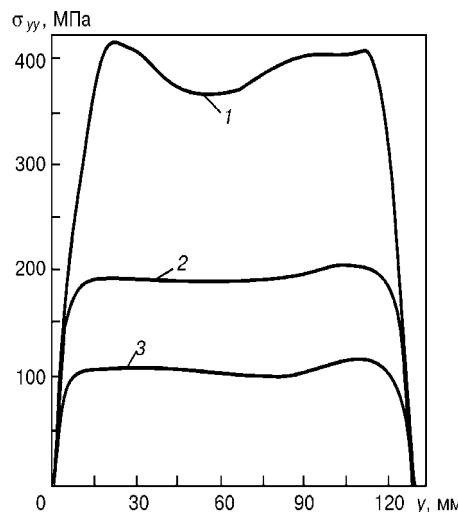


Рис. 6. Влияние температуры отжига после сварки (1 – 400; 2 – 880; 3 – 1000 °С) на распределение продольных остаточных напряжений в образцах № 2 (см. рис. 3);  $T_{\text{п}} = 400$  °С

напряжений. Для экспериментальной проверки этих утверждений на поверхности образцов № 2 исследуемого сплава с помощью электронного луча была осуществлена заварка дефектов с предварительным подогревом до  $T_{\text{п}} = 600$  °С и отжигом после сварки при  $T_{\text{o}} = 850$  °С непосредственно в сварочной камере. Визуальный осмотр и рентген-контроль сварных точек подтвердили отсутствие в них каких-либо дефектов.

## Выводы

1. Образование холодных трещин в сварных соединениях  $\gamma$ -сплавов на основе алюминида титана обусловлено низкой пластичностью этих сплавов при температурах ниже 700 °С и, как следствие, высоким уровнем продольных временных напряжений  $\sigma_{yy}$ , возникающих в процессе охлаждения сварного соединения.

2. Для предотвращения возникновения попечерных трещин в сварных соединениях сплава 47ХД, выполненных ЭЛС, рекомендуется предварительный подогрев свариваемых образцов до температуры 400...500 °С. При выполнении на деталях из сплава 47ХД локальных швов или наплавок в ремонтных целях температура предварительного подогрева должна быть не менее 600 °С.

3. Для снижения уровня остаточных напряжений необходимо непосредственно после сварки

Development of elastic-plastic strains in welding heating and cooling of samples of  $\gamma$ -titanium aluminide alloy has been analysed using the calculation methods. The level of residual longitudinal stresses in the alloy plates 5..17 mm thick in EBW, depending upon the temperatures of preheating and annealing of welded joints after welding, has been determined. It has been established that prevention of formation of cold cracks in the 47KhD alloy welds made by single-pass EBW on metal up to 17 mm thick is provided by preheating the samples to 400...500 °C and annealing of welded joints within a temperature range of 800...900 °C for 10...15 min.

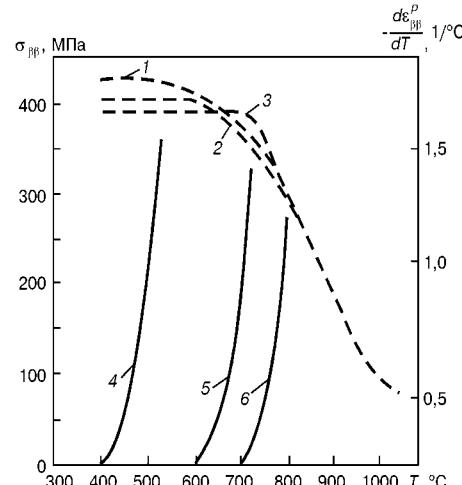


Рис. 7. Изменение временных напряжений  $\sigma_{yy}$  (штриховые кривые) и скорости изменения окружных пластических деформаций (сплошные) в образцах № 3 (см. рис. 3) сплава 47ХД: 1, 4 –  $T_{\text{n}} = 400$ ; 2, 5 – 600; 3, 6 – 700 °С

производить отжиг сварных соединений в интервале температур 800...900 °С. Чтобы исключить при этом возникновение дополнительных напряжений, следует обеспечить равномерный нагрев и охлаждение сварных соединений.

Работа проведена при финансовой поддержке Лоуренсовской ливерморской национальной лаборатории (США).

1. Mantle A. L., Aspinwall D. K., Wise M. L. H. Single point turning of gamma titanium aluminide intermetallic // Proc. of the Eighth world. conf. on Titanium'95: science and technology, Birmingham, UK, 22–26 Oct., 1995. — Cambridge: The University press, 1995. — Vol. 1. — P. 248–255.
2. Иванов В. И., Ясинский К. К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti<sub>3</sub>Al и TiAl для работы при температурах 600...800 °С в авиационной технике // Технология легких сплавов. — 1996. — № 3. — С. 7–12, 93.
3. Titanium aluminid: electron beam weldabiliti / R. A. Patterson, P. L. Martin, B. K. Damkroger, L. Christodoulou // Welding J. — 1990. — 69, № 1. — P. 39–44.
4. The effect of postweld heat treatment on the structure and properties of electron beam welded Ti-48Al-2Cr-2Nb // C. M. Jensen, H. Zhang, W. A. Baeslack, T. J. Kelly // Abs. of papers, presented at 79th AWS annual meeting. — Miami: AWS, 1998. — P. 179–180.
5. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных деформаций и напряжений. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
6. Хипо Н., Нисиэма Ю. Использование алюминидов титана // Metals and Technol. — 1990. — 60, № 7. — С. 70–74.

Поступила в редакцию 11.12.2000



# ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ШЛАКОВ СОЛЕОКСИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, С. М. НАУМЕЙКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы  $\text{BaF}_2\text{-LiF-MgO}$  от его состава и от температуры. Рассмотрено влияние поверхностного натяжения на сварочно-технологические свойства порошковых проволок при сварке в различных пространственных положениях.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, порошковая проволока, сварочные шлаки, солеоксидные системы, поверхностное натяжение, сварочно-технологические свойства, кроющая способность, подрезы

Создание новых сварочных материалов для дуговой сварки с требуемыми технологическими свойствами является актуальной научной проблемой сварочного производства. Представления о взаимосвязи условий получения качественных сварных соединений с основными физико-химическими свойствами шлаков отображены в ряде публикаций [1, 2]. В них отмечено влияние поверхностного натяжения шлаковой и металлической фаз на сварочно-технологические свойства сварочных материалов в случае дуговой сварки плавлением, в частности на кроющую способность шлака. При низкой кроющей способности шлак не покрывает шов полностью, что ухудшает его вид, формирование шва и отделимость шлака. На плавность перехода к основному металлу и благоприятную форму шва также влияют поверхностное натяжение жидкого металла, режимы и технология сварки. В значительной степени от поверхностного натяжения шлаковой и металлической фаз зависит формирование шва в вертикальном и потолочном положениях.

Межфазным натяжением определяются особенность протекания металлургических реакций, стабильность и скорость удаления неметаллических включений из жидкого металла, адгезия шлака и металла. Межфазное натяжение характеризует энергию взаимодействия атомов железа с ионами шлака, которое оказывает определенное влияние на прочность сцепления шлака с металлом, а следовательно, отделимость шлаковой корки. На химическое сцепление шлака и металла большое влияние оказывают поверхностное и межфазное натяжения на границе раздела металл–шлак, от которых зависит смачивание металла жидкими шлаками. С увеличением значения межфазного натяжения смачивание металла шлаком ухудшается, сила сцепления (адгезия) при этом уменьшается. Чем ближе по своей молекулярной природе расплав и

поверхность металла, тем меньше межфазное натяжение на границе расплав–металл и больше адгезия.

Межфазное натяжение характеризуется уравнением

$$\sigma_{\text{Me-ш}} = \sigma_{\text{Me}} + \sigma_{\text{ш}} \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{Me-ш}}$  — межфазное натяжение жидкого шлака на границе с металлом шва;  $\sigma_{\text{Me}}$ ,  $\sigma_{\text{ш}}$  — поверхностное натяжение соответственно жидкого металла и жидкого шлака;  $\theta$  — угол смачивания.

На основании второго закона термодинамики самопроизвольное протекание процесса смачивания твердой поверхности металла шлаком возможно в том случае, если соблюдается условие

$$\sigma_{\text{Me}} \geq \sigma_{\text{Me-ш}} + \sigma_{\text{ш}}, \quad (2)$$

т. е. растекание сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Из этого выражения следует, что шлак тем лучше смачивает поверхность металла шва, чем меньше поверхностное натяжение шлака и межфазное поверхностное натяжение металл–шлак и больше поверхностное натяжение металла. Таким образом, исходя из поверхностного натяжения шлака и металла шва можно оценивать смачиваемость, а значит и кроющую способность шлака.

Поверхностное натяжение металлургических и сварочных шлаков было исследовано многими учеными [3–6]. Экспериментальные данные о поверхностном натяжении расплавленного шлака ограничены определенными системами, поэтому зачастую на практике при выборе шлаков не учитываются изменения ряда свойств сварочных материалов. Расчетные методы оценки поверхностного натяжения шлаков [5–8] дают возможность получения информации на базе ограниченного экспериментального материала.

Для оценки поверхностного натяжения расплавленного сварочного шлака использована методика приближенного расчета поверхностного натяжения многокомпонентных растворов, разработанная в [7, 8]. Согласно модельно-термодинами-

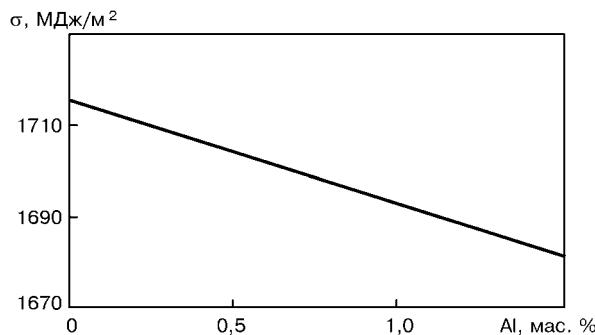


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения металла (массовая доля элементов в металле составляет, %: С 0,07; Si 0,10; Mn 1,0; Ni 1,0; S 0,005; P 0,01; N 0,02; O 0,02) от содержания алюминия при температуре 1823 К

ческому уравнению поверхностное натяжение  $\sigma$  равно

$$\sigma = \sigma_i - \frac{RT}{\omega} \ln \sum_{i=1}^k F_i N_i \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  — поверхностное натяжение чистого  $i$ -го компонента;  $R$  — газовая постоянная;  $\omega$  — молярная поверхность (площадь, занимаемая одним молем раствора);  $F_i$  — поверхностная активность  $i$ -го компонента в глубине раствора;  $N_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента.

Поскольку молярная поверхность расплава шлака солеоксидной системы изменяется мало, то для широкого диапазона концентраций компонентов солеоксидных расплавов можно принять молярную поверхность приблизительно постоянной. Значение  $\omega = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными после измерения поверхностного натяжения шлака [9]. Шлаковую основу самозащитных порошковых проволок трубчатой конструкции составляют солеоксидные системы на основе фторидов бария, лития, калия и оксидов магния, алюминия и циркония.

При определении поверхностного натяжения [2, 3] расплавов шлаков солеоксидных систем выведены следующие значения констант  $F_i$ :  $F_{\text{MgO}} = 1,5$ ,

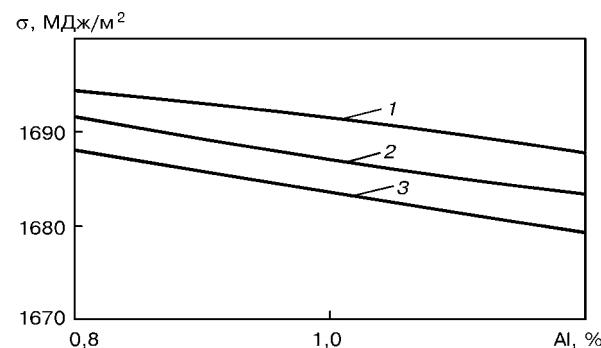


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения металла (массовая доля элементов в металле составляет, %: С 0,1; Si 0,3; S 0,02; P 0,02; N 0,02; O 0,02) от содержания алюминия и марганца при температуре 1823 К: 1 — 0,5 Mn; 2 — 1,0 Mn; 3 — 1,5 Mn

$F_{\text{LiF}} = 3,2$ ;  $F_{\text{BaF}_2} = 2,9$ ;  $F_{\text{ZrO}_2} = 2,1$ ;  $F_{\text{KF}} = 3,4$ ;  $F_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,4$ .

Уравнение (1) выведено для оксидов и фторидов соответственно типа  $\text{MeO}$ ,  $\text{MeF}$ . Чтобы применить к оксидам и фторидам типа  $\text{Me}_x\text{O}_y$  и  $\text{Me}_x\text{F}_y$ , необходимо вместо мольных долей  $N_i$  подставить концентрацию  $N'_i$ , характеризующую равные количества грамм-ионных долей кислорода в различных оксидах [10], согласно уравнению

$$N'_i = \frac{\gamma_i N_i}{\sum_i \gamma_i N_i}, \quad (4)$$

где  $\gamma_i$  — количество атомов кислорода в молекуле оксида.

Свойства шлаковой и металлической фазы наиболее существенно влияют на геометрию шва при температуре 1700...1400 °C. Для самозащитных порошковых проволок со шлаками солеоксидной системы характерно использование раскисления и легирования алюминием, марганцем, никелем при невысоком содержании кремния. В случае многокомпонентной шлаковой системы Fe-Ni-Mn-Si-Al при 1823 K поверхностное натяжение может быть описано уравнением [10]:

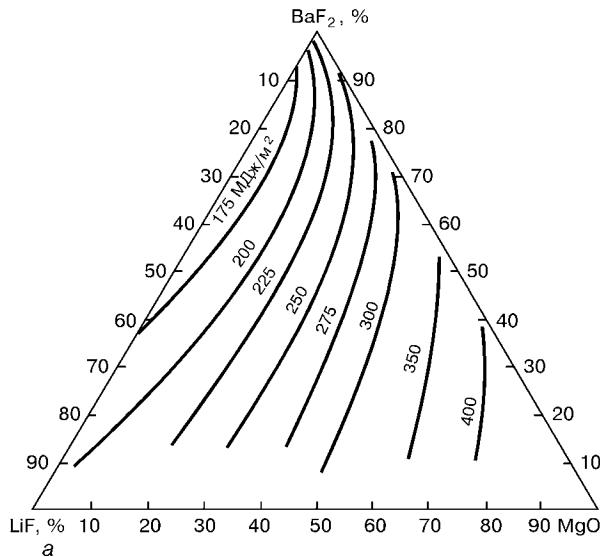
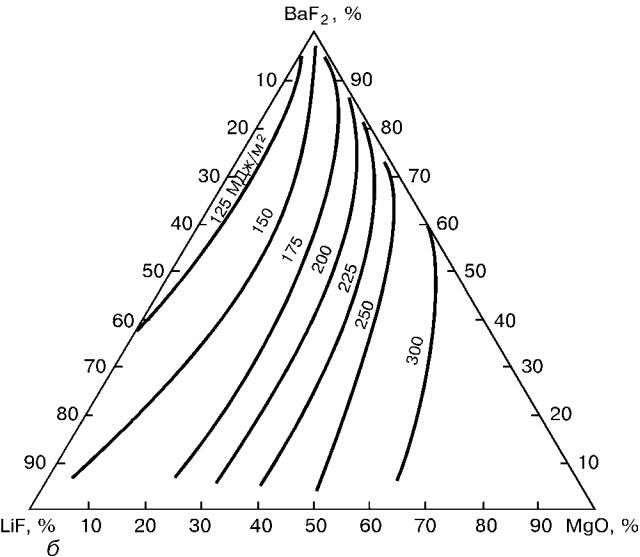


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы  $\text{BaF}_2-\text{LiF}-\text{MgO}$  от их состава при температуре 1673 (а) и 1873 (б) К





## Поверхностное натяжение шлаков при температуре 1673 К

№ прово-локи	Массовое содержание компонентов в шлаке, %						$\sigma$ , МДж/м <sup>2</sup>
	BaF <sub>2</sub>	LiF	MgO	ZrO <sub>2</sub>	KF	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
1	61	15	15	3,0	3,5	—	213
2	57	14	16	6,4	3,2	—	223
3	55	13	25	3,0	1,5	—	253
4	50	15	27	3,5	1,0	—	263
5	50	13	30	4,0	1,0	—	271
6	40	10	45	3,0	1,0	—	325
7	45	5	40	1,0	—	9	345
8	35	4	55	1,0	—	5	385

$$\sigma = 1735x_{\text{Fe}} + 1700x_{\text{Ni}} + 1030x_{\text{Mn}} + 720x_{\text{Si}} - 630(x_{\text{Fe}} + x_{\text{Mn}})x_{\text{Si}} + 800x_{\text{Al}} - 200x_{\text{Fe}}x_{\text{Al}}, \quad (5)$$

где  $x_i$  — содержание  $i$ -го компонента, мол. %.

Уравнение (5) не учитывает влияния растворенных серы, азота и кислорода, но позволяет оценивать изменение поверхностного натяжения жидкого металла при малых колебаниях в содержании указанных примесей.

Расчеты показали, что наибольшее влияние на поверхностное натяжение оказывают алюминий и марганец (рис. 1, 2).

В процессе экспериментальной сварки опытными проволоками на вертикальной плоскости стало очевидным качественное совпадение такого влияния, а именно, при содержании 1,6 % Al происходит стекание металла. При этом металл имеет низкое (приблизительно 1670 МДж/м<sup>2</sup>) поверхностное натяжение. При содержании в металле около 0,9...1,1 % Al и 1,0...1,2 % Mn (поверхностное натяжение 1690...1695 МДж/м<sup>2</sup>) в случае сварки в вертикальном положении наблюдается хорошее формирование сварного шва. Для оценки влияния поверхностного натяжения жидкого металла на сварочно-технологические свойства порошковой проволоки принято легирование марганцем и алюминием в установленных пределах.

Кривые изменения поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы BaF<sub>2</sub>—LiF—MgO при температуре 1673 и 1873 К, рассчитанные по формуле (3), показаны на рис. 3. Для шлаков всех составов поверхностное натяжение снижается с увеличением температуры, что свидетельствует об уменьшении межчастичного взаимодействия, и монотонно возрастает с увеличением концентрации MgO в расплаве. Отсутствие максимумов и минимумов на изолиниях поверхностного натяжения указывает на отсутствие комплексных ионов. Поэтому шлаковая система BaF<sub>2</sub>—LiF—MgO представляет собой твердый раствор во всем поле кристаллизации (рис. 3). То, что поверхностное натяжение не зависит от температуры, свидетельствует об отсутствии структурных изменений в указанной шлаковой системе при кристаллизации.

Составы шлаков, образующихся при плавлении опытных самозащитных порошковых проволок, и их поверхностное натяжение при температуре 1673 К приведены в таблице.

Поверхностное натяжение сварочных шлаков существенно влияет на их кроющую способность.

В значительной степени от него зависят качественное формирование сварного шва, а также его формирование при сварке в вертикальном и потолочном положениях. В таком случае желательно, чтобы шлак имел высокое поверхностное натяжение для удержания сварочной ванны, однако при этом кроющая способность шлака ухудшается. Для увеличения последней необходимо, чтобы поверхностное натяжение шлака имело низкие значения. Однако следует учитывать, что при очень низком поверхностном натяжении шлак стекает к краям шва. Экспериментальную проверку влияния поверхностного натяжения шлаков на сварочно-технологические свойства проводили с использованием опытных проволок, основной состав шлаков которых приведен в таблице. У проволок № 1–5 шлаки имеют низкое поверхностное натяжение. При сварке этими проволоками наблюдается растекание шлака по поверхности шва. При очень низком (около 250 МДж/м<sup>2</sup>) поверхностном натяжении происходит оплавление сварочной кромки с образованием подрезов. Так, при сварке опытными проволоками № 1 и 2, шлаки которых имеют поверхностное натяжение соответственно 213 и 223 МДж/м<sup>2</sup>, наблюдается появление подрезов. При использовании проволок № 4 и 5, шлаки которых имеют поверхностное натяжение в пределах 263 и 271 МДж/м<sup>2</sup>, участки подрезов незначительны. При сварке проволоками № 6 и 7 (поверхностное натяжение шлаков 325 и 345 МДж/м<sup>2</sup>) шов почти полностью покрыт шлаком и подрезы не образуются. При использовании проволоки № 8 (поверхностное натяжение шлака 385 МДж/м<sup>2</sup>) подрезы не наблюдаются, но кроющая способность шлака недостаточна. Таким образом, при сварке проволоками, шлаки которых имеют низкое поверхностное натяжение, они растекаются по краям шва, а при использовании проволок, шлаки которых имеют высокое поверхностное натяжение, последние не покрывают поверхность шва полностью, что ухудшает его вид и формирование. В результате проведенных исследований установлено, что лучшие сварочно-технологические свойства достигаются при сварке порошковыми проволоками, у которых шлаки данной солеоксидной системы имеют поверхностное натяжение в пределах 300...350 МДж/м<sup>2</sup>.

Таким образом, зная поверхностное натяжение шлака и жидкого металла, можно прогнозировать сварочно-технологические свойства самозащитных порошковых проволок по таким показателям, как кроющая способность шлака и формирование шва на вертикальной плоскости.

## Выводы

- Исследована зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы BaF<sub>2</sub>—LiF—MgO от состава и температуры расплава. Отсутствие максимумов и минимумов на изолиниях поверхностного натяжения указывает на отсутствие комплексных ионов, поэтому система BaF<sub>2</sub>—LiF—MgO представляет собой твердый раствор во всем поле кристаллизации. Поскольку поверхностное натяжение не зависит от температуры, можно сде-



лять вывод об отсутствии структурных изменений в шлаковой системе выше линии ликвидуса. Поверхностное натяжение шлакового расплава монотонно возрастает с увеличением концентрации оксида марганца.

2. В самозащитных порошковых проволоках, используемых для сварки в различных пространственных положениях, для снижения поверхностного натяжения металлического расплава желательно ограничивать содержание алюминия до 1,5, а марганца до 2 %.

3. Для предотвращения растекания шлака к краям шва и возникновения подрезов сварочные шлаки должны иметь поверхностное натяжение не ниже  $300 \text{ МДж}/\text{м}^2$ . Лучшие сварочно-технологические свойства при сварке самозащитной порошковой проволокой в различных пространственных положениях достигаются при поверхностном натяжении шлака  $300\dots350 \text{ МДж}/\text{м}^2$ .

1. *Изучение свойств шлаковых расплавов применительно к обоснованию составов сварочных флюсов. Структура /* В. Г. Кузьменко, В. И. Галинич, В. С. Токарев и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 11. — С. 38-41.

Dependence of surface tension of the salt-oxide  $\text{BaF}_2\text{-LiF-MgO}$  system slag upon its composition and temperature has been investigated. The effect of surface tension on welding-technological properties of flux-cored wires in welding in various spatial positions has been considered.

2. *Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 256 с.*
3. *Соколов О. К. Расчет поверхностного натяжения расплавленных галогенидов на границе с инертной фазой при температуре плавления // Изв. вузов. Цвет. металлургия. — 1963. — № 4. — С. 55-58.*
4. *Аннен А. А. Опыт классификации компонентов по их влиянию на поверхностное натяжение силикатных расплавов // Журн. физ.-химии. — 1952. — № 26, № 10. — С. 2215-2218.*
5. *Попель С. И. Теория металлургических процессов. — М.: ВИНТИ, 1971. — 132 с.*
6. *Попель С. И., Павлов В. В. Термодинамический расчет поверхностного натяжения растворов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. — Нальчик: Кабард.-Балкар. кн. изд-во, 1965. — С. 46-60.*
7. *Подгаецкий В. В. Оценка поверхностного натяжения расплавов сварочных шлаков // Автомат. сварка. — 1992. — № 5. — С. 26-28.*
8. *Павлов В. В., Попель С. И. Расчет поверхностного натяжения и поверхностных концентраций компонентов в оксидных расплавах // Изв. вузов. Цвет. металлургия. — 1964. — № 6. — С. 30-37.*
9. *Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — М.: Изд-во АН СССР, 1945. — 352 с.*
10. *Мойсов Л. П., Бурылев Б. П. Расчет свойств металлических и шлаковых систем при разработке сварочных материалов // Свароч. пр-во. — 1997. — № 2. — С. 18-20.*

Поступила редакцию 03.01.2001



# ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОДОГРЕВОМ КРОМОК

В. Ю. ХАСКИН, В. Д. ШЕЛЯГИН, В. П. ГАРАЦУК, В. Н. СИДОРЕНКО, кандидаты техн. наук,  
А. В. САХАРНОВ, Е. И. ГОНЧАРЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано совместное воздействие на сталь лазерного излучения и высокочастотного подогрева при сварке стыковых соединений. Установлено, что сопутствующий высокочастотный подогрев до температуры на поверхности образца, равной 1100...1200 °C, позволяет примерно в 1,5 раза повысить либо глубину проплавления, либо скорость процесса. Геометрия сварных швов близка к типичной для лазерной сварки, но отлична по строению (отсутствуют характерные для лазерной сварки закалочные структуры в металле швов и ЗТВ, значения твердости в меньшей мере отличаются от таковых для основного металла).

**Ключевые слова:** комбинированные способы сварки, лазерная и высокочастотная сварка, оборудование, режимы, структура

Исследованиям совместного воздействия на металлы излучения лазера и других источников тепла при сварке, например дугового разряда [1, 2] или высокочастотного тока [3], уделяли большое внимание с целью увеличения глубины проплавления или производительности процесса.

Сварка высококонцентрированным тепловым источником, в частности лазерная, характеризуется жестким термическим циклом, что в ряде случаев является отрицательным фактором, способствующим образованию трещин и нежелательных хрупких закалочных структур [4]. Для устранения этого недостатка, а также с целью увеличения глубины проплавления (или скорости сварки) нами исследована лазерная сварка стыковых соединений с сопутствующим высокочастотным подогревом. В нашем случае сваривали подготовленные стыковые соединения, в отличие от описанного в статье [3] соединения, которое формировалось в процессе сварки продольного шва трубы, когда высокочастотные токи сгущались в точкестыка, образуя высокоинтенсивный источник тепла.

Для экспериментов использовали технологический лазер ЛТ 104 мощностью излучения до 10 кВт [5] и сварочный высокочастотный комплекс ИВ120-160/0,44 мощностью 160 кВт и рабочей частотой 0,44 МГц. В качестве сварочного поста применяли переоборудованный токарно-винторезный станок, на котором вместо резцедержателя была установлена колонна с фокусирующей лазерное излучение оптикой, а вместо задней бабки — жестко связанная с суппортом подвижная сварочная высокочастотная головка [6]. К головке крепили одновитковый кольцевой индуктор, нагревавший свариваемый стык. Индуктор изготавливали из медной трубы диаметрами 6 и 8 мм. Зазор между индуктором и свариваемыми образцами составлял 3 мм. Температуру высокочастотного подогрева на внешней и внутренней поверхностях свариваемых трубных образцов измеряли оптическим пирометром «Спектропир П1-003» (1986 г.,

НПО «Лентеплоприбор») с диапазоном измерения температуры 600...1800 °C и основной инструментальной приведенной погрешностью  $\pm 1\%$ .

Сварку стыковых соединений трубных образцов с толщиной стенки  $\delta = 15$  мм производили в углекислом газе. Его поддув организовали таким образом, чтобы устраниить плазменный факел над сварочной ванной из-за происходящего по плазме пробоя и образования дугового разряда между индуктором и образцом. Материал образцов — сталь Ст3пс. Для сравнения выполняли также по четыре наплавки без присадок лазерным излучением (имитация лазерной сварки) без высокочастотного подогрева и с ним на скоростях 30, 60, 90 и 120 м/ч. Мощность лазерного излучения во всех случаях составляла 5 кВт, заглубление фокуса — 2 мм, фокусное расстояние линзы — 300 мм, тем-

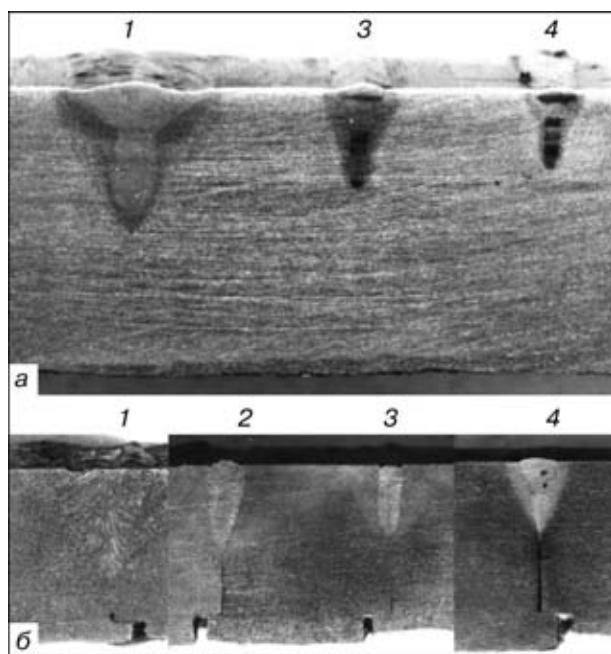


Рис. 1. Макрошлифы лазерных наплавок без присадки (а) и стыковых соединений, выполненных комбинированным способом (б) в стенке  $\delta = 15$  мм трубного образца из стали Ст3пс на скорости 30 (1); 60 (2); 90 (3); 120 (4) м/ч

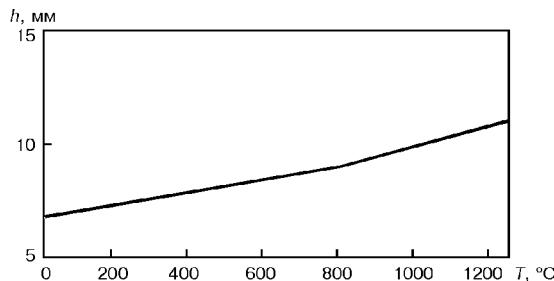


Рис. 2. Зависимость изменения глубины провара  $h$  от температуры  $T$  сопутствующего высокочастотного подогрева при скорости сварки 60 м/ч

пературу сопутствующего высокочастотного подогрева варьировали в пределах 800...1500 °C.

Согласно принятой схеме проведения экспериментов высокочастотный подогрев свариваемых кольцевых стыков производили со стороны наружной поверхности образца. Толщина стенок трубчатых образцов составляла 15 мм. Переход температуры по этой глубине достигал 500...800 °C, что в значительной мере влияло на глубину провара.

Наиболее характерные макрошлифы сварных швов представлены на рис. 1. Зависимости геометрии швов от некоторых режимов комбинированного сварочного процесса представлены на рис. 2, 3. Эксперименты показали, что высокочастотный подогрев поверхности стального образца до 1100...1200 °C позволяет увеличить глубину провара примерно в 1,5 раза по сравнению с обычной лазерной сваркой. При этом сохраняется кинжалальная форма проплавления.

Микроструктуры сварных швов исследовали по макрошлифам, протравленным 4%-м спиртовым раствором азотной кислоты в течение 5 с. Осмотр их производили на оптическом микроскопе «Neophot-32» при увеличениях 50...250, размер зерна измеряли по ГОСТ 5639-82, микротвердость определяли на твердомере «Leco» при нагрузках 0,10; 0,25; 2,0 и 10,0 Н.

Структура основного металла — ферритно-перлитная. Балл ферритного зерна составлял 7...8; микротвердость —  $HV$  10-1660...1800 МПа. После лазерной сварки, как следовало ожидать и что согласуется с результатами работы [7], в металле швов и металле зоны термического влияния (ЗТВ) обнаружены не только структуры феррита и перлита, но и бейнита, мартенсита. После комбинированной лазерной сварки с высокочастотным подогревом в металле швов и металле ЗТВ зафиксированы лишь ферритно-перлитные структуры,

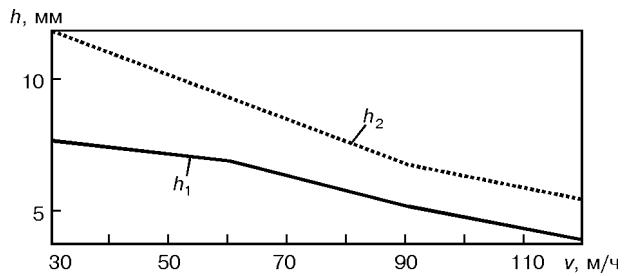


Рис. 3. Зависимость изменения глубины лазерного провара  $h_1$  и провара  $h_2$  с сопутствующим высокочастотным подогревом до 1100...1200 °C от скорости сварки

свидетельствующие об отсутствии жесткого термического цикла [4], т. е. о значительном снижении скоростей охлаждения. Результаты измерений микротвердости структурных составляющих металла швов и ЗТВ для обоих случаев сварки приведены в таблице.

Распределение микротвердости (нагрузка  $HV$  10 Н) в металле шва и околосшовной зоны при скоростях сварки 30, 90 и 120 м/ч приведены на рис. 4.

В случае лазерной сварки со скоростью 30 м/ч зафиксирована самая грубодисперсная структура металла образцов лазерных наплавок. Структура металла шва состоит из бейнита, в котором изредка встречаются участки мартенсита. Вдоль границ кристаллитов зафиксированы ферритные участки, присутствует небольшое количество перлита. Ширина металла ЗТВ равняется 1,6 мм с участком перегрева шириной 0,9 мм, мелкого зерна — 0,30 мм, неполной перекристаллизации — 0,38 мм. Структура металла участка перегрева представляет собой мелкоигольчатую смесь участков мартенсита и бейнита, а также локальных выделений перлита и феррита. На участке перегрева балл зерна — 5, редко встречаются зерна балла 4. На участке мелкого зерна структура измельчается до балла 10.

Структура металла шва и ЗТВ образца, сваренного с использованием лазерного излучения со скоростью 90 м/ч, аналогична упомянутой выше, но более мелкодисперсная. Металл ЗТВ шириной 0,68 мм состоит из участков перегрева (0,25 мм), мелкого зерна (0,13 мм) и неполной перекристаллизации (0,30 мм). На участке перегрева он соответствует баллу 5, реже баллу 6. По мере удаления от линии сплавления зерно измельчается до балла 7–8.

Металл шва при лазерной сварке со скоростью 120 м/ч характеризуется самой мелкодисперсной

#### Микротвердость структурных составляющих металла швов ЗТВ, полученных лазерной и комбинированной сваркой, МПа

Скорость сварки, м/ч	Лазерная сварка, HV 0,1				Комбинированная сварка HV 0,25	
	Феррит	Перлит	Бейнит	Мартенсит	Феррит	Перлит
30	1680...1750 1810...2050	1980...2290 1850...2050	2050...2570 2290...2580	3030...3220 3300...3780	876...891 805...839	— 1160...1200
60	—	—	—	—	958...940 824...839	—
90	1810...1850 2050	1810 2270	2740...3300 3000...3250	3780...4510 3850...4290	772...876 805...1050	—
120	—	— 2030...2380	2900...3030 —	3960...4130 5930	997...1050 925...1050	1220...1360 1050...1220

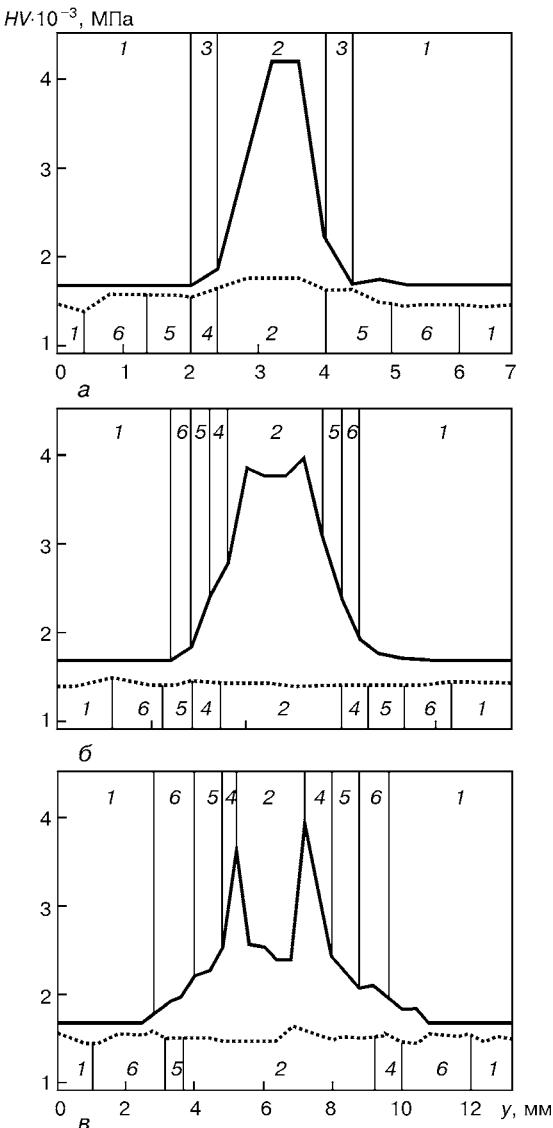


Рис. 4. Распределение микротвердости  $HV$  в направлении  $y$ , перпендикулярном плоскости проваренного стыка, на глубине  $h/3$  для лазерной (сплошная кривая) и комбинированной (точечная) сварки с высокочастотным подогревом до  $1100\ldots1200^{\circ}\text{C}$  при скорости  $120$  (α);  $90$  (β);  $30$  (γ): 1 — основной металл; 2 — сварной шов; 3 — ЗТВ; 4–6 — участки соответственно крупного и мелкого зерна, неполной перекристаллизации

структурой, состоящей из мартенсита, бейнита и тонких выделений перлита вдоль границ кристаллитов. Мартенсит имеет разную травимость, что связано с присутствием в нем углерода (более светлые участки, вероятно, более мелкодисперсный, малоуглеродистый мартенсит [7]). Металл ЗТВ имеет ширину  $0,15\ldots0,20$  мм и представляет собой участок перегрева. Структура участка — мелкоигольчатый мартенсит и локальные перлитные выделения (таблица).

Прослеживаются следующие тенденции изменения структуры металлов швов. С повышением скорости сварки дисперсность структуры увеличивается, размеры литой зоны и металла ЗТВ уменьшаются, возрастает их микротвердость. Последнее объясняется увеличением доли мартенситной составляющей и уменьшением количества перлита и феррита вплоть до полного исчезновения. В металле ЗТВ обединяются зоны мелкого и крупного

зерна, а при максимальной скорости сварки ЗТВ представляет собой участок перегрева.

Структура металла шва, сваренного комбинированным способом лазер+высокочастотный подогрев со скоростью  $30$  м/ч, — ферритно-перлитная с небольшим количеством феррита, характерным для видманштеттовой структуры [4]. Структура зоны перегрева более грубодисперсная, чем во всех прочих образцах, сваренных с применением лазерного излучения с высокочастотным подогревом. Первичное зерно аустенита стало крупнее (балл 4–5). Феррит выделяется по границам зерен и внутри них (таблица). Количество перлита увеличивается по сравнению с наплавками, выполненными на скоростях  $60$ ,  $90$  и  $120$  м/ч.

Микроструктура металла шва, сваренного комбинированным способом со скоростью  $60$  м/ч, более грубопластинчатая, чем при скорости  $90$  м/ч, но мелкодисперснее, чем при скорости  $30$  м/ч. Количество перлита уменьшается, его выделения довольно мелкие. Твердость перлита в металле шва не определена, феррита — приведена в таблице. Структура зоны перегрева также ферритно-перлитная. Количество перлита здесь незначительно. Феррит выделяется по границам первичных аустенитных зерен и в теле зерна. Балл зерна составляет примерно 5.

Структура металла шва, полученного при комбинированной сварке со скоростью  $90$  м/ч, отличается укрупнением составляющих и уменьшением количества перлита по сравнению с аналогичным вариантом для скорости  $120$  м/ч. Микротвердость феррита указана в таблице. Микротвердость перлита не измеряли, поскольку перлитные участки слишком мелкие. Структура участка перегрева ферритно-перлитная. Количество феррита увеличилось и стало значительно преобладающим. Феррит выделяется по границам первичных аустенитных зерен и в теле зерна. Незначительная часть феррита ориентирована по видманштетту [4]. Балл зерна 6. Структура участка полной перекристаллизации — мелкозернистая (балл 9–10) ферритно-перлитная, количество феррита преобладает, а участка неполной перекристаллизации также — ферритно-перлитная.

В образце, сваренном комбинированным способом со скоростью  $120$  м/ч, структура металла шва представляет собой смесь феррита и перлита. Количество феррита здесь преобладает. Структура направлена вдоль границ кристаллитов и является мелкодисперсной. Участок перегрева представляет собой перлитные зерна, окаймленные ферритными выделениями по границам. По мере удаления от линии сплавления количество перлитной составляющей уменьшается, структура изменяется. Балл зерна на этом участке составляет 5–6. Участок полной перекристаллизации имеет мелкозернистую (балл 9–10) ферритно-перлитную структуру с преобладанием ферритной составляющей. Участок неполной перекристаллизации имеет аналогичную структуру с таким же баллом зерна, как и участок полной перекристаллизации.

Зафиксированы следующие тенденции изменения структуры металла швов. Как и в случае ла-



зерной сварки, с повышением скорости процесса дисперсность структуры возрастает, оставаясь при этом более грубой, размеры литой зоны и металле ЗТВ уменьшаются. В случае максимальной скорости обнаружено незначительное повышение микротвердости металла сварного шва. Это объясняется тем, что с увеличением скорости сварки доля ферритной составляющей структур металла шва и ЗТВ возрастает. Однако во всех случаях имеет место достаточно мягкая и пластичная ферритно-перлитная структура. В отличие от лазерной сварки при комбинированном процессе в металле ЗТВ сохраняются все зоны независимо от скорости сварки.

По результатам исследования микроструктур можно заключить, что высокочастотный подогрев свариваемых образцов позволяет получать структуры металла швов и ЗТВ, близкие к таковым основного металла. При этом он способствует избавлению от твердых и хрупких мартенситных структур, которые при лазерной обработке могут приводить к образованию трещин, снижению ударной вязкости и пластичности [6]. Кроме того, как показали эксперименты, благодаря сопутствующему высокочастотному подогреву значительно снижается вероятность образования пор, формирование верхнего валика шва улучшается.

Несмотря на различие схем наших экспериментов и описанных в работе [3], целесообразно отметить некоторые общие моменты. В диапазоне температур высокочастотного подогрева 20...1200 °C повышение скорости сварки [3] и увеличение глубины проплавления в нашем случае (см. рис. 2) имеют сходную тенденцию. Как и в работе [3], получен близкий по структуре к основному металлу металл швов и ЗТВ. Также важным оказался вопрос подачи защитного газа и устранения плазменного факела. Как отмечалось в статье [3], на процесс сварки значи-

тельно влияет точностьстыковки свариваемых кромок.

## Выводы

1. Сопутствующий высокочастотный подогрев до 1100...1200 °C на поверхности образца позволяет примерно в 1,5 раза повысить либо глубину проплавления, либо скорость сварки.
2. Сварные швы, выполненные с высокочастотным подогревом, по форме близки к типичным лазерным, но их структура различна.
3. Отсутствуют характерные для лазерной сварки закалочные структуры в металле швов и ЗТВ, их микротвердость становится значительно равномернее и ближе к таковой основного металла, что является положительным фактором, способствующим увеличению пластичности швов.
4. К недостаткам структуры металла швов и ЗТВ, полученных комбинированной сваркой, следует отнести укрупнение зерна.

1. Dilthey U., Lueder F., Wieschermann A. Technical and economical advantages by synergies in laser arc hybrid welding // Welding in the World. — 1999. — Vol. 43. — P. 141–152.
2. Nagata S., Katsumura M., Matsuda J., Hamasaki M. Laser welding combined with TIG or MIG. — S. l., [1985]. — Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-390-85 IIW. — 8 p.
3. Хаяси Т. Применение сварки с предварительным высокочастотным нагревом для производства толстостенных труб среднего диаметра // Сб. ст. науч. о-ва по лазер. обраб. — 1998. — № 7. — С. 137–144.
4. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 415 с.
5. Технологический CO<sub>2</sub>-лазер ЛТ 104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.
6. Лазерное термоупрочнение комплексно-легированных сталей с низким и средним содержанием углерода / В. Ю. Хаскин, С. Ю. Павловский, В. П. Гаращук и др. // Доп. НАН України. — 2000. — № 2. — С. 36–39.
7. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головко, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак. — Киев: Техніка, 1981. — 131 с.

A joint effect of laser radiation and HF heating on steel in butt welding has been studied. It is found that concurrent HF heating up to sample surface temperature equal to 1100 ...1200 °C allows about 1.5 times improvement of either the penetration depth, or process speed. Weld geometry is close to the one typical for laser welding, but they differ structurally (hardening structures in the metal of the welds and HAZ characteristic of laser welding, are absent, hardness values are closer to those of the base metals).

Поступила в редакцию 04.04.2001,  
в окончательном варианте 17.04.2001



# СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

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

Проанализированы системы питания машин для контактной сварки: однофазные промышленной частоты и трехфазные с преобразователями частоты и числа фаз. Проведено качественное сравнение семи систем питания по их технологическим свойствам, влиянию возмущений на качество соединений, износу электродов, а также энергетическим показателям.

*Ключевые слова:* контактная сварка, системы питания, преобразователи частоты и числа фаз, машины постоянного тока, энергетические показатели

Контактная сварка — один из наиболее распространенных способов соединения металлов, применяемых в автомобиле- и приборостроении, производстве многообразной бытовой техники, средств управления, измерения и связи, металлических сеток и каркасов, строительстве и ремонте железнодорожных путей, а также во многих других областях. Посредством контактной сварки изготавливают изделия из сталей и сплавов на основе цветных металлов. Толщина деталей, подлежащих точечной сварке, изменяется от нескольких микрон до нескольких миллиметров, а при стыковой сварке поперечное сечение в месте соединения колеблется от нескольких долей до сотни тысяч квадратных миллиметров. Поэтому оборудование для контактной сварки очень разнообразно как по конструктивному исполнению, так и по мощности, габаритным размерам.

Ниже рассматриваются особенности систем питания машин для контактной сварки, определяющие их энергетические показатели и в значительной мере технологические свойства.

При выборе системы питания нужно установить, можно ли воспроизвести оптимальный режим сварки, используя ту или иную систему и какая из них позволит сделать это проще и надежнее. Что касается таких импульсных процессов, как контактная точечная, рельефная и шовная сварка, то здесь следует ориентироваться на минимально необходимое время процесса и возможность воспроизведения наиболее подходящего токового цикла. Но и этого недостаточно — нужно проанализировать еще возможное влияние возникающих в ходе сварки возмущений на качество соединений.

При сварке сопротивлением деталей из металлических листов основными возмущениями являются следующие:

износ электродов, приводящий к увеличению поверхности контакта электрод—деталь;

электрическое шунтирование сварочного контакта ранее сваренными точками или случайными контактами;

механическое шунтирование ранее сваренными точками, затрудняющее образование сварочного контакта. Аналогичный эффект может давать и неточная сборка;

колебания напряжения сети;

загрязнение поверхности изделий или некачественная подготовка их к сварке;

загрязнение поверхности электродов.

Влияние ряда возмущений на качество соединений в значительной мере связано с внешней характеристикой (рис. 1), формой которой зависит не только от сопротивления короткого замыкания машины, но и от системы питания, прежде всего, частоты сварочного тока. От особенностей системы питания в некоторой мере зависят и условия на границе электрод—деталь, определяющие эксплуатационную стойкость электродов.

Наиболее вероятное возмущение — износ электродов, который вызывает снижение сопротивления сварочного контакта, а также возрастание тока — тем большее, чем более пологой является его внешняя характеристика. В результате вероятность появления непровара становится меньшей при использовании машин с более жесткими внешними характеристиками. На практике зачастую выбирают режимы сварки с большим запасом, чтобы дефектов подобного рода не было. Однако при этом расходуется лишняя энергия.

На рис. 2 показаны зависимости высоты ядра сварной точки  $H$  от сопротивления короткого замыкания машины  $R_{k,z}$ . Напряжение выбирается таким, как при сварке еще не изношенным электродом, и остается затем неизменным. Высота  $H_1$  относится к новому электроду, а  $H_2$  — к электроду, у которого диаметр контактной поверхности увеличен вследствие износа на 20 %. Как видно,

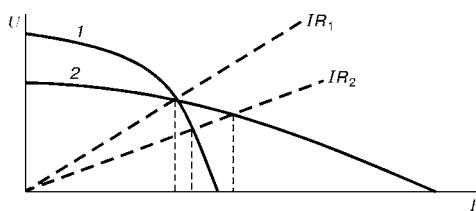


Рис. 1. Внешние характеристики машин контактной сварки и падение напряжения на сварочном контакте ( $R_2 < R_1$ ): 1, 2 — жесткая и пологопадающая характеристики ( $U$  — напряжение;  $I$  — ток)

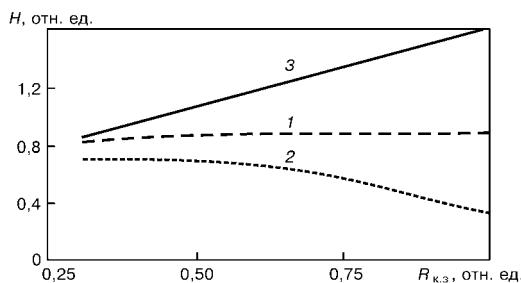


Рис. 2. Зависимость высоты  $H_1$  ядра точки при новом электроде и  $H_2$  при изношенном электроде от сопротивления короткого замыкания  $R_{k.z}$ : 1 –  $H_1$ ; 2 –  $H_2$ ; 3 –  $U$

снижение сопротивления короткого замыкания благоприятно отражается на стабильности размеров литого ядра сварной точки. При этом нет необходимости во вложении дополнительной энергии для гарантии минимально необходимой высоты ядра при изношенном электроде. То же касается и шунтирования: форма внешней характеристики и при этом возмущении влияет на формирование сварного соединения.

Несомненно, износ электрода зависит от температуры контакта электрод–деталь в начале процесса сварки, когда этот контакт еще не сформировался и микроконтакты не деформировались. Здесь также проявляется влияние сопротивления короткого замыкания машины: чем оно ниже, тем меньше вероятность перегрева микроконтактов со всеми отрицательными последствиями.

На рис. 3 показано приблизительное распределение температуры в контакте медного электрода со стальным изделием, поверхность которого отличается повышенным сопротивлением вследствие наличия пленок и шероховатости поверхности. Распределение температуры соответствует моменту после протекания через сварочный контакт импульсов тока разной продолжительности, но при одинаковой энергии. Чем «мягче» импульс, тем меньше температура на границе раздела материалов. В связи с этим на перегрев этой границы должны оказывать влияние пульсации сварочного тока. Глубокие пульсации могут вызвать расплавление микрообъемов с образованием сплавов, отличающихся повышенным электрическим сопротивлением и прогрессирующим налипанием этого сплава на поверхность электрода. Такое явление зафиксировано при сварке сталей с антикоррозионными покрытиями, в частности с цинковым. Если температура плавления электрода выше температуры плавления металла изделия, то возможен переход электродного металла на поверхность сварного соединения. Для случая, когда возможен перегрев контакта электрод–деталь, переменный ток промышленной частоты неблагоприятен.

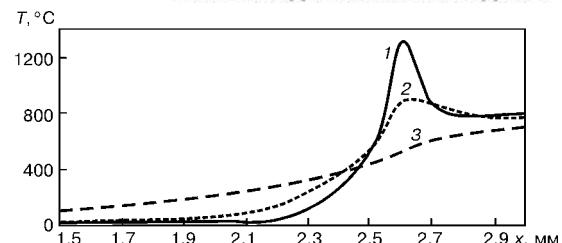


Рис. 3. Распределение температуры в контакте электрод–деталь в зависимости от продолжительности импульса тока при неизменной энергии: 1 – 0,4; 2 – 2; 3 – 20 мс ( $x$  – протяженность контакта)

Очевидно, что чем меньше амплитуда тока отличается от его действующего значения, тем лучше.

Влияние других возмущений отчасти может быть компенсировано системой автоматического регулирования, если она достаточно совершенна.

При сварке оплавлением сопротивление короткого замыкания, определяющее форму внешней характеристики, оказывает большое влияние на устойчивость протекания процесса и его термический КПД. Этот вопрос подробно освещен в работах [1, 2] и здесь не рассматривается.

Любая машина для контактной сварки с одной парой электродов является однофазной (рис. 4), если она не укомплектована специальным преобразователем. Электроды присоединяются к трансформатору, включаемому в сеть тиристорным контактором. Недостаток машин данного типа состоит в том, что онинеравномерно загружают трехфазную распределительную сеть. Ток в загруженных фазах в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем при симметричной нагрузке той же мощности. По этой причине несимметричная нагрузка приводит к большему падению напряжения в распределительной сети, что неблагоприятно отражается на излучении осветительных приборов. Особенно заметно это влияние в связи с повторно-кратковременным режимом работы сварочного оборудования.

Несимметричная нагрузка приводит к искажению трехфазной звезды напряжений. В итоге в электрической сети возникает трехфазная система напряжений с обратным следованием фаз, вызывающая дополнительные потери энергии в асинхронных двигателях. Если мощность однофазной сварочной машины составляет не более  $2/3$  мощности распределительного трансформатора, то, как показывают оценочные расчеты, эти дополнительные потери невелики и их вряд ли стоит принимать во внимание. Однофазные машины отличаются относительно низким коэффициентом мощности из-за значительного реактивного сопротивления вторичной цепи машины. Коэффициент мощности снижает и фазовое управление тиристорами. И еще один недостаток всех машин для

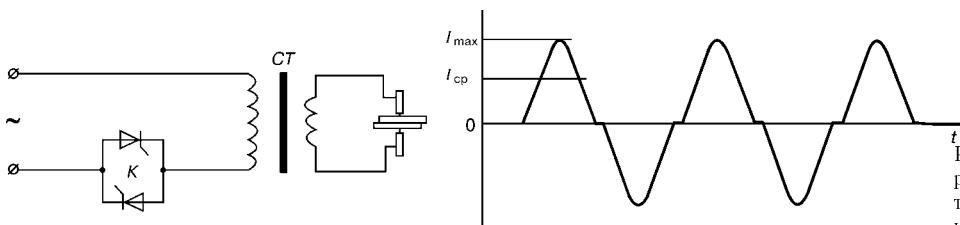


Рис. 4. Схема питания машины переменного тока (СТ – сварочный трансформатор; К – тиристорный контактор;  $t$  – время)

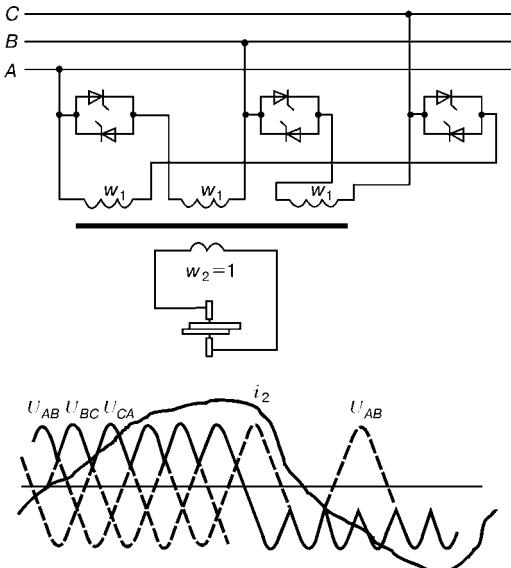


Рис. 5. Преобразователь частоты и числа фаз ( $A, B, C$  — фазы сети;  $w_1, w_2$  — соответственно первичная и вторичная обмотка сварочного трансформатора;  $i_2$  — вторичный ток)

контактной сварки, связанный с повторно-кратковременным режимом работы, приводит к необходимости создания распределительных сетей «с запасом».

В настоящее время усилия создателей этого вида электротехнического оборудования направлены на разработку различного рода преобразователей, чему, несомненно, способствуют успехи в области силовой полупроводниковой техники. В рассмотренных ниже устройствах отсутствуют преобразователи с накопителями энергии, наибольшее распространение среди которых получили накопители из конденсаторов. Машины с такими преобразователями имеют хорошие энергетические показатели, но по технологическим возможностям уступают машинам с современными преобразователями частоты и числа фаз.

Для накопления энергии и ее последующего импульсного использования в процессе сварки в некоторых случаях целесообразны вращающиеся электромашинные преобразователи. В работе [3] сообщается об использовании униполярных генераторов постоянного тока для питания машин, рассчитанных на тысячи ампер. Автономные сварочные агрегаты типа рельсо- и трубосварочных, эксплуатируемых в полевых условиях, комплектуют мобильными электростанциями с трехфазными генераторами промышленной частоты. Ниже рассматриваются лишь полупроводниковые преобразователи частоты и числа фаз, сопоставляемые машины, оснащенные такими преобразователями, с наиболее простыми и распространенными однофазными машинами (рис. 4). В общем виде возможно их сравнение по качественным показателям. Количественные показатели определяются не только выбором того или иного преобразователя, но и конкретным исполнением машины.

Один из первых преобразователей частоты и числа фаз был создан фирмой «Sciacy» более полувека назад (рис. 5). Он включает шесть тиристоров (игнитронов), а также специальный

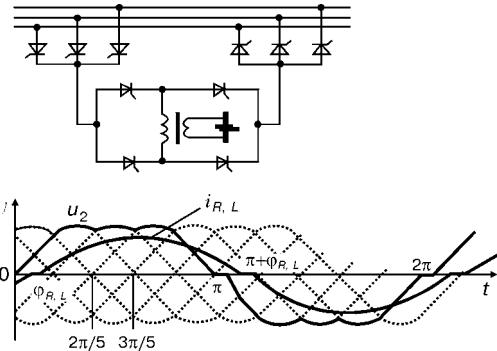


Рис. 6. Преобразователь частоты и числа фаз с переключателем полярности тока ( $u_2$  — вторичное напряжение;  $i_{R,L}$  — активно-индуктивное значение тока;  $\phi_{R,L}$  — фазовый сдвиг в случае активно-индуктивной нагрузки)

трансформатор с тремя первичными обмотками, рассчитанный на частоту вторичного тока 5 Гц. В каждом полупериоде низкой частоты работают три тиристора, которые по отношению ко вторичной цепи как бы имитируют трехфазное однополупериодное выпрямление тока промышленной частоты. К технологическим преимуществам машины с таким преобразователем следует отнести:

значительно более пологую внешнюю характеристику благодаря низкой частоте и малому реактивному падению напряжения во вторичной токоведущей цепи;

притупленную по сравнению с синусоидой форму вторичного тока.

Энергетические преимущества заключаются в следующем:

достаточно высокий коэффициент мощности;

практически равномерная загрузка фаз трехфазной распределительной сети;

меньшие потери энергии в массивных элементах вторичной цепи в результате более равномерного распределения тока в них.

Недостатком машин является громоздкий и тяжелый трансформатор [4] из-за очень низкой частоты, которую целесообразно было бы несколько повысить. Однако при этом снижаются другие показатели. Машины с такими преобразователями, предназначенные для сварки стальных конструкций из листов и профилей с толщиной стенки до 10...12 мм, получили лишь ограниченное применение. Для указанных конструкций выгоднее использовать дуговую сварку.

Принципиальное отличие преобразователя, приведенного на рис. 6, состоит в том, что основу его составляет трехфазный двухполупериодный выпрямитель и обычный двухобмоточный трансформатор. Недостаток его заключается в том, что вместо шести тиристоров требуется десять. Четыре дополнительных тиристора образуют переключатель полярности тока. Возможен вариант с трехобмоточным трансформатором и двумя (вместо четырех) дополнительными тиристорами (рис. 7). Двухполупериодное выпрямление дает дополнительные возможности относительно выбора частоты. Такой преобразователь работает с хорошими энергетическими показателями в квазисимметричном режиме при частоте сварочного тока 30 Гц [5]. Под квазисимметричным режимом работы

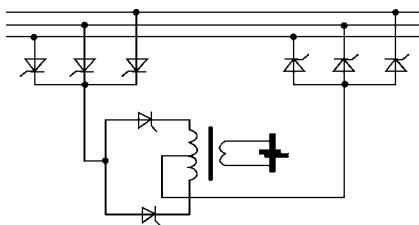


Рис. 7. Вариант преобразователя (см. рис. 6) с уменьшенным количеством тиристоров

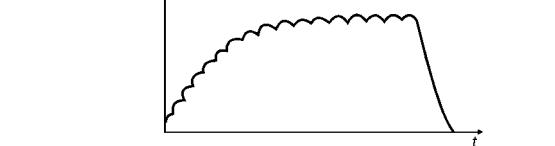
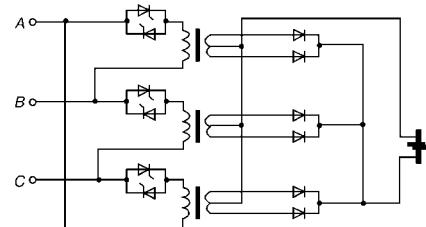


Рис. 9. Система питания для сварки постоянным током

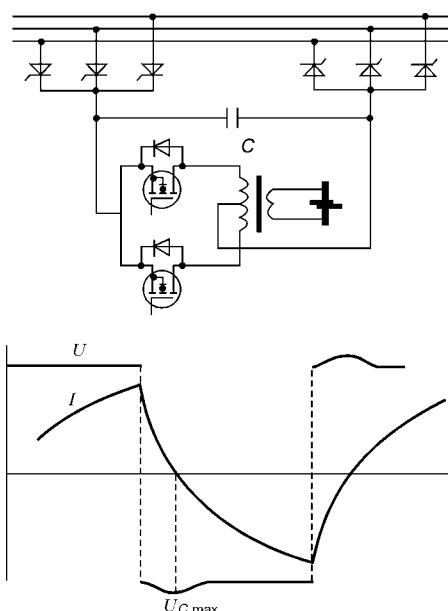


Рис. 8. Преобразователь с промежуточным звеном повышенной частоты и переключателем полярности на биполярных транзисторах ( $C$  — конденсатор;  $U_{C \max}$  — максимальное напряжение на конденсаторе)

подразумевается режим, при котором симметричная загрузка трехфазной сети зафиксирована в среднем за три полупериода тока низкой частоты. В пределах же одного полупериода обнаружены отклонения от симметрии.

В технологическом отношении машины с таким преобразователем имеют несомненные преимущества по сравнению с однофазной машиной, а также с машинами, оснащенными трехфазным однополупериодным преобразователем. При работе на частоте 30 Гц можно использовать практически такие же трансформаторы, как и в машинах переменного тока промышленной частоты, поскольку в диапазоне частот от 50 до 30 Гц сопротивление короткого замыкания машины падает почти пропорционально частоте, необходимое для сварки напряжение снижается.

Более совершенным следует считать аналогичный сварочный преобразователь с переключателем полярности на биполярных транзисторах с изолированным затвором (рис. 8). Подходящие для этой цели транзисторы уже существуют. Однако еще недостаточно изучены особенности их работы в силовых цепях сварочных преобразователей достаточно большой мощности, особенно при частоте сварочного тока ниже частоты сети. Целью такого исследования могла бы явиться оптимизация частоты.

Для машин малой мощности данные преобразователи на транзисторах, работающих на повышенных частотах, особенно перспективны. При соответствующей аппаратуре управления они позволяют получать самые благоприятные для образования соединения циклы изменения сварочного тока. По своим технологическим свойствам машины с указанными преобразователями превосходят распространенные конденсаторные машины. Машины с преобразователями, приведенными на рис. 7, 8, найдут применение и для стыковой сварки, в том числе тонких полос [6].

В последнее десятилетие некоторые фирмы разработали машины для сварки сопротивлением и оплавлением с трехфазной группой трансформаторов (рис. 9). Вторичные обмотки этих трансформаторов соединены с вентилями, образующими шестифазную систему выпрямления. Нагрев свариваемых деталей осуществляют постоянным током. Данные машины отличаются хорошими технологическими свойствами при сварке сопротивлением, о чем имеется информация в рекламных материалах. Полагаем, что технологического эффекта главным образом достигают благодаря минимальной пульсации сварочного тока. Применение постоянного тока при сварке оплавлением изучали в работах [7–9]. Однако убедительные данные о технологических преимуществах постоянного тока для этого способа сварки отсутствуют.

Машины постоянного тока симметрично загружают фазы электрической сети переменного тока, имеют относительно высокий коэффициент мощности и в этом отношении лучше других типов машин с преобразователями частоты и числа фаз. Но им присущ и очень существенный недостаток — низкий КПД. Так, при сварке сопротивлением стальных деталей падение напряжения на них редко превышает 1,5 В. На кремниевых вентилях во вторичной цепи машины снижение напряжения во время сварки приблизительно такое же или больше. С охлаждающей водой выбрасывается больше энергии, чем используется на сварку. При сварке изделий из алюминиевых сплавов относительные потери энергии еще больше.

При сварке непрерывным оплавлением без предварительного подогрева сопротивлением потери в вентилях относительно ниже из-за более

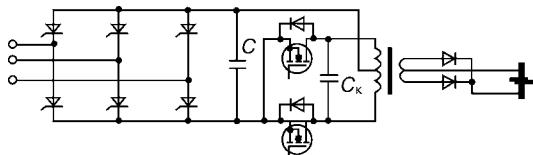


Рис. 10. Преобразователь с выпрямителем во вторичной цепи сварочного трансформатора ( $C_k$  — коммутирующий конденсатор)

высокого сопротивления сварочного контакта. Однако вентили создают дополнительное активное сопротивление, которое воздействует на устойчивость оплавления. Поэтому оплавление приходится выполнять при повышенном напряжении, что приводит к снижению термического КПД, производительности оборудования и дополнительной потере металла. В связи с этим можно высказать сомнение о целесообразности применения машин постоянного тока для сварки оплавлением.

Преобразователь, приведенный на рис. 10, включает выпрямитель, гладжающий конденсатор, инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный повышенной частоты, и трансформатор с двумя вентилями. Этот преобразователь отличается от рассмотренного на рис. 8 только вентилями во вторичной цепи, благодаря чему возможна работа на более высоких частотах. Широтно-импульсное управление транзисторами переключателя полярности позволяет получать самые сложные циклы изменения сварочного тока, обеспечивающие и стабильное качество сварных соединений.

Преобразователи такого типа особенно перспективны для микросварки, когда дополнительные потери энергии в вентилях не имеют значения. Они незаменимы для подвесных машин, работающих в роботизированных линиях и производящих сварку изделий из металла с защитными металлическими покрытиями. В данном случае преобразователь позволяет снизить массу и изменить габариты машины, а также повысить стойкость электродов.

Выбирая тот или иной тип машины, нужно иметь в виду, что любая машина с преобразователем частоты и числа фаз значительно дороже простой однофазной с тиристорным контактором. Если в технологическом отношении однофазную машину можно признать подходящей, то существуют проблемы с ее подключением к распределительной сети. Таким образом, следует подумать о целесообразности вложения дополнительных средств в приобретение машины с преобразователем. Возможно, увеличение установленной мощности участка распределительной сети обойдется дешевле.

## Выводы

1. Достижения в области силовой полупроводниковой техники открывают большие перспективы

Power systems for resistance welding machines have been analyzed, namely commercial-frequency single-phase and three-phase with a converter of frequency and phase number. A qualitative comparison of seven power systems has been conducted in terms of their technological properties, influence of disturbances on joint quality, electrode wear, as well as power characteristics.

для применения преобразователей частоты и числа фаз для контактной сварки.

2. При оценке перспективности применения машины с преобразователем следует учитывать не только возможный энергетический эффект, но и технологические преимущества, которые может дать преобразование энергии.

3. Однофазные машины с тиристорными контакторами и в будущем останутся наиболее распространенными, но области их применения ограничатся простыми технологическими задачами и относительно небольшой мощностью, предельное значение которой может быть определено в каждом конкретном случае исходя из условий электроснабжения.

4. Для сварки сопротивлением и оплавлением найдут применение машины с преобразователями на 30 Гц без вентиляй во вторичной цепи сварочной машины. Эти машины имеют как технологические, так и энергетические преимущества по сравнению с простейшими однофазными, а по КПД и некоторым другим показателям превосходят машины постоянного тока.

5. Преобразователи с промежуточным звеном повышенной частоты следует применять в машинах для точечной и шовной микросварки,стыковой сварки тонких лент. Преобразователи такого же типа с вентилями во вторичной цепи сварочного трансформатора перспективны для машин, работающих в составе робототехнических линий производства изделий из сталей с покрытиями и алюминиевых сплавов, а также для машин, предназначенных для сварки различных особых покрытых деталей, в том числе и с проводящими покрытиями.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
2. Кучук-Яценко С. И. Контактнаястыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
3. Контактнаястыковая сварка трубопроводов / Под ред. С. И. Кучук-Яценко. — Киев: Наук. думка, 1986. — 207 с.
4. Подоля Н. В., Кучук-Яценко С. И. Контактнаястыковая сварка токами низкой частоты // Автомат. сварка. — 1957. — № 1. — С. 63–72.
5. Лебедев В. К., Письменный А. А. Совершенствование систем питания машин для контактной сварки сопротивлением // Сварка и родственные технологии — в XXI веке: Сб. тр. междунар. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 130–136.
6. Лебедев В. К., Дубко А. Г. Совершенствование процесса сварки оплавлением тонких полос // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 48–50.
7. Лебедев В. К. Эффективность применения машин постоянного тока для контактной сварки // Там же. — 1992. — № 11/12. — С. 3–6.
8. Бокштейн О. Н., Канин А. М. Оборудование для контактной сварки постоянным током. — Л.: Энергия, 1976. — 104 с.
9. Thamodharan M., Beck H. P., Wolf A. Steady and pulsed direct current welding with a single converter // Welding J. — 1999. — № 3. — Р. 75–79.

Поступила в редакцию 20.07.2001

# ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**В. Н. БЕРНАДСКИЙ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены статистические и маркетинговые данные о мировом производстве промышленных роботов, объеме их продаж, общей численности мирового и национальных парков роботов, а также об основных областях применения в современном производстве. Показано, что роботы для сварки и родственных технологий составляют основную часть мирового парка промышленных роботов.

*Ключевые слова:* промышленные роботы, сварочные роботы, классификация, статистика, мир, прогноз, производство, рынок, парк, области применения

В последние десятилетия робототехника заняла ведущее место в автоматизации современного промышленного производства. Ее развитие, несмотря на отдельные спады и взлеты, отличается высокой стабильностью. Инженерные и технологические разработки средств робототехники в основном концентрируются собственно на промышленных роботах (ПР), имеющих наибольший спрос и уже сложившиеся области эффективного применения в производстве. При снижении стоимости промышленных роботов значительные успехи достигнуты в повышении их служебных характеристик, гибкости и надежности. Наиболее существенные достижения наблюдаются в области систем управления роботами благодаря использованию в них новых поколений микропроцессоров, обеспечивающих увеличение их функциональных и производственных возможностей.

Расширение сферы применения роботов в промышленном производстве обусловлено не только стремлением к повышению производительности, но и насущной необходимостью обеспечивать высокое качество продукции и стабильность этого показателя при больших партиях или при частых изменениях объектов производства. По мнению экспертов, серьезными стимулами роста инвестиций в производство и применение промышленных роботов являются следующие:

❖ непрерывное снижение стоимости промышленных роботов на фоне роста стоимости рабочей силы. В частности, за период 1990–1999 гг. средняя цена промышленных роботов на рынке США снизилась на 40 %, в то время как стоимость рабочей силы за то же десятилетие возросла на 38...39 % [1];

❖ недостаток квалифицированной рабочей силы. Так, например, в Японии в последние годы зафиксирован хронический дефицит сварщиков, резчиков и операторов сварочного оборудования, который составляет 8...10 % общей численности сварочного персонала, что в 2 раза выше среднего показателя по стране [2];

❖ освобождение работающих на производстве от тяжелого, интенсивного и монотонного труда;

© В. Н. Бернадский, 2001

❖ возможность улучшения экологической обстановки и снижения вредного влияния производства, особенно сварочного, на здоровье производственного персонала.

Международная федерация робототехники (IFR) совместно с Европейской экономической комиссией ООН систематически собирают экономико-статистическую информацию стран-членов IFR и на ее основе ежегодно издают отчеты о состоянии и тенденциях развития мирового производства и парка роботов, а также об областях их применения. По данным IFR [1], на начало 2000 г. в мире было выпущено около миллиона промышленных роботов и примерно 743 тыс. из них находится в эксплуатации, составляя общемировой парк промышленных роботов всех типов. По краткосрочному прогнозу IFR, к 2003 г. общемировой парк возрастет в среднем на 5 % в год и достигнет численности 892 тыс. шт. В первой половине 2000 г. объемы парка уже возросли на 10...15 % по сравнению с первой половиной 1999 г., что иллюстрирует умеренность темпа роста, принятого в прогнозе IFR.

Динамика роста стоимостного объема рынка промышленных роботов за период 1997–1999 гг. в мире и в ряде ведущих стран представлена в табл. 1. В 1999 г. на рынке было реализовано более 81,508 тыс. роботов на сумму более 5,1 млрд дол. США. При этом средняя стоимость одного робота непрерывно снижается: если в 1991 г. она составляла 103 тыс., то в 1995 г. — уже 74 тыс.,

**Таблица 1. Стоимостный объем мирового рынка промышленных роботов и рынка ряда стран, млн. дол. США (текущие цены)**

Страна	1997	1998	1999	1999/1998, %
Япония	2242	2166	2366	9,2
США	1100	1028	1210	17,7
Германия	557	597	539	-9,7
Республика Корея	112	59	89	50,8
Италия	233	295	318	7,8
Великобритания	109	73	86	17,8
Франция	98	99	183	84,8
<b>Всего</b>	<b>4450</b>	<b>4317</b>	<b>4792</b>	<b>11,0</b>
Все другие страны	414	499	347	-30,5
<b>Всего, мир</b>	<b>4864</b>	<b>4816</b>	<b>5139</b>	<b>6,7</b>



## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

а в 1999 г. — 62 тыс. дол. США. Наиболее дорогие роботы выпускают фирмы США (90...100 тыс. дол. США), а наиболее дешевые (30...35 тыс. дол. США) — фирмы Республики Корея [3].

На период 2000–2003 гг. прогнозируется среднегодовой темп роста количественного объема продаж в пределах 10 %, что позволяет ожидать в 2003 г. продажу на мировом рынке более 120 тыс. промышленных роботов [1].

При общей тенденции неуклонного роста количества устанавливаемых и вводимых ежегодно в эксплуатацию промышленных роботов, а также роста общего парка роботов темпы и характер развития роботизации в отдельных регионах и странах мира отличаются весьма существенно. Статистические данные по двум упомянутым показателям за 1999 г. и прогнозируемые объемы на 2003 г. приведены в табл. 2. Данные о количестве устанавливаемых роботов обычно более достоверны, чем сведения об общем (накопленном) количестве (парке) роботов, ибо данные о демонтаже или прекращении эксплуатации роботов обычно не столь оперативны. В статистических данных о парке роботов обычно принято не учитывать те, которые выпущены и установлены более 12

лет тому назад. Динамика роста общемирового и национальных парков промышленных роботов за более ранний период 1990–1998 гг. приведена в работе [3].

Как видно из табл. 2, основной парк промышленных роботов сосредоточен в Японии, США, странах ЕС и Азиатско-Австралийского региона. За исключением нескольких стран, все регионы в 1999 г. имели положительные, по сравнению с 1998 г., темпы прироста ежегодно устанавливаемых промышленных роботов и численности общего парка, которые составляли для мира в целом 17,9 и 4,9 % соответственно. Прогноз на 2003 г. предусматривает среднегодовой темп прироста количества устанавливаемых в мире роботов около 15 %, а темп прироста парка — примерно 6...7 %.

Учитывая ведущую роль Японии в мире по роботизации промышленного производства, IFR в своих статистических обзорах [1] выделяет Японию и приравнивает ее к другим регионам мира. Более того, общие статистические данные IFR даются в двух категориях: «исключая Японию» и «включая Японию».

Так, Япония (табл. 2), безусловно, является лидером по количеству ежегодно вводимых робо-

**Таблица 2. Количество ежегодно устанавливаемых промышленных роботов и их общий парк (регионы и страны мира)**

Регион, страна	Установленные роботы, шт.			Общий парк роботов, шт.		
	1999	1999/1998 изменение, %	2003 (прогноз)	1999	1999/1998 изменение, %	2003 (прогноз)
<b>Япония (все типы ПР)</b>	<b>35609</b>	<b>5,4</b>	<b>47500</b>	<b>402212</b>	<b>-2,3</b>	<b>384700</b>
<b>США</b>	<b>15063</b>	<b>38,7</b>	<b>24000</b>	<b>92860</b>	<b>13,6</b>	<b>155400</b>
<b>Европейский Союз</b>	<b>25087</b>	<b>16,4</b>	<b>37400</b>	<b>176210</b>	<b>11,3</b>	<b>262300</b>
Германия	10548	6,1	13000	81203	11,0	109500
Италия	5224	19,2	9500	34991	11,0	57600
Франция	3092	87,1	4700	18163	12,0	28200
Великобритания	1392	8,6	1700	11537	7,2	14900
Австрия	350	40,0	—	3000	9,0	—
Бенилюкс	1059	11,7	—	7803	10,3	—
Дания	253	17,7	—	1169	17,7	—
Финляндия	435	15,1	—	2276	18,4	—
Испания	2112	16,7	—	10473	21,3	—
Швеция	622	-10,0	—	5595	4,8	—
<b>Другие страны Европы</b>	<b>1201</b>	<b>6,7</b>	<b>2000</b>	<b>16976</b>	<b>2,6</b>	<b>14700</b>
Чехия	100	0	—	1315	8,2	—
Венгрия	20	566,7	—	164	-25,8	—
Норвегия	57	-9,5	—	485	4,8	—
Польша	42	-20,8	—	496	2,5	—
Россия	500	0	—	10000	0	—
Словакия	30	0	—	580	5,5	—
Словения	20	0	—	303	5,2	—
Швейцария	432	21,0	—	3632	9,5	—
<b>Азия/Австралия</b>	<b>4056</b>	<b>33,6</b>	<b>8000</b>	<b>48219</b>	<b>7,5</b>	<b>67300</b>
Австралия	383	10,4	—	2871	9,9	—
Республика Корея	2426	69,5	—	33656	7,1	—
Сингапур	500	0	—	5270	6,0	—
Тайвань	747	-1,6	—	6422	10,1	—
<b>Другие страны</b>	<b>492</b>	<b>65,7</b>	<b>1000</b>	<b>5974</b>	<b>6,0</b>	<b>7800</b>
<b>Всего (все типы ПР), включая Японию</b>	<b>81500</b>	<b>15,3</b>	<b>119900</b>	<b>742500</b>	<b>3,3</b>	<b>892200</b>
<b>Прочие страны мира (оценка)</b>	<b>30600**</b>	<b>24,4</b>	<b>—</b>	<b>226900**</b>	<b>10,8</b>	<b>—</b>
<b>Всего (оценка)</b>	<b>112000**</b>	<b>17,9</b>	<b>—</b>	<b>969000**</b>	<b>4,9</b>	<b>—</b>

\* Данные по России условно-оценочные. \*\* В анализе не учитываются.

**Таблица 3. Плотность промышленных роботов всех типов**

Страна	Плотность роботов, шт./10000 чел.	Парк роботов, шт. (справочно)
Япония (все типы ПР)	280	402212
Сингапур	148	5270
Республика Корея	116	33656
Германия	102	81203
Швеция	69	5595
Италия	67	34991
Финляндия	51	2276
Бенилюкс	49	7803
США	48	92860
Франция	48	18163
Швейцария	46	3632
Австрия	44	3000
Испания	41	10473
Австралия	25	2871
Дания	24	1169
Великобритания	23	11537
Норвегия	16	485
Словения	13	303
Словакия	13	580
Чехия	11	1315
Россия	8	10000
Польша	2	496
Венгрия	2	164
Тайвань	—	6422
Другие страны	—	5974
<b>Всего</b>		<b>742451</b>

тов. Здесь в 1999 г. было установлено 35,6 тыс. роботов, а в 2003 г. прогнозируется установка 47,5 тыс. роботов. При этом происходит активная замена простых роботов прогрессивными (адаптивными и с контурным управлением), доля которых в 2003 г. будет доведена до 85 % [1, 3]. Парк промышленных роботов Японии превышает половину общемирового парка; в 1999 г. его численность достигла 402 тыс., а к 2003 г. несколько сократится и составит примерно 385 тыс. или 46,4 % общемирового парка.

Некоторые элементы стабилизации темпов развития экономики в ведущих странах, в частности Японии и США, могут внести свои коррективы в достаточно оптимистичный прогноз развития робототехники на ближайшие 2...3 года (табл. 2). В частности, начиная с 1998 г. заметно некоторое сокращение парка роботов в Японии. Так, в 1999 г. его падение составило 2,3 %, а к 2003 г. прогнозируется снижение еще на 4 % по сравнению с 1999 г. Отчасти это объясняется расширяющейся практикой выведения из эксплуатации промышленных роботов первых поколений и установкой прогрессивных многоцелевых роботов с повышенным качеством функционирования (скорость, воспроизводимость, точность, надежность) и микропроцессорными системами управления [4].

Общая численность парка действующих роботов в различных странах мира отличается весьма значительно. Достаточно корректно сопоставление уровня роботизации промышленности различных стран мира принято проводить по такому условному показателю, как плотность роботов, т. е. количество

**Таблица 4. Международная (IFR) классификация промышленных роботов по областям их применения**

IFR класс	Область технологического применения
<b>000</b>	<b>Неопределенные</b>
<b>110</b>	<b>Процессы литья</b>
	111 Фасонное литье
	119 Прочие
<b>130</b>	<b>Процессы литья пластмасс</b>
<b>140</b>	<b>Процессы термической обработки</b>
<b>150</b>	<b>Процессы штамповки/ковки</b>
<b>160</b>	<b>Процессы сварки</b>
	161 Дуговая сварка
	162 Точечная сварка
	163 Газовая/плазменная сварка
	164 Лазерная сварка
	169 Прочие
<b>170</b>	<b>Процессы напыления</b>
	171 Окраска/нанесение покрытий
	172 Герметизация/склейивание
	179 Прочие
<b>180</b>	<b>Механическая обработка</b>
	181 Установка/съем
	182 Резка/шлифовка/зачистка/полировка
	189 Прочие
<b>190</b>	<b>Специальные процессы</b>
	191 Лазерная и плазменная резка
	192 Гидроабразивная резка
	199 Прочие
<b>200</b>	<b>Сборка</b>
	201 Механическая сборка/соединение
	202 Сортировка/монтаж/резка
	203 Сцепление/прихватка
	204 Пайка мягким припоем
	205 Управление сборочными операциями
	209 Прочие
<b>210</b>	<b>Процессы складирования/упаковки</b>
<b>220</b>	<b>Измерение/контроль/диагностика</b>
<b>230</b>	<b>Обработка материалов</b>
<b>240</b>	<b>Обучение/образование/научные исследования</b>
<b>900</b>	<b>Прочие</b>

роботов, приходящихся на 10 тыс. чел., работающих в промышленности. Как видно из табл. 3, самую высокую плотность промышленных роботов всех типов (280...102 промышленных роботов на 10 тыс. чел.) имели в 1999 г. четыре страны: Япония, Сингапур, Республика Корея и Германия [1]. На предприятиях Сингапура в основном применяются простейшие роботы для несложных сборочно-монтажных операций в радиоэлектронной промышленности. По плотности же прогрессивных типов роботов он занимает одно из последних мест среди других стран [3].

Робототехника — направление стабильно развивающееся в первую очередь в промышленном производстве. Это не относится к другим областям применения роботов, таким, например, как сфера сервиса и производственно-технического обслуживания, индустрия развлечений и роботов для индивидуального обслуживания, рынок которых находится пока на начальной стадии развития [1, 4].

Основным пользователем промышленных роботов была и остается на ближайшие 5...10 лет



## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Таблица 5. Количество устанавливаемых в 1999 г. промышленных роботов для процессов сварки и родственных технологий в ряде ведущих стран мира

Страна	Всего ПР		В том числе по классам					
			Класс IFR: 160 Сварка		Класс IFR: 190 Специальные процессы		Класс IFR: 200 Сборка	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Австралия	347	100	79	22,8	5	1,4	4	1,2
Дания	253	100	41	16,2	—	—	20	7,9
Финляндия	435	100	29	6,7	3	0,7	141	32,4
Франция	3092	100	1619	52,4	16	0,5	152	4,9
Германия	10548	100	3764	35,7	—	—	696	6,6
Италия	5224	100	1053	20,2	181	3,5	133	2,5
Япония (все типы ПР)	35609	100	6155	17,3	75	0,2	13122	36,9
Норвегия	57	100	16	28,1	1	1,8	2	3,5
Польша	42	100	12	28,6	—	—	12	28,6
Испания	2112	100	1047	49,6	17	0,8	94	4,5
Швеция	622	100	132	21,2	—	—	72	11,6
Тайвань	747	100	257	34,4	—	—	140	18,7
Великобритания	1392	100	685	49,2	17	1,2	28	2,0
США	15063	100	7682	51,0	—	—	1054	7,0
Республика Корея	2426	100	699	28,8	—	—	655	27,0
Все другие страны	3539	100	—	—	—	—	—	—
<b>Всего</b>	<b>81508</b>	<b>100</b>	<b>23270</b>	<b>28,5</b>	<b>315</b>	<b>0,4</b>	<b>16325</b>	<b>20,0</b>

автомобильная индустрия. Постепенно расширяется применение промышленных роботов в сварочном и судокорпусном производстве.

Отрасли общего машиностроения пока сохраняют свои небольшие позиции по использованию промышленных роботов (производство строительно-дорожного, электротехнического и энергетического оборудования, а также авиапромышленность). В ближайшей перспективе крупным потенциальным пользователем промышленных роботов должна стать пищевая промышленность.

Традиционные промышленные роботы служат основой для разработки специализированных роботов для таких новых отраслях применения, как хирургия, атомная энергетика, горное дело, подводные работы и космос.

Технологические области применения промышленных роботов достаточно разнообразны. Учитывая это, IFR приняла достаточно четкую систему классификации промышленных роботов по отраслям их технологического применения или видам операций (табл. 4). Как видно из представленной классификации, она охватывает основные технологии физико-химической и механической обработки конструкционных материалов, а также такие вспомогательные процессы и операции промышленного производства, как метрология и контроль, упаковка, складирование, транспортирование и пр.

Основную группу по технологическому назначению составляют роботы, предназначенные для сварки (IFR 160) и родственных технологий (резка, пайка, склеивание, нанесение покрытий, сборка), входящие в классы IFR 170, 190 и 200. Собственно сварочные роботы (класс IFR 160) включают отдельные типы роботов для дуговой, контактной (точечной), газопламенной, лазерной и других процессов сварки.

Класс IFR 170 включает роботы, используемые для таких смежных операций, как нанесение га-

зотермических покрытий и клеев в производстве kleesварных и kleеных конструкций.

Промышленные роботы, предназначенные для выполнения специальных процессов (класс IFR 190), в основном могут быть отнесены к сварочным роботам, поскольку они используются для автоматизации лазерной и плазменной резки (класс IFR 191), а также для нового перспективного процесса — гидроабразивной резки (класс IFR 192).

Второй (по численности парка) после сварки областью применения промышленных роботов является сборка (класс IFR 200). Этот класс роботов, кроме собственно сборки и монтажа, включает роботы для таких технологических операций неразъемного соединения деталей, как механическое соединение просечкой, клепкой-чеканкой и др. (класс IFR 201), сварочные прихватки (класс IFR 203) и даже пайка мягким припоеем (класс IFR 204). Имеют непосредственное отношение к сварке и промышленные роботы класса IFR 220, предназначенные, в частности, для операций неразрушающего контроля и диагностики качества сварных соединений.

В табл. 5, 6 для основных промышленных стран приведены конкретные сведения о количестве установленных в 1999 г. промышленных роботов и общем парке роботов в 1999 г., предназначенных для сварки и родственных технологий (классы IFR 160 и 190), а также для сборки (класс IFR 200). Для каждой страны приведены абсолютные значения численности и соответствующие доли отдельных видов роботов в их общем количестве.

Как видно из табл. 6, доля сварочных роботов (класс IFR 160), эксплуатируемых в промышленности ведущих стран, составляет 35...53 % общей численности их парка, а сборочных (класс IFR 200) — 26,4 % общемирового парка. Доли сборочных роботов в отдельных странах различаются существенно: от 1,7 до 41,2 %. Как правило, на-

**Таблица 6. Парк промышленных роботов, предназначенных для сварки и родственных технологий, в ряде ведущих стран мира (1999 г.)**

Страна	Всего ПР		В том числе по классам					
			Класс IFR: 160 Сварка		Класс IFR: 190 Специальные процессы		Класс IFR: 200 Сборка	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Австралия	2613	100	1385	53,0	24	0,9	45	1,7
Дания	1169	100	355	30,4	13	1,1	67	5,7
Финляндия	2276	100	424	18,6	32	1,4	433	19,0
Франция	18163	100	6610	36,4	159	0,9	1405	7,7
Германия	81203	100	25812	31,8	—	—	9908	12,2
Италия	34991	100	7688	22,0	—	—	2327	6,7
Япония (все типы ПР)	402212	100	72591	18,0	1207	0,3	165551	41,2
Норвегия	485	100	131	27,0	14	2,9	22	4,5
Польша	496	100	214	43,1	—	—	62	12,5
Испания	10473	100	5343	51,0	133	1,3	407	3,9
Швеция	5595	100	1964	35,1	21	0,4	383	6,8
Тайвань	6422	100	2939	45,8	—	—	728	11,3
Великобритания	11537	100	5527	47,9	207	1,8	324	2,8
США	92860	100	45816	49,3	—	—	9185	9,9
Республика Корея	33656	100	15266	45,4	—	—	5339	15,9
Все другие страны	38349	100	—	—	—	—	—	—
<b>Всего</b>	<b>742500</b>	<b>100</b>	<b>192065</b>	<b>25,9</b>	<b>1810</b>	<b>0,2</b>	<b>196186</b>	<b>26,4</b>

ибольший парк роботов, предназначенных для монтажно-сборочных операций, имеется в странах с развитым производством изделий точной механики и электронной техники, например в Японии (41,2 %), Финляндии (19,0 %) и Республике Корея (15,9 %).

Собственно сварочные роботы (класс IFR:160) включают два основных типа роботов: первый — класс IFR:161 для электродуговой сварки в защитных газах и второй — класс IFR 162 для контактной точечной сварки. Их соотношение в промышленности различных стран отличается заметно (рисунок). Так, в Японии сварочные роботы преимущественно оснащены технологическим инструментом — горелками для дуговой сварки (66 %) — и только 33 % предназначены для контактной точечной сварки. В США и ФРГ, наоборот, в парке сварочных роботов превалируют роботы для контактной сварки (соответственно 67 и 64 %), а роботы для дуговой сварки в защитных газах только несколько превышают треть их общего пар-

ка. Такая структура, по-видимому, определяется технологическими особенностями производства и определенными традициями.

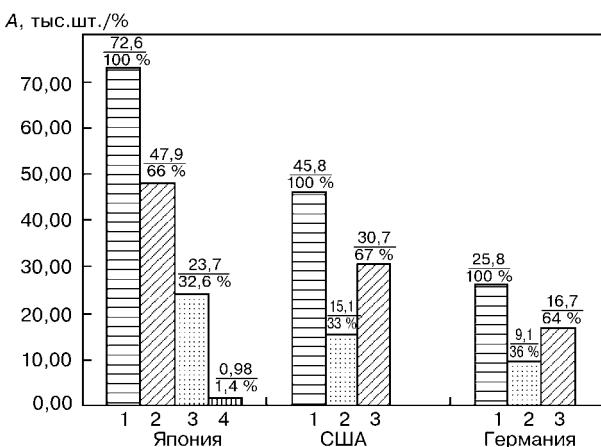
IFR в своем обзоре [1] приводит только по Японии весьма интересные данные о численности сварочных роботов, предназначенных для автоматизации, кроме традиционной дуговой и контактной сварки, других операций. Это относится в первую очередь к промышленным роботам для лазерной сварки и резки, газовой сварки и гидроабразивной резки. В табл. 7 дана информация о парке специальных сварочных роботов и темпах его роста в период 1994–1999 гг.

Впечатляющими являются темпы развития робототехники в конце XX в., сопровождающиеся снижением их стоимости, расширением областей применения, увеличением разнообразия выполняемых ими технологических операций и повышением качества функционирования. Робототехника выросла в такой степени, что стала опорой современного автоматизированного промышленного производства, в частности в автомобилестроении. Все это создает отличные перспективы для производства и сбыта промышленных роботов на ближайшие 5...10 лет [5].

Наиболее представительной группой промышленных роботов являются роботы, предназначенные для сварочных и родственных технологических операций. Именно сварочные роботы из года в год «осваивают» новые области применения благодаря использованию таких прогрессивных в сварочном

**Таблица 7. Парк специальных сварочных роботов в Японии, шт.**

Подкласс IFR	Технологическое назначение	1994	1999	1999/1994 изменение, раз
163	Газовая сварка	75	226	3,0
164	Лазерная сварка	9	235	26,1
191	Лазерная резка	47	279	5,9
192	Гидроабразивная резка	26	447	17,2



Парк сварочных роботов и его структура по способам сварки (1999): 1 — сварочные роботы (IFR: 160); 2 — дуговая сварка (IFR: 161); 3 — контактная сварка (IFR: 162); 4 — другие способы сварки (IFR: 163, 164, 169); A — количество роботов



производстве технологий, как лазерная сварка и резка (в том числе и под водой), гидроабразивная и плазменная резка, нанесение припоев и kleev, поверхностная обработка и пр. Одновременно расстет конструктивное разнообразие сварочных роботов, расширяется их технологическая функциональность. При этом существенно изменяются схемы производства сварных изделий и элементов конструкций. Создаются роботизированные поточные линии со встроенными сварочными ячейками и специальными порталами для перемещения роботов и т. д. Роботизация промышленного производства и, в частности сварочного, — это, безусловно, на-

иболее прогрессивный и экономически эффективный путь развития.

1. *World Robotics 2000* (United Nations) Economic Commission for Europe. — The International Federation of Robotics, 2000. — P. 352.
2. *Нехватка специалистов по сварке и резке* // Йосэцу. гидзицу. — 1996. — № 12. — P. 102–107.
3. Тимченко В. А., Бернадский В. Н. Роботы в производстве сварных конструкций: современное состояние и перспективы // Автомат. сварка. — 1998. — № 5. — С. 55–63.
4. Wiechbrodt B. Edidorsials industrial development in robotics // World Robotics 2000. — UN/ECE, IFR, 2000. — P. IX–X.
5. Akeel Hadi A., Rutledge G. J. Technological enhancements and thier effect on price. Performance indicators of industrial robots // Ibid. — P. XIV–XX.

The paper presents statistical and marketing data on world production of industrial robots, their sales, total world and national population of robots, as well as their main applications in modern production. It is demonstrated, that robots for welding and allied technologies make up the main body of the world population of industrial robots.

Поступила в редакцию 11.06.2001



## Каталог «Періодичні видання Національної академії наук України»

*Сегодня Национальная академия наук Украины издает 75 журналов и 39 периодических сборников. Несмотря на сложную экономическую ситуацию НАН Украины не только сохранила свои периодические издания, но и с 1991 г. было выпущено 51 новое издание.*

*В данном каталоге представлена краткая информация о всех журналах и периодических сборниках, которые издаются научными учреждениями НАН Украины. Приведены алфавитные указатели на украинском, русском и английском языках.*

*В разделе «Распространение» для журналов приведены индексы в соответствии с каталогами подписки (КВУ — «Каталог видань України»; РП — российских каталогов периодических изданий, ЕС — «Експортний каталог видань України») и цена подписки.*

*Журналы и периодические издания сгруппированы по отраслям знаний в соответствии с проблематикой отделений наук НАН Украины.*

За дополнительной информацией просьба обращаться:  
[www.nas.gov.ua/catalog/nas\\_.html](http://www.nas.gov.ua/catalog/nas_.html)

# РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА И МАРГАНЦА В ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ ИЛЬМЕНИТОВОГО ВИДА

Н. Г. ЕФИМЕНКО, канд. техн. наук, Н. А. КАЛИН, инж. (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков)

Предложено использование углерода в составе железоуглеродистого сплава, в частности чугуна, в качестве раскислителя в сварочных электродах ильменитового вида. Разработана методика расчета равновесного содержания углерода и марганца в наплавленном металле, позволяющая определить максимально допустимое количество углерода, вводимого через чугунный порошок в электродных покрытиях при различных долях ильменита, FeMn и [Mn].

**Ключевые слова:** электродное покрытие, шлак, углерод, чугунный порошок, раскисляющая способность, равновесное содержание, марганец, кислород

Использование углерода в качестве раскислителя в сварочных электродах представляет практический интерес в связи с его недефицитностью. При температуре сварочной дуги более 2800 К углерод является наиболее активным раскислителем, способным восстанавливать оксиды всех известных элементов [1].

Однако использование углерода в свободном состоянии [2, 3] требует повышения окислительного потенциала покрытия для полного его окисления, что ухудшает сварочно-технологические свойства электродов.

Цель данной работы заключается в изучении возможности использования связанного углерода (в виде железоуглеродистого сплава) как раскислителя для электродных покрытий ильменитового вида.

Для исследований способом опрессовки изготавляли электроды диаметром 4 мм на проволоке Св-08А. В качестве железоуглеродистого сплава применяли чугунный порошок, содержащий 3,5 % С. Коэффициент массы покрытия  $K_{\text{м.п}}$  электродов составлял 0,47. Содержание FeMn изменялось в пределах 15...20 %, а ильменитового концентрата — 30...60 % при массовой доле чугунного порошка 5, 10 и 15 %. Для определения количества углерода и марганца в наплавленном металле производили наплавку на постоянном токе (160...180 А) при обратной полярности в соответствии с ГОСТ 9466-60.

Для сравнения раскисляющей способности углерода и марганца в каждом конкретном случае необходимо рассчитывать их равновесное содержание в наплавленном металле, которое определяется одинаковой остаточной массовой долей кислорода в жидким железе, раскисленном этими элементами в момент кристаллизации:

$$[\%O]_p^C = [\%O]_p^{Mn}. \quad (1)$$

Остаточное содержание марганца в металле рассчитывают по уравнению, приведенному в работе [4]:

$$[\%Mn] = \frac{[\%MnO]}{K_{Mn} [\%FeO]}, \quad (2)$$

где [%MnO], [%FeO] — массовые доли оксидов марганца и железа в шлаке, %;  $K_{Mn}$  — константа равновесия реакции, рассчитываемая по уравнению  $\lg K_{Mn} = (6440/T) - 2,95$ .

Равновесная концентрация кислорода в металле, раскисленном марганцем, определяется по формуле, приведенной в работе [5]:

$$[\%O]_p^{Mn} = \frac{K'_{Mn}}{[\%Mn]_O^{Mn}}, \quad (3)$$

где  $K'_{Mn}$  — константа равновесия реакции раскисления, вычисляемая по формуле  $\lg K'_{Mn} = (-15065/T) + 6,25$ ;  $f_O^{Mn}$  — коэффициент активности кислорода, определяемый по формуле  $\lg f_O^{Mn} = e^{Mn} [\% Mn]$ .

Углерод, содержащийся в каплях электродного металла и переходящий в них из чугунного порошка, окисляется кислородом, растворенным в жидким железе или находящимся в нем в виде оксидов, а также при взаимодействии металла со шлаком и кислородсодержащими газами атмосферы дуги на границе раздела металл–шлак и металл–газ.

Для расчетов равновесного содержания кислорода в металле, раскисленном углеродом ( $C = 0,02...2,00 \%$ ), и парциальном давлении CO в газовой фазе, равном атмосферному, используют выражение, приведенное в работе [6]:

$$[\%O]_p^C = \frac{1}{K_C [\%C]}, \quad (4)$$

где  $K_C$  — константа равновесия реакции окисления углерода, определяемая по формуле  $\lg K_C = (1160/T) + 2,01$ .

Подставив уравнения (3) и (4) в (1), получим

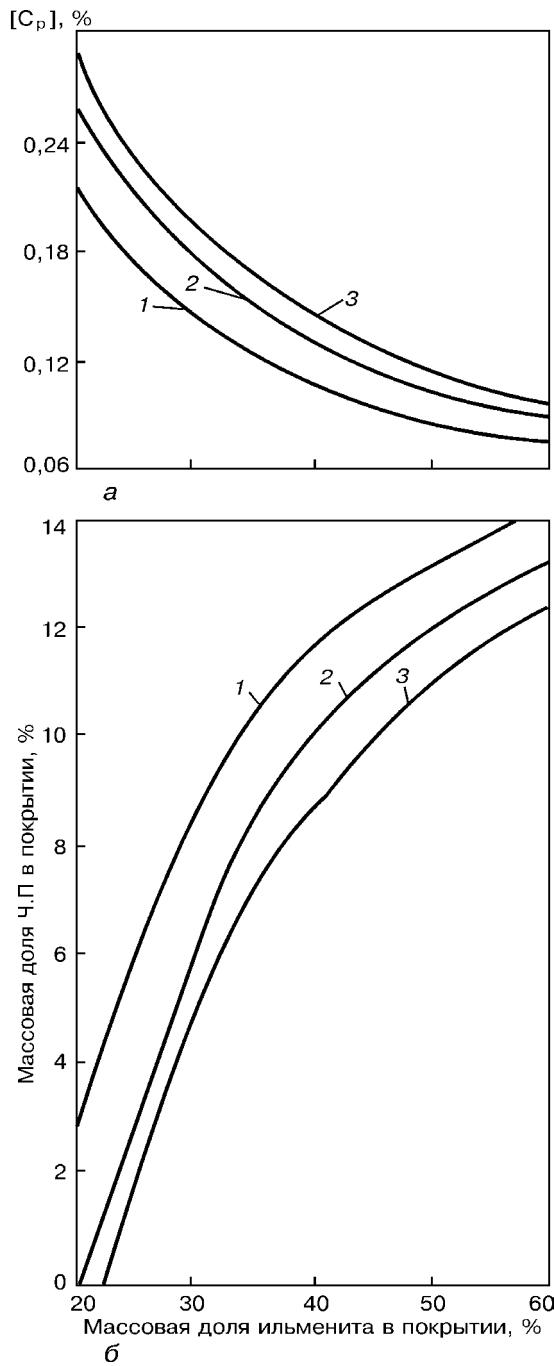


Рис. 1. Зависимость равновесного содержания углерода в наплавленном металле (*а*) и максимального содержания Ч.П в покрытии (*б*) от массовой доли ильменита в покрытии при различном количестве FeMn: 1 – 15; 2 – 18; 3 – 20 %

$$\frac{1}{K_C [\%C]} = \frac{K'_Mn}{[\%Mn] f_O^{Mn}}, \quad (5)$$

откуда равновесное содержание углерода составляет

$$[\%C]_p = \frac{[\%Mn] f_O^{Mn}}{K_C K'_Mn}. \quad (6)$$

Заменив  $[\%Mn]$  в уравнении (6) выражением (2), получим

$$[\%C]_p = \frac{([\%MnO] f_O^{Mn})}{([\%FeO] K_{Mn} K'_C K_{Mn})}. \quad (7)$$

Расчет параметров  $f_O^{Mn}$ ,  $K_{Mn}$ ,  $K'_Mn$ ,  $K_C$  в момент кристаллизации при температуре 1810 К дает  $f_O^{Mn} = 0,97$ ;  $K_{Mn} = 4,055$ ;  $K'_Mn = 0,00845$ ;  $K_C = 519$ .

Подставив значения указанных параметров в формулу (7), уравнение для расчета зависимости равновесного содержания углерода в наплавленном металле от отношения оксидов марганца и железа в шлаке примет вид

$$[\%C]_p = 0,0545 \frac{[\%MnO]}{[\%FeO]}. \quad (8)$$

В практических расчетах составов электродных покрытий удобнее использовать компоненты, применяемые в электродном производстве. В результате пересчета оксидов марганца и железа в FeMn (80 % Mn) и ильменита (40 % FeO) получим формулу для расчета  $[\%C]_p$  в зависимости от содержания FeMn и ильменита в покрытии электродов с учетом коэффициента массы покрытия  $K_{m.p}$

$$[\%C]_p = 0,137 \frac{[\%FeMn]}{K_{m.p} [\%ильм]}. \quad (9)$$

Расчет  $[\%C]_p$  по формуле (9) для принятых в эксперименте вариантах опытных электродов представлен на рис. 1, *a*. Здесь FeMn взят в массовых долях 15, 18 и 20 %, наиболее часто применяемых в электродах ильменитового вида.

Учитывая, что содержание углерода в наплавленном металле ильменитовых электродов не должно превышать 0,12 % [7], для расчета максимального количества чугунного порошка в составе покрытия в соответствии с работой [8] получим

$$[\%Ч.П]_{max} = \frac{0,12 - 0,137 \frac{[\%ильм]}{[\%FeMn]}}{K_{per}^C K_{m.p} \frac{[C]_{Ч.П}}{100}}, \quad (10)$$

где  $K_{per}^C$  – коэффициент перехода углерода, принимаемый для ильменитовых электродов равным 0,37 [9];  $[C]_{Ч.П}$  – содержание углерода в чугунном порошке, %.

Подставив в формулу (10) конкретные значения  $K_{per}^C$ ,  $K_{m.p}$  и  $[C]_{Ч.П}$  для исследуемых вариантов электродов, находим расчетную зависимость

$$[\%Ч.П]_{max} = \frac{0,12 - 0,137 \frac{[\%ильм]}{[\%FeMn]}}{0,006}. \quad (11)$$

Результаты расчета по формуле (11) приведены на рис. 1, *б*.

Практический интерес представляют аналогичные расчеты в зависимости от содержания марганца в наплавленном металле при заданной его концентрации.

Содержание FeMn в покрытии электродов следующее:

$$[\%FeMn] = \frac{[\Mn]}{K_{per}^Mn K_{m.p} [\Mn]_{FeMn}} \cdot 100, \quad (12)$$

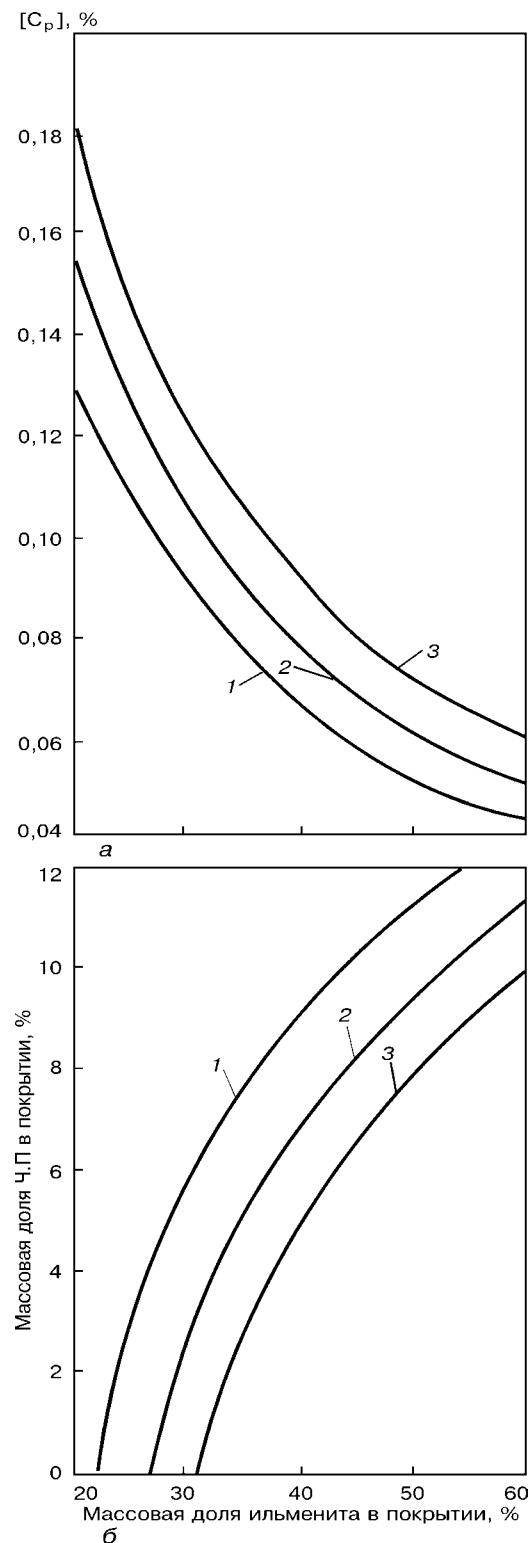


Рис. 2. Зависимость равновесного содержания углерода в наплавленном металле (а) и максимального содержания Ч.П в покрытии (б) от массовой доли ильменита в покрытии при различных концентрациях марганца в наплавленном металле: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7 %

где  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$  – коэффициент перехода марганца;  $[\text{Mn}]_{\text{FeMn}}$  – массовая доля марганца в FeMn.

Содержание  $[\% \text{C}]_p$  рассчитываем с помощью выражений (9), (10)

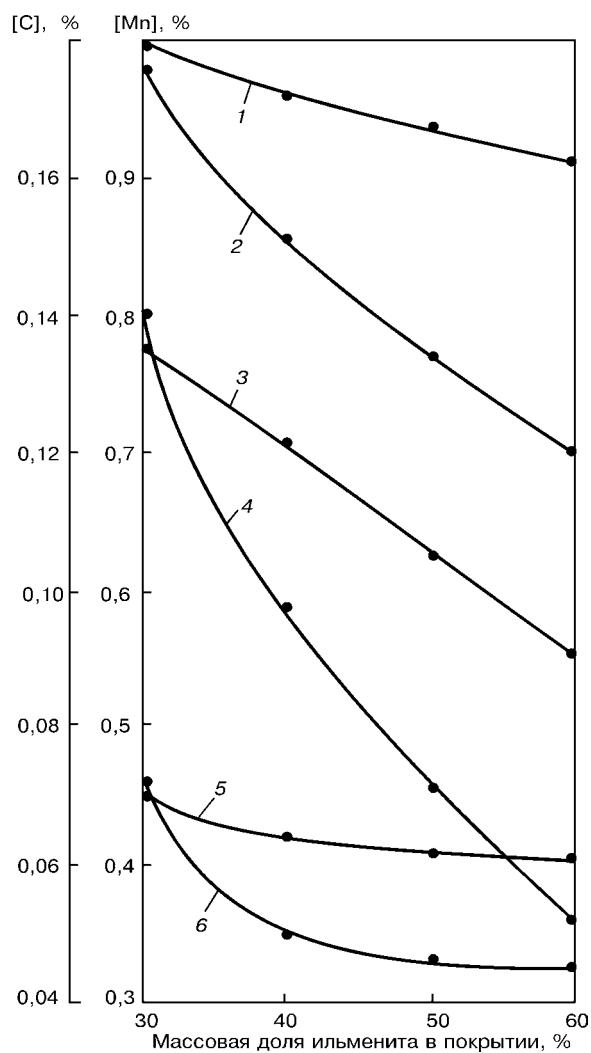


Рис. 3. Зависимость содержания углерода и марганца в наплавленном металле от количества ильменита в покрытии при различных массовых долях Ч.П и 15 % FeMn: 1, 3, 5 –  $[\text{Mn}]$  и 2, 4, 6 –  $[\text{C}]$  соответственно при 15, 10 и 5 % Ч.П

$$[\% \text{C}] = \frac{13,7 [\text{Mn}]}{K_{\text{пер}}^{\text{Mn}} K_{\text{м.п.}} [\text{Mn}]_{\text{FeMn}} [\% \text{ Ильм.}]} \quad (13)$$

На основании многочисленных экспериментов нами установлено, что  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$  в электродах ильменитового вида составляет в среднем 0,07. В соответствии с уравнением (13), используя конкретные значения  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$ ,  $K_{\text{м.п.}}$ ,  $[\text{Mn}]_{\text{FeMn}}$ , получаем расчетную формулу для определения  $[\% \text{C}]_p$  электродов опытной партии

$$[\% \text{C}]_p = \frac{5,2 [\text{Mn}]}{[\% \text{ Ильм.}]} \quad (14)$$

Результаты расчета по формуле (14) представлены на рис. 2, а. Содержание  $[\text{Mn}]$  принято в пределах 0,5...0,7 %, характерных для электродов ильменитового вида.

Расчет ввода максимально возможных долей чугунного порошка в состав электродного покрытия при заданном содержании  $[\text{Mn}]$  и соблюдении условия  $[\% \text{C}] \leq 0,12 \%$  производится по выражению (10) с использованием формулы (13)



$$[\% \text{Ч.П}]_{\max} = \frac{0,12 - \frac{13,7[\text{Mn}]}{K_{\text{неп}}^{\text{Mn}} K_{\text{м.п}} [\text{Mn}]_{\text{FeMn}} (\% \text{Ильм})}}{K_{\text{неп}}^{\text{C}} K_{\text{м.п}} \frac{[\text{C}]_{\text{Ч.П}}}{100}}. \quad (15)$$

С учетом всех параметров для опытных электродов

$$[\% \text{Ч.П}]_{\max} = \frac{0,12 - \frac{5,2[\text{Mn}]}{[\% \text{Ильм}]}}{0,006}. \quad (16)$$

Результаты расчета  $(\% \text{Ч.П})_{\max}$  по формуле (16) приведены на рис. 2, 6.

Для проверки расчетного метода определения равновесного содержания [C] и [Mn] и максимально возможного ввода чугунного порошка (при различных массовых долях ильменита в покрытии) установлено фактическое содержание углерода и марганца в наплавленном металле опытных электродов, содержащих 5, 10 и 15 % чугунного порошка, 30...60 % ильменита и 15 % FeMn в покрытии. Результаты химического анализа опытных наплавок представлены на рис. 3.

Полученные данные показывают, что при одинаковых массовых долях FeMn и чугунного порошка в покрытии содержание [C] и [Mn] изменяется в зависимости от окислительной способности покрытия, определяемой количеством ильменита, что подтверждает правильность данного расчетного метода.

Таким образом, благодаря расчетному методу можно установить оптимальное содержание чугунного порошка в покрытии в зависимости от его окислительной способности, определяемой содержанием ильменита при различном вводе FeMn или заданном содержании [Mn]. Получена также возможность вычисления равновесного содержания

[C] в зависимости от содержания ильменита и FeMn в покрытии, а также [Mn] в наплавленном металле.

## Выводы

1. Установлена возможность использования углерода в связанном состоянии (в виде железоуглеродистого сплава) как раскислителя и экспериментально подтверждена правильность расчетного метода определения его максимального содержания в покрытии электродов ильменитового вида.

2. Разработана методика расчета равновесного содержания [C] и [Mn], позволяющая определить максимально допустимое количество углерода в виде чугунного порошка в электродных покрытиях при различных массовых долях ильменита, FeMn и [Mn].

1. Ефименко Н. Г., Калин Н. А. Раскисляющая способность редкоземельных металлов в сравнении с известными раскислителями // Свароч. пр-во. — 1978. — № 10. — С. 3—4.
2. Ал'ов А. А. Электроды для дуговой сварки и наплавки. — М.: Машгиз, 1947. — 87 с.
3. Пельков В. Б., Потапов Н. Н., Каковкин О. С. Оценка металлургической роли FeO при разработке электродов для ручной дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 1990. — № 10. — С. 38—39.
4. Любавский К. В. Металлургия сварки плавлением. — М.: Знание, 1961. — 150 с.
5. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1978. — 288 с.
6. Меджидовский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. — Киев; Донецк: Виц. шк., 1986. — 280 с.
7. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
8. Петров Г. Л. Сварочные материалы. — Л.: Машиностроение, 1972. — 280 с.
9. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.

Use of carbon, contained in an iron-carbon alloy, in particular, cast iron, as a deoxidizer in ilmenite-type welding electrodes is proposed. A procedure for calculation of an equilibrium content of carbon and manganese in the deposited metal is developed, that allows determination of the maximal admissible amount of carbon, added through the cast iron powder in electrode coatings at different proportions of ilmenite, FeMn and [Mn].

Поступила в редакцию 30.11.2000

# РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА И МАРГАНЦА В ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ ИЛЬМЕНИТОВОГО ВИДА

Н. Г. ЕФИМЕНКО, канд. техн. наук, Н. А. КАЛИН, инж. (Укр. инж.-пед. акад., г. Харьков)

Предложено использование углерода в составе железоуглеродистого сплава, в частности чугуна, в качестве раскислителя в сварочных электродах ильменитового вида. Разработана методика расчета равновесного содержания углерода и марганца в наплавленном металле, позволяющая определить максимально допустимое количество углерода, вводимого через чугунный порошок в электродных покрытиях при различных долях ильменита, FeMn и [Mn].

**Ключевые слова:** электродное покрытие, шлак, углерод, чугунный порошок, раскисляющая способность, равновесное содержание, марганец, кислород

Использование углерода в качестве раскислителя в сварочных электродах представляет практический интерес в связи с его недефицитностью. При температуре сварочной дуги более 2800 К углерод является наиболее активным раскислителем, способным восстанавливать оксиды всех известных элементов [1].

Однако использование углерода в свободном состоянии [2, 3] требует повышения окислительного потенциала покрытия для полного его окисления, что ухудшает сварочно-технологические свойства электродов.

Цель данной работы заключается в изучении возможности использования связанного углерода (в виде железоуглеродистого сплава) как раскислителя для электродных покрытий ильменитового вида.

Для исследований способом опрессовки изготавляли электроды диаметром 4 мм на проволоке Св-08А. В качестве железоуглеродистого сплава применяли чугунный порошок, содержащий 3,5 % С. Коэффициент массы покрытия  $K_{\text{м.п}}$  электродов составлял 0,47. Содержание FeMn изменялось в пределах 15...20 %, а ильменитового концентрата — 30...60 % при массовой доле чугунного порошка 5, 10 и 15 %. Для определения количества углерода и марганца в наплавленном металле производили наплавку на постоянном токе (160...180 А) при обратной полярности в соответствии с ГОСТ 9466-60.

Для сравнения раскисляющей способности углерода и марганца в каждом конкретном случае необходимо рассчитывать их равновесное содержание в наплавленном металле, которое определяется одинаковой остаточной массовой долей кислорода в жидким железе, раскисленном этими элементами в момент кристаллизации:

$$[\%O]_p^C = [\%O]_p^{Mn}. \quad (1)$$

Остаточное содержание марганца в металле рассчитывают по уравнению, приведенному в работе [4]:

$$[\%Mn] = \frac{[\%MnO]}{K_{Mn} [\%FeO]}, \quad (2)$$

где [%MnO], [%FeO] — массовые доли оксидов марганца и железа в шлаке, %;  $K_{Mn}$  — константа равновесия реакции, рассчитываемая по уравнению  $\lg K_{Mn} = (6440/T) - 2,95$ .

Равновесная концентрация кислорода в металле, раскисленном марганцем, определяется по формуле, приведенной в работе [5]:

$$[\%O]_p^{Mn} = \frac{K'_{Mn}}{[\%Mn]_O^{Mn}}, \quad (3)$$

где  $K'_{Mn}$  — константа равновесия реакции раскисления, вычисляемая по формуле  $\lg K'_{Mn} = (-15065/T) + 6,25$ ;  $f_O^{Mn}$  — коэффициент активности кислорода, определяемый по формуле  $\lg f_O^{Mn} = e^{Mn} [\% Mn]$ .

Углерод, содержащийся в каплях электродного металла и переходящий в них из чугунного порошка, окисляется кислородом, растворенным в жидким железе или находящимся в нем в виде оксидов, а также при взаимодействии металла со шлаком и кислородсодержащими газами атмосферы дуги на границе раздела металл–шлак и металл–газ.

Для расчетов равновесного содержания кислорода в металле, раскисленном углеродом ( $C = 0,02...2,00 \%$ ), и парциальном давлении CO в газовой фазе, равном атмосферному, используют выражение, приведенное в работе [6]:

$$[\%O]_p^C = \frac{1}{K_C [\%C]}, \quad (4)$$

где  $K_C$  — константа равновесия реакции окисления углерода, определяемая по формуле  $\lg K_C = (1160/T) + 2,01$ .

Подставив уравнения (3) и (4) в (1), получим

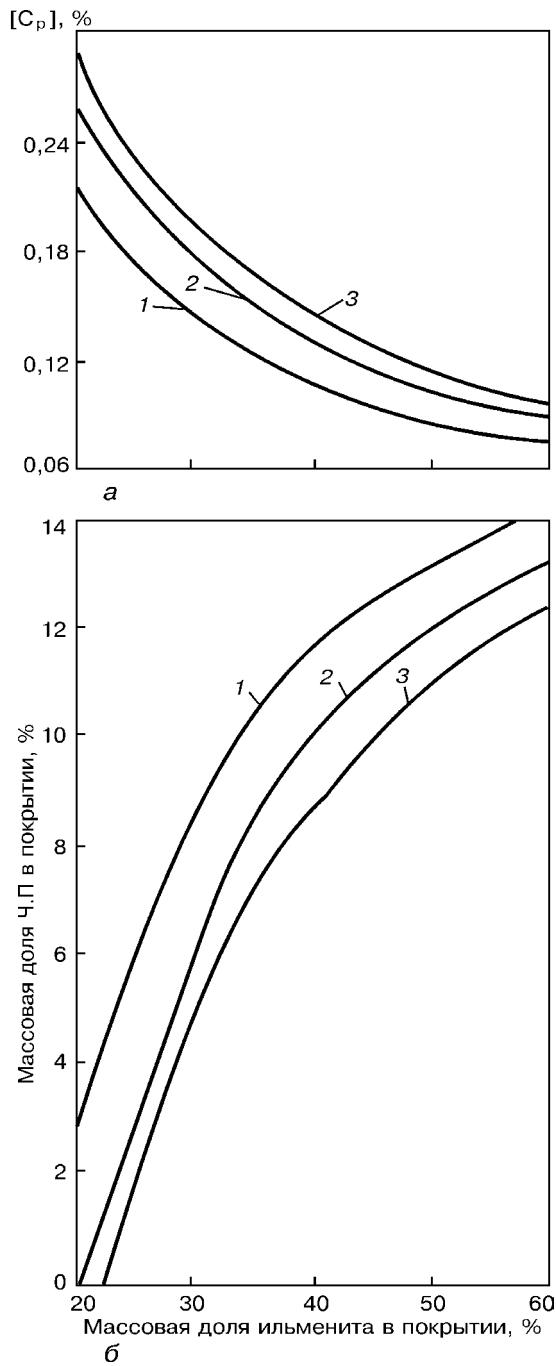


Рис. 1. Зависимость равновесного содержания углерода в наплавленном металле (*a*) и максимального содержания Ч.П в покрытии (*b*) от массовой доли ильменита в покрытии при различном количестве FeMn: 1 – 15; 2 – 18; 3 – 20 %

$$\frac{1}{K_C [\%C]} = \frac{K'_Mn}{[\%Mn] f_O^{Mn}}, \quad (5)$$

откуда равновесное содержание углерода составляет

$$[\%C]_p = \frac{[\%Mn] f_O^{Mn}}{K_C K'_Mn}. \quad (6)$$

Заменив  $[\%Mn]$  в уравнении (6) выражением (2), получим

$$[\%C]_p = \frac{([\%MnO] f_O^{Mn})}{([\%FeO] K_{Mn} K'_C K_{Mn})}. \quad (7)$$

Расчет параметров  $f_O^{Mn}$ ,  $K_{Mn}$ ,  $K'_Mn$ ,  $K_C$  в момент кристаллизации при температуре 1810 К дает  $f_O^{Mn} = 0,97$ ;  $K_{Mn} = 4,055$ ;  $K'_Mn = 0,00845$ ;  $K_C = 519$ .

Подставив значения указанных параметров в формулу (7), уравнение для расчета зависимости равновесного содержания углерода в наплавленном металле от отношения оксидов марганца и железа в шлаке примет вид

$$[\%C]_p = 0,0545 \frac{[\%MnO]}{[\%FeO]}. \quad (8)$$

В практических расчетах составов электродных покрытий удобнее использовать компоненты, применяемые в электродном производстве. В результате пересчета оксидов марганца и железа в FeMn (80 % Mn) и ильменита (40 % FeO) получим формулу для расчета  $[\%C]_p$  в зависимости от содержания FeMn и ильменита в покрытии электродов с учетом коэффициента массы покрытия  $K_{m.p}$

$$[\%C]_p = 0,137 \frac{[\%FeMn]}{K_{m.p} [\%ильм]}. \quad (9)$$

Расчет  $[\%C]_p$  по формуле (9) для принятых в эксперименте вариантах опытных электродов представлен на рис. 1, *a*. Здесь FeMn взят в массовых долях 15, 18 и 20 %, наиболее часто применяемых в электродах ильменитового вида.

Учитывая, что содержание углерода в наплавленном металле ильменитовых электродов не должно превышать 0,12 % [7], для расчета максимального количества чугунного порошка в составе покрытия в соответствии с работой [8] получим

$$[\%Ч.П]_{max} = \frac{0,12 - 0,137 \frac{[\%ильм]}{[\%FeMn]}}{K_{per}^C K_{m.p} \frac{[C]_{Ч.П}}{100}}, \quad (10)$$

где  $K_{per}^C$  – коэффициент перехода углерода, принимаемый для ильменитовых электродов равным 0,37 [9];  $[C]_{Ч.П}$  – содержание углерода в чугунном порошке, %.

Подставив в формулу (10) конкретные значения  $K_{per}^C$ ,  $K_{m.p}$  и  $[C]_{Ч.П}$  для исследуемых вариантов электродов, находим расчетную зависимость

$$[\%Ч.П]_{max} = \frac{0,12 - 0,137 \frac{[\%ильм]}{[\%FeMn]}}{0,006}. \quad (11)$$

Результаты расчета по формуле (11) приведены на рис. 1, *b*.

Практический интерес представляют аналогичные расчеты в зависимости от содержания марганца в наплавленном металле при заданной его концентрации.

Содержание FeMn в покрытии электродов следующее:

$$[\%FeMn] = \frac{[\Mn]}{K_{per}^Mn K_{m.p} [\Mn]_{FeMn}} \cdot 100, \quad (12)$$

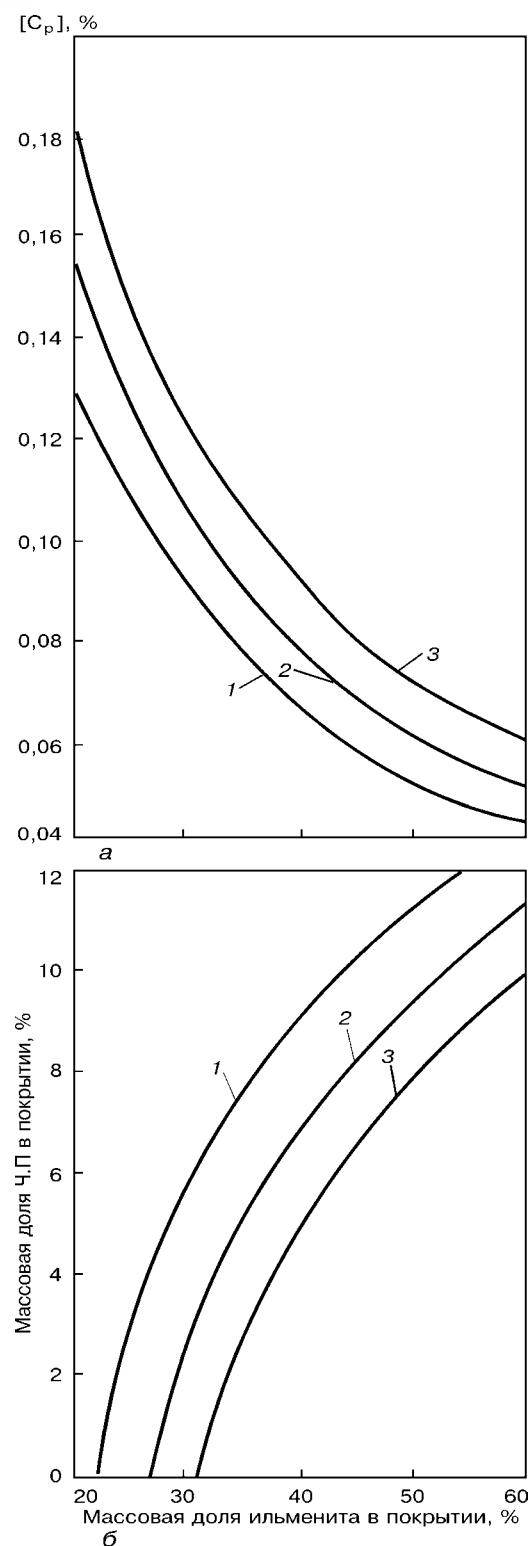


Рис. 2. Зависимость равновесного содержания углерода в наплавленном металле (а) и максимального содержания Ч.П в покрытии (б) от массовой доли ильменита в покрытии при различных концентрациях марганца в наплавленном металле: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7 %

где  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$  – коэффициент перехода марганца;  $[\text{Mn}]_{\text{FeMn}}$  – массовая доля марганца в FeMn.

Содержание  $[\% \text{C}]_p$  рассчитываем с помощью выражений (9), (10)

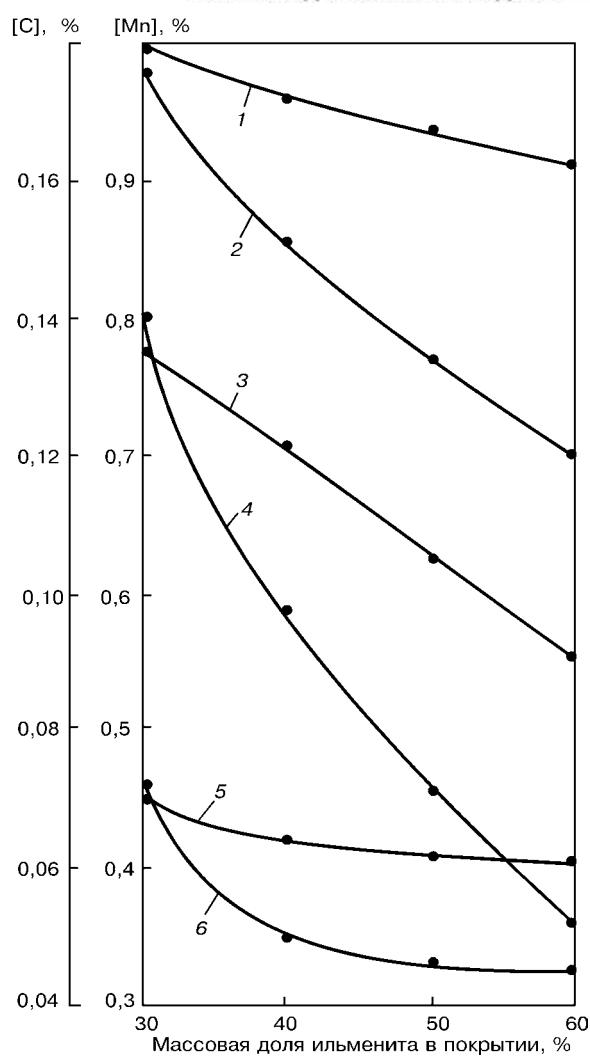


Рис. 3. Зависимость содержания углерода и марганца в наплавленном металле от количества ильменита в покрытии при различных массовых долях Ч.П и 15 % FeMn: 1, 3, 5 –  $[\text{Mn}]$  и 2, 4, 6 –  $[\text{C}]$  соответственно при 15, 10 и 5 % Ч.П

$$[\% \text{C}] = \frac{13,7 [\text{Mn}]}{K_{\text{пер}}^{\text{Mn}} K_{\text{м.п.}} [\text{Mn}]_{\text{FeMn}} [\% \text{ Ильм.}]} \quad (13)$$

На основании многочисленных экспериментов нами установлено, что  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$  в электродах ильменитового вида составляет в среднем 0,07. В соответствии с уравнением (13), используя конкретные значения  $K_{\text{пер}}^{\text{Mn}}$ ,  $K_{\text{м.п.}}$ ,  $[\text{Mn}]_{\text{FeMn}}$ , получаем расчетную формулу для определения  $[\% \text{C}]_p$  электродов опытной партии

$$[\% \text{C}]_p = \frac{5,2 [\text{Mn}]}{[\% \text{ Ильм.}]} \quad (14)$$

Результаты расчета по формуле (14) представлены на рис. 2, а. Содержание  $[\text{Mn}]$  принято в пределах 0,5...0,7 %, характерных для электродов ильменитового вида.

Расчет ввода максимально возможных долей чугунного порошка в состав электродного покрытия при заданном содержании  $[\text{Mn}]$  и соблюдении условия  $[\% \text{C}] \leq 0,12 \%$  производится по выражению (10) с использованием формулы (13)



$$[\% \text{Ч.П}]_{\max} = \frac{0,12 - \frac{13,7[\text{Mn}]}{K_{\text{неп}}^{\text{Mn}} K_{\text{м.п}} [\text{Mn}]_{\text{FeMn}} (\% \text{Ильм})}}{K_{\text{неп}}^{\text{C}} K_{\text{м.п}} \frac{[\text{C}]_{\text{Ч.П}}}{100}}. \quad (15)$$

С учетом всех параметров для опытных электродов

$$[\% \text{Ч.П}]_{\max} = \frac{0,12 - \frac{5,2[\text{Mn}]}{[\% \text{Ильм}]}}{0,006}. \quad (16)$$

Результаты расчета  $(\% \text{Ч.П})_{\max}$  по формуле (16) приведены на рис. 2, 6.

Для проверки расчетного метода определения равновесного содержания [C] и [Mn] и максимально возможного ввода чугунного порошка (при различных массовых долях ильменита в покрытии) установлено фактическое содержание углерода и марганца в наплавленном металле опытных электродов, содержащих 5, 10 и 15 % чугунного порошка, 30...60 % ильменита и 15 % FeMn в покрытии. Результаты химического анализа опытных наплавок представлены на рис. 3.

Полученные данные показывают, что при одинаковых массовых долях FeMn и чугунного порошка в покрытии содержание [C] и [Mn] изменяется в зависимости от окислительной способности покрытия, определяемой количеством ильменита, что подтверждает правильность данного расчетного метода.

Таким образом, благодаря расчетному методу можно установить оптимальное содержание чугунного порошка в покрытии в зависимости от его окислительной способности, определяемой содержанием ильменита при различном вводе FeMn или заданном содержании [Mn]. Получена также возможность вычисления равновесного содержания

[C] в зависимости от содержания ильменита и FeMn в покрытии, а также [Mn] в наплавленном металле.

## Выводы

1. Установлена возможность использования углерода в связанном состоянии (в виде железоуглеродистого сплава) как раскислителя и экспериментально подтверждена правильность расчетного метода определения его максимального содержания в покрытии электродов ильменитового вида.

2. Разработана методика расчета равновесного содержания [C] и [Mn], позволяющая определить максимально допустимое количество углерода в виде чугунного порошка в электродных покрытиях при различных массовых долях ильменита, FeMn и [Mn].

1. Ефименко Н. Г., Калин Н. А. Раскисляющая способность редкоземельных металлов в сравнении с известными раскислителями // Свароч. пр-во. — 1978. — № 10. — С. 3—4.
2. Ал'ов А. А. Электроды для дуговой сварки и наплавки. — М.: Машгиз, 1947. — 87 с.
3. Пельков В. Б., Потапов Н. Н., Каковкин О. С. Оценка металлургической роли FeO при разработке электродов для ручной дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 1990. — № 10. — С. 38—39.
4. Любавский К. В. Металлургия сварки плавлением. — М.: Знание, 1961. — 150 с.
5. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1978. — 288 с.
6. Меджидовский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. — Киев; Донецк: Виц. шк., 1986. — 280 с.
7. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
8. Петров Г. Л. Сварочные материалы. — Л.: Машиностроение, 1972. — 280 с.
9. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.

Use of carbon, contained in an iron-carbon alloy, in particular, cast iron, as a deoxidizer in ilmenite-type welding electrodes is proposed. A procedure for calculation of an equilibrium content of carbon and manganese in the deposited metal is developed, that allows determination of the maximal admissible amount of carbon, added through the cast iron powder in electrode coatings at different proportions of ilmenite, FeMn and [Mn].

Поступила в редакцию 30.11.2000



УДК 621.791.927

# ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОКАТАНОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ НАПЛАВОЧНОЙ ЛЕНТЫ В ОАО «ММК им. ИЛЬИЧА»

**В. Н. МАТВИЕНКО, К. К. СТЕПНОВ, В. П. ИВАНОВ, Н. Г. ЗАВАРИКА, А. И. ОЛДАКОВСКИЙ, В. П. ЕРМОЛОВ,**  
кандидаты техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрены особенности разработки состава и изготовления холоднокатаной легированной ленты в условиях ОАО «ММК им. Ильича», предназначеннной для электродуговой наплавки износостойкого слоя металла при восстановлении и упрочнении деталей прокатного и металлургического оборудования.

*Ключевые слова:* электродуговая наплавка под флюсом, холоднокатаная легированная лента, наплавленный металл, детали прокатного и металлургического оборудования

Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича — предприятие с полным металлургическим циклом, которое изготавливает продукцию широкого сортамента. Одним из основных направлений его деятельности является производство стального высококачественного листа различной толщины. На предприятии широко используется электродуговая наплавка деталей металлургического и прокатного оборудования. Потребность в наплавочных материалах велика, в настоящее время существует дефицит электродных материалов для механизированной износостойкой наплавки. Для решения проблемы обеспечения ремонтных участков электродным материалом на комбинате было решено разработать и освоить технологию производства холоднокатаной легированной ленты. Использование в качестве наплавочного материала электродной ленты обеспечивает высокую производительность процесса, малую глубину проплавления основного металла, надежность провара наплавляемого валика, устойчивость процесса при меньшей, чем при наплавке проволоками, плотности тока. Наряду с высокой производительностью формируется однородный по составу и свойствам наплавленный металл, что определяется саморегулированием производительности расплавления флюса и ленты, а также интенсивным перемешиванием металла ванны под воздействием перемещающейся по торцу дуги.

На основании результатов исследований свойств наплавочных среднехромистых сталей, проведенных в отраслевой научно-исследовательской лаборатории (ОНИЛ) наплавки Приазовского государственного технического университета с целью определения оптимального состава, а также обеспечения наилучшего сочетания прочностных и пластических свойств материала для использования в виде наплавочной ленты, рекомендованы экономнолегированные составы стали. Они позволяют удовлетворить жесткие требования по производству тонкой холоднокатаной ленты и обеспечить получение наплавленного металла с высокими тех-

нологическими и эксплуатационными характеристиками.

При разработке технологии изготовления и использования наплавочной легированной ленты приходится сталкиваться со взаимоисключающими требованиями. Для обеспечения необходимых свойств (высокой прочности и твердости) используемая для производства ленты сталь должна быть технологичной (пластичной и низкой твердости) на всех переделах металлургического и прокатного циклов. Вместе с этим разработанные составы наплавочной ленты не соответствовали маркам сталей, освоенным комбинатом при производстве тонкого листа.

После детального анализа технических возможностей цехов комбината по производству проката требуемого химического состава и свойств совместно с сотрудниками комбината разработана технология изготовления холоднокатаной ленты, предусматривающая выплавку стали заданного химического состава в фасонно-сталелитейном цехе; прокатку слитков в слябы — в обжимном цехе слябинг-1150; прокатку слябов на полосу толщиной 3 мм — на НШС-1700 горячей прокатки. Холодную прокатку полос проводили до конечной толщины 1<sup>-0,2</sup> мм, а затем осуществляли порезку на ленты шириной 30 мм. В результате выполненных работ освоена технология производства холоднокатаной легированной наплавочной ленты марок 18Х3ГМФА, 20Х4ГМФБ и 25Х3ВМБ.

С целью выяснения возможностей применения легированной ленты для износостойкой наплавки прокатных валков и роликов рольганга провели испытания металла, наплавленного лентой из стали марки 18Х3ГМФА под флюсом АН-60. Образцы металла подвергли испытаниям на термостойкость, износостойкость при повышенных температурах, сопротивляемость образованию кристаллических трещин при наплавке. Определили также его твердость при нормальных и повышенных температурах, механические свойства, в том числе после отпуска, выполнили металлографические исследования. Для изготовления образцов производили пятислойные наплавки на пластины толщиной 40 мм из стали 50, которые перед наплавкой по-



**Результаты испытаний металла, наплавленного проволоками Св-08А и Св-10ГН под флюсом ЖСН-5 и лентой 18Х3ГМФА под флюсом АН-60**

Свойство наплавленного металла	Тип наплавленного металла (наплавочный материал)		
	18ХМФС (Св-08А, флюс ЖСН-5)	22Х6МФН (Св-10ГН, флюс ЖСН-5)	18Х3ГМФ (18Х3ГМФА, флюс АН-60)
Износ, мг	26,5...30,1	22,3...26,0	36,7...40,3
Термостойкость (количество циклов теплосмен «нагрев – охлаждение» до появления видимой трещины)	1230...1320	890...1020	1510...1590
Твердость при температуре 20 °С, HRC	38...39	41...42	32...36
Твердость при температуре 500...550 °С, HRC	27...30	26...29	26...30
Показатель технологической прочности, мм/мин	11,9...12,3	9,5...10,1	13,2...13,8

догревали до температуры 300...350 °С. Для сравнения проведены исследования металла, полученного наплавкой проволоками Св-08А и Св-10ГН под флюсом ЖСН-5. Результаты этих сравнительных испытаний представлены в таблице.

Лабораторные исследования показали, что процесс наплавки лентой из стали 18Х3ГМФА под плавленым флюсом АН-60 характеризуется высокими сварочно-технологическими свойствами: стабильным горением сварочной дуги, хорошим формированием наплавленного металла, отсутствием пор и подрезов, хорошей отделимостью шлаковой корки. Как видно из приведенных в таблице данных, металл, наплавленный лентой 18Х3ГМФА под флюсом АН-60, обладает достаточно высокими показателями служебных характеристик (прежде всего повышенной пластичностью и трещиностойкостью), что достаточно важно для металла, эксплуатирующегося в условиях циклических изменений нагрузок и температур.

Результаты выполненных исследований показали техническую возможность и перспективность использования холоднокатанных легированных лент, изготовленных в условиях комбината, для упрочняющей наплавки прокатных валков и роликов рольганга. Наплавлена опытно-промышленная партия прокатных валков стана слябинг-1150 (горизонтальные и вертикальные валки), НШС-1700 горячей прокатки (опорные и рабочие валки черновой клети) и роликов рольганга ТЛС-3000. Процесс наплавки легированной лентой характеризуется высокой устойчивостью и стабильностью. При этом наблюдаются хорошие отделимость шлаковой корки и качество формирования наплавленной поверхности.

Эксплуатация наплавленных валков стана слябинг-1150 показала, что рабочий слой отвечает

Considered are the features of developing the composition and manufacturing a cold-rolled alloyed strip in OJSC "Illyich MMW", designed for electric arc hardfacing of a wear-resistant metal layer in reconditioning and strengthening of rolling and metallurgical equipment parts.

всем требованиям технологии прокатки слябов: отсутствуют пробуксовки и проскальзывания металла, улучшился захват слябов. Скорость изнашивания рабочей поверхности не превышает нормы и составляет 1 мм на 150...170 тыс. т проката (при минимальной сетке разгара трещин). Эксплуатация наплавленных валков НШС-1700, а также роликов рольганга ТЛС-3000 подтвердила высокие свойства рабочего слоя, полученного наплавкой легированной лентой. Анализ стойкости прокатных валков, наплавленных легированной лентой, показал, что их эксплуатационная надежность выше, чем у используемых штатных из сталей 50ХН и 9ХФ. При этом износостойкость рабочего слоя, наплавляемого лентой под флюсом АН-60, не превышает таковую при наплавке под флюсом ЖСН-5 из-за более низкой степени легирования ленты. Однако экономическая целесообразность использования легированной ленты, изготовленной в условиях комбината, наряду с повышением производительности процесса наплавки позволяет рекомендовать ее широкое использование для восстановления и упрочнения прокатных валков и роликов рольгангов.

В настоящее время на комбинате ведутся дальнейшие совместные разработки, направленные на получение наплавочных лент различной степени легирования. Это позволит решить в условиях отечественного производства задачу обеспечения необходимым и относительно дешевым наплавочным материалом для высокопроизводительных процессов восстановления и упрочнения изнашивавшихся деталей оборудования путем электродуговой наплавки электродной лентой под плавленым и керамическим флюсами.

Поступила в редакцию 24.05.2001



УДК 621.721.052:539.4.014.001

# РОЛЬ УМЕНЬШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКЕ В ПОВЫШЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**П. П. МИХЕЕВ, д-р техн. наук, О. В. ВОЙТЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)**

Сопоставлены экспериментальные значения коэффициентов концентрации напряжений (ККН), определенные поляризационно-оптическим методом, с расчетными, полученные на основе замеров параметров угловых швов тавровых сварных соединений, в исходном состоянии и после высокочастотной проковки. Показана взаимосвязь между снижением ККН под воздействием высокочастотной проковки и повышением сопротивления усталости сварных соединений.

**Ключевые слова:** сварное соединение, угловой шов, геометрические параметры шва, коэффициент концентрации напряжений, расчетные методы, поляризационно-оптический метод, высокочастотная проковка, повышение сопротивления усталости

Среди известных способов повышения сопротивления усталости сварных соединений с помощью поверхностно-пластического деформирования металла околошовной зоны наиболее эффективным является способ высокочастотной проковки [1, 2]. Он разработан сотрудниками ГНПП «Квант» (г. Северодвинск, Россия) и ИЭС им. Е. О. Патона [3]. В случае сварных соединений с не снятой выпуклостью швов и узлов сложной формы для высокочастотной проковки используется компактный ручной ультразвуковой инструмент с многоэлементным рабочим органом [4]. В качестве источника питания инструмента с магнитострикционным преобразователем применяют ультразвуковое тиристорное генераторное устройство с выходной мощностью до 1,2 кВт [4].

Положительное воздействие высокочастотной проковки на сопротивление усталости сварных соединений достигается за счет уменьшения концентрации напряжений, наведения сжимающих остаточных напряжений в зоне концентратора и деформационного упрочнения металла околошовной зоны [5, 6].

Целью настоящей работы является исследование изменения концентрации напряжений в сварном соединении под воздействием высокочастотной проковки и оценка роли этого фактора в повышении сопротивления усталости соединения.

Геометрические параметры соединения (рис. 1), необходимые для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН), устанавливали расчетным методом. При этом использовали образцы с поперечными угловыми швами, изготовленные из высокопрочной стали для усталостных испытаний

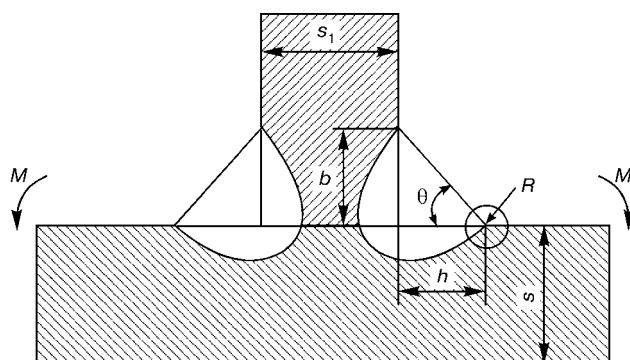


Рис. 1. Геометрические параметры углового шва сварного таврового соединения ( $M$  — момент приложенной нагрузки;  $s, s_1$  — толщина соответственно свариваемой и привариваемой пластин;  $b, h$  — катеты углового шва)

© П. П. Михеев, О. В. Войтенко, 2001

(рис. 2). Высокочастотную проковку переходной зоны от шва к основному металлу выполняли по одному из технологических вариантов, обеспечивающему значительное повышение сопротивления усталости сварного соединения. При определении радиуса  $R$  перехода металла шва к основному металлу и угла  $\theta$  использовали метод профилометрирования [7]. Для каждого образца строили по три профильные линии локальной геометрии углового шва.

Расчетное определение ККН в соединениях в исходном состоянии, прошедших высокочастотную проковку, проводили по соотношению (1) из [8]

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left(-0,90\sqrt{\frac{s}{2h} + 1}\right)}{1 - \exp\left(-0,45\pi\sqrt{\frac{s}{2h} + 1}\right)} \times \\ \times \left[ \operatorname{th} \left\{ \frac{\left(\frac{2h}{s}\right)^{1/4}}{1 - \frac{R}{s}} \right\} \right] \left[ \frac{0,13 + 0,65\left(1 - \frac{R}{s}\right)^4}{\left(\frac{R}{s}\right)^{1/3}} \right]. \quad (1)$$

Это обеспечивает получение наиболее достоверных значений ККН с учетом установленных относительных радиусов сопряжения  $R/s$ , углов перехода  $\theta$  и относительных катетов  $h/s$  углового шва (рис. 1).

С целью сопоставления ККН определяли также экспериментальный поляризационно-оптическим методом на моделях, которые воспроизводят форму сварного соединения. Модели сварного соединения изготавливали из эпоксидной смолы ЭДБ-М. Идентичность моделей и исследованных сварных соединений проверяли сопоставлением их конфигураций при двадцатикратном увеличении с помощью спектрального проектора ПС-18. При моделировании сварных соединений выполнялись условия геометрического подобия и работы материала соединения

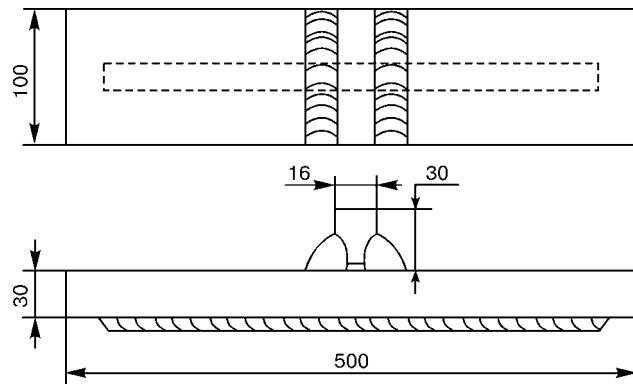


Рис. 2. Сварной образец из высокопрочной стали для усталостных испытаний

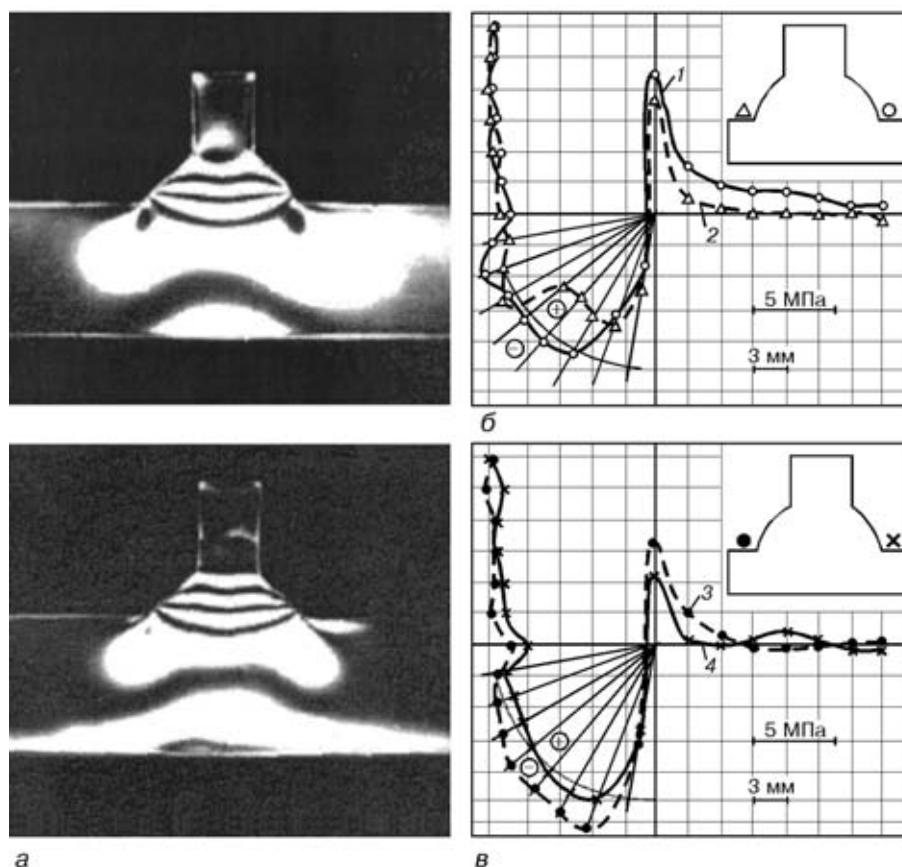


Рис. 3. Картинки изохромных линий (а) и схемы распределения напряжений в окколошовной зоне таврового соединения, полученных на моделях из оптически активного материала, в исходном состоянии (б) и после высокочастотной проковки (в): 1 —  $K_t = 2,0$ ; 2, 3 — 1,8; 4 — 1,6

Состояние образца	Коэффициент концентрации напряжений	
	расчетный	экспериментальный*
Исходное	2,3	$\frac{2,0 \dots 1,8}{1,9}$
После высокочастотной проковки	1,8	$\frac{1,8 \dots 1,6}{1,7}$

\* В числите приведен диапазон значений, в знаменателе — среднее значение.

нения под действием напряжений. Исследовали напряженное состояние моделей на поляризационных установках «Меорта» и КСП-5. Коэффициенты концентрации напряжений определяли в местах перехода швов к основному металлу, замеряя с помощью координатно-синхронного поляриметра КСП-5 оптическую разницу хода лучей. Полученные картины изохромных линий и распределение напряжений в окколошовной зоне сварного соединения моделей с угловыми швами показаны на рис. 3.

Усредненные значения ККН, определенные расчетным и экспериментальным методами для сварного соединения с попечными угловыми швами, приведены в таблице.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений ККН показало, что расхождение между ними незначительное. Под влиянием высокочастотной проковки ККН в сварном соединении с попечными угловыми швами уменьшился от 2,3...1,9 до 1,8...1,7.

Результаты исследований [9] свидетельствуют, что такое снижение значений ККН приводит при прочих равных условиях к повышению предела выносливости соединений в случае симметричного цикла нагружения на 12...25 %. В то же время установленное при испытании образцов повышение предела выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов испытаний под влиянием высокочастотной проковки достигает по данным [4] 200 % (рис. 4).

Следовательно, снижение концентрации действующих напряжений при высокочастотной проковке, скорее всего, не является превалирующим фактором в повышении сопротивления

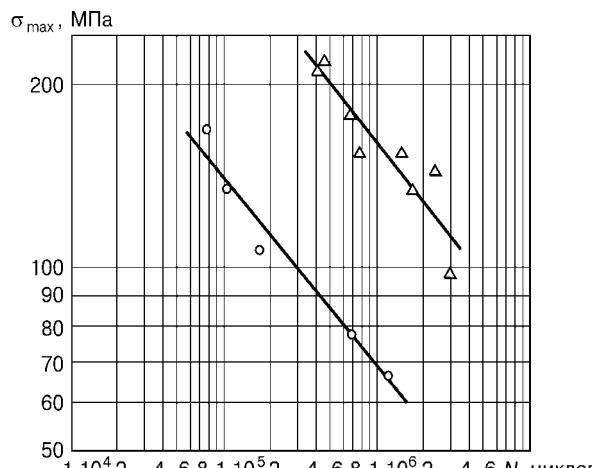


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний при трехточечном изгибе тавровых соединений высокопрочной стали (коэффициент асимметрии цикла нагружений  $R_\sigma = -1$ ): ○ — в исходном состоянии; Δ — после высокочастотной проковки

усталости соединений. Установленное повышение предела выносливости сварных соединений вследствие высокочастотной проковки, по всей вероятности, объясняется снижением растигающих и созданием в поверхностном слое металла окколошовной зоны благоприятных остаточных напряжений сжатия, а также наличием эффекта наклена (деформационного упрочнения).

1. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
2. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods / E. S. Statnikov, V. O. Muktepavel, V. I. Trufyakov et al. — S. l., [2000]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1817-00).



3. Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4–8.
4. Specification for weld toe improvement by ultrasonic impact treatment / E. S. Statnikov, V. I. Trufyakov, P. P. Mikheev, Yu. F. Kudryavtsev. — S. l., [1996]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1617-96).
5. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Пробл. сварки и спец. электрометаллург.: Сб. науч. тр. / Под. ред. В. К. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
6. Trufiakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Yu. F. Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and strengthening treatments // Welding and Surf. Rev. — 1995. — Vol. 3, part 2. — P. 100.
7. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1985. — 256 с.
8. Махненко В. И., Мосесикис Р. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–18.
9. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 255 с.

Compared are the experimental values of stress concentration factors (SCF) determined by the polarization-optical method with the calculated ones obtained by measuring parameters of fillet welds of T-joints in the as-welded state and after high-frequency peening. Shown is the relationship between a decrease in SCF under the effect of high-frequency peening and increase in fatigue resistance of welded joints.

Поступила в редакцию 17.05.2001,  
в окончательном варианте 21.06.2001

УДК 621.791.753

## РОБАСТНЫЙ ЦИФРОВОЙ СЕНСОР ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

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

Предложена модификация цифрового дугового сенсора, предназначенного для текущей оценки отклонения электрода от осевой линии свариваемого соединения. За счет введения дополнительного цифрового блока существенно снижается чувствительность сенсора к некоторым параметрическим возмущениям сварочного процесса.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, боковое отклонение горелки, цифровой дуговой сенсор, параметрическая неопределенность, работоспособность

При оценке бокового отклонения электрода от осевой линии свариваемого соединения на основе измерения сварочного тока, используя так называемый дуговой сенсор (Arc Sensor) [1], обычно предполагается, что параметры сварочного процесса известны с достаточной точностью и практически не изменяются в течение дуговой сварки. На самом же деле, некоторые параметры известны не точно и, кроме того, значения их в процессе сварки изменяются непредсказуемо. Поэтому оценка бокового отклонения, полученная в условиях параметрической неопределенности, не гарантирует необходимую точность, что существенно затрудняет решение последующей задачи — коррекции движения сварочной горелки на основе данной оценки.

В работе [2] предложен эффективный способ оценки бокового отклонения электрода, обладающий низкой чувствительностью к изменениям неконтролируемых параметров. В частности, предлагается оценку бокового отклонения  $\hat{\epsilon}_n$ , получаемую по результатам измерения отклонений  $\delta_R$  и  $\delta_L$  сварочного тока от его名义ального значения соответственно в правой и левой крайних точках колебаний сварочной горелки, находить не по известной формуле [3]

$$\hat{\epsilon}_n = (\delta_R - \delta_L) \frac{M}{4\alpha v_n}, \quad (1)$$

а используя соотношение

$$\hat{\epsilon}_n = \frac{\delta_R - \delta_L}{\delta_R + \delta_L} (A - v_n T_c). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $v_n$  — скорость поперечного движения горелки;  $M$  — крутизна характеристики плавления электрода;  $A$  — амплитуда поперечных колебаний горелки;  $T_c$  — постоянная времени, определяемая по формуле  $T_c = R/EM$ ,

© Г. А. Цыбулькин, 2001

где  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $R$  — общее активное сопротивление сварочного контура;  $a$  — параметр, определяющий форму кривой  $F(n) = a(n - p)^2 + q$  ( $q > 0$ ), с помощью которой обычно аппроксимируют линию, образовавшуюся при пересечении свободной поверхности сварочной ванны с плоскостью, проходящей через продольную ось электрода и перпендикулярной осевой линии свариваемого углового соединения (рис. 1). Параметр  $p$ , определяющий форму и положение кривой  $F(n)$ , и величина  $\epsilon_n$  связаны соотношением  $p = A - \epsilon_n$ .

Рассматривая выражения (1) и (2), нетрудно заметить, что оценка (2) в отличие от (1) совершенно не зависит от параметра  $a$ , который вследствие нестационарного движения свободной поверхности жидкой ванны в процессе сварки подвержен неконтролируемым изменениям и практически не под-

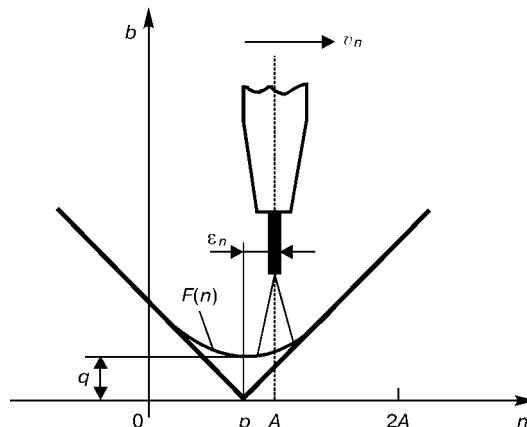


Рис. 1. Схема движения горелки поперек линии свариваемого соединения

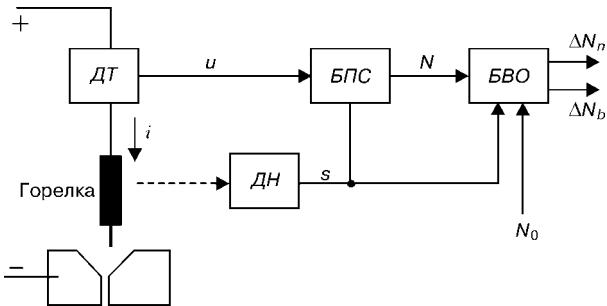


Рис. 2. Структурная схема цифрового сенсора

дается текущей идентификацией. В выражение (2) входят лишь измеряемые величины  $\bar{\delta}_R$ ,  $\bar{\delta}_L$ , а также заранее задаваемые и известные значения  $A$ ,  $v_n$  и  $T_c$ .

Как и следовало ожидать, аналогичным свойством робастности (малочувствительности) по отношению к изменению параметра  $a$  обладает и оценка бокового отклонения

$$\hat{\epsilon}_n = \frac{\bar{\delta}_R - \bar{\delta}_L}{\bar{\delta}_R + \bar{\delta}_L} (A - v_n T_c), \quad (3)$$

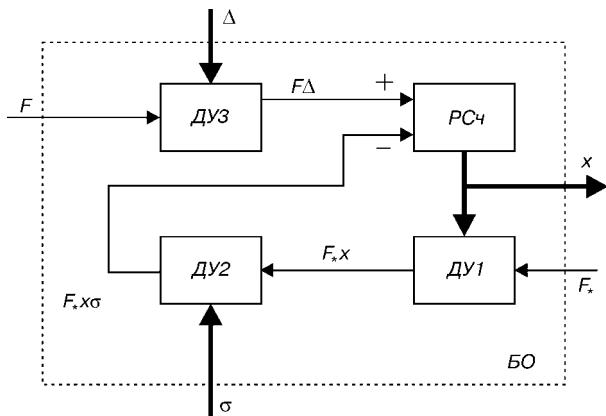
построенная по формуле (2), но в которой вместо значений  $\delta_R$  и  $\delta_L$  фигурируют средние значения отклонений сварочного тока от номинального его значения  $\bar{\delta}_R = \bar{\delta}_R(\Delta n)$  и  $\bar{\delta}_L = \bar{\delta}_L(\Delta n)$ , полученные не в крайних точках, а на некоторых интервалах измерения  $\Delta n \leq A$  справа и слева от среднего положения горелки.

Именно средние значения измеряемых величин вычисляются во многих дуговых сенсорах, в частности в цифровом, предложенном в [4] для оценки отклонения конца электрода от линии свариваемого соединения. Цифровой дуговой сенсор имеет преимущество перед дуговым сенсором в аналоговом исполнении, связанное с упрощением сопряжения его с системами управления сварочных роботов и автоматов, которые выполнены, как правило, на базе цифровой техники. Но при построении сенсора, предложенного в [4], используется не робастный алгоритм (3), а алгоритм (1), которому присущ недостаток, обусловленный чувствительностью оценки  $\hat{\epsilon}_n$  к изменениям параметра  $a$ .

В настоящей статье будет рассмотрена модификация этого сенсора, обеспечивающая получение робастной оценки бокового отклонения в цифровом виде. На рис. 2 изображена его упрощенная структурная схема. Сенсор включает в себя датчики сварочного тока  $DT$  и направления движения горелки поперек линии свариваемого соединения  $DH$ , а также блоки преобразования сигнала  $BPS$  и вычисления отклонений  $BVO$ . На схеме даны следующие обозначения:  $u = u(t)$  — напряжение на выходе  $DT$ , пропорциональное сварочному току  $i = i(t)$ ;  $N$  — среднее значение результатов  $m$  измерений напряжения  $u(t)$ , представленное в числомпульсном коде и вычисленное по формуле  $N = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m N_j$ , где  $N_j$  — количество импульсов, поступивших на выход  $BPS$  в результате  $j$ -го измерения;  $N_0$  — задаваемое двоичное число, соответствующее номинальному сварочному току;  $s$  — сигнал, синхронизирующий работу устройства;  $\Delta N_n = DN_n[kT]$  и  $\Delta N_b = DN_b[kT]$  — двоичные числа, формируемые на выходе  $BVO$  и характеризующие в каждый момент времени  $t = kT$  отклонения горелки соответственно в боковом направлении  $\epsilon_n$  и вдоль оси электрода  $\epsilon_b$ ;  $T$  — период поперечных колебаний сварочной горелки;  $k = 1, 2, \dots, K$ . При этом, согласно [2],

$$\Delta N_n = N_1 - N_2; \quad \Delta N_b = \frac{N_1 + N_2}{2} - N_0.$$

В этих выражениях  $N_1 = N_1[kT_1]$  и  $N_2 = N_2[kT_2]$  — числа, пропорциональные среднему значению сварочного тока в промежутках времени измерения  $T_1$  и  $T_2$ , когда сварочная горелка находится справа и слева от среднего своего положения соответственно  $T_1 = T_2 = A/v_n$ .

Рис. 3. Структурная схема  $BO$ 

Очевидно, если теперь вместо оценки  $\hat{\epsilon}_n = K_1 \Delta N_n$ , где  $K_1 = K_1(M, a, v_n)$ , каким-либо образом вычислять оценку  $\epsilon_n$ , формируемую в соответствии с соотношением

$$\epsilon_n = \frac{\Delta N_1 - \Delta N_2}{\Delta N_1 + \Delta N_2} (A - v_n T_c) = \frac{\Delta N_n}{2\Delta N_b} (A - v_n T_c), \quad (4)$$

аналогичным (3), то эта величина, как и оценка (3), будет робастной по отношению к изменениям параметра  $a$ . (В выражении (4)  $\Delta N_s = N_s - N_0$ ,  $s = 1, 2$ .)

Для технической реализации соотношения  $\Delta N_n/2\Delta N_b$ , входящего в формулу (4), можно воспользоваться, например, весьма простой схемой на двоичных умножителях, описанной в свое время Лундом [5]. Введем в схему цифрового сенсорного устройства (рис. 2) дополнительный блок оценки  $BO$ , построенный на двоичных умножителях (рис. 3). В схеме  $BO$  использованы три двоичных умножителя  $DU1$ ,  $DU2$ ,  $DU3$  и реверсивный счетчик  $PCЧ$ .

На двоичные умножители подаются последовательности импульсов одинаковой частоты  $F$  и  $F_*$ , но сдвинутые по фазе, чтобы предотвратить совпадение импульсов во времени на входах  $PCЧ$ . На  $DU1$  подаются импульсы с частотой  $F_*$  и некоторое число  $x$ . На выходе  $DU1$  формируются импульсы с частотой  $F_*x$ , которые подаются на вход второго двоичного умножителя  $DU2$ . На управляемые входы  $DU2$  вводится число  $\sigma = 2\Delta N_b$ , получаемое путем сдвига на один разряд влево числа  $\Delta N_b$ , формируемого на выходе  $BVO$  (рис. 2). На выходе  $DU2$  возникают импульсы с частотой  $F_*x\sigma$ . В третий двоичный умножитель  $DU3$  через управляемые входы вводится число  $\Delta = \Delta N_n$ , также получаемое на выходе  $BVO$ . На выходе  $DU3$  образуются импульсы с частотой  $F\Delta$ .

Если в начальный момент времени число  $x = 0$ , то  $F_*x\sigma = 0$  и  $x$  начинают увеличиваться с поступлением импульсов с частотой  $F\Delta$  на вход сложения  $PCЧ$ . Увеличение же  $x$  приводит к постепенному возрастанию частоты  $F_*x\sigma$ . Как только значения частоты  $F\Delta$  и  $F_*x\sigma$  сравняются на обоих входах  $PCЧ$ , т. е. когда закончится переходный процесс, в схеме установится соотношение

$$F\Delta = F_*x\sigma,$$

из которого следует, что

$$x = \frac{F\Delta}{F_*\sigma} = \frac{\Delta}{\sigma} = \frac{\Delta N_n}{2\Delta N_b}. \quad (5)$$

Время установления переходного процесса при двенадцатиразрядных двоичных умножителях и частоте импульсов  $F = F_* = 1$  МГц, как показывают расчеты, составляет 0,3...0,5 мс, что вполне приемлемо для практического использования.

Таким образом, число  $x$  на выходе  $PCЧ$  в каждый момент времени  $t = kT$  при заданных  $A, v_n$  и  $T_c$  характеризует, согласно (4), (5), боковое отклонение  $\epsilon_n$ .

Итак, модифицированный дуговой сенсор за счет введения дополнительного блока, построенного на простых счетчиковых структурах, приобретает робастное свойство по отношению к неконтролируемому движению свободной поверхности сварочной ванны.



1. Inoue K., Zhang J., Kang M. Analisis of detection sensitivity of arc sensor in welding process // Trans. of JWRI. — 1991. — № 2. — P. 53–56.
2. Цыбулькин Г. А. К оценке текущего отклонения электрода от линии свариваемого соединения // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 53–54.
3. Cook G. E. Robotic arc welding: research in sensory feedback control // IEEE Trans. Ind. Electron. — 1983. — № 3. — P. 252–268.
4. А. с. 1822042 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 23 Л 9/10. Цифровое устройство для направления сварочного робота по стыку / Г. А. Цыбулькин. — Опубл. 10.05.93, Бюл. № 22.
5. Lundh Y. Digital technique for small computations // J. Brit. IRE. — 1959. — № 1. — P. 37–44.

A modification of a digital arc sensor is proposed, that is designed for current evaluation of electrode deviation from the axis of the joint being welded. Addition of a digital block significantly lowers the sensor sensitivity to some parametric disturbances of the welding process.

Поступила в редакцию 26.01.2001

УДК 621.791:669.15.018.8

## ИНФОРМАЦИЯ ПРЕСС-ГРУППЫ ИЭС

### Коррозионно-стойкая сталь — материал XXI века

В 2000 г. в г. Мельбурне состоялась 34-я конференция Международного института черной металлургии (IISI). Один из трех вопросов, рассматривавшихся здесь, был посвящен состоянию и перспективам производства коррозионно-стойких сталей.

Доклады тематического заседания содержали следующую информацию. Общий объем производства коррозионно-стойких сталей в 1999 г. составил 17 млн т, в том числе 14,3 млн т проката; 80 % этого количества приходится на листовой и полосовой прокат, в свою очередь примерно 80 % его производится — в виде холоднокатаной полосы и ленты. В дальнейшем прогнозируется ежегодный прирост производства коррозионно-стойких сталей на 6...7 %.

Рынок коррозионно-стойких сталей, в отличие от углеродистых, более консолидирован и интернационализирован. Пять крупнейших компаний производят примерно 45 % мирового объема коррозионно-стойкой стали. Рынок открыт для ежегодного ввода в эксплуатацию одного предприятия с годовой производительностью 800 тыс. т и соответствующими мощностями по разливке и прокатке.

Интенсивно ведутся работы по созданию машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) для последующей прокатки полосы из коррозионно-стойкой стали. Результаты, полученные на опытном варианте такой МНЛЗ корпорации «Eurostrip» («Krupp Thyssen Stainless», «Usinor», «Voest-Alpine Industrie-

anlagen»), настолько многообещающи, что в будущем можно рассчитывать на выпуск на одной установке МНЛЗ примерно 400 тыс. т заготовок в год (оптимальная производительность для металлургического завода).

Рыночные ниши для коррозионно-стойкой стали несколько отличаются друг от друга в зависимости от региона мира. В Японии, Южной Корее, на Тайване до 30 % коррозионно-стойкой стали используют в строительной индустрии. В США 30 % такой стали потребляет автомобильная промышленность. Перспективы расширения объема производства коррозионно-стойкой стали благодаря многообразию отраслей применения очень хорошие.

В одном из докладов была отмечена экологичность коррозионно-стойких сталей. Такие их преимущества, как высокая коррозионная стойкость, гигиеничность, прочность, способность к утилизации, перевешивают недостатки производства — большое потребление энергии и вредные выделения в окружающую среду.

Участники конференции подтвердили прогноз Секретариата IISI о том, что мировой рынок коррозионно-стойких сталей в начале XXI в. имеет тенденцию роста, чему способствуют превосходный критерий в соотношении цена/качество стали, хорошие экологические показатели, а также большие потенциальные возможности применения в существующих и новых отраслях промышленности, в частности, в производстве сварных конструкций. В сортаменте стального проката коррозионно-стойкая сталь по праву относится к перспективным материалам XXI в.

По материалам журнала «Черные металлы». — 2001. — № 4.

УДК 621.791(688.8)

## Патенты в области сварочного производства\*

**Способ изготовления двухслойных паяных конструкций**, отличающийся тем, что в качестве высокотеплопроводного металла используют серебро, в процессе термической обработки закалку деталей из сплава на никелевой основе осуществляют с температурой  $(1000 \pm 30)^\circ\text{C}$ , а ступенчатое старение — сначала при  $(740 \pm 15)^\circ\text{C}$ , а затем при  $(650 + 10)^\circ\text{C}$ , пайку проводят при  $(775 \pm 10)^\circ\text{C}$  с предварительной изотермической выдержкой. Патент РФ 2169646. В. Н. Семенов, К. И. Неджиковский, Р. В. Черникова и др. (НПО Энергомаш им. В. П. Глушко) [18].

**Способ изготовления двухслойных паяных конструкций преимущественно в форме колец**, содержащих детали из дисперсионно-твердеющего сплава на никелевой основе и сплава на

основе меди, отличающейся тем, что при предварительной термической обработке закалку деталей из сплава на никелевой основе осуществляют с температурой  $(960 \pm 10)^\circ\text{C}$ , а старение — при температуре  $(730 \pm 10)^\circ\text{C}$ , пайку проводят при температуре  $(980 \pm 10)^\circ\text{C}$ , а после охлаждения спаянную конструкцию подвергают старению при температуре  $(730 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Патент РФ 2169647. НПО Энергомаш им. В. П. Глушко [18].

**Горелка термогазоструйного резака**, содержащая наружный кожух, камеру горения, сопло и систему охлаждения. Приведены отличительные признаки устройства. Патент РФ 2169448. В. И. Новиков, В. И. Лапицкий, В. П. Александренков (НИИ Энергомашинстроения МГТУ им. Н. Э. Баумана) [18].

**Аппарат ручной контактной сварки**, отличающейся тем, что сварочный трансформатор в нем выполнен в виде двух равных

\* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2001 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



Ш-образных пакетов сердечника с зазором между их торцами, значение которого и число витков первичной обмотки выбраны из условия обеспечения соотношения токов рабочего и холостого хода, равным 1,2:1,0. Патент РФ 2169650. В. А. Щекотов, Ю. А. Любимов, О. Г. Стародумов и др. (ГУП ПО «Уралвагонзавод») [18].

**Роликовый раскатник для создания сварочного давления при диффузионной сварке труб внахлестку**, отличающийся тем, что раскатник снабжен по меньшей мере тремя штангами, на концах которых закреплены раскатные ролики разных диаметров, противоположные концы установлены в корпусе с возможностью вращения, при этом ролик с минимальным диаметром расположен на максимальном расстоянии от корпуса, а ролик с максимальным диаметром — на минимальном. Патент РФ 2169651. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (ГУП «НИКТИ Энерготехники») [18].

**Способ термитной сварки встык вертикально расположенных труб**, при котором участки свариваемых труб располагают в сварочной полости огнеупорной формы, размещают в зоне сварки термитную смесь, составленную из оксидов металлов, восстановителя и шлакообразующих добавок, поджигают смесь для возбуждения термитной реакции и производят сварку. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2169652. Ю. Б. Гаспарян, В. В. Сычев, В. Г. Моисеев (ЗАО «Корпорация Макс Вальтер») [18].

**Устройство для сварки световым лучом**, содержащее корпус с герметичной крышкой, установленный в корпусе отражатель с внутренней криволинейной поверхностью, электроды — анод и катод в электрододержателях, узел совместного перемещения электродов для юстировки дугового разряда относительно излучающего фокуса отражателя и экран, прозрачный для светового потока. Приведены отличительные признаки устройства. Патент РФ 2169653. Э. Б. Гусев, М. И. Опарин, Б. П. Салтыков, А. Клаус (Германия) [18].

**Внутренний центратор для сборки и сварки в вакууме кольцевых стыков труб**, содержащий центральный стержень с гайками, концентрично установленные на нем фланцы и кольцевые эластичные уплотнения, установленные концентрично центральному стержню с возможностью их деформирования. Приведены отличительные признаки центратора. Патент РФ 2169654. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев [18].

**Машинка для многоточечной контактной сварки арматурных сеток**, отличающаяся тем, что она снабжена, по крайней мере, одной дополнительной траверсой с установленными на ней с возможностью вертикального перемещения шунтирующими верхними электродами, траверсы выполнены сменными, верхние шунтирующие электроды установлены на каждой траверсе на расстоянии друг от друга, соответствующем шагу между продольными стержнями в сетке, а сварочные трансформаторы подключены к нижним электрододержателям с возможностью включения каждого трансформатора в схему подачи тока в зависимости от шага между продольными стержнями изготовленной сетки и ее ширины. Патент РФ 2170163. Ю. И. Кудрявцев, А. Ю. Кудрявцев, С. Ю. Кудрявцев и др. [19].

**Автоматическая линия для изготовления арматурных сеток**, содержащая устройство подачи проволок для продольных стер-

жней, устройство подачи проволоки для поперечных стержней, бухтодержатели с бухтами проволоки для продольных и поперечных стержней сетки, механизм отрезки поперечных стержней, машину контактной сварки с верхними электродами, установленными с возможностью вертикального перемещения, нижними электродами и сварочными трансформаторами, механизм резки и выдачи готовой сетки. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2170164. Ю. И. Кудрявцев, А. Ю. Кудрявцев, С. Ю. Кудрявцев и др. [19].

**Трансформатор с обдувом для дуговой плавильной печи или электросварки**, отличающийся тем, что в него введены две двухполупериодные схемы выпрямления, одна из которых соединена с обмоткой первоначального возбуждения дуги, а вторая — соответственно с обмоткой поддержания горения дуги, при этом обмотка электродвигателя обдува последовательно подключена к обмотке первоначального возбуждения дуги до или после соответствующей двухполупериодной схемы выпрямления. Патент РФ 2170651. В. И. Власов (ОАО «Новолипецкий меткомбинат») [20].

**Неплавящийся электрод для дуговой обработки материалов**, отличающийся тем, что корпус его выполнен в виде полого стержня с отверстиями, размещенными в два ряда по окружностям, ограничивающим плоскости, перпендикулярные продольной оси корпуса, количество которых в каждом ряду по меньшей мере равно количеству прутков, а каждый из прутков пропущен через пару отверстий вдоль оси корпуса с размещением участка между отверстиями снаружи корпуса. Патент РФ 2170652. И. Е. Лапин, В. А. Косович, О. А. Русол, А. В. Савинов (Волгоградский ГТУ) [20].

**Способ изготовления биметаллических цилиндрических изделий типа труб**, включающий установку с зазором внутри оболочки заготовки из материала покрытия и последующую пластическую деформацию этой заготовки с одновременным ее охлаждением. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2171164. Г. А. Картель, Н. А. Бычков, В. А. Ростовников, С. А. Харетов (ЗАО «Элкам-нефтемаш») [21].

**Сплав для износостойкой наплавки**, содержащий углерод, хром, титан, алюминий отличающийся тем, что он дополнительно содержит азот при следующем соотношении компонентов, мас. %: 1,25...1,90 углерода, 5...10 хрома, 0,85...2,00 титана, 0,1...0,3 алюминия, 0,03...0,20 азота, остальное железо. Патент РФ 2171165. Б. А. Кулищенко, В. И. Шумяков, А. А. Флягин, А. Н. Балин (ЗАО «Завод сварочных материалов») [21].

**Способ резки материалов лазерным лучом с использованием вспомогательного газа**, удаляющего из реза продукты разрушения, при котором сопло располагают над разрезаемой поверхностью с зазором, позволяющим разрезать неровные и шероховатые поверхности, и создают над резом область повышенного давления, вдувая в нее вспомогательный газ, втекающий в рез, отличающийся тем, что газ вдувают в область повышенного давления с составляющей скорости, направленной вдоль реза в сторону его фронта. Патент РФ 2172333. Ю. Г. Жулев, А. Г. Наливайко, Н. К. Макашев, О. Г. Бузыкин [23].

## ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ

**SCHWEISSEN & SCHNEIDEN**

(Германия) 2001. — № 1  
(нем. яз.)

**Конъюнтура 2001** — Размышления о внутреннем спросе, с. 2–3.

**Исследовательские** организации работают с точки зрения экономики удовлетворительно, с. 3.

**Vollrath K.** Автоматическая смена горелки при сварке легких конструкций, с. 5.

**Регулирование** тепловложения при сварке в защитных газах с помощью переменного тока, с. 6–8.

**Greitman M. J., Volz O., Stamm R. et al.** Исследование пригодности пьезоэлектрических приводных механизмов для контактной сварки, с. 10, 12–19.

**Bach F.-W., Duda T., Berthold M.** Совместимость пищевых продуктов с термическими покрытиями, с. 20, 23–26.

**Hahn O., Klemens U., Heeren R.** Система информации «Механические способы соединения» клепанных и клинических соединений, с. 27–28.



**Kempf B., Sjostrom E., Kaufman D. et al.** Новые припои дихромоникелевых сталей, с. 36–40, 42.

**Aichele G.** Полностью механизированная сварка трубок в трубные доски, с. 43–46.

**Обзор** литературы по неразрушающему контролю, с. 47–49.

**Унификация** инструкций по сварке, с. 49–56.

(Германия) 2001. — № 2 (нем. яз.)

**1-е полугодие 2000 г.** — сварочной технике мало динамики, с. 62–65.

**Lorenz G., Heitz S., Treder M.** Автоматическое плакирование котельных установок, с. 69–70.

**Титановые** трубы для целлюлозной и бумажной промышленности, с. 70.

**Wohlfahrt H., Thomas K., Wiesner S.** Измерение сварочных напряжений при МИГ сварке с целью контроля про-вала, с. 74, 76–77, 79.

**Hobbacher A., Belenki V.** Вибрационная прочность соединений из стали, сваренных лазером, с. 80, 82–86.

**Sutter E.** Зоны опасности ультрафиолетового излучения при сварке, с. 88, 90–92.

**Из** истории автогенной резки, с. 93–94.

**Potente H.** Комиссия XVI «Соединение полимеров и технологии склеивания», с. 94–95.

**Конференция** Евролист, декабрь 2001 год, с. 97–120.

(Германия) 2001. — № 3 (нем. яз.)

**Расширение** мирового рынка промышленных роботов, с. 130–131.

**Служба** информации и банк данных в области технологии соединения, с. 133–134.

**Muller A.** Комплексная предварительная обработка — сверление, распиловка, автогенная резка, с. 135–136.

**Новый** способ керамизации алюминия, с. 136.

**Decker I., Pries H., Wohlfahrt H., Schmidt A. J.** Металлургические процессы при сварке плавлением автоматных сталей, с. 140, 142–144, 145–146.

**Hoffmann R., Schuller T., Solch R.** Электронно-лучевая сварка дуплексной стали ленточным присадочным материалом, с. 148, 150–155.

**Dilthey U., Kabatnik L.** Плазменная сварка алюминиевых сплавов на обратной полярности в высоких диапазонах мощности, с. 156–158, 160–161.

**Christoph H., Steinbichler D., Wengmann H.** Подогрев при сварке ферритных сталей, с. 162, 164–168, 170.

**Обзор** литературы по неразрушающему контролю, с. 173–177.

**Требования** к аттестации способов сварки металлических материалов, с. 177–179.

**TWI CONNECT**

(Великобритания) 2001. — № 111 (англ. яз.)

**Troughton M.** Долгосрочное испытание соединений полипропиленовых труб, с. 1.

**Практические** рекомендации для сварщиков. 52. Процессы резки — лазерная резка, с. 4–5.

**Bond S.** Проблемы коррозии в странах Ближнего Востока, с. 7.

**Burling P., Smith N.** Новая концепция конструкции многослойных панелей — Ex-Struct, с. 8.

**Welding & Metal Fabrication**

(Великобритания) 2001. — Vol. 69, № 2 (англ. яз.)

**Lucas B., Bird J., Aitchison A., Yates D.** Влияние воздуха, попавшего в защитный газ, на свойства металла шва, с. 7–11.

**Ремонтная** сварка алюминиевых автомобилей, с. 12–13.

**WELDING Journal**

(США) 2001. — Vol. 80, № 1 (англ. яз.)

**Devine J.** Ультразвуковая сварка пластмассовых изделий, с. 29–33.

**Dommer M.** Микроволновая сварка для соединения труб из поливинилденфторида и арматуры, с. 35–37.

**Molzen M. S., Hornbach D.** Проковка дробью и термо-обработка для снижения напряжений, с. 38–42.

**Роликовая** сварка применительно к нержавеющей стали, с. 43–44.

**Kang M. J., Rhee S.** Статистические модели для оценки разбрзывания в процессе сварки плавящимся электродом в защитном газе с переносом металла короткими замыканиями, с. 1–8.

**Huang C., Kou S.** Частично расплавленная зона в алюминиевых соединениях — сегрегация растворенного вещества и механические характеристики, с. 9–17.

**Nawrocki J. G., Dupont J. N., Robino C. V., Marder A. R.** Склонность к растрескиванию при снятии напряжений на новой ферритной стали. Ч. 2. Моделирование ЗТВ многопроходной сварки, с. 18–24.

**Leshchinskiy L. K., Samotugin S. S.** Механические свойства инструментальной стали с 5 % Cr, упрочненной дуговой наплавкой с последующей плазменной обработкой поверхности, с. 25–30.

(США) 2001. — Vol. 80, № 2 (англ. яз.)

**Scheel K.** Применение респираторов с избыточным давлением для повышения производительности и обеспечения комфорта, с. 28–30.

**Wagner D. D.** Контрольно-измерительные приборы для работы в ограниченном пространстве, с. 31–34.

**Tsai C., Kim D., Jaeger J. et al.** Влияние сварочных параметров и геометрии соединения на количество и распределение остаточных напряжений в стыковых соединениях толстого сечения, с. 35–41.

**Olsson I. H.** Обеспечение безопасности — защита головы и глаз сварщика, с. 43–45.

**Wu C. S., Polte T., Rehfeldt D.** Система нечеткой логики для управления процессом и оценки качества при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе, с. 33–38.

**Ko S. H., Choi S. K., Yoo C. D.** Влияние углубления поверхности на конвекцию в сварочной ванне и геометрию при стационарной дуговой сварке неплавящимся электродом в защитном газе, с. 39–45.

**Huang C., Kou S.** Частично расплавленная зона в сварных алюминиевых соединениях — плоская и ячеистая кристаллизация, с. 46–53.

**Zhang Y. M., Li P. J.** Модифицированный активный контроль переноса металла и процесса импульсной сварки ТИГ титана, с. 54–61.



**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ**

**КОНТАКТНАЯ СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Papkala H. и др.** (Польша). III-1149-00. Исследование влияния направления постоянного тока на асимметрию швов при контактной сварке с использованием инверторных машин, 14 с.

**Kobayashi A. и др.** (Япония). III-1150-00. Изучение характеристик начального кручения при сварке трением, 8 с.

**Satohak S. и др.** (Япония). III-1153-00. Испытания на сдвиг и растяжение конструкций, выполненных точечной сваркой. Прогнозирование прочности и влияние положения шва, 10 с.

**Weber G. и др.** (Германия). III-1156-00. Мониторинг процесса в реальном масштабе времени с использованием фазиз-классификации при контактной сварке на переменном токе, 12 с.



**СВАРКА С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ  
ПОТОКА ЭНЕРГИИ**

**Matsunawa A. и др.** (Япония). IV-753-99. Влияние защитного газа на образование пористости при сварке алюминиевых сплавов и сталей высокомощным CW CO<sub>2</sub>-лазером, 6 с.

**Fabbro R. и др.** (Франция). IV-760-99. Теоретические аспекты лазерной сварки с глубоким проплавлением, 11 с.

**Kapadia P. и др.** (UK). IV-762-00. Некоторые аспекты поведения заряженных капель при лазерной сварке, 18 с.

**Maggio U. и др.** (UK). IV-763-00. Зависимость между размером пятна и глубиной проплавления при лазерной сварке, 20 с.

**Katayama S. и др.** (Япония). IV-764-00. Взаимодействие плазмы и лазерного луча и его влияние на динамику проплавления замочкой скважины при сварке алюминиевых сплавов и нержавеющих сталей высокомощным CW CO<sub>2</sub>-лазером, 12 с.

**Katayama S. и др.** (Япония). IV-765-00. Разработка сопла типа ТОРНАДО для сварки CO<sub>2</sub> и ИАГ-лазером. Влияние вихревого газового потока на уменьшение пористости при сварке алюминиевых сплавов, 7 с.

**Morita I. и др.** (Япония). IV-767-00. Разработка технологии подводной сварки ИАГ-лазером, 8 с.

**Sano Y. и др.** (Япония). IV-769-00. Разработка и применение системы лазерной ударной обработки для предотвращения коррозионного растрескивания под напряжением сварных изделий, 12 с.

**Matsunawa A.** (Япония). IV-770-00. Действующие силы в сварочной ванне при лазерной сварке, 12 с.

**Hilton P. H.** (UK). IV-780-00. Лазерная обработка материалов (Европа-2000), 13 с.

**Olivien C. A. и др.** (UK). IV-781-00. Обработка материалов с помощью ИАГ-лазера мощностью 10 кВт, 9 с.

**Shiihara K. и др.** (Япония). IV-782-00. Разработка технологии сборки под сварку CO<sub>2</sub>-лазером радиочастотных усекающих резонаторов из бескислородной меди, 12 с.

**КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
КАЧЕСТВА СВАРОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

**Kanaikin A. и др.** (Россия). V-1152-00. Диагностика внутреннего состояния поверхности магистральных трубопроводов, 11 с.

**Kanaikin A. и др.** (Россия). V-1153-00. Концепция подготовки норм допуска дефектов в сварных узлах газо- и нефтепроводов по результатам диагностики в процессе эксплуатации, 10 с.

**Forza P. и др.** (Италия). V-1160-00. Системы мониторинга при сварке — технические заметки, 2 с.

**Fugazzi A. и др.** (Италия). V-1161-00. Подход к системам качества в директиве PED 97/23 CE (PED-оборудование, работающее под давлением), 8 с.

**Galcagno G. и др.** (Италия). V-1162-00. Характеристики магнитных флуоресцентных частиц: Результаты согласно существующим стандартам, 10 с.

**Dobman G. и др.** (Австрия). V-1166-00. Характеристики магнитных материалов для мониторинга процесса и оценки долговечности изделий из стали, 23 с.

**Krontikova L.** (Россия). V-1167-00. ГОСТ 30415-96 «Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры стальных изделий магнитным методом», 23 с.

**Bezlyudko G. и др.** (Россия). V-1168-00. История и перспективы стандарта СНГ ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры стальных изделий магнитным методом», 4 с.

**Dubov A. A. и др.** (Россия). V-1170-00. Физическая интерпретация основного параметра диагностики, используемого для испытания труб с помощью магнитной памяти металла, 14 с.

**Erhard A. и др.** (ФРГ). V-1171-00. Характеристики дефектов в кольцевых швах труб из austenитных сталей, 17 с.

**Calcagno G. и др.** (Италия). V-1174-00. Характеристики пленок для промышленной радиографии согласно Е 25580, 13 с.

**Lanza M. и др.** (Италия). V-1175-00. Надежность определения коррозионного поражения с помощью ультразвукового контроля труб в нефтехимическом оборудовании, 13 с.

**ЗДОРОВЬЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ**

**Delcourt C., Beaufils D.** (Франция). VIII-1896-00. Влияние светового излучения и риск заболевания катарктой, 9 с.

**Floreani A. и др.** (Италия). VIII-1897-00. Влияние омегнения сварочной проволоки на процесс GMAW и образование аэрозолей, 9 с.

**Rasoini R.** (Италия). VIII-1898-00. Водород: газовая экология в будущем и сокращение использования газов для сварки и плазменной обработки за счет собственного производства, 9 с.

**VIII-1901-00.** Сварка неплавящимся торированным вольфрамовым электродом, 2 с.

**Spiegel-Cialani V. E.** (Германия). VIII-1904-00. Некоторые замечания об образовании ультрамелких частиц (UFP) при сварке, 15 с.

**Heinrich H.** (Германия). VIII-190-00. Сравнительная оценка длительности воздействия частиц при испытаниях на крысах, мышах и хомячках, 23 с.

**Oberdorster G.** (США). VIII-1906-00. Профзаболевание: Перегрузка легких частицами, 15 с.

**Heinrich U. и др.** (Германия). VIII-1907-00. Хронические заболевания при загрязнении дыхательных путей, подверженных воздействию выхлопных газов дизелей, угольной пыли и диоксида титана (испытания на крысах и мышах), 26 с.

**Oberdorster G. и др.** (США). VIII-1908-00. Наличие мелких частиц в окружающем пространстве. Причины хронических легочных заболеваний, 16 с.

**Antonini J. M. и др.** (США). VIII-1909-00. Последствия влияния сварочных аэрозолей: легочные заболевания, воспаления, некрозы фактор-А и фактор-IB при раковых заболеваниях, 25 с.

**Heinrich U.** (Германия). VIII-1910-00. Канцерогенное влияние твердых частиц, 22 с.

**ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ СВАРКЕ**

**Yurioka N. и др.** (Япония). IX-1962-00. Анализ прочности на растяжение, величины FATT и твердости металла шва, полученного дуговой сваркой под флюсом с высоким тепловложением и выполненного с использованием нейросетей Bayesian, 13 с.

**Yurioka N.** (Япония). IX-1963-00. Наука и технология сварки и соединения в XX столетии и перспективы на XXI столетие. Конструкционные стали и сплавы, 10 с.

**Nishimoto K. и др.** (Япония). IX-1965-00. Влияние добавок Ce на образование горячих трещин в ЗТВ при сварке литого сплава 718, 15 с.

**Hitara N. и др.** (Япония). IX-1966-00. Механические свойства сварных соединений из котельной высокопрочной austenитной нержавеющей стали с 23 % Cr, 9 с.

**Tamaki K. и др.** (Япония). IX-1967-00. Влияние содержания углерода и протекания перитетической реакции на образование горячих трещин в металле шва, выполненного на высококлеродистой стали, 22 с.

**Ito R. и др.** (Япония). IX-1968-00. Микроструктурный анализ участка разупрочнения ЗТВ на ультрамелкозернистой стали, 14 с.

**Kannengiesser Th. и др.** (Германия). IX-1971-00. Влияние прочности металла шва и режимов сварки на силы реакции и распределения напряжений жесткозакрепленных элементов, 18 с.

**Sakaguchi M. и др.** (Япония). IX-1972-00. Склонность углеродистых сталей S45C и SS400 к коррозионному растрескиванию под напряжением в воде при высокой температуре, 8 с.

**Vilpas M.** (Финляндия). IX-1973-00. Использование моделирования для прогнозирования возникновения микросегрегации и сопротивления питтинговой коррозии металла швов на austenитной нержавеющей стали, 20 с.

**Miyake T. и др.** (Япония). IX-1983-00. IX-H-482-00. Обзор литературы: Влияние остаточных и микролегирующих элементов на сварку нержавеющих сталей. Ч. 2. Влияние на механические свойства при дуговой сварке, 20 с.



**СОСУДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ,  
КОТЛЫ И ТРУБОПРОВОДЫ**

**Bernasovsky R. и др.** (Словакия). XI-721-00. Метод «Hot Sleeve» ремонта без остановки дефектных кольцевых швов на трубопроводах, эксплуатируемых под давлением, 9 с.

**Korolkov P. M.** (Россия). XI-722-00. Влияние местной термообработки на свойства сварных швов трубопроводов, транспортирующих натрий, 5 с.

**Fugazzi A. и др.** (Италия). XI-723-00. Подход к системе качества в соответствии с директивой 97/23 CE, 8 с.

**Lauro A. и др.** (Италия). XI-726-00. Отчет о техническом обследовании резервуаров сжиженного газа, эксплуатировавшихся под землей и поднятых на поверхность, выполненный для оценки конструкционной целостности, 13 с.

**Lanza V. и др.** (Италия). XI-727-00. Примеры анализа риска, применительно к нефтеперерабатывающему оборудованию, базирующиеся на подобном разрушении в производственных условиях, 18 с.

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Farkas J. и др.** (Венгрия). XV-1038-00. Конструкция бункера минимальной стоимости, изготовленного из сварных панелей с ребрами жесткости, 13 с.

**Timossi L.** XV-1045-00. Годовой отчет WG 8. Сварные изделия, 2 с.

**Etterdal B. и др.** (Норвегия–Дания). XV-1056-00. Ч. 1. Испытание колонн на сжатие, 9 с.

**XV-1057-00.** Ч. 2. Анализ методом конечных элементов, 15 с.

**Jarmai K. и др.** XV-1058-00. Конструкция сварного пресса минимальной стоимости для штамповки в легкой промышленности, 13 с.

**Huhtala L. и др.** (Финляндия). XV-1060-00. Статическая прочность поперечных соединений из нержавеющей стали, 13 с.

**SC «СТАНДАРТИЗАЦИЯ».**

**Lucas W.** (UK). XII-1621-00. Применение АТИГ – процесса для сварки труб в судостроении, с. 13.

**Kazunito K. и др.** (Япония). XII-1622-00. Разработка системы орбитальной ТИГ-сварки трубопроводов в узкий зазор с использованием нескольких головок, с. 14.

**Leino K.** (Финляндия). XII-1623-00. Ускорение автоматизации сварки, 6 с.

**Asai K. и др.** (Япония). XII-1624-00. Развитие роботизированной системы GTAW, пригодной для работы внутри робота, 16 с.

**Fujimoto M. и др.** (Япония). XII-1625-00. Развитие сварочной системы, состоящей из нескольких роботов для сварки в судостроении, 16 с.

**Oshima K. и др.** (Япония). XII-1626-00. Контроль положения сварочной ванны при односторонней роботизированной сварке, 8 с.

**Lukacevic Z. и др.** (Словения–США). XII-1627-00. Характеристика процесса сварки, основывающаяся на мониторинге параметров, 10 с.

**Ueyama T. и др.** (Япония). XII-1629-00. Повышение качества и производительности МИГ-сварки наложением импульсов постоянного тока, 17 с.

**Nishi Y. и др.** (Япония). XII-1631-00. Совершенствование автоматической сварки полотниц судов, 10 с.

**Boekholt R.** XII-1632-00. Доклад WG «Судостроение», 9 с.

**Sugitani Y. и др.** (Япония). XII-1641-00. Применение автоматической GMAW трубопроводов для повышения качества и производительности, 17 с.

**Rinaldi F. и др.** (Италия–Нидерланды). XII-1642-00. Компьютеризированная система сварки магистральных трубопроводов, 20 с.

**Ikuno Y. и др.** (Япония). XII-1643-00. Автоматизированная установка для сварки трубопроводов для транспортировки газов, 9 с.

**Blackman S. A. и др.** (Англия–Канада). XII-1644-00. Современные процессы сварки транспортирующих трубопроводов, 18 с.

**Tanaka T. и др.** (Япония). XII-1645-00. Производство спиралевидных труб – новый ERW и SAW комбинированный процесс, 17 с.

**Dallani C.** (США). XII-1646-00. Свойства и недостатки процесса FCAW-S, 18 с.

**Nakano T. и др.** (Япония). XII-1647-00. Состояние со сварочными проволоками для GMAW, используемыми при изготовлении трубопроводов в Японии, 18 с.

**Yarp D. и др.** (США). XII-1648-00. Применение твердотельных ИАГ-лазеров для сварки трубопроводов из высокопрочной стали, 11 с.

**Punshon C. S. и др.** (Великобритания–Италия). XII-1649-00. Применение электронно-лучевой сварки при пониженном давлении при производстве стальных трубопроводов, 9 с.

**Asai S. и др.** (Япония). XII-1650-00. Применение GTAW в узкий зазор при производстве сосудов и труб на заводах энергетического машиностроения, 15 с.

**Shribman V. и др.** (Израиль). XII-1636-00. Магнитоимпульсная сварка в твердом состоянии, 21 с.

**Okazaki T. и др.** (Япония). XII-1637-00. Высокотемпературные характеристики металла шва, полученного при сварке нержавеющей стали порошковыми электродными проволоками, 9 с.

**Miyake T. и др.** (Япония). XII-1638-00. Тенденции и потребности использования сварочных электродов для МАГ-МИГ сварки сталей, применяемых в мостостроении, 49 с.

**Tsutsumi S. и др.** (Япония). XII-1639-00. Тенденции развития сварочных материалов и процессов (обзор МИС), 3 с.

**Dilthey U. и др.** (ФРГ). XII-1630-00. Использование нагрева электрической дугой для пайки оцинкованной и легированной сталей. Альтернативная технология для получения соединений в транспортных средствах, 9 с.

**Simpson S. W. и др.** (Австралия). XII-1635-00. Перспективы идентификации дефектов и контроля при сварке, используя запись изображений, 8 с.



## «СЭЛМА» — 55 лет

Можно с уверенностью сказать, что на пороге третьего тысячелетия сварка остается одним из ведущих технологических процессов, поскольку даже в развитых странах с ее использованием производится до 70 % совокупного общественного продукта. Несомненен тот факт, что Украина по уровню развития сварочных технологий занимает одно из ведущих мест в мире. Одним из наиболее крупных и известных производителей электросварочного оборудования в Украине и странах СНГ является ОАО Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА».

В ноябре «СЭЛМА» отмечает свое 55-летие. Завод, основанный в 1946 г. в Симферополе и первоначально выпускавший трансформаторы, подвесные, стационарные асинхронные двигатели, вращающиеся сварочные машины постоянного тока, сегодня стал одним из крупнейших предприятий своей отрасли.

Вскоре после своего основания завод стал специализироваться по выпуску аппаратуры управления устройствами для сварочных машин.

В начале 1970-х годов после установления прочных творческих связей с Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и непосредственно с его директором академиком Б. Е. Патоном, Всесоюзным НИИ электросварочного оборудования предприятие наладило выпуск современного электросварочного оборудования.

Существенный толчок в развитии технологии производства, отладки и испытаний сложных электронных систем произошел в результате взаимодействия фирмы с Межотраслевым научно-техническим комплексом «Технологические лазеры», который был создан в 1987 г. как головной центр в СССР по разработке и внедрению в народное хозяйство страны систем технологических лазеров. На заводе было выпущено около 200 микропроцессорных систем управления технологическими лазерами, при изготовлении которых впервые была применена система термотренировки модулей в термобарокамере. Значительный вклад в развитие предприятия в этот период внес академик Академии наук СССР Е. П. Велихов, который курировал работу МНТК. С этого момента на заводе началось активное внедрение компьютерной техники, современных технологий производства двухсторонних печатных плат и современной автоматизированной системы управления разработкой и проектированием конструкторской документации. В 1980-е годы вся выпускаемая фирмой продукция была аттестована государственным Знаком качества и поставлялась более чем в 30 стран мира.



В связи с распадом СССР Симферопольский электромашиностроительный завод попал в тяжелейшее положение — прекратился сбыт продукции аппаратуры управления. Было принято решение развивать выпуск разнообразного электросварочного оборудования. В связи с этим в производство были внедрены более интенсивные технологии — новые штамповочные комплексы с программным управлением производства немецкой фирмы TRUMPF и современная линия покраски порошковым напылением. За сравнительно короткий срок была освоена широкая гамма сварочных трансформаторов, полуавтоматов и установок для аргонодуговой сварки.

В 1996 г. завод стал акционерным обществом. С этого времени начался период становления завода, как крупнейшего производителя сварочной техники в Украине.

Сегодня по соотношению цены и качества фирма «СЭЛМА» занимает лидирующее положение среди отечественных производителей электросварочного оборудования. Уникальность продукции завода состоит в том, что на заводе потребитель может приобрести всю необходимую гамму оборудования (более 60-ти наименований) для всех типов электродуговой сварки, а также сварочные электроды. Высококачественное, а потому надежное оборудование с торговой маркой «SELMA» применяется практически во всех сферах хозяйственной деятельности: от мобильного использования на строительных площадках, при монтажных и ремонтных работах — до промышленного применения в самых жестких условиях эксплуатации (автоиндустрия, вагоно-и судостроение, судоремонт, химическая промышленность, тяжелое машиностроение, нефтегазодобывающая и нефтегазоперерабатывающая промышленность и другие отрасли), т. е. везде, где необходимы качественный результат и высокая надежность.

Качество всей выпускаемой на ОАО «Фирма СЭЛМА» продукции подтверждено сертификатами соответствия Госстандарта Украины и России. Завод одним из первых в Крыму внедрил и сертифицировал систему обеспечения качества выпускаемой продукции по международному стандарту ISO 9001. Сертификат на систему качества ISO 9001 в 2001 г. заводу вручил академик — Б. Е. Патон.

Постоянная работа конструкторов и разработчиков по модернизации парка оборудования и разработке новой сварочной техники, использование новейших компьютерных технологий при проектировании машин и механизмов



позволяет заводу в короткие сроки осваивать и выпускать новые виды современного высокотехнологичного оборудования.

Кроме того, многолетний опыт работы фирмы «СЭЛМА» на рынке сварочного оборудования построен на тесном и взаимовыгодном сотрудничестве с крупнейшими мировыми производителями в этой отрасли — шведским концерном ESAB, финской фирмой KEMPPPI, немецкой фирмой «Abicor Binzel», «Copptim Ltd» (Венгрия), а также с Научно-техническим комплексом «Институт электросварки им. Е.О. Патона» (г. Киев). Налажено деловое сотрудничество с польской фирмой OZAS, а также начато освоение выпуска принципиально новых сварочных полуавтоматов инверторного типа с синергетическим управлением во всем диапазоне режимов сварки «SYNTERMIG-401». Микропроцессорная система синергетического управления позволяет легко подобрать оптимальные сварочные параметры в зависимости от типа, марки, толщины свариваемого материала, диаметра и типа сварочной проволоки.

Фирма «СЭЛМА» проводит постоянную работу по освоению новых рынков сбыта и поиску потенциальных клиентов в различных регионах Украины и за рубежом, что позволило планомерно увеличивать сбыт продукции и стать предприятием, ориентированным на экспорт. Показательно, что реализация сварочного оборудования за пределы Украины составляет более 70 % общего объема. Основными зарубежными партнерами фирмы являются компании стран СНГ, Швеции, Сингапура, Иордании, Сирии, ОАЭ, Пакистана, Ирака, Вьетнама и др.

Широкая сеть региональных представительств в Украине и России позволяет не на словах, а на деле сопровождать свою продукцию сервисным обслуживанием на местах как в течение гарантийного срока, так и на весь период эксплуатации. На территории России генеральным представителем ОАО «Фирма СЭЛМА» по реализации и гарантийному обслуживанию оборудования является ЗАО НПФ ИТС (г. Санкт-Петербург).

Свою торговую марку ОАО «Фирма СЭЛМА» постоянно поддерживает, участвуя в международных специализированных и отраслевых выставках в Украине и за рубе-

жом. В сентябре 2001 г. фирма приняла участие в 15-й Международной сварочной выставке «Сварка—Резка—Наплавка-2001» (г. Эссен, Германия), которая является крупнейшей специализированной выставкой в мире и проводится один раз в четыре года. На выставке к оборудованию фирмы проявляли большой интерес фирмы и предприятия Ближнего и Среднего Востока, Юго-Восточной Азии, Индокитая, Африки, Латинской Америки.

Фирма «СЭЛМА» большое внимание уделяет решению социальных проблем. Здоровье сотрудников фирмы всегда в центре внимания: на заводе функционируют медицинский центр с большим диапазоном услуг, современный стоматологический комплекс, на ЮБК работают летний детский лагерь и база отдыха «Парус». В центре города Симферополя функционирует детский дошкольный комплекс «Алые паруса», который по праву считается одним из лучших в Украине.

Мощная производственная база, современное оборудование и технологии мирового класса, высококвалифицированные специалисты всех уровней, и, конечно же, постоянная забота о людях — вот тот фундамент, на котором строится нынешняя стратегия предприятия. Несомненно, что залогом успешной работы завода является умелое и квалифицированное руководство фирмой генеральным директором Е. А. Копиленко, позволившее выбрать оптимальный путь предприятия к успеху и стать одним из лидеров в области сварочного производства Украины и стран СНГ. По словам директора, секрет успеха в первую очередь заключается в людях и традициях, приобретенных фирмой за более чем полувековую историю своей деятельности. На заводе работают династии, порой уникальные, более 150 человек — ветераны производства. За последние два года коллектив завода значительно пополнился и молодыми кадрами. Это как нельзя более наглядно подтверждает стремление предприятия работать на перспективу.

Все есть у «СЭЛМЫ» — работа, планы, работоспособный коллектив, надежные деловые партнеры — значит, есть и будущее!

В. В. Верна, инж.-экономист

УДК 621.791.001.12/18

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ»

10–14 сентября в Мариуполе (Донецкая обл.) прошла Международная научно-методическая конференция «Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров», организованная Приазовским государственным техническим университетом (ПГТУ). Конференция была посвящена 55-летию кафедры оборудования и технологии сварочного производства и 30-летию сварочного факультета ПГТУ. В ее работе приняли участие специалисты по сварке и родственным технологиям промышленных предприятий, научно-исследовательских организаций и учебных заведений Украины и стран СНГ.

Открыл конференцию и приветствовал всех ее участников ректор ПГТУ, академик АНВШ Украины И. В. Же-

желенко. Он напомнил, что в прошлом году отмечался 70-летний юбилей ПГТУ, а также остановился на создании в ПГТУ новых факультетов и задачах в области образования и науки. На пленарном заседании академик АНВШ Украины зав. кафедрой оборудования и технологии сварочного производства В. А. Роянов отметил достижения сотрудников за 55 лет существования кафедры. Декан сварочного факультета, проф. А. Д. Размышляев рассказал об истории факультета, его структуре и многоуровневой системе подготовки кадров на этом факультете.

Зав. кафедрой metallurgii и технологии сварочного производства, академик В. В. Чигарев (ПГТУ) доложил



о научных разработках, выполненных на кафедре, а также проблемах в области образования и подготовки кадров.

С докладом, посвященным использованию сварочных и родственных технологий на ОАО «Азовмаш», выступил главный сварщик этого предприятия А. Г. Савин, а главный сварщик ОАО «Азовсталь» П. В. Халангот рассказал о новых технологиях, используемых на предприятии при сварке, наплавке и напылении деталей металлургического оборудования.

12 сентября работа трех секций конференции проходила не в стенах ПГТУ, а в пансионате ПГТУ «Олимп» на живописном побережье Азовского моря (с. Юрьевка). На заседаниях секций было представлено 67 докладов. Следует отметить, что к началу конференции вышел сборник докладов конференции.

В секции «Повышение качества и эффективность процессов сварки и родственных технологий» была представлена большая часть докладов. Значительный интерес вызвали доклады проф. И. В. Пентегова (ИЭС им. Е. О. Патона) по определению зависимости температуры плазмы сварочной дуги от давления с помощью принципа минимума Штеенбека; д-ра техн. наук Г. М. Григоренко, кандидатов техн. наук В. В. Арсенюка, А. И. Игнатенко (ИЭС им. Е. О. Патона) по ударной сварке и формовке изделий в специализированных устройствах; канд. техн. наук Е. А. Донченко, инженеров В. И. Королева, Д. Л. Сторожика (МВА, г. Новороссийск) по расчету режимов наплавки; канд. техн. наук В. Н. Пучкова (ЗГТУ, г. Запорожье) об исследовании атмосферы дуги при сварке

никеля в аргоне; д-ра техн. наук С. В. Гулакова, инж. О. А. Лаврентик (ПГТУ) о повышении качества электроронктактной наплавки. Отрадно отметить, что многие доклады сделаны молодыми учеными, в частности, из ЗГТУ (г. Запорожье), ВУНУ (г. Луганск), ДГМА (г. Краматорск), ПГТУ (г. Мариуполь). С докладом выступили также ученые и инженерно-технические работники предприятий из России и Беларуссии.

В секции «Система сертификации продукции сварочного производства» интерес вызвали доклады доцента Ю. В. Белоусова (ПГТУ), в которых рассмотрены особенности классификации по европейским стандартам, а также вопросы подготовки специалистов сварщиков в области стандартизации на примере кафедры оборудования и технологии сварочного производства ПГТУ.

В секции «Проблемы совершенствования подготовки кадров в современных условиях многоуровневой системы высшего образования» было представлено 14 докладов. Наибольший интерес участников конференции вызвал доклад проф. В. Н. Коржа (НТУУ «Киевский политехнический институт») о концепции подготовки специалистов по специальности 7.092303 «Технология и оборудование восстановления износостойкости машин и конструкций». Он отметил целесообразность переименования названия этой специальности на «Инженерия покрытия твердого тела» и создания в ее рамках специализаций «Инженерия покрытия деталей и конструкций» и «Организация и управление восстановительно-ремонтным производством деталей машин». Он призвал также более активно обсуждать все нормативные материалы по принятию Стандарта на высшее образование в Украине.

На заседаниях секций проходило живое обсуждение докладов. Многие вопросы решались также в рабочем порядке. При этом устанавливались деловые контакты между учеными и работниками производства, обсуждались проблемы сварки наплавки, а также напыления деталей и конструкций. Участники конференции отметили высокий уровень организации работы конференции. Проведение конференции стало возможным благодаря спонсорской благотворительной поддержке таких крупнейших предприятий г. Мариуполя, как ОАО «Азовмаш», ОАО «Сталькон», ОАО «Пожзащита», а также информационной поддержке журнала «Автоматическая сварка» (в № 8 за 2001 опубликована подборка статей преподавателей и специалистов ПГТУ), Общества сварщиков Украины, Украинского информационного центра «Наука, Техника, Технология».

На конференции были приняты решения, которые послужат дальнейшему развитию сварочной науки и техники, повышению качества подготовки специалистов в вузах Украины и СНГ. В частности, высказывалось предположение о проведении подобных международных конференций в ПГТУ каждые пять лет.

А. Д. Размышляев, д-р техн. наук

## КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ – НА СЛУЖБУ ОБЩЕСТВУ

С 24 по 28 августа во Дворце искусств «Украинский дом» (г. Киев) прошла Международная выставка «Космические технологии — на службу обществу». Организатор выставки — Национальное космическое агентство Украины. На выставке были представлены 47 организаций, научно-производственных предприятий и институтов, среди них такие известные, как «Южный машиностроительный завод», государственное конструкторское бюро «Южное», «Арсенал», «Хартрон» и др., а также ряд научно-исследовательских и проектных институтов.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, имеющий более чем 40-летний опыт работы в аэрокосмической отрасли, представил компактную по объему и разнообразную по тематике экспозицию, состоящую из двух основных разделов: фундаментальные исследования и технические разработки в космосе; технология — на службу космической индустрии.



На стенах первого раздела выставки были представлены действующие образцы разнообразной научно-исследовательской аппаратуры, а также плакаты, отражающие разработку протяженных силовых трансформируемых конструкций и иллюстрирующие многообразие специальных имитационных и испытательных космических средств, включая операторскую деятельность в невесомости.

В другом разделе были продемонстрированы возможности новых технологических процессов получения неразъемных соединений для аэрокосмической промышленности.

Особое место на выставке было уделено специализированной научной и технической литературе ученых и специалистов ИЭС им. Е. О. Патона, занимающихся космической тематикой. Работа стенда ИЭС сопровождалась видеопоказом научно-популярных фильмов и фрагментов технических сюжетов, представляющих определенный интерес для специалистов.

К началу проведения выставки был издан рекламно-информационный буклете, в котором отражены достижения и возможности ИЭС в области космической технологии.

И. Г. Любомуров, инж.





## В. И. Лакомскому — 75 лет



Член-корреспонденту Национальной академии наук Украины, доктору технических наук, профессору Виктору Иосифовичу Лакомскому, известному ученому в области специальной электрометаллургии и материаловедения, лауреату Государственной премии Украины, заслуженному деятелю науки и техники исполнилось 75 лет.

В. И. Лакомский родился 11 октября 1926 г. в Краматорске Донецкой области в семье рабочего. В 1945 г. окончил металлургический техникум в Новокузнецке Кемеровской области, а в 1950 г. — Запорожский машиностроительный институт. В 1954 г. закончил аспирантуру в Киевском политехническом институте и защитил кандидатскую диссертацию. С 1957 г. по настоящее время работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины с небольшим перерывом (1975–1979 гг.), когда работал заместителем директора по научной работе в «УкрНИИспецсталь». В 1969 г. защитил докторскую диссертацию, в 1971 г. утвержден в ученом звании профессора, в 1992 г. был избран член-корреспондентом НАН Украины, а в 1998 г. ему присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники.

Глубокие и обстоятельные исследования В. И. Лакомского в области специальной электрометаллургии снискали ему заслуженное признание и высокий научный авторитет. Он автор оригинальных тонких методик исследования равновесия систем газ — жидккий металл при высоких температурах (до температур кипения металлов). Им впервые обнаружено экспериментально и обосновано теоретически существование явления «электрического» поглощения газов металлами и возбужденных молекул газа в атмосфере дуги, что позволяет легировать жидкий металл азотом из газовой фазы при плазменно-дуговом плавлении.

Под руководством академика Б. Е. Патона он создал и развил новое научное направление, основанное на изучении закономерностей высокотемпературного взаимодействия газов с жидкими металлами, что позволило в короткий срок разработать научные основы, технологию, оборудование и внедрить в промышленность один

из способов специальной электрометаллургии — плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Эта работа была отмечена в 1980 г. Государственной премией Украины.

Нынешний этап научной деятельности В. И. Лакомского связан с работами по созданию принципиально новых самоспекающихся термохимических катодов и на их основе электродуговых источников тепла — дуготронов. Им разработана оригинальная технология дуговой сварки открытой дугой черных и цветных металлов с углеродными материалами в производстве многоамперных контактных узлов электрометаллургических агрегатов. Технология успешно используется в алюминиевой и электродной промышленности как в Украине, так и за рубежом (Англии, Италии, Австралии).

В. И. Лакомский является организатором ряда научных подразделений Института электросварки. По поручению академика Б. Е. Патона он создал в 1958 г. лабораторию газов в металлах, в 1968 г. — отдел плазменной металлургии, в 1979 г. — отдел, а впоследствии (с 1995 г.) НИЦ «Плазменные технологии» (г. Запорожье). С 1997 г. он работает главным научным сотрудником в отделе физико-химических исследований материалов.

Виктор Иосифович Лакомский проводит большую работу по подготовке научных кадров. Под его руководством подготовлено 11 кандидатов наук. Он принимает активное участие в научной жизни, выступает с докладами и лекциями, является членом спецсовета по защите докторских, членом редколлегии журнала «Проблемы специальной электрометаллургии».

В. И. Лакомский опубликовано свыше 300 статей и 6 монографий, получено около 200 авторских свидетельств на изобретения и патентов в США, Японии, Англии, Германии, Италии, Австралии, Бразилии, Франции, Швейцарии, Норвегии.

Профессор В. И. Лакомский полон творческих сил, целеустремленности в поиске новых решений задач, стоящих перед специальной электрометаллургией и сваркой.

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему здоровья, счастья и новых больших творческих успехов.

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



## НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ



В августе исполнилось 60 лет академику Академии высшей школы Украины, доктору технических наук Украины, профессору, заместителю ректора Приазовского государственного технического университета, заведующему кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Вячеславу Александровичу Роянову. Окончив в 1964 г. Ждановский metallurgical институт, он прошел путь от инженера-исследователя до заведующего кафедрой (1980) и первого проректора ПГТУ (1994).

Деятельность по подготовке инженерных кадров В. А. Роянов сочетает с научно-исследовательской работой. Им совместно с К. В. Багрянским была разработана теория массообмена между шлаком и расплавом в реакционной зоне при сварке и наплавке под керамическими флюсами. Получили известность работы В. А. Роянова по интенсификации процессов легирования наплавленного металла и плавления электродов. В последние годы он активно разрабатывает теоретические основы повышения прочности сцепления газотермических покрытий и создает серию порошковых электродов для их напыления. В. А. Рояновым опубликовано свыше 100 научных и учебно-методических работ, в том числе три монографии.

покрытий и создает серию порошковых электродов для их напыления. В. А. Рояновым опубликовано свыше 100 научных и учебно-методических работ, в том числе три монографии.

Исполнилось 70 лет Виктору Алексеевичу Ковтуненко, известному специалисту в области конструктивно-технологической прочности сварных конструкций, кандидату технических наук, лауреату Государственной премии УССР, заведующему лабораторией ИЭС им. Е. О. Патона. После окончания Киевского политехнического института в 1956 г. по настоящее время В. А. Ковтуненко работает в ИЭС им. Е. О. Патона, сочетая научную деятельность с практической инженерной, связанной с внедрением прогрессивных технологий сварки в строительстве. При его активном участии осуществлялось строительство ряда уникальных инженерных сооружений: телевышка в Петербурге, глубоководные стационарные основания для разведки и добычи нефти и газа в акваториях Черного, Каспийского и Балтийского морей, крупногабаритные многослойные рулонированные сосуды высокого давления, металлические мосты в Каменец-Подольске, Днепропетровске, Днепродзержинске, Одессе, Киеве. В настоящее время под руководством В. А. Ковтуненко выполняется большой объем работ по разработке и внедрению новых прогрессивных технологий автоматической сварки и оборудования при строительстве и реконструкции мостов в г. Киеве и Днепропетровске, морского причала в Одессе. Он является автором и соавтором 63 научных работ, а также 14 авторских свидетельств на изобретения.



В ноябре исполнилось 60 лет Анатолию Александровичу Рыбакову, кандидату технических наук, заведующему отделом ИЭС им. Е. О. Патона. Около 40 лет юбиляр посвятил инженерной и научной деятельности, направленной на создание высокоэффективных производств, материалов, сварочных и других технологий, обеспечение качества сварных соединений и надежности магистральных газо-, нефтепроводов. Сварочные технологии в производстве труб большого диаметра были и остаются одним из главных направлений научной и практической деятельности А. А. Рыбакова. Разработанная при его активном участии трехслойная сварка, впервые освоенная при производстве спиральношовных труб, впоследствии стала основополагающим компонентом технологии, повсеместно используемой в современном трубном производстве.

Руководимый А. А. Рыбаковым отдел обеспечил выполнение комплексных работ по созданию опытно-промышленного производства принципиально нового вида продукции — труб многослойной конструкции, использование которых в будущем может стать основой создания газовых магистралей сверхвысоких рабочих параметров. В последнее время его научные интересы связаны с разработкой многодуговой сварки с программным управлением технического состояния и восстановлением старых трубопроводных систем, оценкой процессов старения и выбором новых материалов, предупреждением коррозионных разрушений. Серьезное внимание уделяется нормативному обеспечению новых разработок.