

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВАРКА

www.nas.gov.ua/pwj

СВАРКА • РЕЗКА • НАПЛАВКА • ПАЙКА • НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Издается с 1948 года

МАЙ 2008

ДЕЛОРО СТЕЛЛИТ **Stellite** **СТО ЛЕТ НА РЫНКЕ**

**ВСЬ СПЕКТР УСТАНОВОК
ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-
ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ
ДЛЯ ЛЮБОЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ЗАДАЧИ**



Deloro Stellite GmbH, Zur Bergpflege 53, 56070, Koblenz, Germany, tel.: +49 261 80 88 34, fax: +49 261 80 88 23, mob.: +49 172 418 69 87, e-mail: apavlenko@stellite.com, www.stellite.com

Продажи в СНГ: Украина, 83108, г. Донецк, Партизанский пр., 31а/89, тел.: +380-62-348-54-57, факс: +380-622-57-75-60, моб.: +380-50-471-90-22, e-mail: dubinina@mail.ru



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Качарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова, И. В. Петушков,
А. И. Сулима

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И.
Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций 5

Позняков В. Д. Повышение сопротивляемости замедленному разрушению сварных соединений литых закаливаемых сталей 11

Рябцев И. И. Расчетно-экспериментальная оценка эффективности легирования фосфором высоколегированного наплавленного металла 18

Кузьмин С. В., Чувичилов В. А., Лысак В. И. Особенности пластического деформирования металла околшовной зоны при сварке взрывом по схеме двустороннего симметричного плакирования 23

Цыбульский Г. А. Коррекция траектории движения манипуляционного робота с учетом дополнительных измерений 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Гарф Э. Ф., Снисаренко В. В. Разработка и применение сварных конструкций из труб 32

Козулин С. М., Лычко И. И., Подыма Г. С. Электрошлаковая наплавка зубьев вал-шестерни вращающейся обжиговой печи 38

Загорников В. И. Техника ремонта лопаток из титанового сплава BT3-1 с использованием ЭЛС 42

Левченко О. Г., Левчук В. К. Безопасный уровень напряженности электромагнитного поля при контактной сварке 46

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Добрушин Л. Д., Петушков В. Г., Брызгалин А. Г. Применение энергии взрыва для обработки сварных соединений декомпозиеров и мешалок Николаевского глиноземного завода 56

Изобретения стран мира 57

По зарубежным журналам 60

Новые книги 62

ХРОНИКА

Б. А. Мовчану — 80 63

А. А. Мозжухину — 70 64

ИНФОРМАЦИЯ 65

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 5 (661)

May 2008

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»
Address of Editorial Board:
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23
Fax: (38044) 528 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

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

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

NEWS 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Makhnenko V. I., Velikoivanenko E. A., Oleinik O. I. Risk-analysis as a means of formalization of taking decision about a non-scheduled repair of welded structures 5

Poznyakov V. D. Increase in resistance against delayed fracture of welded joints of cast hardening steels 11

Ryabtsev I. I. Calculated-experimental estimation of effectiveness of high-alloy deposited metal alloying by phosphorus 18

Kuzmin S. V., Chuvichilov V. A., Lysak V. I. Specifics of plastic deformation of near-weld metal in explosion welding by scheme of a double-sided symmetric cladding 23

Tsybulkin G. A. Correction of trajectory of a manipulation robot movement with account for additional measurements 28

INDUSTRIAL

Garf E. F., Snisarenko V. V. Development and application of welded structures of tubes 32

Kozulin S. M., Lychko I. I., Podyma G. S. Electroslag cladding of shaft-gear teeth of a rotating kiln 38

Zagornikov V. I. Technique of repair of blades, made from titanium alloy VT3-1, using EBW 42

Levchenko O. G., Levchuk V. K. Safe level of electromagnetic field intensity in resistance welding 46

BRIEF INFORMATION

Dobrushin L. D., Petushkov V. G., Bryzgalin A. G. Application of explosion energy for treatment of welded joints of decomposers and mixers of Nikolaev aluminous plant 56

Inventions of countries throughout the world 57

Review of foreign journals 60

New books 62

NEWS

Movchan B. A. is 80 63

Mozzhukhin A. A. is 70 64

INFORMATION 65

УДК 621.791.01

РИСК-АНАЛИЗ КАК СРЕДСТВО ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О ВНЕПЛАНОВОМ РЕМОНТЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
О. И. ОЛЕЙНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена идеология формализации принятия решения относительно объема и срока ремонта по данным технической диагностики сварных конструкций на основе прогнозирования вероятности отказа обнаруженных дефектов на предстоящий период эксплуатации в сочетании с хорошо развитыми в смежных областях деятельности средствами риск-анализа.

Ключевые слова: риск-анализ, техническая диагностика, обнаруженные дефекты, вероятность отказа

В настоящее время для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных конструкций все более широкое распространение получает концепция, основанная на «прогнозировании и предупреждении» вместо используемой старой концепции «обнаружение и устранение».

Согласно новой концепции прогнозирование ресурса безопасной эксплуатации осуществляется на основе соответствующей информации мониторинга нагруженности, результатов технической диагностики состояния конструкции при наличии геометрических дефектов (особенно несплошностей), а также данных о деградации механических свойств, ответственных за сопротивление различным видам разрушения, которые связаны с условиями эксплуатации. С этой целью используют соответствующие расчетные коды (алгоритмы), основанные на современных достижениях механики деформирования, разрушения, вычислительной математики и компьютерной техники.

Для обеспечения надежности расчетной оценки прогноза используется система коэффициентов безопасности по нагруженности конструкции, а также характеристикам материала, определяющим сопротивление разрушению, с помощью которой стремятся компенсировать погрешности результатов измерений, полученных при технической диагностике, вероятные колебания нагрузки и свойств материала сопротивляться разрушению. В последнее десятилетие достаточно широко известны применяемые для этих целей подходы, основанные на теории вероятности, а именно, когда на основе заданных законов случайно меняющихся характеристик (нагрузки, измеренных геометрических размеров дефектов, степени деградации сопротивления материала тому или иному виду

разрушения определяется вероятность отказа — нарушение целостности), после чего принимается решение относительно дальнейшей безопасной эксплуатации конструкции. Чаще всего принятие соответствующего решения основано на заданных допускаемых нормами вероятностях отказа для соответствующих конструкций в конкретных условиях эксплуатации [1]. Создание нормативной базы является достаточно трудоемкой и ответственной работой. Тем не менее, такие разработки известны не только в областях промышленности, где действуют весьма высокие требования надежности (типа авиастроение), но и в гражданском строительстве [2–4], трубопроводном транспорте [5, 6] и др. Естественно, расчет вероятности отказа связан с большим объемом вычислений, чем при детерминированном расчете сохранения целостности. Однако при современном уровне развития вычислительной техники этот недостаток не является существенным. В то же время благодаря вероятностному подходу можно при формализации решений использовать хорошо развитые в смежных областях деятельности (например, в банковской сфере) методы риск-анализа, а также другие методы и таким образом максимально исключить субъективизм в вопросах принятия решений по предупреждению аварийных ситуаций в течение прогнозируемого срока эксплуатации конструкций.

Рассмотрим этот вопрос более конкретно. Пусть обследуемый объект имеет $n = 1, 2, \dots, n, \dots, N$ независимых дефектов, по каждому из которых определена вероятность отказа $P_1, P_2, \dots, P_n, \dots, P_N$ на прогнозируемый период τ . При этом все $P_n < 1$, однако, можно выделить несколько значений P_1, P_2, \dots, P_k , для которых условие $P_n \ll 1$ не выполняется.

В этом случае вероятность $P_N(\tau)$ того, что, по крайней мере, за прогнозируемый период τ про-

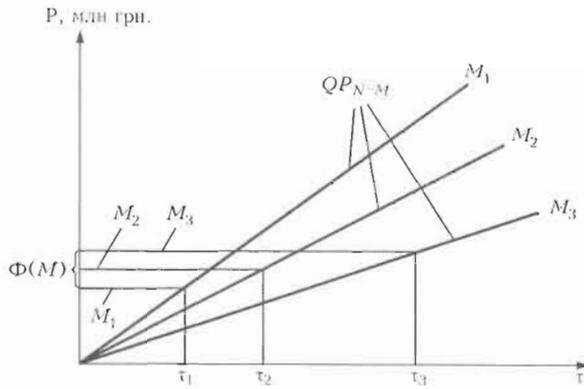


Рис. 1. Диаграмма риск-анализа, связывающая вероятные расходы на ремонт $QP_{N-M}(\tau)$ с объемом M , стоимостью отремонтированных дефектов $\Phi(M)$ в зависимости от времени τ до следующего обследования объекта: $M_1 < M_2 < M_3$; P — финансовые расходы

изойдет отказ по одному из дефектов определяется известной зависимостью

$$P_N(\tau) = 1 - \left[\prod_{n=1}^k (1 - P_n) \right] \exp \left(- \sum_{n=1}^N P_n \right) \quad (1)$$

где $\prod_{n=1}^k (1 - P_n)$ — оператор произведения величин $(1 - P_n)$, $n = 1, 2, \dots, k$.

При конкретных значениях $P_n(\tau)$ из (1) можно оценить вклад каждого из N дефектов в вероятность $P_N(\tau)$.

Рассмотрим только случай финансовых потерь, связанных с отказом для данного объекта. Обозначим через Q расходы на устранение последствий отказа для данного объекта, а через $(q_n + q_0)$ — расходы на устранение (ремонт) n -го дефекта q_n , где q_0 — расходы на ремонт, не зависящие от особенностей дефекта, их количества и других факторов, т. е. стоимость объема M ремонта дефектов выражается суммой

$$\Phi(M) = q_0 + \sum_{n=1}^M q_n \quad (2)$$

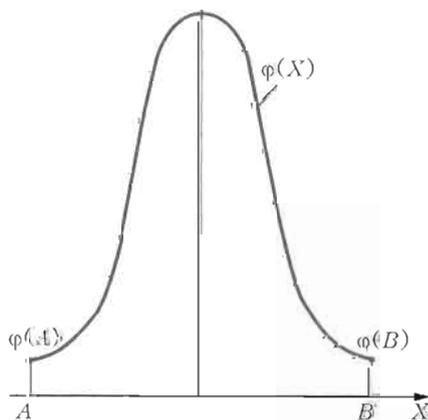


Рис. 2. Плотность распределения значений X

Поскольку риск финансовых потерь, связанных с устранением последствий появления дефектов, можно представить как произведение $QP_{N-M}(\tau)$, то сравнение $\Phi(M)$ с $QP_{N-M}(\tau)$ определяет необходимость ремонта и его объема M на время τ прогноза эксплуатации

$$\Phi(M) = QP_{N-M}(\tau) \quad (3)$$

На рис. 1 представлена диаграмма риск-анализа финансовых потерь, связывающая время эксплуатации определенного объекта до очередного обследования τ с количеством N обнаруженных дефектов, их качеством через $P_n(\tau)$, расходами Q на устранение последствий отказа и ремонт q_0 , q_n и объемом M устраненных с помощью ремонта дефектов.

Ключевым моментом в реализации рассматриваемой схемы риск-анализа является определение $P_n(\tau)$ для обнаруженных дефектов.

Поскольку экспериментально решить задачу нереально, то в современных условиях для этих целей используют численные методы, основанные на соответствующих детерминированных критериях разрушения и, как указывалось выше, на основе экспериментально наблюдаемых разбросов (вариации) значений нагрузки, геометрических размеров дефектов и параметров сопротивления материала характерным видам разрушения.

Критерий разрушения для данного конкретного дефекта можно представить в виде

$$Y(X_1, X_2, \dots, X_n, Z_1, Z_2, \dots, Z_m) = 0, \quad (4)$$

где X_1, X_2, \dots, X_n — параметры, имеющие достаточно заметную стохастичность; Z_1, Z_2, \dots, Z_m — параметры, вариации которых незначительны, т. е. они считаются детерминированными.

Для параметров X_1, X_2, \dots, X_n известны средние значения $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$, а также нормированная плотность распределения $\varphi_{X_1}, \varphi_{X_2}, \dots, \varphi_{X_n}$. Чаще всего для этих целей используется усеченный нормальный закон распределения с учетом нормирования (рис. 2) в виде

$$\varphi_X = 0, \quad \bar{\varphi}_X = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_X} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}_X}{\xi_X} \right)^2 \right] \right], \quad (5)$$

где $S = \int_A^B \varphi_X dX$; ξ_X — стандартное отклонение значений X .

Вероятность $P(Y < 0)$, где $Y < 0$ из (4), определяется методом Монте-Карло [7], т. е. формируется выборка значений $Y(X, Z)$ по (4) для различных сочетаний значений параметра X , определяемых по закону случайных чисел. Для каж-

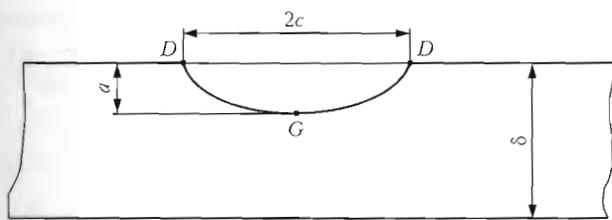


Рис. 3. Полуэллиптическая трещина размером $2c \times a$, расположенная в стенке трубы

Для заданного значения X составляется таблица соответствия между случайными числами Z в пределах $0 \leq Z \leq 1$ и значениями X в пределах $A \leq X \leq B$. При этом используется правило, что случайному числу Z соответствует значение X , вероятность которого не меньше значения Z , а именно,

$$Z = \int_A^X \bar{\varphi}_X dX. \quad (6)$$

Таким образом, если известен закон нормированной плотности распределения значений X в интервале $A \leq X \leq B$, то уравнение (6) позволяет однозначно связать каждое значение X со случайным числом Z в диапазоне значений $0 \leq Z \leq 1$.

Здесь следует отметить, что для таких характеристик материала, как критические значения коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} , определяющих сопротивление хрупкому разрушению, стохастичность часто описывают законом Вейбулла, т. е. вместо (6) получим

$$Z = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_{IC} - K_0}{K_d - K_0} \right)^\eta \right], \quad (7)$$

где K_0 , K_d , η — параметры распределения закона Вейбулла, определяемые обычно по результатам 12–15 экспериментов [8], когда известны среднее значение K_{IC}^m , для которого $Z = 0,5$, а также нижняя K_{IC}^n и верхняя K_{IC}^B границы значений этой величины, для которых соответственно $Z = 0,05$ и $0,95$.

Из изложенного выше следует, что ключевым моментом являются детерминированные критерии разрушения (4). Применительно к сварным соединениям (узлам) этот вопрос достаточно подробно изложен в современной литературе, в частности, в работе [9].

В качестве примера рассмотрим участок трубопровода диаметром $d = 1420$ мм с толщиной стенки $\delta = 19$ мм, в котором были обнаружены дефекты двух типов:

- поверхностные трещины размером $2c_j \times a_j$ (рис. 3) вдоль осевого шва трубы варианты $j = 1, 2, 3$ и вдоль кольцевого шва $j = 4, 5$ (табл. 1);
- локальные утонения (рис. 4) размером s_j (вдоль оси трубы) и c_j (по окружности) при минимальной

Таблица 1. Геометрические размеры (мм) трещины

j	\bar{a}	\bar{c}	ξ_a	A_a	ξ_c	A_c	Нагрузка, МПа		
							$\bar{\sigma}_m$	ξ_σ	A_σ
1	1,6	20	1	0,6	2,0	16,0	235	10	225
2	1,6	50	1	0,6	4,0	46,0	235	10	225
3	1,6	200	1	0,6	4,0	196,0	235	10	225
4	1,6	200	1	0,6	4,0	196,0	117,5	10	107,5
5	1,6	600	1	0,6	4,0	596,0	117,5	10	107,5

Таблица 2. Геометрические размеры (мм) утонения

j	\bar{s}	\bar{c}	$\delta_{из}$	ξ_s	A_s	$\xi_{\delta_{из}}$	$A_{\delta_{из}}$	ξ_c	A_c
6	40	500	11,5	2,0	20	0,5	10,5	5,0	250
7	40	500	12,0	2,0	20	0,5	11,0	5,0	250
8	100	500	12,0	2,0	50	0,5	11,0	5,0	250
9	150	500	15,5	2,0	75	0,5	14,5	5,0	250
10	150	500	16,0	2,0	75	0,5	15,0	5,0	250

измеренной толщине $\delta_{из}^{(j)}$, соответствующие геометрические размеры дефектов указаны в табл. 2 для $j = 6...10$.

Дефекты работают под напряжением в коррозионной среде. Скорость коррозионного роста трещин при статической нагрузке задана параметрами соответствующей диаграммы статического коррозионного растрескивания — пороговым значением коэффициента интенсивности напряжений K_{ISCC} и скорости распространения трещины W_{max} (рис. 5). Стохастичность этих параметров не вызывает сомнений. Для K_{ISCC} используется распределение Вейбулла при $K_0 = 2$ МПа·м^{1/2}, $K_d = 21,7$ МПа·м^{1/2}, $\eta = 4$. Соответственно $K_{ISCC} = 20$ МПа·м^{1/2}. Для W_{max} усеченный нормальный закон (5) при $\bar{W}_{max} = 4,4$ мм/год, $\xi_W = 0,4$ мм/год, $A_W = 4,0$ мм/год, $\bar{B}_W = 4,8$ мм/год.

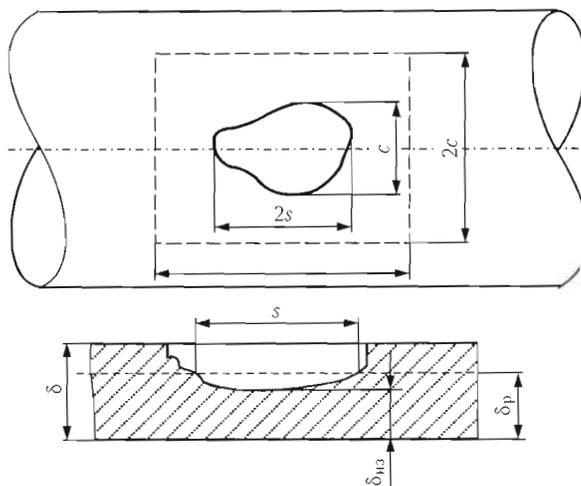


Рис. 4. Локальное утонение $c \times s$ в стенке трубы ($2c \times 2s$ — зона контроля)

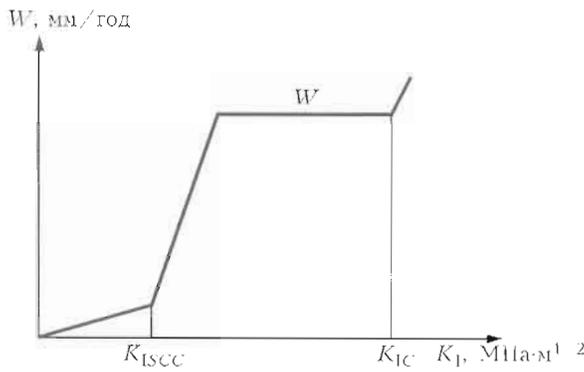


Рис. 5. Диаграмма статического коррозионного растрескивания

Значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в зоне трещины определяются через размеры трещины a , c и действующие нормально к

Таблица 3. Соответствие между случайными значениями Z и K_{ISCC} , K_{IC} для рассматриваемого материала трубы

Z	K_{ISCC} , МПа·м ^{1/2}	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
0,8095667	24,35589	119,5234
0,8579873	25,28505	123,6599
0,4322595	19,08786	96,07135
0,3141314	17,43731	88,72343
0,050000	11,37522	61,73637
0,8706391	25,55849	124,8771
0,09593023	13,10156	69,42165
0,2225395	15,95394	82,11980
0,8249169	24,63388	120,7610
0,7943811	24,09273	118,3519
0,9500000	27,91743	135,3786
0,05106258	11,42594	61,96219
0,9500000	27,91743	135,3786
0,9500000	27,91743	135,3786
0,8305760	24,73983	121,2327
0,1832684	15,21426	78,82693
0,1558958	14,63995	76,27024
0,1917861	15,38211	79,57417
0,6983891	22,61277	111,7635
0,3617200	18,12585	91,78867
0,9038577	26,37022	128,4908
0,7445055	23,29188	114,7867
0,4923106	19,87538	99,57719
0,2371828	16,21029	83,26105
0,3804549	18,38694	92,95100
0,2091601	15,71121	81,03925
0,2628518	16,63960	85,17223
0,6154635	21,47819	106,7125
0,4542154	19,37802	97,36305

плоскости трещины мембранные σ_m и изгибные σ_b напряжения [10]. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений по [11] следующий:

$$K_{ij}(j) = \frac{\sqrt{\pi a}}{Q} F_j(\sigma_m + H_j \sigma_b), \quad (j = D, G), \quad (8)$$

где $Q = 1 + 1,464(a/c)^{1,65}$;

$$F_j = [M_1 + M_2(a/\delta)^2 + M_3(a/\delta)^4] g_j; \quad M_1 = 1,11 + 0,09(alc);$$

$$M_2 = -0,54 - \frac{0,89}{0,2 + a/c};$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + a/c + 14(1 - a/c)^{24}};$$

$$g_G = 1, \quad g_D = [1 + (0,1 + 0,35)(a/\delta)^2] \sqrt{a/c};$$

$$H_G = 1 - (1,22 + 0,12 a/c) a/\delta +$$

$$+ [0,55 - 1,05(a/c)^{0,75} + 0,47(a/c)^{1,5}] (a/\delta)^2;$$

$$H_D = 1 - 0,34(a/\delta) - 0,11(a/c)(a/\delta).$$

По этим зависимостям рассчитываются значения K_I в вершинах трещины (точки D и G на рис. 3), а по диаграмме, представленной на рис. 5, определяем скорость роста размеров трещины da/dt и dc/dt .

Путем последовательного прослеживания во времени находим размеры трещин $a(\tau)$ и $c(\tau)$. Критическим состоянием считается такое, при котором возникают условия для спонтанного роста трещины размером $a(\tau) \times 2c(\tau)$.

Условие спонтанного роста трещины определяется достаточно известным критерием хрупко-вязкого разрушения [9]:

$$K_r(L_r) = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)], \quad (9)$$

где $K_r = K_I(\tau)/K_{IC}$ характеризует риск хрупкого разрушения; $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$ — риск чисто вязкого разрушения в зоне трещины по механизму пластической неустойчивости; σ_T — предел текучести материала; σ_{ref} — напряжения, зависящие от номинальных мембранных σ_m и изгибных σ_b напряжений [11].

Расчет σ_{ref} выполняется по [11] для трещин вдоль образующей

$$\sigma_{ref} = \frac{1}{3} \left\{ \sigma_b + [f(\sigma_b)^2 + 9(M_s \sigma_m)^2]^{0,5} \right\}, \quad (10)$$

где

$$f = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0,75} \alpha^3, \quad \alpha = \frac{a/\delta}{1 + \delta/c};$$

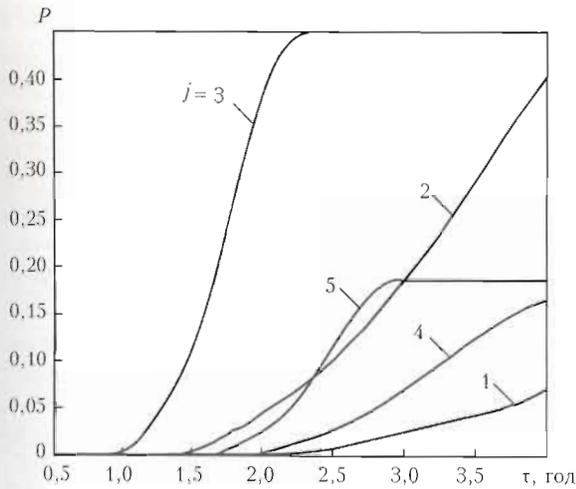


Рис. 6. Вероятность отказа во времени эксплуатации для дефектов типа трещины $j = 1...5$ (соответственно $c = 20...600$ мм) при $a = 1,6$ мм

$$M_s = \frac{1 - 0,85a/\delta/M_\tau}{1 - 0,85a/\delta}$$

$$M_\tau = \frac{1,0005 + 0,49001\lambda + 0,32409\lambda^2}{1,0 + 0,50144\lambda - 0,01106\lambda^2}, \quad \lambda = \frac{1,818a}{\sqrt{\delta d/2}}$$

Расчет σ_{ref} по [11] для трещин вдоль окружности при $\sigma_b = 0$ составляет

$$\sigma_{ref} = \sigma_m Z, \quad (11)$$

где

$$Z = \left[\frac{2\bar{\alpha}}{\pi} - \frac{(\bar{\alpha}/\delta)\theta}{\pi} \left[\frac{2 - 2(2\delta/d) + 2a/d}{2 - 2\delta/d} \right] \right]^{-1}$$

$$\bar{\alpha} = \arccos A \sin \theta; \quad \theta = \frac{2\pi c}{4d}$$

$$A = X \frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + X\tau) + (1 - \tau + X\tau)^2}{2[1 + (2 - \tau)(1 - \tau)]}$$

$$X = \frac{a}{\delta}; \quad \tau = \frac{2\delta}{d}$$

Здесь стохастичность проявляется как в напряжениях $\bar{\sigma}_m$ (см. табл. 1) и σ_b , так и в характеристиках материала K_{IC} и σ_τ . Для определения σ_τ используется нормальный усеченный закон распределения плотности вероятности (5) при $\bar{\sigma}_\tau = 350$ МПа, $\xi_\sigma = 20$ МПа, $A_{\sigma_\tau} = 320$ МПа, $B_{\sigma_\tau} = 380$ МПа. Для определения K_{IC} используется распределение Вейбулла (7) при $K_0 = 20$ МПа·м^{1/2}, $\eta = 4$, $K_d = 107,7$ МПа·м^{1/2}. Соответственно среднее значение $\bar{K}_{IC} = 100$ МПа·м^{1/2}. В табл. 3 приведены соответствия между случайными значениями Z и K_{ISCC} , K_{IC} . Результаты расчета вероятности отказа для трещин $j = 1...5$ по табл. 1 в зависимости от времени эксплуатации τ при-

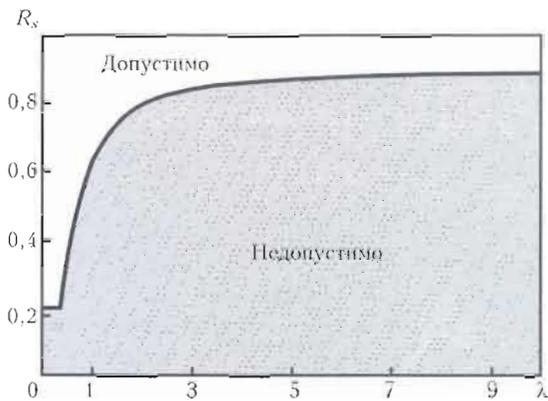


Рис. 7. Условие допустимости дефектов типа локальное утонение по размеру s

ведены на рис. 6. Видно, что после определенного инкубационного периода, когда рост трещины определяется случайным нарушением условия $K_{IC} > K_{ISCC}$ на шагах прослеживания, наступает период достаточно интенсивного их роста вплоть до превращения трещины в сквозную (когда $a \approx \delta$), после чего вероятность отказа возрастает медленно, поскольку определяется уже увеличенным размером $2c$.

Для второго типа дефектов, т. е. для локальных утонений ($j = 6...10$) (см. табл. 2), критерий отказа согласно [12] можно записать в виде

$$\delta_{из}^{min} - v_c \tau - [\delta_p] R_{s,c} = 0, \quad (12)$$

где $\delta_{из}^{min}$ — минимальная измеренная толщина трубы; v_c — скорость поверхностной коррозии; δ_p — допускаемая (расчетная) толщина бездефектной трубы из условий прочности; τ — прогнозируемое время эксплуатации; $R_{s,c}$ по [12] (см. также [9]) приведено на рис. 7

$$R_{s,c} = 0,2 \text{ при } \lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{d\delta_p}} \leq 0,3475 \text{ и } c/d \leq 0,348;$$

$$R_{s,c} = f(\lambda) \text{ по рис. 7 при } \lambda > 0,3475;$$

$$R_{s,c} = \frac{10,51(c/d)^2 - 0,73539}{13,838(c/d)^2 + 1} \text{ при } c/d > 0,3475.$$

В этом критерии стохастичность связана с геометрическими размерами зоны утонения s , c , $\delta_{из}^{min}$, а также со скоростью коррозии v_c . Для определения этих величин можно использовать усеченный нормальный закон распределения (5). В табл. 1 и 2 приведены соответствующие характеристики такого распределения для указанных параметров, а на рис. 8 показана кинетика изменения вероятности отказов P_j ($j = 6...10$), рассчитанная при детерминированных данных относительно $d = 1420$ мм, $\delta_p = 16$ мм. Из этих данных следует, что для утонений $j = 6, 7$ отказ определяется разрушением вдоль окружности, а для

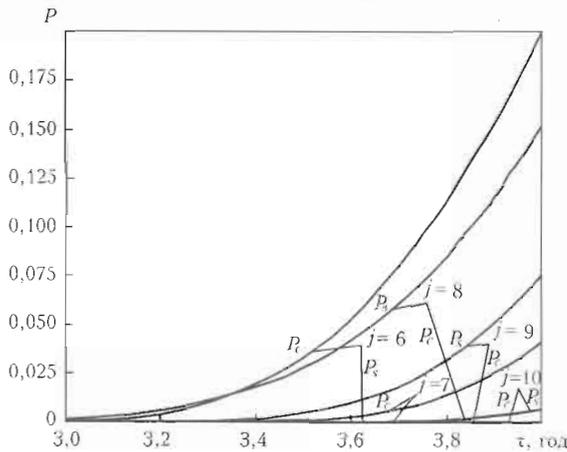


Рис. 8. Вероятность отказа во времени эксплуатации для дефектов утонения $j = 6 \dots 10$ по направлению c — (P_c) и s — (P_s)

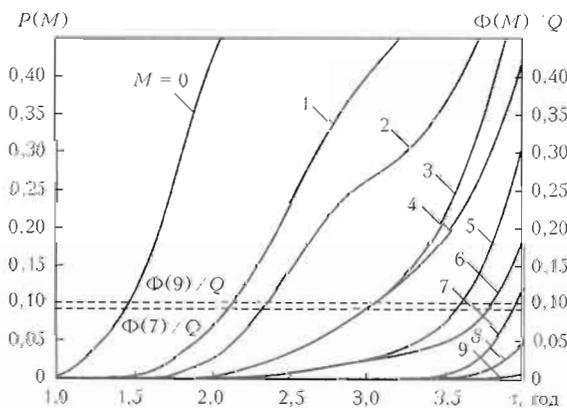


Рис. 9. Диаграмма риск-анализа для обоснования необходимого объема ремонта ($M = 1 \dots 9$ — см. объяснения в тексте)

остальных ($j = 8 \dots 10$) — разрушением вдоль образующей. При этом основным фактором является уменьшение со временем значений $\delta_{из}$ за счет коррозии.

С помощью данных рис. 6 и 8 по уравнению (1) можно рассчитать вероятность отказа хотя бы по одному из рассмотренных дефектов $j = 1 \dots 10$ (кривая $P(M = 0)$ на рис. 9), что соответствует $M = 0$ устраняемых (отремонтированных) дефектов. Из рисунка видно, что при этом вероятность отказа уже через полтора года эксплуатации составляет более 0,12, а через 2 года более 0,42. На этом рисунке кривые относительной стоимости ремонта $\Phi(M)/Q$ показывают, что практически через два года эксплуатации необходимость ремонта является бесспорной и по экономическим соображениям, т. е. риск-анализ показывает, что без

ремонта можно эксплуатировать данный участок не более полутора лет.

Кривые $P(M)$ на рис. 9 (при $M = 1, 2, \dots, 9$) дают представление о риске отказа при условии устранения объема M наиболее опасных дефектов, т. е. $M = 1$ соответствует удалению дефекта $j = 3$ (см. табл. 1, 2), $M = 2$ — дополнительно устранен дефект $j = 2$, $M = 3$ — $j = 5$, $M = 4$ — $j = 6$, $M = 5$ — $j = 4$, $M = 6$ — $j = 8$, $M = 7$ — $j = 1$, $M = 8$ — $j = 9$, $M = 9$ — $j = 7$.

Из рисунка видно, что в случае предстоящего четырехлетнего периода эксплуатации до следующей диагностики экономически выгодным является устранение семи наиболее опасных дефектов (кривая $M = 7$).

Таким образом, на основании рассмотренного примера можно сделать вывод, что построение диаграмм риск-анализа для обнаруженных дефектов в сварных конструкциях существенно формализует процесс принятия решения относительно необходимости предстоящего ремонта, а также его объема.

1. Болотин В. В. Методы теории вероятности и надежности в расчетах сооружений. — М.: Стройиздат, 1982. — 350 с.
2. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1986. — 190 с.
3. Рожаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М.: Стройиздат, 1978. — 240 с.
4. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — Киев: УкрНИИ-проектстальконструкция, 2000. — 216 с.
5. ISO SD 16708. Petroleum and natural gas industrial. Pipeline transportation systems. Reliability. Based limit state methods. — Filed Oct. 2000.
6. Caley T., Gonzalez I. L., Hallen I. M. A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects // Intern. J. Pressure Vessels and Piping. — 2002. — № 1. — P. 3–6.
7. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo method // Amer. Statist. Assoc. — 1949. — 44, № 248. — P. 335–341.
8. Прогнозирование трещиностойкости корпусной реакторной стали на основе концепции «Master curve» и вероятностной модели / Б. Э. Марголин, В. А. Швецова, А. Г. Гуленко и др. // Пробл. прочности. — 2003. — № 1. — С. 5–21.
9. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
10. МР 125-01-90. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. — Киев, 1990. — 55 с.
11. Zahoor A. Ductile Fracture handbook. — Palo Alto (CA): Electric Power Institute, 1989. — 259 p.
12. Fitness-for-service: Recommended practice 579. — Washington: American Petroleum Institute, 2000. — 625 p.

The ideology of formalising decision taking on the scope and terms of repair of welded structures by using data of their technical diagnostics is considered. It is based on prediction of failure probability due to the detected defects for the forthcoming period of operation, allowing for the probability approaches in formalising the decisions by the risk analysis methods.

Поступила в редакцию 19.09.2007



УДК 621.791.052:539.4

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЗАМЕДЛЕННОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТЫХ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ

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

Приведены результаты оценки сопротивляемости замедленному разрушению металла ЗТВ сварных соединений литой стали типа 35Л в зависимости от насыщенности швов диффузионным водородом, погонной энергии сварки и температуры предварительного подогрева. Представлены данные о влиянии техники сварки на формирование напряженного состояния жесткозакрепленных соединений металла больших толщин и восстановление металлоконструкций.

Ключевые слова: углеродистая литая сталь, холодные трещины, предварительный подогрев, диффузионный водород, сварочные напряжения, технология сварки, восстановление металлоконструкций

В настоящее время в Украине и других странах СНГ эксплуатируются инженерные сооружения и механизмы, исчерпавшие предназначенный срок службы или близкие к этому состоянию. В большинстве случаев они являются уникальными. Масса некоторых из них превышает 100 т, а толщина металла — 80 мм. Среди них базовые узлы дробилок, гидравлических и механических пресов — технологического оборудования, эксплуатируемого на горно-обогатительных и металлургических комбинатах, а также на машиностроительных заводах. Они изготовлены из литых сталей типа 25Л и 35Л с содержанием углерода 0,25...0,40 %.

Как показывает опыт, в процессе длительной эксплуатации в металле, из которого изготовлены указанные конструкции, накапливаются микро- и макроповреждения. Когда трещины достигают критических размеров, возникает потребность в ремонте изделия. Одним из наиболее простых способов восстановления целостности и геометрических размеров металлоконструкций является сварка. Этот процесс можно выполнять непосредственно на месте работы оборудования (оборудование, как правило, не демонтируется) в короткий срок и при относительно небольших материальных затратах.

При восстановлении металлоконструкций, как правило, используют стандартные технологии сварки, разработанные для изготовления новых изделий. Однако они не учитывают ряд особенностей, характерных для ремонта — высокую жесткость закрепления сварных соединений, ограниченные возможности относительно выбора способов удаления дефектов, подготовки кромок и выполнения сварки, т. е. факторов, существенно

влияющих на свойства свариваемых узлов [1–4]. Указанная специфика сварки при ремонте привела авторов работы [5] к следующему выводу: выбор технологии сварки для восстановления металлоконструкций требует принципиально иного подхода, чем для первоначальной сварки. Одной из основных задач, которые следует решать в этом случае, является необходимость изыскания процессов, которые бы обеспечили низкий уровень остаточных напряжений в сварных узлах. Это необходимо не только для того, чтобы исключить возможность образования трещин в соединении на стадии выполнения сварочных работ, но и для увеличения работоспособности изделия при дальнейшей эксплуатации.

Повышенное содержание углерода в литых сталях 25Л и 35Л уже само по себе предопределяет значительные трудности при их сварке. Обусловлены они возможностью формирования в металле ЗТВ сварных соединений закалочной мартенситной структуры, которая, как известно [6], резко снижает сопротивляемость металла образованию холодных трещин. Чтобы она не образовывалась, сварку соединений рекомендуется выполнять с предварительным подогревом до температур 200...300 °С. Однако, учитывая сложную конфигурацию и большую толщину металла, из которого изготовлены конструкции, а также тот факт, что во время ремонта сварочные работы, как правило, выполняются в стесненном пространстве, реализовать такую технологическую операцию в полной мере на практике сложно.

В связи с этим возникла необходимость в проведении работ, направленных на изыскание новых, более эффективных технологических решений, обуславливающих повышение сопротивляемости замедленному разрушению сварных соединений из сталей, содержащих более 0,25 % углерода, которое выражено в допустимости снижения температуры предварительного подогрева до 80...100 °С. Для решения поставленной задачи

© В. Д. Позняков, 2008

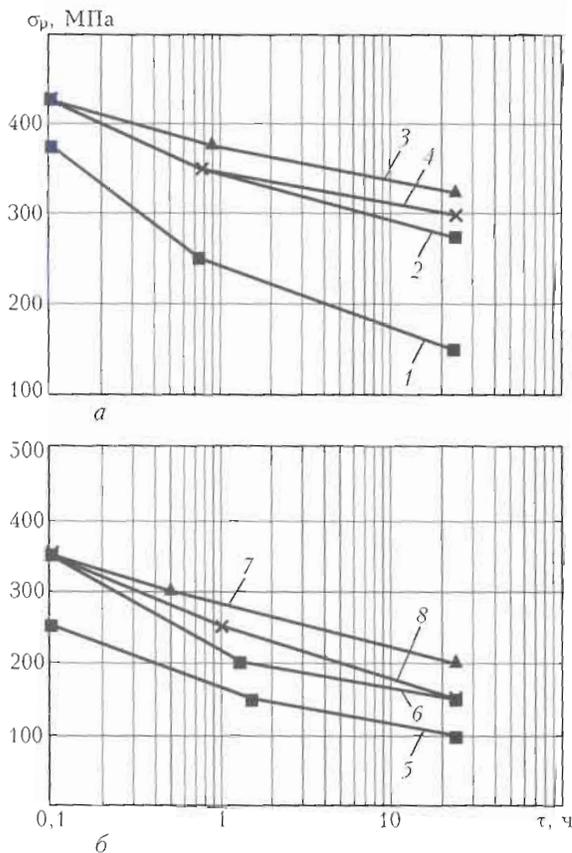


Рис. 1. Сопротивляемость замедленному разрушению металла ЗТВ стали 35Л при содержании диффузионного водорода в наплавленном металле 8,0 (а) и 15 мл/100 г (б) в зависимости от температуры предварительного подогрева и погонной энергии сварки: 1, 4, 5, 8 — $T_{п} = 20^\circ\text{C}$; 2, 6 — 60°C ; 3, 7 — 100°C ; 1-3, 5-7 — $Q_{св} = 10$; 4, 8 — 20 кДж/см

необходимо было оценить влияние погонной энергии сварки, температуры предварительного подогрева, уровня насыщенности швов водородом на сопротивляемость замедленному разрушению металла ЗТВ соединений стали с повышенным содержанием углерода, а также определить влияние технологических приемов сварки на формирование остаточных напряжений в сварных соединениях металла больших толщин.

Сопротивляемость металла ЗТВ замедленному разрушению изучали с использованием общеизвестного метода «Имплант» [6]. Для проведения испытаний из станины дробилки, которая свыше 12 лет эксплуатировалась на одном из горно-обогатительных комбинатов, были отобраны образцы металла, которые имели следующий химический состав, мас. %: 0,42 С; 0,41 Si; 0,67 Mn; 0,34 Cr; 0,36 Ni; 0,025 S; 0,035 P.

Наплавку связующих швов осуществляли электродами марки АНП-10 диаметром 4,0 мм на режимах, которые обеспечивали погонную энергию сварки в диапазоне 10...21 кДж/см. Скорость охлаждения образцов регулировали путем изменения температуры предварительного подогрева от 20 до 100 °С. Концентрацию диффузного водо-

рода в наплавленном металле оценивали хромографическим способом и изменяли от 7,0 до 15,0 мл/100 г путем уменьшения температуры и продолжительности прокали электродов. Обобщенные данные, полученные по результатам проведенных исследований, представлены на рис. 1.

Наиболее высокая сопротивляемость замедленному разрушению наблюдается у образцов, сварку которых выполняли с предварительным подогревом до температур 80...100 °С на режимах, обеспечивающих $Q_{св} \approx 10$ кДж/см, при содержании диффузионного водорода в наплавленном металле до 8,0 мл/100 г. Критические напряжения, при которых указанные образцы не разрушались на протяжении 24 ч, составляли $\sigma_{кр} \approx 325$ МПа. Анализ термокинетической диаграммы распада аустенита стали 35 [7], близкой по химическому составу и механическим свойствам к стали 35Л, свидетельствует, что при данных условиях охлаждения сварных соединений ($w_{6/5} \leq 10$ °С/с) в металле ЗТВ образуется структура, состоящая из бейнита и перлита. При более интенсивном их охлаждении, характерном для сварки без подогрева ($w_{6/5} \approx 20$ °С/с) и с подогревом до 60 °С ($w_{6/5} \approx 12$ °С/с), в металле ЗТВ формируется преимущественно мартенситная структура, которая имеет низкую сопротивляемость образованию холодных трещин. При скорости охлаждения 12 °С/с она почти на 50 % состоит из мартенсита. Дальнейшее увеличение интенсивности остывания образцов до $w_{6/5} \geq 20$ °С/с способствует тому, что количество мартенсита в металле ЗТВ возрастает до 80 %. По нашему мнению, этим объясняется тот факт, что при таких условиях сварки даже в том случае, когда концентрация диффузионного водорода в наплавленном металле небольшая ($\approx 7,0$ мл/100 г), трещины в металле ЗТВ стали 35Л образуются при напряжениях, не превышающих 150 МПа. При ограниченном содержании диффузионного водорода в наплавленном металле (до 8,0 мл/100 г) высокую сопротивляемость замедленному разрушению ($\sigma_{кр} \approx 300$ МПа) также имеют образцы, сварку которых выполняли на повышенных режимах ($Q_{св} \approx 20$ кДж/см). Но, как известно [8], увеличение погонной энергии сварки способствует возрастанию уровня остаточных напряжений в сварных соединениях, поэтому данный технологический вариант, по-видимому, не позволит избежать образования в них холодных трещин.

Значительное влияние на замедленное разрушение металла ЗТВ сварных соединений стали 35Л оказывает диффузионный водород. Увеличение его концентрации в наплавленном металле от 8 до 15 мл/100 г приводит к существенному снижению способности металла сопротивляться образованию холодных трещин. Даже при сварке

на повышенных режимах ($Q_{св} \approx 20$ кДж/см) они могут образовываться при напряжениях, значение которых не превышает 150 МПа. Предварительный подогрев в этих случаях также малоэффективен. Нагрев образцов до температуры 100 °С позволил увеличить $\sigma_{кр}$ лишь до 200 МПа.

В целом выполненные исследования свидетельствуют, что для обеспечения высокой сопротивляемости сварных соединений сталей типа 35Л образованию холодных трещин необходимо снижать не только концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле, но и уровень напряжений в сварных соединениях.

Известно, что в жесткозакрепленных сварных соединениях с многослойными швами остаточные напряжения могут достигать предела текучести наплавленного металла. Это существенно больше тех нагрузок, которые металл 3ТВ стали 35Л способен воспринимать без разрушения. При таких обстоятельствах образования холодных трещин в сварных соединениях не избежать. В связи с этим проблеме формирования остаточных напряжений в сварных соединениях, влиянию на этот процесс разных технологических факторов и изысканию способов их регулирования посвящено достаточно много исследовательских работ. Известно также, что основной причиной образования деформаций и напряжений при сварке является неравномерное расширение и сужение разных участков соединения, которое происходит вследствие действия на металл сконцентрированного источника тепла [9, 10]. Поэтому задачи относительно уменьшения общего уровня остаточных напряжений в сварных соединениях могут решаться путем регулирования тепловложения или отвода тепла из зоны шва, условий нагрева и охлаждения металла, изменения технологических процессов сварки и др. [11, 12]. В данном случае представлялось целесообразным исследовать влияние техники выполнения сварки на формирование остаточных напряжений в соединениях металла больших толщин.

Исследования выполняли с использованием специальной технологической пробы, которая имитирует один из узлов толстостенных конструкций, где наиболее часто возникают трещины. Данная технологическая проба (рис. 2) представляет собой усиленное ребрами жесткости массивное стыковое соединение с V-образной разделкой кромок длиной 500 мм, шириной 400 мм. Жесткость соединения формируется в результате закрепления одного из его окончаний массивной выводной планкой и установкой двух ребер жесткости. Такие размеры и конструкция технологической пробы, во-первых, исключают угловую деформацию образца и влияние на ход исследований других непредвиденных факторов, а во-вторых, способствуют формированию в соединениях остаточных напряжений, близких к тем, которые об-

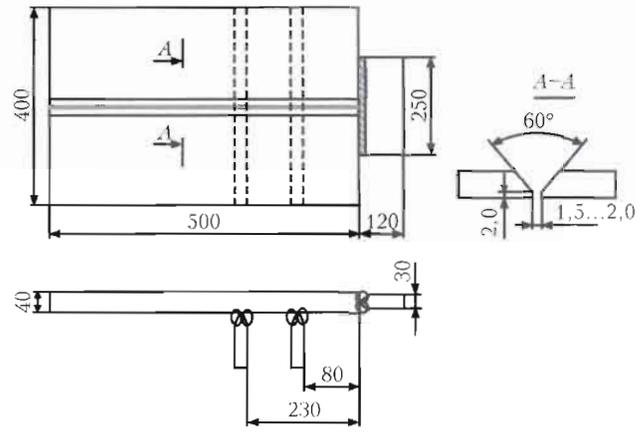


Рис. 2. Схематическое изображение технологической пробы

разуются при сварке жесткозакрепленных узлов изделия.

В качестве базовой технологии для исследований была принята ручная дуговая сварка как один из наиболее применяемых при ремонте способов соединения металла, а в качестве базовой стали — высокопрочная сталь марки 14ХГ2САФД, имеющая подобно стали 35Л высокую склонность к образованию холодных трещин. Использовали листовой прокат толщиной 40 мм следующего химического состава, мас. %: 0,13 С; 0,57 Si; 1,42 Mn; 0,44 Cr; 0,16 Ni; 0,39 Cu; 0,08 Al; 0,04 Ti; 0,01 Nb; 0,08 V, который имеет следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 635$ МПа; $\sigma_b = 784$ МПа; $\delta_5 = 17,8$ %; $\psi = 59,0$ %.

Сварку корневого слоя шва выполняли электродами FOX EV 50 диаметром 3,2 мм на следующем режиме: $I_{св} = 140...150$ А, $U_d = 24...25$ В, $v_{св} = 7,0...8,0$ м/ч. Для заполнения разделки использовали электроды марки АНП-10 диаметром 4,0 мм и следующие режимы сварки: $I_{св} = 160...170$ А, $U_d = 25...26$ В, $v_{св} = 9,0...10$ м/ч. Химический состав и механические свойства металла, наплавленного электродами АНП-10 и FOX EV 50, приведены в таблице. Перед сваркой электроды прокаливали в печи при температуре 430...450 °С в течение двух часов, что обеспечивало низкую (4,0...4,5 мл/100 г) концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле, содержание которого определяли хроматографическим методом [13]. После выполнения отдельных слоев шва (всего таких слоев в каждом соединении выполнено 14) образцы охлаждались до температуры окружающей среды, и только после этого возобновлялась сварка.

Исследовано четыре технологических варианта сварки. Сварку образца № 1 (базовый вариант) осуществляли традиционным способом на проход (рис. 3, а). Второй и третий образцы условно были разбиты на три блока, каждый из которых имел длину 165 мм. Сваривали эти блоки последова-



Химический состав и механические свойства металла, наплавленного электродами АНП-10 и FOX EV 50

Марка электрода	Химический состав, мас. %					Механические свойства (не менее)		
	C	Mn	Si	S	P	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCV_{+20} , Дж/см ²
АНП-10	0,11	1,8	0,5	0,020	≤ 0,023	760	18	120
FOX EV 50	0,07	1,1	0,5	0,009	0,012	590	30	220

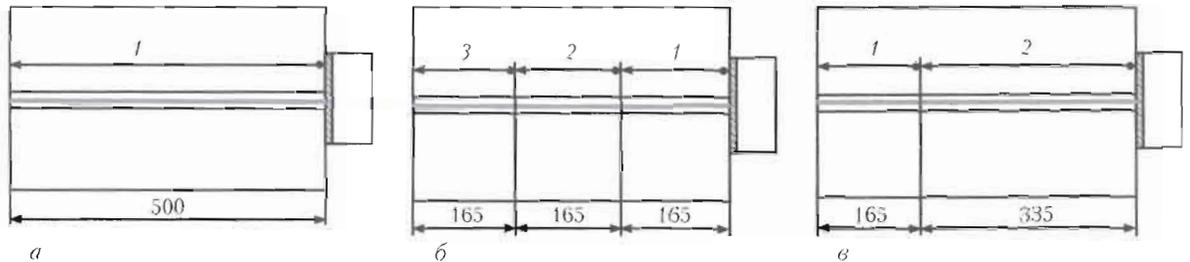


Рис. 3. Схема последовательности выполнения сварки технологических образцов (проб) № 1 (а), 2 и 3 (б), 4 (в)

тельно один за другим в направлении от жесткозакрепленной основы соединения к относительно свободной его вершине (рис. 3, б). Основное отличие между этими соединениями состояло в том, что образец № 3 выполняли с проковкой шва, а № 2 без нее. Образец № 4 условно был разбит на два блока длиной 335 и 165 мм, его сварку осуществляли в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, в.

Для каждого из приведенных технологических вариантов сварки было изготовлено по две партии технологических проб. Одну партию образцов использовали для оценки напряженного состояния сварных соединений, вторую — для оценки их сопротивляемости замедленному разрушению. Остаточные напряжения в сварных соединениях определяли в начале, в среднем сечении и в конце швов методом механической тензометрии. Для

этого на поверхности образцов готовили специальные розетки с базовым расстоянием между отверстиями 17 мм.

Исследования, результаты которых приведены на рис. 4, свидетельствуют о том, что напряженное состояние сварных соединений зависит от техники сварки и последовательности заварки блоков. Наиболее высокие поперечные и продольные напряжения ($\sigma_y = 500 \dots 590$ МПа, $\sigma_x = 750 \dots 760$ МПа) формируются в образцах, сварку которых выполняли напроход (образец № 1). В соединении № 3, сваренном блочным методом с послойной проковкой шва, они значительно меньше ($\sigma_y \leq 250$ МПа, $\sigma_x = 500 \dots 560$ МПа).

Довольно близкие по значению ($\sigma_y = 350 \dots 400$ МПа) поперечные напряжения зафиксированы в начале и в середине соединений № 2 и 4, но по длине образцов они распределены по-разному. В технологической пробе № 4, сварку которого выполняли в направлении от незакрепленного конца образца к жесткозакрепленной части соединения, поперечные напряжения вдоль шва распределены относительно равномерно. В том случае, когда последовательность заварки блоков была изменена и сварку начинали от жесткозакрепленного конца пробы (образец № 2), с противоположной, более свободной для перемещений стороны соединения, формируются напряжения не более 300 МПа. Продольные напряжения в таких соединениях ниже, чем в образце № 1, но также достаточно высоки и неравномерно распределены по длине образцов. Наиболее высокие напряжения ($\sigma_x = 630 \dots 680$ МПа) в технологической пробе № 4 сформировались в начале и в конце шва и несколько ниже ($\sigma_x \approx 550$ МПа) в средней его части. В образце № 2 продольные напряжения монотонно возрастают от 530 (начало шва) до 670 МПа в его конце. Такой характер распределения остаточных напряжений в указан-

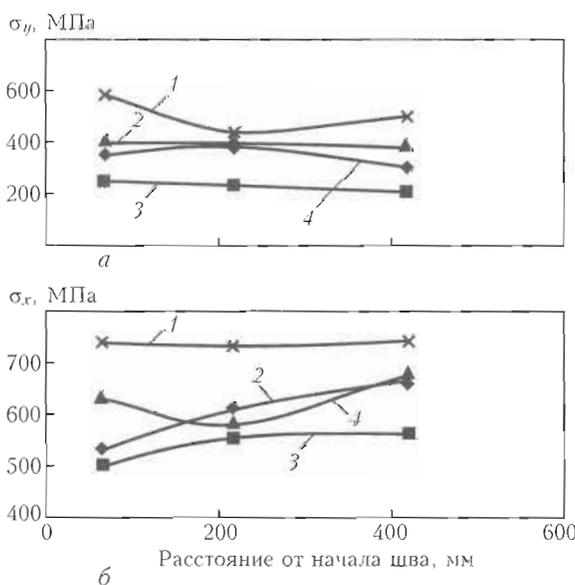


Рис. 4. Распределение поперечных (а) и продольных (б) напряжений в металле швов технологических проб № 1 (кривая 1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4)

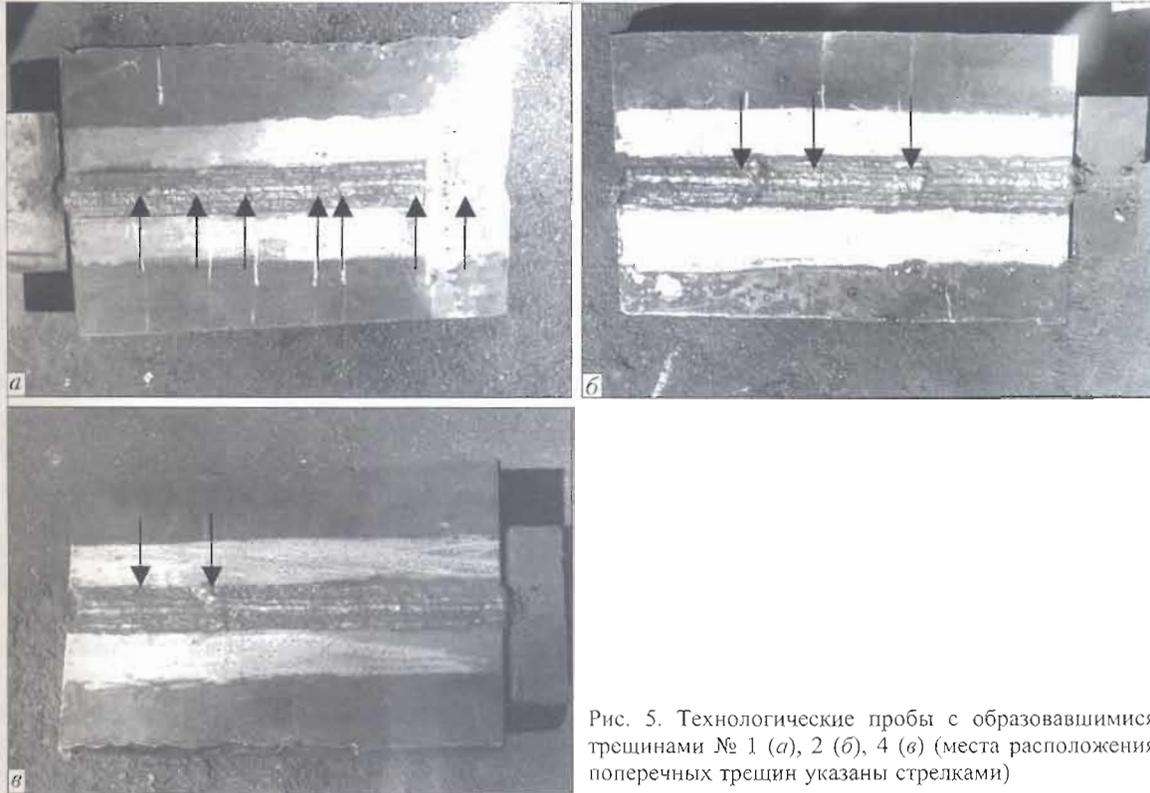


Рис. 5. Технологические пробы с образовавшимися трещинами № 1 (а), 2 (б), 4 (в) (места расположения поперечных трещин указаны стрелками)

ных технологических пробах, очевидно, связан как с особенностями закрепления образцов, так и с изменением направления сварки и последовательности заварки блоков. Следует отметить, что с точки зрения возможности образования в сварных соединениях с многослойными швами холодных трещин наиболее неблагоприятное напряженное состояние сформировалось в образце № 1.

Существенное влияние на формирование напряжений в сварных соединениях оказала послойная проковка швов (образец № 3). Как показали исследования, в результате технологического приема уровень остаточных поперечных напряжений в таких соединениях может быть уменьшен по отношению к контрольному образцу (№ 1) почти в 2,5 раза, а относительно образца № 2, который сваривался в такой же последовательности, но не проковывался, в 1,4...1,6 раза. В меньшей мере, но также положительное воздействие проковка швов оказала и на формирование продольных напряжений. По отношению к базовому образцу они уменьшились на 40...50%. Разное влияние проковки на изменение условий формирования продольных и поперечных напряжений, очевидно, связано с особенностями деформирования металла в продольном (длина участка 165 мм) и поперечном (ширина 10...40 мм) относительно оси шва направлениях. Можно предположить, что сочетание двух технологических приемов (сварка блочным способом и проковка швов) можно оказать положительное влияние на сопротивляемость

толстостенных сварных соединений образованию холодных трещин. Последующие исследования это подтвердили.

Для оценки сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин использовали те же технологические пробы, что и при исследовании их напряженного состояния. Отличие между ними заключалось только в формировании корневого слоя шва. В данном случае он выполнялся таким образом, чтобы в соединении образовался концентратор напряжений в виде непровара. В процессе сварки соединений, по результатам испытания которых оценивали сопротивляемость технологических проб образованию холодных трещин, и в течение определенного времени после ее завершения образцы контролировались несколькими способами. При сварке и на протяжении первых двух суток после нее контроль за поведением сварного соединения осуществляли методом акустической эмиссии [14], а затем на протяжении еще 40 сут визуально и с периодичностью один раз в пять дней методом магнитопорошковой дефектоскопии. Для этих целей использовали портативное намагничивающее устройство на постоянных магнитах марки «МАГЕКС-1г» и концентрат магнитной суспензии «ДИАГМА-1100». Если трещины в сварных соединениях не наблюдались визуально, окончательный вывод о сопротивляемости технологических проб образованию трещин делался по результатам металлографических исследований макро-



лифов. Шлифы в количестве 12 штук вырезали в поперечном и продольном относительно оси шва направлениях, по четыре из начала, середины и конца образца.

Наблюдение за развитием акустических сигналов показало, что на протяжении первых двух суток образование трещин ни в одном из рассмотренных сварных соединений не зафиксировано. Первые трещины, которые образовались в технологических пробах № 1, 2 и 4, были выявлены значительно позже. Сначала поперечные трещины были обнаружены в образце № 1, сваренном напроход. Первые четыре трещины на поверхности швов этого соединения были обнаружены только через 7 сут после окончания сварки. Еще через пять дней их общее количество достигло семи. В данной технологической пробе трещины образовались равномерно по всей длине образца и поразили исключительно шов (рис. 5, а).

Через 10 сут после окончания сварки трещины были выявлены в образцах № 2 и 4. В отличие от соединения № 1 их количество было значительно меньшим — три и две соответственно (рис. 5, б, в). Менее интенсивный характер развития трещин в этих сварных соединениях, вероятно, связан с более благоприятным (меньшим), чем в технологической пробе № 1, формированием напряжений. Обращает на себя внимание тот факт, что в образце № 2 две из трех трещин, а в образце № 4 одна из двух образовались на участке соединения блоков, в которых расположены кратеры швов. Как известно, именно эти участки швов наиболее склонны к образованию горячих и холодных микротрещин. В дальнейшем такие микротрещины могут инициировать развитие поперечных трещин. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке технологического процесса сварки и следить за тем, чтобы данные участки шва тщательно вышлифовывались.

Дальнейшие исследования показали, что наиболее высокая сопротивляемость замедленному разрушению наблюдается у соединений, выполненных блочным способом с послышной проковкой шва (образец № 3). Трещины в пробах, сваренных по данной технологии, не обнаружены даже по истечении 40 сут после окончания сварки. Результаты металлографических исследований подтвердили факт отсутствия трещин в данном образце. На наш взгляд, отсутствие холодных трещин в соединении № 3 может объясняться как минимум двумя факторами — снижением общего уровня остаточных напряжений в данном образце и измельчением структуры металла швов, которое произошло при проковке. Как известно, металл, который при прочих равных условиях имеет меньший балл зерна, лучше сопротивляется хрупкому разрушению [15]. Не исключено также, что в результате проковки в металле шва были устранены

локальные пиковые напряжения, имеющие место в сварных соединениях [16].

В целом результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что образование холодных трещин в соединениях закаливаемых сталей с многослойными швами значительно зависят от уровня остаточных напряжений, которые формируются во время сварки. Это подтверждает общепринятое мнение о необходимости изыскания путей для их снижения. Среди рассмотренных технологических приемов наиболее эффективно напряжения снижаются в результате проковки швов и ведения процесса блочным способом с разбивкой соединения на участки небольшой (до 200 мм) длины. Использование базирующейся на этих принципах технологии позволило нам исключить возможность образования трещин в жесткозакрепленных сварных соединениях стали 14ХГ2САФД даже при сварке без предварительного подогрева.

Безусловно, условия сварки металла большой толщины на практике могут существенно отличаться от тех, что мы воспроизвели при исследовании технологических проб в лабораторных условиях и потому исключать подогрев как технологическую операцию не следует. В то же время данные выполненных исследований указывают на то, что его можно существенно уменьшить. Об этом свидетельствует и наш опыт, полученный при ремонте базовых узлов дробилок, изготовленных из литой стали 25Л и 35Л толщиной 80...100 мм.

С помощью технологии сварки, разработанной при непосредственном участии специалистов ИЭС им. Е. О. Патона на ДОФ ОАО «Карельский окатыш» в период с 2003 по 2004 гг., был произведен восстановительный ремонт восьми станин дробилок ККД, КСД и КМД. Технологический процесс ремонта включал следующие операции:

- определение методами неразрушающего контроля протяженности и глубины залегания трещин;

- удаление трещин и разделку кромок под сварку;

- контроль качества подготовленных для сварки поверхностей соединяемого металла;
- предварительный подогрев (80...100 °С);
- сварку соединений;

- работы по снижению уровня остаточных напряжений в сварных соединениях (послышная проковка швов);

- снятие усиления металла шва с обеспечением плавного его перехода к основному металлу;
- контроль качества сварных соединений.

В настоящее время указанное оборудование эксплуатируется в проектом режиме. Затраты на

восстановление дробилок не превысили 25 % первоначальной стоимости станин.

В заключение следует отметить, что проведенные исследования и накопленный опыт восстановительных работ позволяет оптимистично оценивать роль технологических способов повышения сопротивляемости сварных соединений литых закаливающих сталей замедленному разрушению.

1. *Maccocaire C.* Repair welding: how to set up a shop // *Welding J.* — 1991. — № 8. — P. 54–56.
2. *A study on cracks on the oxigas cut surfaces of weld grooves of 14MnMoVN steel plates during cold forming / Ye Donglin, Yongfu He, Rangez Zhang et al.* // *Transaction China Weld. Inst.* — 1982. — № 4. — P. 159–164.
3. *Ларионов В. П.* Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 168 с.
4. *Волков А. С.* Причины появления дефектов вблизи исправленных участков сварных швов // *Свароч. пр-во.* — 1974. — № 8. — С. 33–34.
5. *Irving R. R.* Can industry afford the high cost of weld repair? // *Iron Age.* — 1980. — № 3. — P. 49–55.
6. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
7. *Шориоров М. Х., Белов В. В.* Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас. — М.: Наука, 1972. — 219 с.
8. *Корольков П. М., Дикун В. Н.* Влияние технологических процессов сварки и объемной термообработки на уровень сварочных напряжений в шаровых резервуарах жидкого аммиака // *Монтаж и спец. работы в стр-ве.* — 1993. — № 8. — С. 24–26.
9. *Винокуров В. А., Григорьяни А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 279 с.
10. *Трочун И. П.* Внутренние усилия и деформации при сварке. — М.: Машгиз, 1964. — 217 с.
11. *Бережницкая М. П.* Методы визначення залишкових напружень та їх зняття // *Фізико-хім. механіка матеріалів.* — 2001. — № 6. — С. 69–74.
12. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
13. *Походня И. К., Пальцевич А. П.* Хроматографический метод определения диффузионного водорода в сварных швах // *Автомат. сварка.* — 1980. — № 1. — С. 37–39.
14. *Мусяченко В. Ф., Жданов С. Л.* Применение акустического эмиссионного метода при исследовании процесса образования холодных трещин в сварном соединении высокопрочной стали // *Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций.* — 1987. — Вып. 5. — С. 73–77.
15. *Влияние церия на замедленное разрушение высокопрочного металла шва / В. Е. Лазько, М. Т. Борисов, В. Д. Ковальчук, Э. Л. Макаров* // *Автомат. сварка.* — 1977. — № 2. — С. 27–29.
16. *Сарик В. И., Суворова С. О., Филиппов Г. А.* О внутренних микронапряжениях, возникающих в результате мартенситного превращения в стали // *Металлофизика.* — 1974. — 54. — С. 94–97.

Results of evaluation of delayed fracture resistance of the HAZ metal in welded joints on cast steel of the 35L type, depending upon the saturation of welds with diffusible hydrogen, value of welding heat input and preheating temperature, are given. Data on the effect of welding technique on formation of the stressed state of rigidly fixed joints on heavy metal sections are presented.

Поступила в редакцию 08.02.2008



ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС ЮГА РОССИИ

3–5 сентября 2008 г.

г. Ростов-на-Дону

МЕТМАШ 2008 СТАНКОИНСТРУМЕНТ

Металлургия Машиностроение Metalloobrabotka

344068, г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, За
Тел./факс: (863) 268-77-84, 268-77-83, 268-77-65
E-mail: metall@vertolexpo.ru
<http://www.vertolexpo.ru>



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ ФОСФОРОМ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

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

Путем термодинамических расчетов определена вероятность образования фосфидов ряда легирующих элементов (V, Mo, Cr, Mn, Co, W, Al, Fe, Ni, Si). Исследования микроструктуры металла, наплавленного порошковыми проволоками, содержащими фосфор, ванадий и фосфор, молибден и фосфор, титан и фосфор, показали, что все упомянутые легирующие элементы способствуют сфероидизации фосфидных включений сферической формы, что делает перспективным использование фосфора в качестве легирующего элемента в высоколегированных наплавочных материалах.

Ключевые слова: дуговая наплавка, наплавленный металл, инструментальная сталь, фосфор, фосфиды, фосфидные эвтектики, термодинамические расчеты, перспектива

В работах [1–4] было показано, что фосфор может с успехом применяться в качестве легирующего элемента для улучшения триботехнических характеристик наплавленного металла типа низколегированных сталей. С учетом имеющегося опыта исследована возможность легирования фосфором наплавленного металла типа инструментальных сталей систем легирования Fe–Si–Mn–W–Cr–V, Fe–Si–Mn–Cr–Mo–V–Ni, Fe–Si–Mn–Cr–Mo–V–W. Установлено [4], что основная проблема, возникающая при этом, — это пониженная трещиностойкость наплавленного металла при содержании в нем фосфора более 1,2 мас. %. Причиной возникновения трещин является образование по границам зерен сплошной сетки фосфидной эвтектики, которая характеризуется повышенной твердостью и хрупкостью.

Известно, что фосфор в определенных пределах может растворяться в железе и одновременно образовывать включения фосфидной фазы в виде компактных фосфидов или фосфидных эвтектик [5]. В нелегированных сталях фосфор образует легкоплавкие хрупкие фосфидные эвтектики типа FeP–Fe₃P. В высоколегированных сталях некоторые легирующие элементы могут образовывать тугоплавкие фосфиды такие, как TiP (температура плавления 1962 °С), P₂P (1895 °С), CrP (1575 °С), Cr₃P (1482 °С), Co₂P (1361 °С) [6]. С целью повышения трещиностойкости и некоторых других эксплуатационных показателей наплавленного металла необходимо осуществлять его легирование и связывать фосфор в наиболее тугоплавкие фосфиды, которые при кристаллизации наплавленного металла выделялись бы в первую очередь и имели компактную форму.

Вероятность образования тех или иных фосфидов при одновременном легировании наплавленного металла несколькими элементами можно оценить с помощью термодинамических расчетов равновесия химических реакций их образования. Такие расчеты дают возможность проведения теоретического анализа различных технологических процессов без выполнения сложных и дорогостоящих экспериментов [7].

Для расчета изобарных потенциалов реакций образования фосфидов легирующих элементов выбран энтропийный метод. При наличии данных о термодинамических характеристиках исходных компонентов и образующихся продуктах реакции расчеты по этому методу относительно просты и достаточно достоверны. Изобарные потенциалы реакций образования фосфидов рассчитывали по уравнению из работы [7]

$$\Delta Z_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0.$$

Для расчетов по данной формуле необходимо знать энтальпию ΔH_{298}^0 образования фосфидов легирующих элементов и разность ΔS_{298}^0 между значениями абсолютных энтропий исходных элементов и образующихся фосфидов.

Изобарные потенциалы реакций образования фосфидов рассчитывали при комнатной температуре и температуре сварочной ванны (табл. 1). По данным И. И. Фрумина [8], при сварке низкоуглеродистой стали под флюсом АН-348А средняя температура T сварочной ванны составляет (1770±100) °С, или 2043 К (округленно 2050 К).

Расчетные значения изобарных потенциалов образования фосфидов, полученные при двух различных температурах, наносили на диаграмму (рис. 1). Нанесение на диаграмму нескольких прямых для реакций дает возможность оценить направление реакции образования различных фосфи-

Таблица 1. Энтропии S_{298}^0 легирующих элементов [9], энтропии S_{298}^0 и энтальпии ΔH_{298}^0 их фосфидов [6, 10–13], а также изобарные потенциалы ΔZ_T^0 реакций образования фосфидов при 298 и 2050 К

Химический элемент	S_{298}^0 легирующих элементов, Дж/(моль·К)	Фосфид	S_{298}^0 фосфидов, Дж/(моль·К)	ΔS_{298}^0 , Дж/(моль·К)	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔZ_T^0 , кДж/(г·моль), при температуре, К	
						298	2050
Al	28,33	AlP	47,28	-22,14	-164	-157,40	-118,60
Mn	32,01	MnP	49,16	-23,94	-186	-178,86	-136,92
		Mn ₂ P	76,98	-28,13	-172	-163,62	-114,33
		Mn ₃ P	104,52	-32,60	-181	-170,27	-114,20
Si	18,83	SiP	32,64	-27,28	-69	-60,87	-13,076
Fe	27,28	Fe ₂ P	72,38	-23,27	-147	-140,07	-99,30
		Fe₃P	101,67	-21,26	-162	-155,66	-118,42
Cr	23,47	CrP	39,74	-24,82	-168	-160,60	-117,12
		Cr₃P	87,88	-23,62	-252	-244,96	-203,58
V	28,91	V ₂ P	33,25	-65,66	-327	-307,44	-192,40
Ni	29,87	NiP	93,12	+22,16	-108	-114,60	-153,43
Co	30,04	Co₂P	77,40	-23,77	-174	-166,92	-125,27
		CoP	50,21	-20,92	-158	-151,77	-115,11
Mo	28,66	Mo ₂ P	90,45	-7,96	-255	-252,63	-238,68
W	32,64	WP	52,41	-21,32	-172	-165,65	-128,29
P	41,09	—	—	—	—	—	—

Примечание. В случае образования двух или трех фосфидов одного легирующего элемента жирным шрифтом выделены наиболее вероятные продукты их образования.

дов и значение изобарного потенциала каждой из них, а также путем сравнения выяснить благоприятные термодинамические условия для их протекания и большую или меньшую устойчи-

вость образующихся продуктов соответствующей реакции.

Из легирующих элементов, которые используются в инструментальных сталях, термодинамически наиболее вероятно образование фосфидов ванадия, молибдена и хрома. Изобарные потенциалы реакций образования фосфидов вольфрама и кобальта, также применяющихся для легирования инструментальных сталей, находятся на уровне изобарных потенциалов реакций образования фосфидов железа и их появление в наплавленном металле термодинамически менее вероятно, хотя они, как и железо, могут входить в состав фосфидов, образование которых термодинамически более вероятно.

Для экспериментального определения влияния наиболее сильных фосфидообразующих элементов на морфологию фосфидной фазы в наплавленном металле изготовлены опытные порошковые проволоки диаметром 2 мм (табл. 2), которые легировали только фосфором, ванадием и фосфором, молибденом и фосфором, титаном и фосфором. Хотя исчерпывающие данные о термодинамических характеристиках титана в литературе нами не найдены, тем не менее, он выбран для исследований как элемент, образующий наиболее тугоплавкие фосфиды [6]. При затвердевании сварочной ванны такие фосфиды должны выделяться в первую очередь. И хотя титан редко применяется для легирования наплавленного металла в

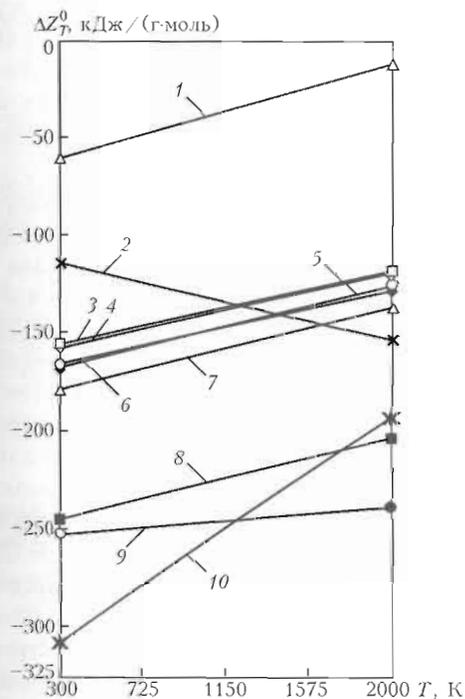


Рис. 1. Изобарные потенциалы реакций образования фосфидов легирующих элементов: 1 — SiP; 2 — NiP; 3 — Fe₃P; 4 — AlP; 5 — Co₂P; 6 — WP; 7 — MnP; 8 — Cr₃P; 9 — Mo₂P; 10 — V₂P



Таблица 2. Химический состав (мас. %) металла, наплавленного опытными порошковыми проволоками

Марка проволоки	C	Mn	Si	P	Ti	Mo	V
ПП-Нп-ГСП	0,11	0,81	0,92	0,89	—	—	—
ПП-Нп-П2ГС	0,13	0,67	0,83	1,86	—	—	—
ПП-Нп-М6ГСП	0,14	0,79	0,86	0,97	—	5,63	—
ПП-Нп-М12П2ГС	0,11	0,71	0,96	1,77	—	11,26	—
ПП-Нп-Т3ГСП	0,12	0,90	1,01	0,82	2,56	—	—
ПП-Нп-Т6П2ГС	0,15	0,87	0,89	1,73	4,81	—	—
ПП-Нп-Ф4ГСП	0,13	0,91	0,94	0,96	—	—	3,70
ПП-Нп-Ф8П2ГС	0,12	0,83	0,90	1,82	—	—	6,35

композициях, близких по типу к инструментальным сталям, но его обязательно вводят в шихту самозащитных порошковых проволок для раскисления наплавленного металла этого типа.

Расчетное содержание фосфора в опытных проволоках составляло 1 и 2 мас. %. По данным [5], растворимость фосфора в чистом железе 1 % и при таком содержании фосфора не должна образовываться сетка пограничных фосфидных эвтектик.

С учетом стехиометрического соотношения элементов в фосфидах V_2P (около 3,3:1), Mo_2P (около 6:1) и Ti_2P (около 3:1) выбирали такое расчетное содержание соответствующих легирующих элементов, чтобы теоретически весь фосфор был связан в эти фосфиды.

Опытными порошковыми проволоками под флюсом АН-26 выполняли пятислойную дуговую наплавку валиков на пластины из стали Ст3 на следующем режиме: ток наплавки 220...250 А; напряжение на дуге 22...24 В; скорость наплавки 30 м/ч. Визуальный осмотр показал, что во всех валиках, кроме наплавленного проволокой ПП-Нп-П2ГС, трещины отсутствовали. Из верхних слоев наплавленных валиков вырезали образцы для исследований их микроструктуры.

Нелегированный наплавленный металл 20ГСП и 20П2ГС, содержащий только фосфор, имеет ферритную структуру (рис. 2, а, б). Микротвердость феррита составляет $HV 0,05 244...303$. При содержании фосфора около 1 мас. % в структуре наплавленного металла появляются отдельные включения фосфидной эвтектики (рис. 2, а). При увеличении содержания фосфора до 1,89 мас. % она образует сплошную сетку по границам зерен (рис. 2, б). Микротвердость фосфидной эвтектики составляет $HV 0,05 321...412$.

Введение молибдена не меняет структуру матрицы наплавленного металла 20М6ГСП и 20М12П2ГС — она остается ферритной (рис. 2, в, г). Практически не меняется и ее микротвердость ($HV 0,05 221...303$). При содержании мо-

либдена около 6 мас. % и фосфора около 1 мас. % включения фосфидных эвтектик в наплавленном металле 20М6ГСП отсутствуют (рис. 2, в). При увеличении содержания фосфора до 2 мас. % в наплавленном металле 20М12П2ГС появляются отдельные включения фосфидной эвтектики, но они не образуют сплошной пограничной сетки (рис. 2, г). Микротвердость фосфидной эвтектики составляет $HV 0,05 412$. Легирование наплавленного металла молибденом способствует глобулизации фосфидов, имеющих значительно более высокую микротвердость ($HV 0,05 606...824$).

В наплавленном металле 20Ф4ГСП образуется ферритно-перлитная структура с незначительным количеством очень мелких включений (рис. 2, д). Твердость матрицы составляет $HV 0,05 232...250$. С увеличением содержания ванадия и фосфора структура наплавленного металла 20Ф8П2ГС резко изменяется, объемная доля перлитной составляющей уменьшается (рис. 2, е). Микротвердость матрицы возрастает до $HV 0,05 303...321$. Внутри зерен образуется значительное количество очень мелких фосфидных включений. Из-за их малого размера микротвердость в наплавленном металле обоих типов замерить не удалось.

Наплавленный металл 20Т3ГСП имеет ферритно-перлитную структуру с включениями фосфидов и фосфидной эвтектики (рис. 2, ж). Микротвердость феррита $HV 0,05 286...303$, а перлитной составляющей $HV 0,05 271...286$. Эвтектика и компактные включения фосфидов располагаются внутри перлитных колоний. Микротвердость фосфидов достигает $HV 0,05 644$. Микроструктура наплавленного металла 20Т6П2ГС в основном ферритная, балл зерна колеблется в пределах 6...9 (рис. 2, з). Микротвердость матрицы несколько выше, чем наплавленного металла 20Т3ГСП ($HV 0,05 391...412$). Внутри зерен содержится много мелких включений с твердостью $HV 0,05 554$.

Таким образом, исследования микроструктуры наплавленного металла различных типов показали, что все три легирующие элемента (молибден, ванадий и титан) образуют компактные фосфидные включения, имеющие форму, близкую к сферической. Такие включения должны способство-

* Исследования микроструктуры наплавленного металла были выполнены канд. техн. наук Д. П. Новиковой и инж. И. Л. Богачук.

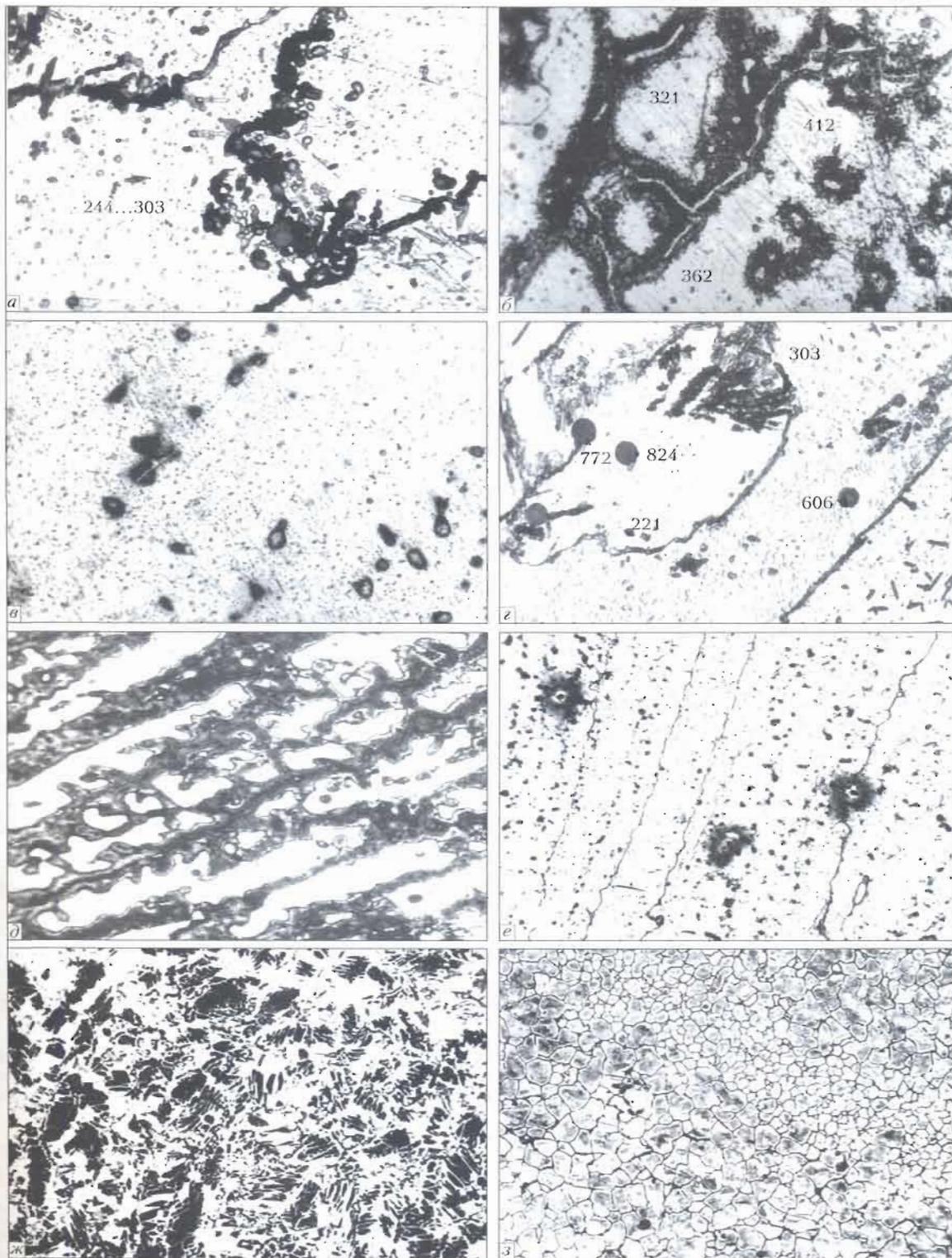


Рис. 2. Микроструктура (X500) наплавленного металла типа 20ГСП (а), 20П2ГС (б), 20М6Г СП (в), 20М12П2ГС (г), 20Ф4ГСП (д), 20Ф8П2ГС (е), 20Т3ГСП (ж) и 20Т6П2ГС (з)

вать увеличению трещиностойкости наплавленного металла, что делает возможным использование фосфора в наплавочных материалах, легированных этими элементами.

Оценку влияния фосфора на трещиностойкость высоколегированного наплавленного металла проводили с использованием трех опытных порошковых проволок (ПП-Нп-35 В9Х3ГСФ, ПП-АН132, ПП-АН147), разработанных в ИЭС им. Е. С. Патона

для наплавки инструментов, работающих в условиях горячего деформирования металла. Эти проволоки обеспечивают получение наплавленного металла типа инструментальных сталей систем легирования Fe-Si-Mn-W-Cr-V, Fe-Si-Mn-Cr-Mo-V-Ni, Fe-Si-Mn-Cr-Mo-V-W. В состав шихты порошковых проволок дополнительно вводили по 1,5 мас. % P, что обеспечивало высокую износостойкость наплавленного металла [3].

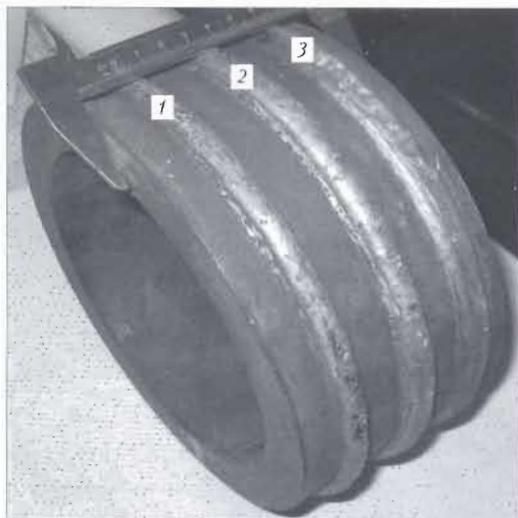


Рис. 3. Внешний вид цилиндрического образца из стали 30X, наплавленного опытными порошковыми проволоками: 1 — ПП-Нп-35В9ХЗСФ; 2 — ПП-АН132; 3 — ПП-АН147

С использованием каждой из трех опытных порошковых проволок диаметром 2,6 мм под флюсом АН-26 выполнена четырехслойная наплавка одиночных валиков жесткой пробы в виде цилиндрического образца диаметром 220 мм из стали 30X (рис. 3). Наплавку осуществляли без подогрева на следующем режиме: напряжение на дуге 30...32 В; ток наплавки 280...320 А; скорость наплавки 25 м/ч. После наплавки образец подвергали замедленному охлаждению под слоем флюса. Внешний осмотр показал, что после остывания образцов наплавленные валики имеют хорошее формирование, в наплавленном металле всех трех типов трещины отсутствовали.

Выводы

1. Путем термодинамических расчетов изобарных потенциалов реакций образования фосфидов основных легирующих элементов определена вероятность их образования при одновременном легировании наплавленного металла несколькими легирующими элементами: V, Mo, Cr, Mn, Co, W, Al, Fe, Ni, Si.

2. Результаты исследований микроструктуры металла, наплавленного опытными порошковыми

проволоками, которые содержат только фосфор, ванадий и фосфор, молибден и фосфор, титан и фосфор, показали, что все три легирующих элемента способствуют образованию фосфидных включений сферической формы, наличие которых не снижает трещиностойкость наплавленного металла.

1. Особенности плавления и кристаллизации наплавленного металла типа стали 20ХГС, легированного фосфором / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, Л. К. Дорошенко, В. Г. Васильев // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 24–27.
2. Рябцев И. И., Кусков Ю. М. Перспективы использования фосфора в наплавочных материалах на основе железа // Там же. — 2003. — № 1. — С. 12–16.
3. Триботехнические характеристики наплавленного металла системы Fe–Cr–Si–Mn–P / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, В. Ф. Грабин и др. // Там же. — 2003. — № 6. — С. 20–24.
4. Рябцев И. И., Кусков Ю. М., Новикова Д. П. Влияние фосфора на трещиностойкость низкоуглеродистого наплавленного металла системы легирования Fe–Mn–Si–Cr // Там же. — 2006. — № 5. — С. 15–19.
5. Лунев В. В., Аверин В. В. Сера и фосфор в стали. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
6. Гордиенко С. П. Термодинамические характеристики твердых бинарных фосфидов. — Киев, 1987. — 50 с. — (Препр. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. № 15).
7. Владимиров Л. П. Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. — М.: Металлургия, 1970. — 528 с.
8. Фрумкин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 422 с.
9. www.qivx.com/ispt/elements/ptw-022.php, [ptw-040.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-040.php), [ptw-023.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-023.php), [ptw-041.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-041.php), [ptw-042.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-042.php), [ptw-074.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-074.php), [ptw-024.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-024.php), [ptw-025.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-025.php), [ptw-026.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-026.php), [ptw-029.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-029.php), [ptw-027.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-027.php), [ptw-028.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-028.php), [ptw-013.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-013.php), [ptw-014.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-014.php), [ptw-015.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-015.php), [ptw-016.php](http://www.qivx.com/ispt/elements/ptw-016.php).
10. Мучник С. В. Изучение взаимодействия переходных металлов с фосфором в режиме горения: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. — Киев, 1982. — 24 с.
11. Mayers C. E., Conti T. J. Vaporization behavior, phase equilibria and thermodynamic stabilities of nickel phosphides // J. Electrochem. Soc. — 1985. — 132, № 2. — P. 454–457.
12. Schlesinger M. The thermodynamic properties of phosphorus and solid binary phosphides // Chemical Rev. — 2002. — № 102(11). — P. 4267–4302.
13. Niessen A. K., Boer F. R. de. The enthalpy of formation of solid borides, carbides, nitrides, silicides and phosphides of transition and noble metals // J. Less-Common Metals. — 1981. — 82, № 1. — P. 75–80.

The probability of formation of phosphides of some alloying elements (V, Mo, Cr, Mn, Co, W, Al, Fe, Ni, Si) in simultaneous alloying the deposited metal with them has been determined by using thermodynamic calculations. As shown by examinations of microstructure of metal deposited with the flux-cored wires containing phosphorus, vanadium and phosphorus, molybdenum and phosphorus, and titanium and phosphorus, all of the above alloying elements promote spheroidisation of phosphide inclusions, which makes promising the use of phosphorus as an alloying element for high-alloy deposition consumables.

Поступила в редакцию 24.09.2007

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ ПО СХЕМЕ ДВУСТОРОННЕГО СИММЕТРИЧНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ

С. В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, В. А. ЧУВИЧИЛОВ, канд. техн. наук, В. И. ЛЫСАК, д-р техн. наук
(Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Представлены результаты анализа деформационно-временных условий формирования соединения и пластического деформирования приконтактных слоев металла при сварке металлов взрывом по различным схемам соударения.

Ключевые слова: сварка взрывом, плоскопараллельная и батарейная схемы сварки, сварные соединения, приграничные объемы металла, пластическое деформирование металла

Одним из факторов, определяющих образование соединения при сварке взрывом, является интенсивная совместная пластическая деформация металла соударяющихся пластин. Исследования авторов работ [1–8] позволили выявить и обобщить основные закономерности пластического деформирования металла в околошовной зоне (ОШЗ) при сварке одно- и разнородных материалов. При этом большинство экспериментальных данных получено при использовании несимметричной плоскопараллельной схемы соударения (рис. 1, а). Вместе с тем, с учетом полученных в последнее время экспериментальных результатов, свидетельствующих об увеличении объема вовлекаемого в пластическое деформирование металла при сварке по схеме двустороннего симметричного плакирования (далее — батарейная схема) за счет повышения деформирующего импульса давления в зоне соударения [8, 9], значительный научный и практический интерес представляет изучение особенностей пластического течения металла ОШЗ при такой схеме сварки.

Целью настоящей работы явилось исследование закономерностей и особенностей пластического деформирования приграничных объемов металла в условиях сварки взрывом по батарейной схеме.

Для достижения поставленной цели были проведены серии сравнительных экспериментов по сварке взрывом двух- и трехслойных модельных алюминиевых образцов соответственно по традиционной плоскопараллельной и батарейной схемам (рис. 1) с построением по результатам каждого опыта эпюр остаточных сдвиговых пластических деформаций g_{\max} , фиксируемых в непод-

вижных пластинах. Для этого в последних выфрезеровывали специальные окна-колодцы, в которые помещали слоистую модельную вставку (рис. 1), выполненную из предварительно подпрессованной рулонированной алюминиевой фольги толщиной 0,025...0,03 мм. Были проведены две серии опытов — для плоскопараллельной (толщина слоев 4 + (2 + 16) мм) и батарейной 4 + (2...16) + 4 мм) схем сварки. Скорость контакта v_k для двух серий соответствовала 2400 м/с, скорость соударения v_c для первой серии — 220, для второй — 370 м/с. После сварки взрывом опытных образцов изготавливали микрошлифы зоны соединения, включающей слоистую вставку. Цифровую фотосъемку полированных и протравленных поверхностей микрошлифов проводили на микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40, $\times 200$). Для построения эпюр максимальных сдвиговых деформаций использовали специальную программу EWD 1.0 [2], позволяющую автоматизировать процесс построения зависимостей $g_{\max} = f(v)$.

Параметры сварки подбирали таким образом, чтобы остаточное давление продуктов детонации

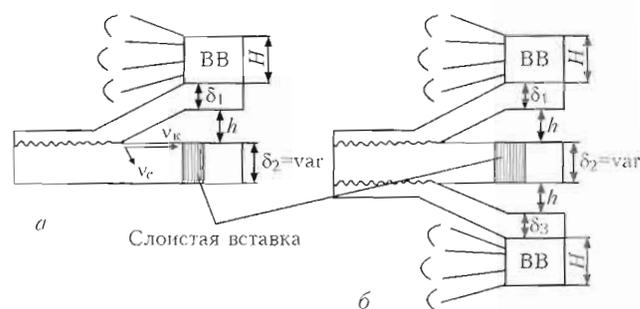


Рис. 1. Схема соударения слоев в двух- и трехслойных пакетах с использованием слоистых модельных вставок при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам (ВВ — взрывчатое вещество; H — высота заряда ВВ; δ_1 , δ_3 и δ_2 — толщины соответственно metaемых ($\delta_1 = \delta_3$) и неподвижной пластины; h — сварочный зазор на границах пакета; v_k , v_c — скорость соответственно контакта и соударения)

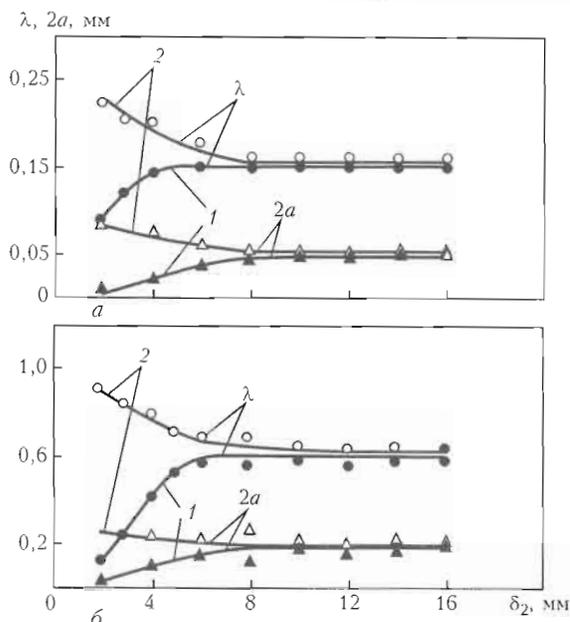


Рис. 2. Зависимость длины λ и амплитуды $2a$ волн на границах двух- и трехслойного соединения алюминиевых пластин от толщины средней пластины δ_2 : а — $v_c = 220$; б — 370 м/с; 1 — плоскопараллельная; 2 — батарейная схема

$P_{п.д}$ взрывчатого вещества было заведомо больше динамического предела текучести σ_T^d металла как в момент соударения пластин, так и по истечении некоторого времени, что обеспечивало при сварке двухслойных образцов приход в зону соединения волны разгрузки, в первую очередь, со стороны неподвижной пластины. Это условие выполнялось при малых значениях относительного сварочного зазора h/H порядка $0,05 \dots 0,07$.

Анализ конфигурации ОШЗ сваренных образцов, полученных по обеим схемам плакирования в двух сериях опытов, показал, что во всем диапазоне толщин неподвижной пластины линия соединения имеет волновой профиль. При этом, как было показано, например, в работе [9], при увеличении толщины неподвижной пластины δ_2 при сварке по плоскопараллельной и батарейной схемам характер изменения параметров волн в соединении различен (рис. 2, 3). При сварке двухслойных образцов размеры волн (длина λ и амплитуда $2a$) сначала интенсивно возрастают, достигают при некотором значении δ_2 максимального

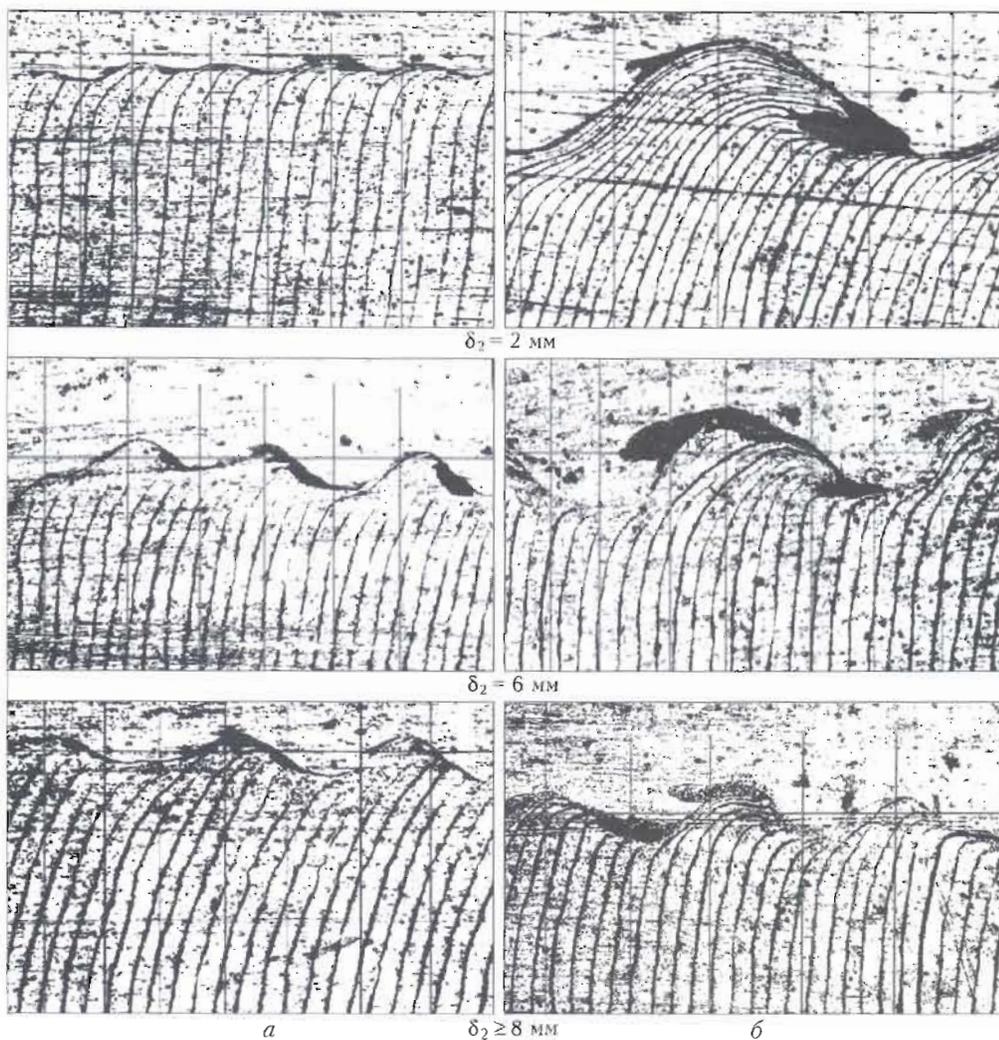


Рис. 3. Макроструктуры ($\times 200$) модельных образцов из алюминия, полученных при сварке взрывом по плоскопараллельной (а) и батарейной (б) схемам при $v_c = 220$ м/с

значения и практически не изменяются при дальнейшем увеличении толщины неподвижной пластины. При батарейной схеме наблюдается противоположная картина — уменьшение λ и $2a$ при увеличении δ_2 [9].

Из анализа рис. 2 следует, что для выбранных условий сварки по батарейной схеме трехслойного пакета предельная толщина неподвижной пластины $\delta_2^{пр}$, начиная с которой параметры волн не изменяются и равны размерам волн в двухслойном соединении, полученная по плоскопараллельной схеме, для первой и второй серий составляют соответственно 8 и 10 мм. В обоих случаях при $\delta \geq \delta_2^{пр}$ наиболее интенсивно сдвиговая пластическая деформация протекает в узкой околошовной зоне толщиной не более 0,15...0,3 мм. Значения максимальных сдвигов g_{max} в непосредственной близости от линии соединения составляют 100...120 и 130...150 % соответственно для первой и второй серии опытов.

При уменьшении толщины неподвижной пластины ($\delta_2 < \delta_2^{пр}$) начинают проявляться качественные и количественные различия в пластическом деформировании металла ОШЗ в рассматриваемых схемах сварки (рис. 4).

Так, при уменьшении толщины δ_2 с 8 до 2 мм в двухслойных образцах, полученных по плоскопараллельной схеме, значение g_{max} , измеренное в непосредственной близости от линии соединения, снижается примерно вдвое и составляет примерно 50 и 75 % соответственно при $v_c = 220$ и 370 м/с (рис. 4, 5). При батарейной схеме g_{max} приконтактных слоев, наоборот, увеличивается,

достигая значений примерно 180 и 250 % соответственно для первой и второй серий опытов (рис. 4, 5). Объяснить обнаруженный факт изменения уровня максимальных сдвиговых деформаций в приконтактных слоях двух- и трехслойных образцов, сваренных соответственно по плоскопараллельной и батарейной схемам, при варьировании толщины неподвижной пластины можно с позиции деформирующего импульса давления I_d как интегрального параметра, учитывающего давление в зоне соударения и время его действия [9, 10].

Рассмотрим сначала ситуацию, реализующуюся при изменении толщины неподвижной пластины при сварке двухслойной композиции. Как было показано ранее, с увеличением толщины неподвижной пластины δ_2 сдвиговая пластическая деформация приконтактных слоев металла (подобно изменению параметров волн в двухслойном соединении) сначала возрастает до максимума, затем, начиная с некоторого значения δ_2 , остается постоянной при неограниченном увеличении толщины неподвижной пластины (рис. 5, кривые 1). Значение деформирующего импульса давления I_d можно в соответствии с работами [9, 10] оценить по формулам в зависимости от соотношения времени прихода волны разгрузки со свободной поверхности неподвижной пластины τ_p и времени деформирования металла ОШЗ за точкой контакта τ_c (рис. 6):

при $\tau_p < \tau_c$

$$I_d = \int_0^{\tau_p} p_{max} e^{-\tau/\theta} d\tau = p_{max} \theta (1 - e^{-\tau_p/\theta}), \quad (1)$$

при $\tau_p > \tau_c$

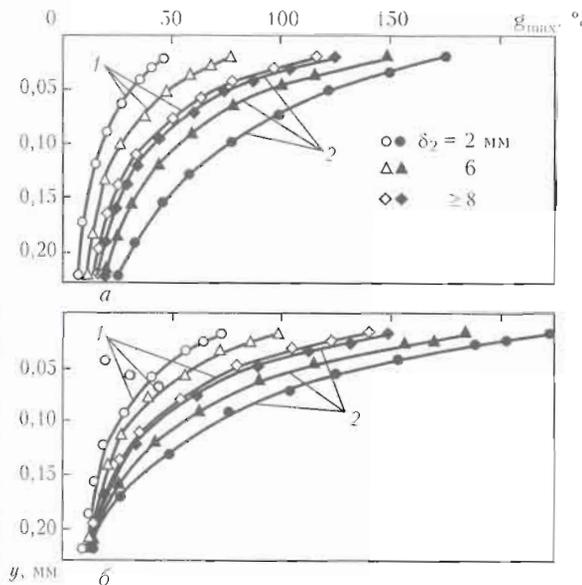


Рис. 4. Эпюры сдвиговых пластических деформаций, полученные на образцах, сваренных по плоскопараллельной (1) и батарейной (2) схемам сварки ($v_k = 2400$ м/с): а — $v_c = 220$; б — 370 м/с

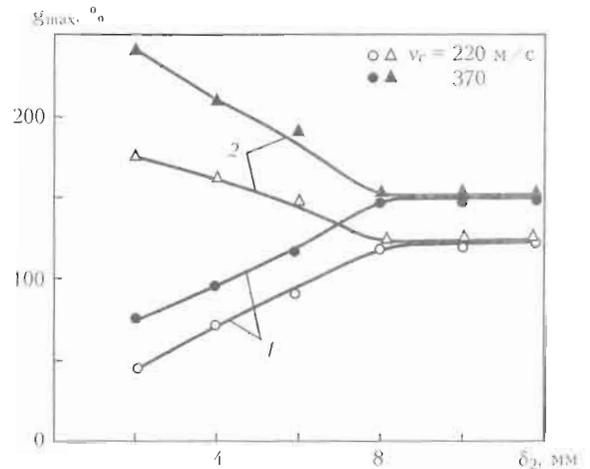


Рис. 5. Зависимость сдвиговой пластической деформации металла g_{max} в приконтактных слоях двух- (1) и трехслойных (2) образцов, сваренных взрывом, от толщины неподвижной пластины δ_2

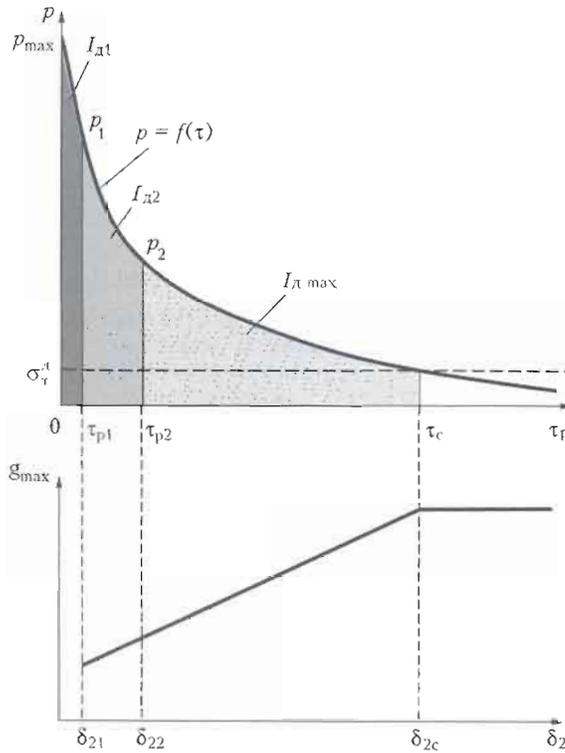


Рис. 6. Увеличение уровня сдвиговой пластической деформации в зоне соединения g_{max} при изменении деформирующего импульса I_d за счет времени действия давления τ

$$I_d = \int_{\tau_0}^{\tau_c} p_{max} e^{-\tau/\theta} d\tau = p_{max} \theta (1 - e^{-\tau_c/\theta}), \quad (2)$$

где p_{max} — максимальное (пиковое) давление в импульсе, определяемое скоростью соударения; θ — постоянная времени, зависящая от свойств свариваемых материалов.

При малых толщинах неподвижной пластины (δ_{21} на рис. 6) время прихода волны разгрузки со стороны свободной поверхности нижней пластины равно $\tau_{p1} = 2\delta_{21}/c_0$ (c_0 — скорость звука в металле), давление в зоне соединения за это время изменится с p_{max} до p_1 , а значение импульса I_{d1} , рассчитанное по формуле (1), соответствует в этом случае площади, ограниченной фигурой $0-p_{max}-p_1-\tau_{p1}$ (рис. 6). Приход волны разгрузки не дает в полной мере развиться деформационным процессам в приконтактных объемах металла за точкой контакта (в зоне соединения наблюдается «застывшая» картина пластического течения металла с соответствующим уровнем сдвиговых деформаций).

Увеличение δ_{21} до значения δ_{22} (рис. 6) или, что то же самое, τ_{p1} до τ_{p2} ведет к соответствующему возрастанию I_d с вовлечением в пластическую деформацию больших объемов металла и реализацией значительных сдвиговых деформаций приконтактных объемов металла. При снижении p до значения динамического предела те-

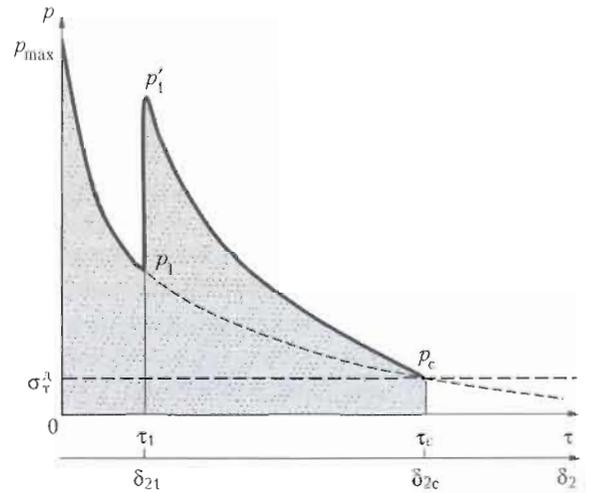


Рис. 7. Изменение давления в зоне соединения при сварке взрывом по батарейной схеме (толщина неподвижной пластины δ_{21})

кучести металла σ_T^d , что соответствует времени τ_c на рис. 6, деформационные процессы в ОШЗ протекают в полном объеме (для данных условий соударения), а степень пластической деформации g_{max} достигает своего максимально возможного значения, которое не изменяется при неограниченном увеличении δ_2 .

Совершенно иные деформационно-временные условия реализуются в зоне соединения при сварке по батарейной схеме. Здесь при малых толщинах неподвижной пластины δ_2 , спустя время $\tau_1 = \delta_{21}/c_0$, импульс давления, возникающий при соударении на противоположной границе свариваемого пакета, начинает оказывать дополнительное силовое воздействие на приконтактные слои металла, пластически деформируемые импульсом давления, возникшим на рассматриваемой границе (рис. 7). При этом суммарный деформирующий импульс, соответствующий площади, ограниченной геометрической фигурой $0-p_{max}-p_1-p_1'-p_c-\tau_c$ (рис. 7), оказывается значительно больше, чем деформирующий импульс, действующий на приконтактные слои металла при сварке двухслойного композита по плоскопараллельной схеме (рис. 6). Это вызывает, в свою очередь, существенное увеличение уровня пластических сдвиговых деформаций металла ОШЗ.

Время прихода импульса давления с противоположной границы (в случае сварки по батарейной схеме) при увеличении δ_2 также возрастает, а суммарный импульс давления уменьшается. В предельном случае, при $\delta_2 \geq \delta_2^{up}$, импульс давления с противоположной границы приходит после завершения деформационных процессов на рассматриваемой границе композита ($\tau > \tau_c$) и не способен дополнительно продеформировать разгруженный металл ОШЗ.

Таким образом, экспериментально показано, что при сварке взрывом по батарейной и плоскопараллельной схемам деформационно-временные условия формирования соединения и пластического деформирования приконтактных слоев металла существенно различаются: при сварке по батарейной схеме значения максимальных сдвиговых деформаций ϵ_{\max} , реализуемых вблизи линии соединения при $\delta_2 < \delta_2^{пр}$, в несколько раз превышают соответствующие значения, характерные для плоскопараллельной, что связано с дополнительным силовым воздействием импульса давления, возникшего при соударении на противоположной границе соединения.

Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании технологических процессов сварки взрывом с применением схемы двустороннего симметричного плакирования, поскольку при чрезмерных сдвиговых деформациях в металле ОШЗ (при малых толщинах неподвижной пластины δ_2) в зоне соединения будут образовываться участки оплавленного металла и другие дефекты, отрицательно сказывающиеся на качестве полученного композиционного материала.

1. Седых В. С., Соннов А. П., Шморгул В. Г. Исследование характера течения металла при высокоскоростном плакировании взрывом на слоистых моделях // Сварка взры-

вом и свойства сварных соединений // Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1988. — С. 82–90.

2. Новая методика исследования пластической деформации металла в околошовной зоне свариваемых взрывом соединений / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Физика и химия обработки материалов. — 2000. — № 2. — С. 54–60.

3. Основные закономерности деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом алюминия / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Там же. — 2001. — № 3. — С. 39–44.

4. Формирование соединения при сварке металлов взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 25–29.

5. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов // Физика и химия обработки материалов. — 2003. — № 1. — С. 71–76.

6. Гульбин В. Н., Кобелев А. Г. Пластическая деформация металлов при сварке взрывом // Свароч. пр-во. — 1998. — № 10. — С. 9–12, 55–56.

7. Кривецов А. Н., Седых В. С. О роли пластической деформации металла в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов. — 1969. — № 1. — С. 132–141.

8. Бондарь М. П., Оголихин В. М. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом // Физика горения и взрыва. — 1985. — 21, № 2. — С. 147–157.

9. Кузьмин С. В., Чувичлов В. А., Лысак В. И. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом // Перспективные материалы. — 2005. — № 1. — С. 85–91.

10. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 344 с.

Results of analysis of the deformation-time conditions in formation of welded joints and plastic deformation of near-contact metal layers in explosion welding of metals using different collision schemes are presented.

Поступила в редакцию 26.11.2008



МЕТАЛЛУРГИЯ 2008

16–19 сентября 2008

Донецк, Украина

V Международная выставка машин, оборудования, технологий и продукции горно-металлургического комплекса

Организатор:

Специализированный выставочный центр «ЭКСПОДОНБАСС»

Тел./факс: +38(062) 381 21 35, 381 24 41, 381 21 60

E-mail: yarosh@expodon.dn.ua, metal@expodon.dn.ua

<http://www.expodon.dn.ua>



КОРРЕКЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Рассмотрены вопросы обеспечения требуемой точности движения робота по траекториям в условиях, когда пространственное положение этих траекторий заранее точно неизвестно. Синтезирован закон корректирующего управления, основанный на использовании дополнительных измерений в процессе движения и гарантирующий его заданную точность. Проведено моделирование динамики системы, реализующей этот закон управления.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, сварные соединения, корректирующее управление, манипуляционный робот, траектория движения

Одной из сложных проблем, которая возникает при управлении движением манипуляционных систем по заданным траекториям, является обеспечение необходимой точности движения. Для решения этой проблемы традиционно используют методы [1–4], направленные на уменьшение динамических ошибок локальных систем (ЛС), входящих в состав многоканальной манипуляционной системы управления. Известны также нетрадиционные подходы, предложенные в свое время М. Б. Игнатьевым [5] и получившие дальнейшее развитие в работах [6–9]. В отличие от [1–4] эти методы предусматривают введение в многоканальную систему дополнительных обратных связей, обеспечивающих минимизацию траекторной ошибки за счет коррекции соотношений между динамическими ошибками по отдельным координатам [7–9] или корректирующего управления темпом движения системы в функции от динамических ошибок ЛС [5, 8, 9].

Однако гарантировать повышение точности движения с помощью указанных методов возможно лишь при условии, что сами программно заданные траектории всегда адекватны требуемым (желаемым) траекториям. На практике же довольно часто возникают ситуации, когда желаемые траектории по тем или иным причинам не совпадают с программно заданными траекториями. Такие ситуации встречаются, в частности, при роботизированной дуговой сварке крупногабаритных изделий, когда свариваемые детали из-за их больших размеров и массы не всегда удается точно поместить в заданное для сварки место или они имеют слишком большие допуски на размеры. Ясно, что при этом пространственное положение фактических линий соединений свариваемых де-

талей может существенно отличаться от положения запрограммированных линий.

Программу движения робота можно скорректировать, если располагать информацией об отклонении фактических линий (желаемых траекторий) от предварительно заданных. Для этого обычно робот оснащают специальным устройством, которое в процессе движения в каждый момент времени t измеряет, например, расстояние от конца электрода до желаемой траектории и на основании сигнала $\rho(t)$, характеризующего это расстояние, производят коррекцию программно заданной траектории. В случаях, когда траектории являются прямолинейными и располагаются вдоль одной из координат рабочего пространства робота, их коррекция осуществляется сравнительно просто [10–12]. Но когда траектории криволинейны, остается неясным, как следует «расщеплять» сигнал $\rho(t)$ на составляющие по координатам для того, чтобы реализовать корректирующее управление. При этом не известны и динамические свойства таких систем.

В данной статье построен закон корректирующего управления, обеспечивающий движение роботов по желаемой траектории независимо от ее формы и расположения в рабочем пространстве робота, и выполнено моделирование динамики системы, реализующей этот закон коррекции.

Синтез закона корректирующего управления. Пусть заданная траектория движения рабочего органа робота описывается уравнением

$$F(x_1, x_2) = 0, \quad (1)$$

устанавливающим в неявной форме вполне определенные соотношения между заданными движениями

$$x_1^0(t) = X_1(s(t)), \quad x_2^0(t) = X_2(s(t))$$

в декартовой системе координат Ox_1x_2 . Здесь $X_1(s)$, $X_2(s)$ — известные непрерывные и диффе-

ренцируемые функции параметра s , представляющего собой длину дуги траектории, которая соединяет изображающую точку задания P_0 с некоторой начальной точкой P_n (рис. 1). Предполагается, что при этом обязательно выполняется условие $F(x_1^0(t), x_2^0(t)) = 0$, а связь между входными воздействиями манипуляционного робота $q^0 = \{q_j^0(t)\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ и координатами $x_0 = \{x_i^0(t)\}$, $i = 1, 2$ описывается зависимостью $x_0 = A(q^0)$, в которой $A(\cdot)$ — вектор-функция, порождаемая кинематикой конкретного манипуляционного робота.

Предположим, что желаемая траектория $G(x_1, x_2) = 0$ не совпадает с траекторией $F(x_1, x_2) = 0$, как это показано на рис. 1. Обозначим через ρ расстояние от точки P_0 до точки N , лежащей на пересечении траектории $G(x_1, x_2) = 0$ с нормалью к траектории $F(x_1, x_2) = 0$ в точке P_0 . Цель корректирующего управления состоит в том, чтобы обеспечить выполнение требования $|\rho(t)| \leq \rho_0$, где ρ_0 — положительное число, характеризующее заданную точность движения робота.

Из рис. 1 видно, что для уменьшения ρ целесообразно одновременно с движением точки по траектории $F(x_1, x_2) = 0$ дополнительно перемещать ее по координате x_1 на расстояние $\xi_1 = \rho \sin \alpha$, а по координате x_2 — на $\xi_2 = \rho \cos \alpha$, где α — угол между касательной в точке P_0 и осью x_1 . Такое перемещение осуществимо, если к входным сигналам $x_1^0(t)$ и $x_2^0(t)$ постоянно добавлять сигналы, пропорциональные текущим значениям соответственно $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. Подобный ход рассуждений наводит на мысль о том, что закон корректирующего управления следует строить в интегральной форме

$$\xi_1(t) = K \sin \alpha(t) \int_0^t \rho(t) dt, \quad \xi_2(t) = -K \cos \alpha(t) \int_0^t \rho(t) dt, \quad (2)$$

где K — коэффициент пропорциональности, выбираемый из условия устойчивости системы.

Нетрудно убедиться, что текущие значения $\sin \alpha(t)$ и $\cos \alpha(t)$ можно получать непосредственно в процессе движения системы по заданной траектории $F(x_1, x_2) = 0$. В самом деле, угловой коэффициент касательной в точке P_0 определяется как $\operatorname{tg} \alpha(t) = \frac{dx_2^0}{dt} / \frac{dx_1^0}{dt}$. Отсюда

$$\sin \alpha(t) = \frac{1}{v} \frac{dx_2^0}{dt}, \quad \cos \alpha(t) = \frac{1}{v} \frac{dx_1^0}{dt}, \quad (3)$$

где $v = \sqrt{\left(\frac{dx_1^0}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_2^0}{dt}\right)^2}$ — скорость движения точки P_0 по траектории $F(x_1, x_2) = 0$.

Таким образом, закон корректирующего управления (2) с учетом (3) принимает окончательный вид

$$\xi_1(t) = \frac{K}{v} \frac{dx_2^0}{dt} \int_0^t \rho(t) dt, \quad \xi_2(t) = -\frac{K}{v} \frac{dx_1^0}{dt} \int_0^t \rho(t) dt. \quad (4)$$

Моделирование системы управления. С целью экспериментальной проверки эффективности синтезированного закона (4) корректирующего управления движением манипуляционного робота проводилось моделирование на ЭВМ динамики двухканальной системы управления для случая, когда $q_1^0(t) = x_1^0(t)$, $q_2^0(t) = x_2^0(t)$. Как видно из рис. 2, в эту систему дополнительно введено корректирующее устройство (КУ). В блоках B_1

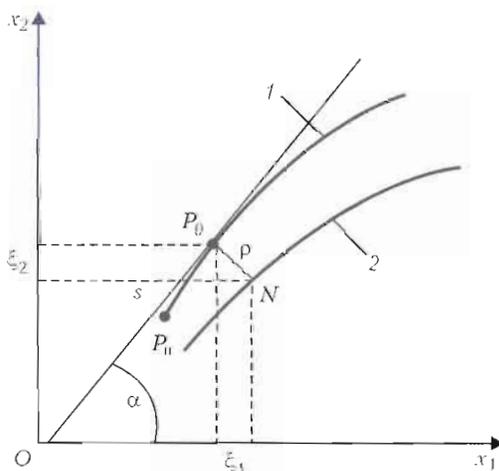


Рис. 1. К расчету корректирующих сигналов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$: 1 — $F(x_1, x_2) = 0$; 2 — $G(x_1, x_2) = 0$; остальные обозначения см. в тексте

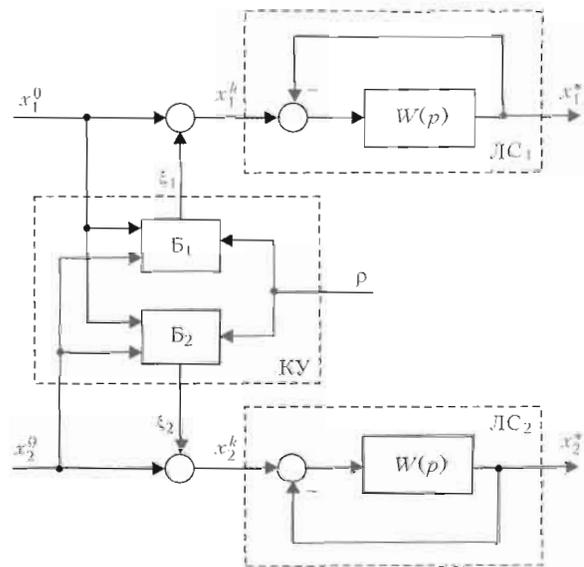


Рис. 2. Структурная схема системы управления с корректирующим устройством

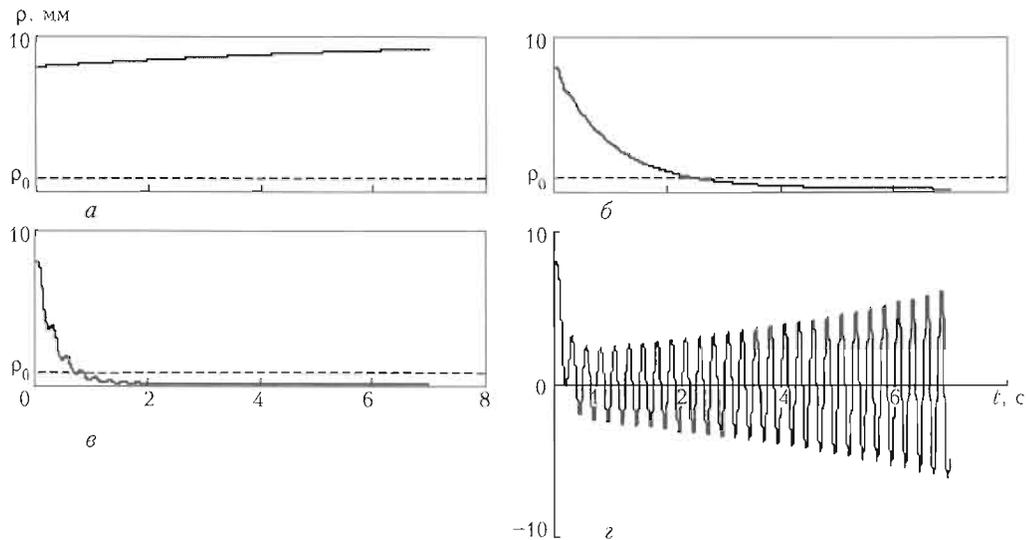


Рис. 3. Графики функции $\rho(t)$, построенные по результатам моделирования: $a - K = 0$; $b - 1$; $v - 3,0$; $z - 6,6 \text{ c}^{-1}$

и B_2 на основе информации об отклонении $\rho(t)$ и о производных от входных сигналов $x_1^0(t)$ и $x_2^0(t)$ формируются по (4) корректирующие сигналы $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. На входы локальных систем ЛС₁ и ЛС₂, входящих в состав двухканальной системы управления, поступают сигналы $x_1^k(t) = x_1^0(t) + \xi_1(t)$ и $x_2^k(t) = x_2^0(t) + \xi_2(t)$, по сути представляющие собой скорректированную программу движения робота.

Для удобства моделирования принято, что ЛС₁ и ЛС₂ идентичны, характеризуются астатизмом первого порядка и в разомкнутом состоянии описываются передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K_0}{p(Tp + 1)}, \quad (5)$$

где K_0 — коэффициент передачи; T — постоянная времени; p — оператор Лапласа.

Взяты следующие значения параметров передаточной функции (5): $K_0 = 75 \text{ c}^{-1}$, $T = 0,11 \text{ c}$. В качестве программно заданной и желаемой траекторий рассматривались дуги окружности, которые описываются уравнениями

$$x_1^0(t) = R(1 - \cos \omega t), \quad x_2^0(t) = R \sin \omega t, \quad (6)$$

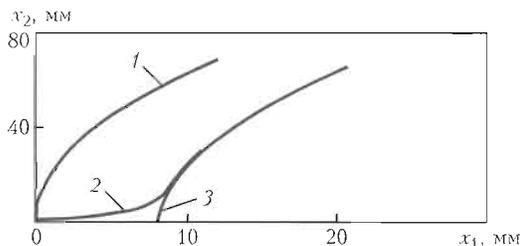


Рис. 4. Траектории движения: 1 — $F(x_1, x_2) = 0$; 2 — $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$; 3 — $G(x_1, x_2) = 0$; остальные обозначения см. в тексте

$$x_1^0(t) = R + a - R \cos \omega t, \quad x_2^0(t) = b + R \sin \omega t, \quad (7)$$

где R — радиус дуги; $\omega = v/R$ — параметр, выбираемый из условия обеспечения требуемой скорости v движения робота; a, b — начальные отклонения желаемой траектории (7) от программно заданной (6) соответственно по координатам x_1 и x_2 .

Траектории (6) и (7) выбраны таким образом, чтобы расстояние $\rho(t)$ в любой момент времени t в условиях модельного эксперимента можно было бы легко оценить путем расчета. Очевидно, что $\rho(t)$ можно определить по формуле

$$\rho(t) = \sqrt{(x_1^*(t) - R - a)^2 + (x_2^*(t) - b)^2} - R,$$

где $x_1^*(t)$ и $x_2^*(t)$ — координаты фактического положения рабочего органа робота.

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования двухканальной системы управления при следующих значениях параметров: $s = 70 \text{ мм}$; $R = 200 \text{ мм}$; $\omega = 0,05 \text{ c}^{-1}$; $a = 8 \text{ мм}$; $b = -5 \text{ мм}$; $\rho_0 = 1 \text{ мм}$. На рис. 3 показаны процессы изменения $\rho(t)$ в зависимости от значения коэффициента K в законе корректирующего управления (4). Анализ этих кривых показал, что расстояние $\rho(t)$ при отсутствии коррекции ($K = 0$) достаточно велико по сравнению с ρ_0 (рис. 3, a), но стремительно уменьшается (рис. 3, b, v), если введено корректирующее управление ($K > 0$).

При сравнении кривых на рис. 3, b, v видно, что время коррекции, т. е. интервал времени, за который расстояние $\rho(t)$ становится меньше ρ_0 , существенно зависит от значения коэффициента K (с его увеличением время коррекции уменьшается). Однако следует заметить, что при увеличении K начинают появляться колебания $\rho(t)$

и при $K \geq K_{\text{доп}}$ процесс автоматической коррекции приобретает неустойчивый характер (рис. 3, з) (в нашем эксперименте допустимое значение $K_{\text{доп}} = 6,3 \text{ с}^{-1}$). Отсюда ясно, что значение коэффициента K следует выбирать в каждом отдельном случае исходя из компромиссных соображений.

На рис. 4 представлена траектория $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$, по которой осуществляется движение робота в результате коррекции программно заданной траектории $F(x_1, x_2) = 0$ при $K = 3 \text{ с}^{-1}$. Из рисунка видно, что траектория $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$ начинается на траектории $F(x_1, x_2) = 0$ и спустя некоторое время коррекции практически совпадает с желаемой траекторией $G(x_1, x_2) = 0$, расположенной на достаточно большом расстоянии от $F(x_1, x_2) = 0$, что свидетельствует о высокой точности корректирующего управления, синтезированного по (4).

Между тем, уместно заметить, что при движении робота по криволинейным траекториям возникает траекторная ошибка $\varepsilon(t)$ даже при таком благоприятном случае, когда программно заданная и желаемая траектории совпадают. Как известно [9], ошибка $\varepsilon(t)$ возрастает с увеличением скорости движения v по траектории и ее кривизны. Но поскольку $\varepsilon(t)$ является лишь частью общего отклонения от траектории, определяемого расстоянием $\rho(t)$, то синтезированный закон автоматической коррекции (4) обеспечивает требуемую точность движения по траектории, независимо от того, чем это отклонение вызвано.

Таким образом, моделирование на ЭВМ показало достаточно высокую эффективность пред-

ложенного закона коррекции программно заданной траектории движения при произвольном ее расположении в рабочем пространстве робота.

1. Тимофеев А. В. Построение адаптивных систем управления программным движением. — Л.: Энергия, 1980. — 88 с.
2. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
3. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления в задаче слежения за эталонным сигналом // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 6. — С. 104–113.
4. Крутько П. Д., Голованов М. А. Траекторное управление движением автоматических манипуляторов при выполнении технологических операций // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2005. — № 3. — С. 88–95.
5. Игнатъев М. Б. Голономные автоматические системы. — Л.: Изд-во АН СССР, 1963. — 203 с.
6. Цыбульский Г. А. Координирующее управление движением по двумерному многообразию с перекрестными связями между воспроизводящими системами // Автоматика. — 1988. — № 2. — С. 83–86.
7. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 128 с.
8. Цыбульский Г. А. Об одном нетрадиционном подходе к проблеме повышения точности движения по заданным траекториям // Управляющие системы и машины. — 2002. — № 2. — С. 20–25.
9. Цыбульский Г. А. Стабилизация бокового отклонения программно управляемого объекта при движении по траекториям с переменной кривизной // Там же. — 2003. — № 3. — С. 12–17.
10. Gao X., Huang S., Yu Y. An artificial neural network for detecting weld position in arc welding process // China Welding. — 1999. — 8, № 1. — P. 74–80.
11. Sugitani Y. Making best use of the arc sensor // J. the Jap. Welding Soc. — 2000. — 69, № 2. — P. 46–50.
12. Цыбульский Г. А. Ситуационные алгоритмы автоматической коррекции траектории движения робота в процессе дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 11–14.

Issues associated with ensuring the required accuracy of movement of a robot along the paths, the spatial position of which is not known exactly beforehand, are considered. The law of the correction control has been formulated, which is based on utilisation of additional measurements during the movement, and which guarantees the preset movement accuracy. Modelling of dynamics of the system realising this law has been performed.

Поступила в редакцию 15.10.2007



УДК 621.791:62-112.81

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТРУБ

Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Пагона НАН Украины),
В. В. СНИСАРЕНКО, инж. (ОАО «Укрстальконструкция», г. Киев)

Разработка и применение сварных конструкций из труб неразрывно связано с совершенствованием сварки как технологического процесса соединения материалов и сопряжено с выполнением требований по обеспечению их качества и прочности. Показано, что Украина имеет многолетние традиции в области создания конструкций из труб и сохранила свой научный и производственный потенциал для развития этого направления в будущем.

Ключевые слова: сварка, сварные соединения, сварные конструкции, конструкции из труб, узловые соединения, прочность, устойчивость, экономические показатели

Сварка как технологический процесс получения неразъемных соединений создала предпосылки для эффективного использования труб в конструкциях самого различного назначения. Если традиционные сечения элементов (уголки, швеллеры и др.), широко используемые в сварных конструкциях, заимствованы из клепаных конструкций, то трубы — тип сечений, применение которых стало возможным и оправданным только благодаря сварке. В настоящее время трудно представить конструкцию из труб (трубопровод, башня или ферма), выполненную с использованием клепаных или болтовых соединений.

Вместе с тем сварные конструкции из труб в свою очередь выдвигают определенные требования к технологии сварки. Так, затруднительно создание эффективных конструкций без возможности получения стыковых соединений труб, равнопрочных основному металлу. Это вызывает необходимость иметь сварочные материалы, обеспечивающие такие свойства сварных соединений, которые не уступают свойствам основного металла в широком диапазоне классов стали, и технологии соединения, способные обеспечить высокое их качество не только при двусторонней, но и односторонней сварке. Благодаря современным достижениям в сварочном производстве эти задачи успешно решаются для разных классов стали и диаметров труб.

Расширение областей применения труб в сварных конструкциях связано с рядом преимуществ, которыми отличается данный тип сечения:

высокие и одинаковые во всех направлениях значения геометрических характеристик сечений таких, как радиус инерции и момент инерции, что позволяет эффективно использовать трубы в стержнях, работающих на центральное и внецен-

тренное сжатие, а также кручение. Это открывает возможности для более эффективного использования сталей повышенной и высокой прочности в стержневых конструкциях;

повышенная местная устойчивость стенок труб, обеспечивающая возможность использования тонкостенных сечений. Увеличение соотношения диаметра трубы к толщине ее стенки D/t ведет к повышению эффективности использования труб в сжатых элементах с позиций продольного изгиба, но может наступить момент, когда местная устойчивость будет определять их несущую способность. Для элементов из труб с отношением $D/t < 100$ при условии равномерного распределения напряжений по сечению не существует опасности потери местной устойчивости. Однако при неравномерном распределении напряжений по сечению, как это имеет место в бесфасоночных узловых соединениях труб, потеря местной устойчивости может происходить при $100 > D/t > 50$. На рис. 1 показана эффективность использования

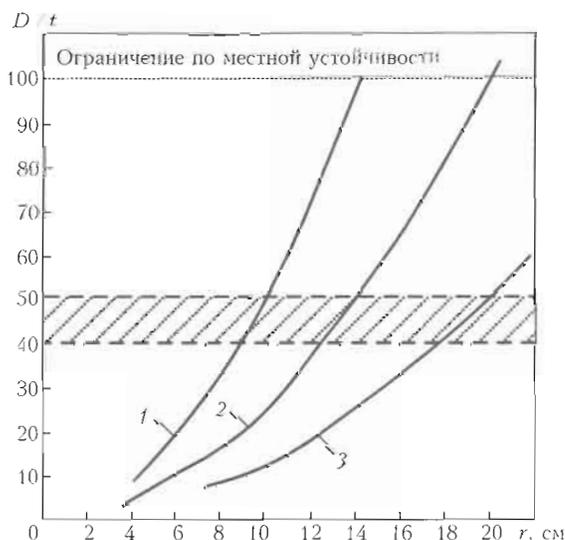


Рис. 1. Зависимость радиуса r инерции от соотношения D/t при площади поперечного сечения труб 50 (1), 100 (2) и 200 см² (3), область оптимального отношения D/t для трубчатых узлов заштрихована

трубчатых сечений в зависимости от их тонкостенности [1]. Как видно из рисунка, в решетчатых конструкциях, где в узловых соединениях всегда имеет место определенная неравномерность распределения напряжений по сечению трубы, оптимальным можно считать отношение $50 \geq D/t \geq 40$. Поскольку трубы отличаются наилучшей из применяемых в конструкциях обтекаемостью сечения, то такое отношение обеспечивает снижение ветровой и волновой нагрузки на сооружение, а следовательно, позволяет дополнительно уменьшить массу конструкции. Именно по этой причине мачтовые и башенные конструкции в большинстве изготавливают из труб, а в таких сооружениях, как морские стационарные платформы для добычи нефти и газа, другие профили для опорных блоков практически не используют; повышенная коррозионная стойкость, обусловленная относительно меньшей площадью поверхности, подверженной коррозии, доступностью поверхности для очистки и окраски, отсутствием в ней щелей пазух и карманов. Однако при этом необходимо принимать меры по обеспечению герметизации внутренних, не окрашиваемых поверхностей труб. Повышенная коррозионная стойкость позволяет снизить эксплуатационные расходы и увеличить срок эксплуатации сварных конструкций из труб;

эстетичность и архитектурное совершенство конструкций из труб, а также широкая номенклатура сортамента производимых промышленностью труб, способствуют их применению как

в малых архитектурных формах, так и в уникальных сооружениях.

Подтверждением целесообразности использования трубчатых сечений могут служить башенные конструкции. Для их эксплуатации характерны ветровые нагрузки, значительно превосходящие нагрузки от собственного веса и технологического оборудования, большая доля динамической составляющей в общем значении перемещений и усилий, а также и сильная зависимость реакции сооружения на основные воздействия от конструктивной формы и формы его элементов [2].

В таблице приведены данные о телевизионных башнях, построенных в бывшем СССР во второй половине прошлого века. Мы сознательно ограничиваемся сооружениями, построенными в СССР, поскольку при их проектировании использовалась общая нормативная база. Не вдаваясь в анализ особенностей конструкций и нагрузок, из данных таблицы можно сделать вывод о преимуществе применения трубчатых сечений в части расхода металла. Коротко остановимся на наиболее характерных сооружениях из труб.

Башня телецентра в Санкт-Петербурге была построена в 1962 г. (см. цв. вклейку, рис. 2). Впервые в практике строительства эта башня выполнена цельносварной, из трубчатых элементов. Несущая башня шестигранного сечения выполнена решетчатой с предварительно натянутыми трубчатыми раскосами. На ней установлен каркас технического здания, выше которого расположена этажерка из трех призматических секций квад-

Данные о телевизионных башнях

Город	Высота башни, м	Организация-проектировщик	Тип используемых сечений	Расход материала		
				прокат на башню, т	арматура для фундамента, т	бетон для фундамента, м ³
Киев	380,0 (с флагштоком 385,0 м)	УПСК	Трубы	2737,7	23,0	1066
Ташкент	375,0	ЦНИИПСК	Фасонный прокат, трубы	5800,0	Нет свед.	Нет свед.
Рига	368,0	ГСПИ Минсвязи СССР	Листовой профильный прокат	4500,0	» »	» »
Алматы	360,0	ЦНИИПСК	Сварные двутавры, фасонный прокат	4760,0	» »	» »
Санкт-Петербург	316,0	УПСК	Трубы	1300,0	21,8	1664
Ереван	311,7	То же	» »	1757,8	18,6	1269
Тбилиси	274,4	» »	Трубы, канаты	1242,5	31,5	1331
Витебск	243,9	» »	» »	628,0	32,6	260
Харьков	240,7	» »	Трубы, листовой прокат	1233,0	45,3	1080

Примечание. УПСК — Украинский проектный институт стальных конструкций (г. Киев); ЦНИИПСК — Центральный научно-исследовательский проектный институт стальных конструкций им. Н. П. Мельникова (г. Москва); ГСПИ — Государственный союзный проектный институт Министерства связи СССР (г. Москва).



ратного сечения. Трубы для башни изготовлены из низколегированной стали марки 15ХСНД. Узловые соединения крепления элементов решетки к поясам были решены с помощью торцевых листов — заглушек труб решетки, к которым приваривались листовые фасонки. На монтаже угловыми швами элементы решетки соединялись к поясам. При таком технологическом решении, несмотря на укрепление торцевого листа дополнительными ребрами, имеет место высокая концентрация напряжений на участках пересечения листовых фасонки с трубой раскоса. С целью ее снижения толщина торцевого листа заглушки принималась не менее $1/6$ диаметра трубы.

Следует заметить, что на момент проектирования башни исследования по выбору оптимальных конструктивных решений узловых соединений из труб, обеспечивающих минимальную концентрацию напряжений и максимальную прочность при статическом и циклическом нагружении, велись недостаточно широко. Дефицит данных частично был восполнен результатами исследований, выполненных в Институте электросварки им. Е. О. Патона [3, 4]. Тем не менее, после 40 лет эксплуатации в наиболее нагруженных узлах башни начали появляться трещины усталости, что потребовало тщательного контроля за техническим состоянием сооружения и своевременного ремонта выявленных повреждений.

В 1973 г. были построены башни телецентров в Киеве и Тбилиси. К этому времени исследования в области конструкций из труб получили дальнейшее развитие [5–7 и др.]. Их результаты подтверждали преимущества конструирования узловых соединений на основе непосредственного (бесфасоночного) примыкания трубчатых элементов.

Башня телецентра в Тбилиси отличается тем, что имеет несимметричную схему и воплощает идею совмещения несущих и ограждающих функций в одном из ее поясов (см. цв. вклейку, рис. 3). Вертикальный пояс башни, переходящий в антенну, является одновременно шахтой лифтов и поддерживается наклонными трубчатыми поясами, связанными с ним системой распорок из труб и раскосов из высокопрочных канатов. Выше отметки 71,0 м и ниже 163,8 м размещены технические здания. Угол между боковыми гранями башни в любом горизонтальном сечении составляет 60° . В большинстве узлов башни использованы принципы непосредственного примыкания труб, что обеспечило снижение уровня концентрации напряжений по сравнению с соединением труб через торцевой лист и фасонку.

Башню телецентра в Киеве (см. цв. вклейку, рис. 4) конструктивно можно разделить на три части: базу, решетчатый призматический ствол и шахту лифтов с антенной частью. База башни представляет собой решетчатую восьмигранную

обойму, к которой прикреплены пространственные четырехгранные «ноги». Решетчатый призматический ствол восьмигранного сечения зашпелен в верхней части обоймы базы.

Верхняя часть призматического участка этой башни несет каркас технического здания. Шахта лифтов опирается на фундамент у основания башни и проходит внутри решетчатого призматического ствола, а выше его переходит в антенную часть. Шахта лифтов и антенная часть сварены из стальных цилиндрических оболочек. Шахта лифтов крепится к стволу «лучевыми» диафрагмами.

В башне использован ряд новых современных и на сегодня решений. В частности, применена высокопрочная сталь марки ИЗ 138, узловые соединения в основном выполнены бесфасоночными, реализован способ монтажа подрачиванием, что позволило обеспечить качественное выполнение сборочно-сварочных работ на монтажной площадке и сократить сроки строительства.

Последняя четверть прошлого века характеризуется повышенным интересом к использованию в сварных конструкциях труб. Формируется понимание того, что оптимальных весовых показателей можно достичь путем оптимизации сечений отдельных элементов конструкции и обеспечения прочности узловых соединений [8]. В ряде работ [9–12 и др.] доказываются преимущества конструирования узловых соединений на основе непосредственного примыкания труб, разворачиваются масштабные исследования по разработке методов расчета узловых соединений при статическом и периодическом нагружении. В рамках Международного института сварки регулярно проводятся научные конференции по сварным конструкциям из труб. Столь повышенный интерес к проблемам сварных конструкций из труб объясняется прежде всего интенсивным освоением мирового континентального шельфа и необходимостью широкомасштабного строительства морских стационарных платформ для добычи нефти и газа. Освоение глубин моря свыше 100 м, а особенно шельфа Северного моря с его суровыми климатическими условиями, вызывает необходимость оценки прочности морских стационарных платформ при циклических нагрузках, действующих на сооружение. Становится ясно, что прочность трубчатых конструкций при переменных нагрузках всегда определяется сопротивлением усталости узловых соединений. Особенности напряженно-деформированного состояния в зоне узловых соединений труб исключают возможность при оценке их долговечности использовать результаты испытаний на усталость сварных соединений плоских элементов. Для оценки сопротивления усталости трубчатых узлов необходима разработка специальных методов расчета усталости. В итоге эти исследования завершились раз-

работкой соответствующих методик оценки прочности узлов при статических и периодических нагрузках и включением их в нормативные документы по проектированию морских сооружений ряда развитых стран [13–15]. Интенсивно проводились исследования по указанным направлениям также и в бывшем СССР [16, 17 и др.], поскольку в этот период шло активное освоение шельфов южных морей (Каспийского, Азовского и Черного), велось строительство первых платформ на шельфе о. Сахалин и подготовка к освоению шельфа северных морей. Был создан ряд нормативных документов, регламентирующих проектирование морских сооружений [18–20].

В связи с распадом СССР и последовавшим экономическим кризисом, который охватил и Украину, строительство крупных сооружений было практически прекращено.

С началом подъема экономики в Украине стали возрождаться строительная индустрия, а также возрос интерес к сварным конструкциям из труб. Немалую роль в этом сыграло то, что успешно смогли преодолеть кризис ведущие в области проектирования металлических конструкций институты: ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского» (г. Киев), ООО «Институт «Шельф» (г. Симферополь) и др.

К числу уникальных сооружений, выполненных в последние годы с использованием цилиндрических труб, следует отнести завершающееся строительство навеса над трибунами стадиона в Днепропетровске. Проект разработан отделом новых типов конструкций ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского» (главный инженер проекта — канд. техн. наук И. Н. Лебедич) [21], а изготовление и монтаж конструкций осуществляет ОАО «Укрстальконструкция» (г. Киев). Общая масса металлоконструкций навеса составляет 1290 т.

Козырьковое покрытие над трибунами запроектировано в виде системы плоских решетчатых консольных ферм переменной высоты (см. цв. вклейку, рис. 5). Для ферм над трибунами вылет консольной части от опоры равен 27,0 м, хвостовой — 17,15 м. Для ферм над VIP корпусом вылет консольной части составляет 32,80 м, хвостовой — 14,0 м. Сортамент бесшовных цельнотянутых труб, используемых в конструкции навеса, включает сечения от 80×5 до 426×16 мм. Для поясов ферм использованы трубы сечением до 299×14 мм. Все трубы изготовлены на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе из стали 20.

Узловые соединения трубчатых элементов приняты преимущественно бесфасоночными. Заводские стыки сварены на подкладном кольце. При монтаже с целью уменьшения объемов сварочных работ стыки сжатых элементов выполняли, как правило, на фланцевых соединениях с

использованием высокопрочных болтов, а для растянутых элементов были применены шкворневые соединения с соединительными втулками диаметром 124, 164 и 194 мм.

Еще одним примером удачного использования труб может служить покрытие Международного выставочного центра (МВЦ) в Киеве на Броварском проспекте, построенное в 2002 г. Металлические конструкции выставочного центра запроектированы ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского» (главный инженер проекта М. Н. Пальчик). Решетчатое покрытие в виде стропильных и подстропильных ферм и системы связей выполняют не только инженерные, но и архитектурные функции. Стропильные фермы пролетом 24,6; 30,0 и 48,0 м имеют криволинейный нижний и верхний пояса, подстропильные фермы пролетом 60,0 м — параллельные пояса (см. цв. вклейку, рис. 6). Для поясов и опорных раскосов ферм пролетом 60,0 м использованы толстостенные цельнотянутые трубы сечением 377×40 мм из стали 20, для других элементов решетки — трубы сечениями от 152×6 до 325×18 мм из той же стали. Исходные заготовки труб имеют длину 12 м. Все заводские стыки сварены на подкладных кольцах, монтажные стыки верхнего сжатого пояса выполнены также на подкладных кольцах, а нижнего растянутого пояса — на полумуфтах. Узловые соединения труб бесфасоночные, они имеют непосредственное примыкание элементов решетки к поясам.

Особенностью конструкции ферм является изготовление элементов пояса с патрубками элементов решетки в узлах. При монтаже каждый из элементов решетки соединяется с соответствующими патрубками узлов верхнего и нижнего поясов двумя стыками, которые выполняются с помощью двух фигурных полумуфт. Это существенно упрощает сборку конструкции на монтаже, снижает требования к точности изготовления заготовок, но вместе с тем ведет к увеличению расходов металла и сварочных материалов. При современном развитии сварочных технологий и материалов такие соединения выполняются односторонней сваркой с обеспечением обратного формирования сварного шва. Последнее достигается, например, при использовании отечественных электродов марки АНО-ТМ или выпускаемых в Японии электродов LB-524.

Изготовление конструкций МВЦ осуществлялось на Днепропетровском заводе металлоконструкций им. И. В. Бабушкина, монтаж выполняли специалисты ОАО «Укрстальконструкция» и «Центростальконструкция» (г. Киев).

Примером эффективного использования труб в покрытиях промышленных зданий может служить построенный в 2004–2007 гг. в Киевской области цех ОАО «Ветропак Гостомельский стек-



лозавод» (см. цв. вклейку, рис. 7). Проект цеха разработан тем же авторским коллективом ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского». Трубчатые конструкции цеха изготовлены на Черниговском заводе металлоконструкций и металлооснастки. Монтаж конструкций выполнен ОАО «Укрстальконструкция» и ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского». Для ферм пролетом 42 м использованы бесшовные цилиндрические трубы из стали 20. Сечение поясов ферм составляет 219×8 мм, решетки — 152×6 мм. Узловые соединения выполнены путем непосредственного примыкания элементов решетки к поясу. Стыки труб верхнего сжатого пояса сваривали кольцевыми швами на подкладных кольцах, нижнего растянутого пояса — с помощью фигурных накладных полумуфт. Такое техническое решение, хотя и не является оптимальным с позиции расхода металла, но позволяет упростить сборку конструкций как в заводских условиях, так и на монтаже.

Перечень конструкций из труб, запроектированных и построенных в последнее десятилетие, был бы не полным без упоминания о сооружениях на континентальном шельфе.

Значительное количество сооружений на континентальном шельфе Украины спроектировано ООО «Институт «Шельф» — это в основном морские стационарные платформы, предназначенные для бурения и промышленной добычи нефти и газа с акваторий Азовского и Черного морей. За последние годы разработано более десятка крупных проектов, большинство из которых реализовано. Выбор конструкции платформ обычно осуществляется с учетом природно-климатических условий района строительства, наличия технических средств для монтажа и закрепления конструкций, возможностей предприятий, изготавливающих конструкции, способа транспортировки конструкций к месту их установки.

Следует заметить, что в Украине отсутствует мощное специализированное предприятие по производству морских сооружений, поэтому изготовление конструкций осуществляется на судостроительных заводах или специальных монтажных площадках, расположенных на берегу вблизи осваиваемого месторождения. Кроме того, для элементов конструкций приходится использовать трубы газового сортамента с относительно небольшой толщиной стенки и соотношением их диаметров к толщине стенки $D/t > 50$. В связи с этим при проектировании конструкций особое внимание необходимо уделять вопросам прочности узловых соединений из труб. Учитывая небольшие глубины Азовского моря и осваиваемых в настоящее время месторождений в Черном море можно обходиться без специальных труб, предназначенных для морских платформ с толщиной

стенки 30...40 мм. Освоение месторождений на глубине моря свыше 100 м потребует изготовления специальных труб или их закупки за рубежом.

Эффективность использования труб в сварных конструкциях во многом зависит от технологии их производства. Одним из трудоемких процессов изготовления конструкций из труб является прирезка концов элементов и последующая их сборка в узлах. Эти технологические операции существенно упрощаются при использовании современных машин для газокислородной резки труб.

В Украине только две организации (ОАО «Укрстальконструкция» и ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского») имеют машины для резки труб с шестикоординатной цифровой системой управления — Tubosec «С» марки RM 631-1500-5T (производство фирмы «Messer Griesheim», Германия). Эти машины по заданной программе осуществляют прирезку концов труб в зависимости от соотношения диаметров примыкающей и основной трубы, угла наклона и толщины стенки примыкающей трубы. При этом одновременно выполняется и разделка кромок под последующую сварку. Диаметр труб, для резки которых может использоваться указанное оборудование, составляет 80...1500 мм, длина — 700...10000 мм, максимальная масса обрабатываемой трубы — до 5000 кг. Такие параметры труб позволяют использовать их в широкой номенклатуре сварных конструкций — от легких ферм до сооружений морских стационарных платформ.

Машинная резка за счет высокой точности поверхностей кромок реза дает возможность достичь экономии расходов при последующей сварке в пределах 10...20 %. Экономические преимущества ее использования при изготовлении сварных конструкций из труб настолько существенны, что амортизация капиталовложений обеспечивается при односменной работе и 60%-й загрузке машины.

Приведенный обзор не охватывает в полной мере весь спектр сварных конструкций из труб, изготовленных в Украине или с участием украинских организаций, в том числе и за последние годы. К таким конструкциям могли быть отнесены также пешеходные переходы через автомагистрали и другие конструктивные решения, созданные за последнее время.

Вместе с тем, приведенные данные свидетельствуют, на наш взгляд, о технических возможностях Украины как в части проектирования, так и изготовления ответственных сооружений с использованием цилиндрических труб. Это приобретает особое значение в связи с предстоящей реализацией проекта нового безопасного конфайнмента для Чернобыльской АЭС, представляющего собой пространственную систему, основными несущими элементами

которой являются арки пролетом 150 м, состоящие из трубчатых элементов. Проектным и научно-исследовательским институтам Украины вполне по силам разработать надежную конструкцию укрытия, а промышленным предприятиям и организациям изготовить трубы необходимого сортамента, создать конструкции из них и осуществить их монтаж.

Выводы

1. Благодаря имеющемуся научному потенциалу, значительному опыту ведущих проектных институтов и производственной базе, оснащенной достаточно современным оборудованием и технологиями, в Украине имеются все условия для широкого использования цилиндрических труб в сварных решетчатых конструкциях различного назначения.

2. При проектировании и изготовлении сварных конструкций гражданского и промышленного назначения из труб далеко не всегда используются оптимальные соотношения параметров труб и конструктивные решения стыковых соединений, что вызвано стремлением упростить их изготовление, однако приводит к перерасходу стали и сварочных материалов. Не уделяется должного внимания использованию в конструкциях из труб сталей повышенной и высокой прочности.

3. Определенным сдерживающим фактором использования труб в конструкциях является отсутствие национальной общестроительной нормативной базы, отражающей особенности проектирования трубчатых конструкций, а при проектировании морских сооружений отсутствует нормативная база, регламентирующая расчет их устойчивости.

1. *Гарф Э. Ф.* Особенности проектирования металлических конструкций из труб // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. — 2003. — № 4. — С. 11–17.
2. *Сварные строительные конструкции* / В. Н. Шимановский, Э. Ф. Гарф, В. А. Пермяков и др. — В 3 т. — Т. 2: Типы конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 680 с.

3. *Новиков В. И., Ковтуненко В. А.* Прикрепление трубчатых элементов решетки к узловым фасонкам // Автомат. сварка. — 1959. — № 4. — С. 3–13.
4. *Новиков В. И., Ковтуненко В. А., Шумицкий О. И.* Некоторые вопросы проектирования и сооружения цельносварной башни // Там же. — 1963. — № 5. — С. 69–74.
5. *Новиков В. И., Ковтуненко В. А.* Прочность и расчет сварных бесфасоночных узлов // Там же. — 1969. — № 9. — С. 70–71.
6. *Hlavacek V.* Strength of welded tubular joints in lattice girders // Construzioni Metalliche. — 1970. — № 6. — P. 521–529.
7. *Experimental study on the strength of thin wall welded tubular joints* / T. Nakajima, K. Ishimazu, M. Shimizu et al. — S. I., [1971]. — 41 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XV-312–71).
8. *Marshall P. W.* Connections for welded tubular structures // Welding of tubular structures. — Oxford: Pergamon press, 1984. — P. 1–57.
9. *Marshall P. W., Toprac A. A.* Basis for tubular joint design // Welding Res. Supplement. — 1974. — May. — P. 1923–2013.
10. *Pan R. B., Plummer F. B., Kuang J. G.* Ultimate strength of tubular joints // J. Petrol. Technol. — 1977. — 29, Apr. — P. 449–460.
11. *Kurobane Y., Makino Y., Mitsui Y.* Ultimate strength formulae for simple tubular joints. — S. I., [1976]. — 31 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XV-385–76).
12. *Study of strength and design of cylindrical tubular welded connections at static loading* / E. F. Garf, V. I. Novikov, A. E. Litvinenko, L. Ya. Yurko // Welding of tubular structures. — Oxford: Pergamon press, 1984. — P. 359–372.
13. *BS 6235.* Code of practice for fixed offshore structures. — Filed 28.09.84.
14. *API RP 2A.* Recommended practice, for planning, designing and constructing fixed offshore platform. — Введ. Jan. 1983.
15. *Rules for the design construction and inspection of offshore structures.* — Введ. 1985.
16. *Решетников Б. Н., Ривкин А. М.* Результаты испытаний моделей стропильных ферм из высокопрочных труб // Пром. стр-во. — 1971. — № 1. — С. 31–35.
17. *Гарф Э. Ф., Таурли З. М.* Статическая прочность сварных трубчатых узлов при сложном нагружении // Азерб. нефт. хоз-во. — 1988. — № 10. — С. 48–53.
18. *ВСН 51.3–85.* Проектирование морских стационарных платформ. — Введ. 01.01.85.
19. *ВСН 51.4–85.* Бесфасоночные узлы конструкций из труб морских нефтегазопромысловых сооружений. Методика расчета прочности. — Введ. 03.06.85.
20. *ВСН 41.88.* Проектирование ледостойких стационарных платформ. — Введ. 03.01.89.
21. *Лебедич И., Козьявкин И.* Конструкции стадиона «Металлург» в Днепропетровске // А+С. — 2007. — № 1. — С. 160–164.

Widening of application of welded structures made from tubes is inseparably linked with improvement of welding as a technological process for materials joining, and involves fulfilment of requirements for assurance of quality and strength of the welded joints. It is shown that Ukraine has many-year traditions in the field of fabrication of structures from tubes, and that it has preserved its scientific and industrial potential for further development of this field.

Поступила в редакцию 17.01.2008



УДК 621.791.927.93

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЗУБЬЕВ ВАЛ-ШЕСТЕРНИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ*

С. М. КОЗУЛИН, инж., И. И. ЛЫЧКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. С. ПОДЫМА, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Изложен опыт применения электрошлаковой наплавки при исправлении дефектов зубьев подвальной вал-шестерни вращающейся обжиговой печи, возникших в процессе ее изготовления.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, вал-шестерня, дефекты зубьев, восстановление, эвольвентный профиль, плавящийся мундштук, температура нагрева, термический цикл, остаточные напряжения и деформации

Восстановление крупногабаритных, дорогостоящих деталей машин с применением электрошлаковой сварки и наплавки позволяет значительно продлить срок их эксплуатации, а также уменьшить нагрузку на литейные и кузнечно-прессовые цехи путем сокращения количества выпускаемых запасных деталей [1]. Наименее изученной категорией известных на практике разновидностей ремонта является исправление дефектов деталей и узлов, возникающих в процессе их изготовления.

В ПО «Волгоцеммаш» на завершающей стадии изготовления подвальной вал-шестерни привода вращающейся обжиговой печи диаметром 3,6×110 м были обнаружены дефекты в двух зубьях, не подлежащие исправлению согласно существующей на предприятии технологии изготовления таких изделий (рис. 1). Вал-шестерня (модуль зуба $m = 40$, количество зубьев $z = 21$, длина зубьев 700 мм, диаметр выступов 920 мм, масса вал-шестерни 4150 кг) была изготовлена из цельной поковки стали 34ХН1МА [2] и предназначалась для поставки на Николаевский комбинат строительных изделий для установки в печной агрегат.

После нарезки зубьев на одном из них было обнаружено недопустимое занижение впадины и эвольвентного профиля по всей длине зуба, на другом — срезана часть профиля. В результате дорогостоящую деталь, прошедшую практически все стадии механической обработки, отдел технического контроля завода признал окончательным браком.

Однако специалисты ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и отдела главного сварщика ПО

«Волгоцеммаш» решили восстановить забракованную вал-шестерню с применением электрошлаковой наплавки (ЭШН). Для этого разработали технологию ЭШН и специальную технологическую оснастку. При этом необходимо было обеспечить не только качество восстановления зубьев, но и сохранить геометрические размеры вал-шестерни. Главная задача заключалась в том, чтобы в процессе ЭШН не допустить возникновения продольных остаточных напряжений в теле вал-шестерни, превышающих область упругих деформаций для данного конструкционного материала.

Учитывая, что вал-шестерня изготовлена из конструкционной легированной стали с повышенным содержанием углерода (0,3...0,4 %) [3], при восстановлении зубьев требуется проведение

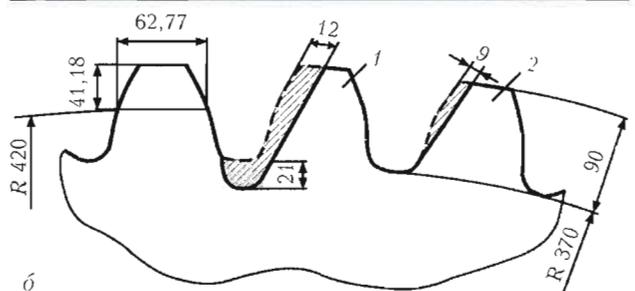
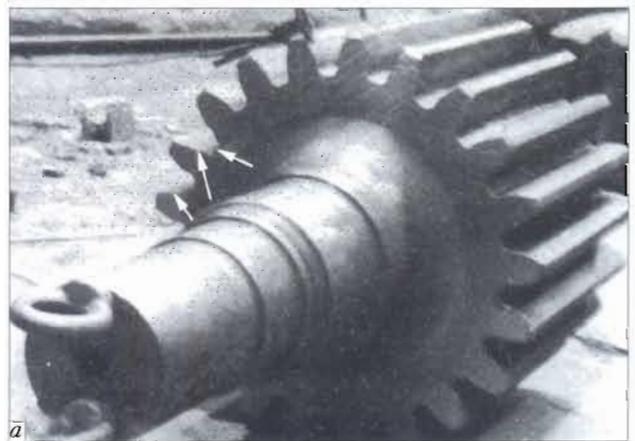


Рис. 1. Вал-шестерня привода вращения обжиговой печи с дефектами зубьев, образовавшимися при ее изготовлении (а), и схема дефектов зубьев (б): 1 — зуб с заниженной впадиной и срезанной частью эвольвентного профиля; 2 — зуб со срезанной частью эвольвентного профиля

* В восстановлении вал-шестерни принимали участие работники ПО «Волгоцеммаш» инж. А. П. Сятышев, кандидаты техн. наук Д. И. Фильченков и Л. Ф. Башев.

предварительного подогрева и последующей термообработки. Температуры предварительного подогрева определили по известной методике, изложенной в работе [4]. Расчет показал, что участок металла вал-шестерни в зоне наплавки необходимо нагреть до температуры 320 °С. Так как применить общую нормализацию изделия после наплавки в данном случае невозможно, было решено в качестве эксперимента ограничиться проведением высокого отпуска.

На одном из участков электрошлаковой сварки ПО «Волгоцеммаш» дефектную вал-шестерню установили на инвентарные тумбы в строго вертикальном положении. Для контроля деформации изгиба вала изготовили специальное устройство, на котором установили два стрелочных индикатора часового типа с точностью измерения 0,01 мм. Было предусмотрено осуществлять замеры отклонения оси вала вал-шестерни в горизонтальной плоскости на уровне верхнего торца вала (рис. 2). Один индикатор фиксировал отклонения в плоскости, проходящей посередине впадины, расположенной между дефектными зубьями, другой — отклонения в перпендикулярной плоскости. Для контроля степени общего нагрева тела шестерни, а также наблюдения перепада температур в диаметрально расположенных участках на торцевой поверхности в области диаметра впадин зачеканивали хромель-алюмелевые термопары (рис. 2). Запись температур осуществляли самописцем КСП-4.

Учитывая, что дефекты зубьев находились лишь с одной стороны эвольвентного профиля, решили не удалять тело дефектных зубьев, как это делали обычно [1], а осуществить одностороннюю наплавку каждого зуба с последующим восстановлением формы рабочих профилей с помощью модульной фрезы на зубофрезерном станке. Для проведения восстановительных работ изготовили специальную технологическую оснастку: стойку с консольным кронштейном для крепления стрелочных индикаторов часового типа, плиту с опорными планками, медные водоохлаждаемые накладки специальной конструкции, графитовый тигель, графитовый электрод с электрододержателем, сифонную воронку и др.

Для образования полостей под наплавку параллельно плоскостям срезанных профилей зубьев установили водоохлаждаемые накладки, под определенным углом к которым со стороны вершин зубьев поставили переставные водоохлаждаемые накладки. При этом в целях сохранения рабочих поверхностей зубьев, расположенных рядом с дефектными, формирующую оснастку крепили к заходному и выходному карманам, установленным на торцевых частях зубьев. Для обеспечения гарантированного сплавления в нижних (торцевых) участках зубьев, а также требуемой

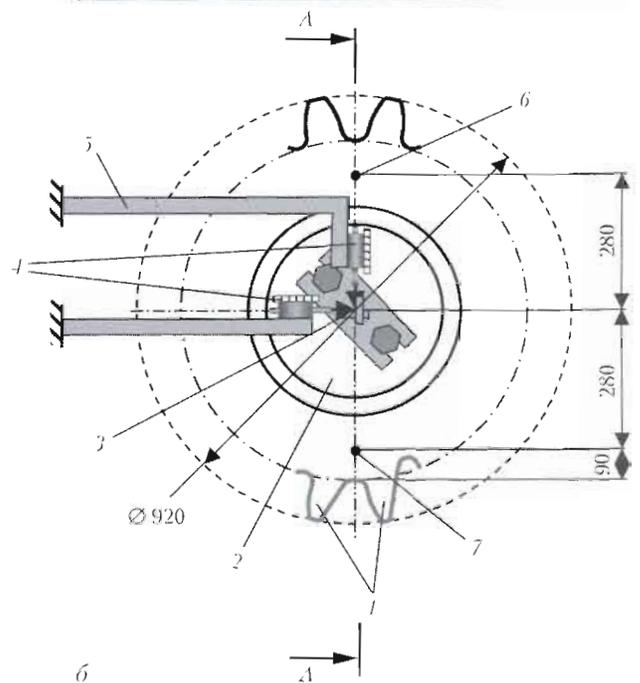
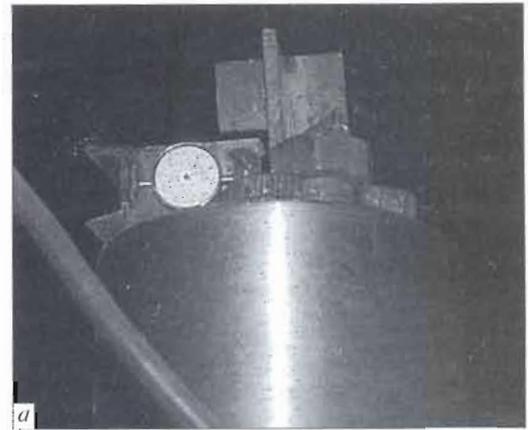


Рис. 2. Устройство (а) и схема измерения отклонений верхнего торца вала от вертикальной оси при проведении наплавки зубьев и места установки термопар (б): 1 — дефектные зубья; 2 — торцевая поверхность вала; 3 — опорные планки; 4 — индикаторы часового типа; 5 — кронштейн крепления индикаторов; 6, 7 — место установки соответственно термопары № 2 и 1

глубины шлаковой ванны, начало электрошлакового процесса осуществляли методом «жидкого» старта. Для этого в заходных карманах устанавливали сифонную воронку, через которую заливали строго дозированные порции жидкого флюса. Флюс расплавляли в графитовом тигле с помощью графитового электрода. Наплавку выполняли плавящимся мундштуком с помощью аппарата А-645 и трансформатора ТШС-3000-3 (рис. 3). Пластины плавящегося мундштука изготавливали из стали 34ХН1МА, применяли сварочную проволоку Св-10Г2, флюс АН8М. Режимы ЭШН рассчитывали с учетом рекомендаций, приведенных в работе [1]. Предварительный подогрев вал-шестерни проводили с помощью мощной газопламенной горелки заводской конс-



Рис. 3. Фрагмент восстановления зубьев подвешивочной вал-шестерни ($m = 40, z = 21$) с применением ЭШН

трукции, работающей на природном газе. Для сохранения поверхности шеек вала под установку подшипников от повреждения в процессе восстановления зубьев первые укутывали асбестовым полотном. Учитывая отсутствие практического метода расчета ожидаемых деформаций изделия в результате поперечной и продольной усадки наплавленного металла, использовали опытные данные замеров остаточных деформаций, полученные при ЭШС среднеуглеродистых сталей [5].

Перед наплавкой зубьев произвели общий предварительный подогрев вал-шестерни. Температуру нагрева и значения деформаций контролировали с помощью термопар и индикаторов часового типа (см. рис. 2). Для компенсации влияния продольной усадки на геометрические размеры изделия перед началом наплавки газопламенную горелку установили со стороны дефектных зубьев и производили локальный нагрев наплаваемых поверхностей до расчетной температуры, при этом верхний торец вала отклонился в сторону, противоположную зоне наплавки на 6 мм. Характер термических циклов нагрева металла в местах установки термопар в сочетании с деформациями вертикальной оси вала-шестерни, вызванными предварительным нагревом и непосредственно от ЭШН, приведен на рис. 4.

Сразу после выполнения ЭШН зубьев произвели обрезку прибыльных участков газокислородной резкой. С целью исключения возможности подкалки торцевых поверхностей наплавленных зубьев прибыльные части отрезали не полностью, оставляя выступающие участки высотой 15...20 мм для их дальнейшего удаления механическим путем. Затем в течение не более 30 мин вал-шестерню помещали в нагретую до 350 °С электрическую печь с выкатным подом для проведения высокого отпуска. В печи вал-шестерню

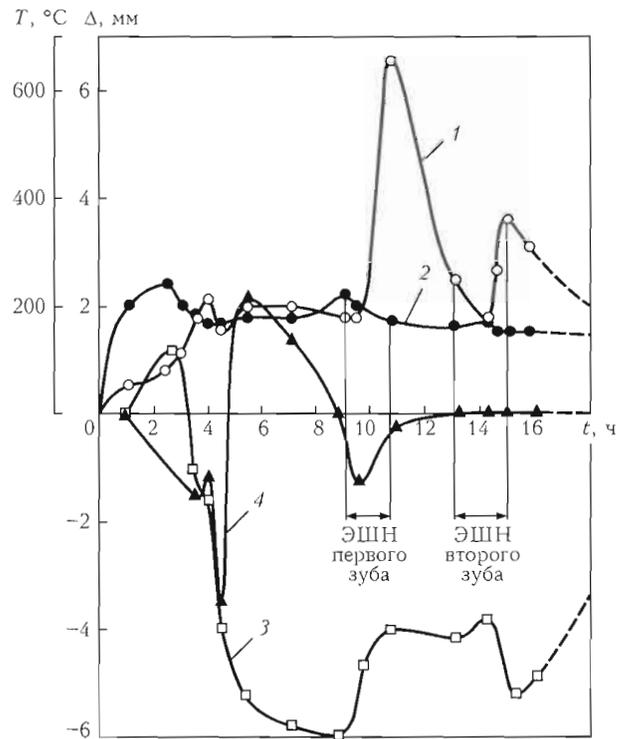


Рис. 4. Термические циклы нагрева вал-шестерни в местах установки термопар и отклонения консольной части вала от вертикальной оси при проведении предварительного нагрева вал-шестерни и восстановления дефектных зубьев (см. рис. 2): 1, 2 — соответственно нагрев металла в месте установки термопары № 1 и 2; 3 — отклонения в плоскости А-А, проходящей между восстанавливаемыми зубьями; 4 — отклонения в перпендикулярной плоскости А-А

установили в вертикальном положении на стальные тумбы. Отпуск проводили на следующем режиме: нагрев со скоростью не более 50 °С/ч до температуры 650 °С, выдержка в течение 8 ч, охлаждение с печью до температуры 80 °С.

После полного остывания вала-шестерни на токарном станке ДИП-500 произвели механическую обработку прибыльных торцевых поверхностей зубьев до размеров, указанных в чертеже. На рис. 5 показан внешний вид торцевых поверхностей наплавленных зубьев, форма провара и результаты замеров твердости, выполненных с помощью переносного прибора Польди. Результаты ультразвукового контроля наплавленных зубьев показали отсутствие дефектов в наплавленном металле зубьев и в металле ЗТВ вал-шестерни. Твердость наплавленного металла отличалась от твердости незакаленных участков не более чем на 8 %, что подтвердило правильность выбора сварочных материалов.

Восстановление эвольвентных профилей зубьев осуществили стандартной модульной фрезой на зубофрезерном станке. Затем вал-шестерню вновь установили на токарный станок. Контрольные замеры диаметров выступов и шеек валов под подшипники, а также радиальных биений участков вала произвели с помощью индикатора

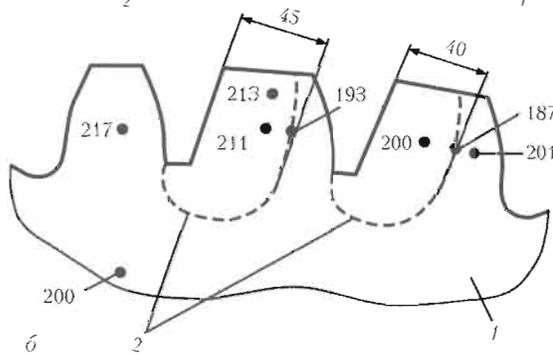


Рис. 5. Внешний вид торцевых частей зубьев после ЭШН и механической обработки прибыльных участков (а) и схема формы и глубины провара зубьев (б): 1 — торец вал-шестерни; 2 — форма провара; точками указаны места и значения твердости по *HV*

часового типа и измерительных скоб. Замеры показали, что биения поверхностей вершин зубьев (кроме восстановленных) по всей длине не превышают 0,1 мм (допускаемое биение 0,15 мм), биения шеек валов — 0,05 мм (допускаемое 0,05 мм). Диаметры валов также находятся в пределах допустимых значений [2]. Таким образом, искривление вала после ЭШН двух зубьев оказалось незначимым. Высота наплавленных и двух соседних с ними зубьев уменьшилась по сравнению с чертежным размером соответственно на 0,9...1 и 0,4...0,5 мм, однако специалисты отдела механического контроля завода-изготовителя посчитали, что такое незначительное уменьшение высоты зубьев не скажется отрицательно на их эксплуатационной способности.

Described is the experience of application of electroslag surfacing for repair of manufacturing defects in teeth of a sub-rim gear shaft of a rotating kiln.

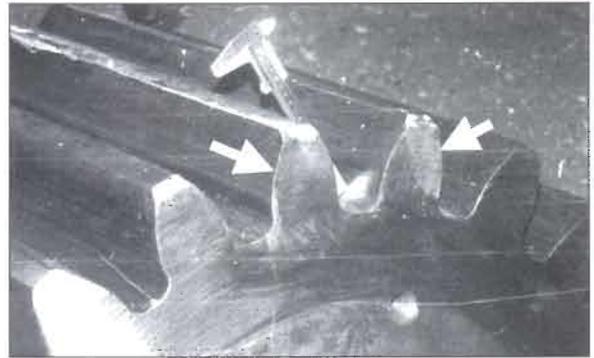


Рис. 6. Внешний вид наплавленных зубьев с применением ЭШН после их механической обработки на зубофрезерном станке

После проведения заковки рабочих поверхностей зубьев ТВЧ вал-шестерня была признана годной к эксплуатации (рис. 6) и отправлена на Николаевский комбинат строительных изделий, где успешно отработала положенный ресурс.

Выводы

1. Разработана и успешно реализована технология и техника восстановления дефектов зубьев крупного модуля ($m = 40$, $z = 21$), возникших при изготовлении подвальной вал-шестерни методом ЭШН без последующей высокотемпературной обработки.

2. Результаты выполненной работы подтверждают, что ЭШН является эффективным методом восстановления практически любых дефектов, образующихся в процессе изготовления или эксплуатации крупномодульных вал-шестерен.

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах* / И. И. Суцук-Слюсаренко, И. И. Лычко, М. Г. Козулин, В. М. Семенов. — Киев: Наук. думка, 1989. — 112 с.
2. *ОСТ 22-785-74. Венцы зубчатые и шестерни подвальные вращающихся цементных печей.* — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1974. — 10 с.
3. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
4. *Земзин В. Н., Шрон Р. З. Термическая обработка и свойства сварных соединений.* — Л.: Машиностроение, 1978. — 367 с.
5. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.

Поступила в редакцию 21.01.2008



ТЕХНИКА РЕМОНТА ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛС

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

Рассмотрена техника ремонта титановых лопаток сложного профиля толщиной 1...2 мм в месте соединения способом ЭЛС. Разработана программа высокопроизводительных режимов сварки (до 50 мм/с), позволяющая получать качественный металл шва. Обоснован отказ от проведения термообработки вне вакуумной сварочной камеры на восстанавливаемых с помощью ЭЛС титановых лопатках с целью получения их требуемого качества.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав, малые толщины, техника ремонта, высокая производительность, режимы сварки, металлографические исследования

Известен положительный опыт применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для восстановления рабочих лопаток паровых турбин [1, 2]. Для лопаток компрессоров реактивных двигателей, изготавливаемых из жаропрочных титановых сплавов, требуется высокая точность сопряжения свариваемых встык деталей при минимальном короблении после сварки. Способ ЭЛС удовлетворяет всем этим требованиям и отличается рядом технологических особенностей, которые делают его незаменимым при изготовлении таких изделий [3–6]. Минимальные тепловложения и деформации обеспечивают сохранение исходной геометрии восстанавливаемых тонкостенных лопаток при удовлетворительном качестве шва.

В настоящей работе изложена техника ремонта рабочих лопаток из титанового сплава ВТЗ-1 турбин газоперекачивающих станций. Выбор способа ЭЛС обусловлен требованиями массовой эффективности и повышенной эксплуатационной надежности таких деталей. Опыт применения ЭЛС для такого типа изделий малой толщины в отечественной промышленности весьма ограничен, поэтому необходимо проведение комплекса исследований для выявления условий качественного ремонта сложнопрофильных лопаток из титановых сплавов. Следует отметить, что накоплен положительный опыт применения ЭЛС толстостенных (до 20 мм) кованных заготовок из сплава ВТЗ-1 [7]. Технологические особенности получения ЭЛС сварных соединений толстостенных (100...160 мм) титановых сплавов, связанные с неоднородностью швов по толщине изделий, рассмотрены в работе [8].

Наша работа касается выполнения ЭЛС качественных швов на тонкостенной (1...2 мм) сложнопрофильной детали при значительной (≥ 50 мм/с)

скорости сварки без термообработки вне вакуумной камеры и применения присадочного материала. При этом необходимо было выполнять швы небольшой ширины, соизмеримой с толщиной свариваемой детали ($\delta \leq 1$ мм). Предполагается отсутствие недопустимых подрезов с лицевой и обратной стороны шва. Для обеспечения равнопрочности детали (лопатки) по толщине форма стенок шва в поперечном сечении должна приближаться к параллельной.

При восстановлении лопаток отрезается их дефектная часть, а затем выполняется приварка вновь изготовленной части «пера» из того же материала, что и лопатка. При этом сварной шов на лопатке располагается в области минимальных вибрационных нагрузок. Толщина лопатки может быть восстановлена путем электронно-лучевого напыления металла того же химического состава, что и материал лопатки.

ЭЛС осуществляли вертикальным пучком в нижнем положении электронной пушкой ЭЛА 60/15 на малогабаритной установке СВ-112. Рабочее расстояние составляло 100 мм. Образец закрепляли в специальном сборочном приспособлении для сварки тонкостенных криволинейных поверхностей (элементов лопатки) с соблюдением минимальных сборочных зазоров в стыке и в месте пристыковки выводных планок (рис. 1).

Эксперименты сначала проводили на скорости сварки 15...25 мм/с, однако значительная разница между скоростью ЭЛС и смещением электронного пучка поперек стыка не позволяла корректно выполнить в процессе сварки смещение пучка в стык. В дальнейшем от корректировки пучка пришлось отказаться и ЭЛС осуществляли по ранее установленному и зафиксированному в программе сварки усредненному положению пучка по всей длине стыка. Снятие перечисленных выше ограничений по позиционированию позволило перейти к ЭЛС на скорости до 50 мм/с, которая рекомендована для сварки стыков малой (0,8...1,6 мм) толщины, при этом требуются минимальные удельные тепловложения [9].

В связи с изменяющимся по толщине сечением свариваемого стыка потребовалось в программу ЭЛС ввести изменения тока пучка на входе-выходе лопатки. Ток фокусирующей линзы оставался неизменным. При ЭЛС экспериментальных образцов с нормальной фокусировкой (по минимальному фокальному пятну на поверхности изделия) получали швы, имеющие форму стенок в поперечном сечении, близкую к клиновидной, что в наших условиях недопустимо. Более целесообразно осуществлять ЭЛС с перефокусировкой пучка, что позволяет получать швы с почти параллельными стенками по всей толщине детали и с относительно широким проваром заподлицо с незначительным усилением. При этом нивелировалась опасность скрытых непроваров, связанных с неточностями сборки или настройки пучка на стык. Имеющие место вследствие быстротечности переходного процесса сварки уменьшение усиления шва на тонких (0,5...0,6 мм) концах лопаток и незначительные подрезы с лицевой стороны проплава (рис. 2) при необходимости устранялись декоративными локальными проходами.

Для получения швов требуемой формы применялась более трудоемкая техника сварки. Чтобы не допустить возможных подрезов и утонений шва при переходном режиме ЭЛС, ввод-вывод сварочного тока на концах лопаток осуществляли на минимально возможном отрезке длины шва, при этом значения тока подбирали в соответствии с толщиной свариваемого участка стыка. Крутизна нарастания-спада тока сварки и место ввода-вывода определяли экспериментально и фиксировали в программе ЭЛС. Значение тока сварки на основном участке шва составляло 30 мА.

Как вариант использовали импульсную ЭЛС с частотой 25...100 Гц и скважностью 1:4. При этом в ряде случаев наблюдалось нестабильное формирование клиновидного шва с неполным заполнением металлом (корневые раковины). По-

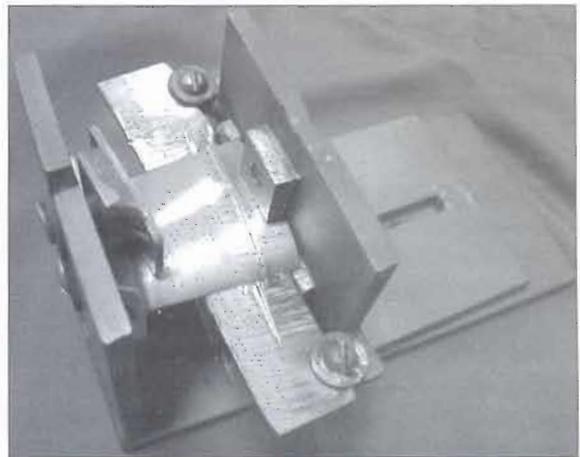


Рис. 1. Сборочное приспособление для выполнения ЭЛС титановых лопаток

видимому, реализация преимуществ импульсного режима сварки на больших скоростях при сквозном проплавлении проблематична.

Для повышения работоспособности сварных швов, выполненных на титановых сплавах типа ВТЗ-1 (жаропрочных $\alpha+\beta$ -сплавов), во многих работах [7, 9, 10] предлагались различные способы: использование термообработки, приставок из менее прочных и более пластичных материалов, введение в металл шва легирующих материалов и модификаторов. За рубежом из-за трудоемкости применения в промышленности указанных способов от них почти отказались, оставив в ряде случаев только отжиг. Требуемые механические свойства сварных соединений и устранение структурной неоднородности получают благодаря оптимизации термомеханического цикла ЭЛС.

Определенные трудности в достижении равнопрочности швов, выполненных ЭЛС, могут возникнуть из-за их резкого охлаждения после термического цикла сварки (со значительно большими скоростями в околошовной зоне (ОШЗ), чем, например, при аргонодуговой сварке). Вместе с



Рис. 2. Общий вид лопатки с ремонтным швом: а — лицевая сторона; б — обратная

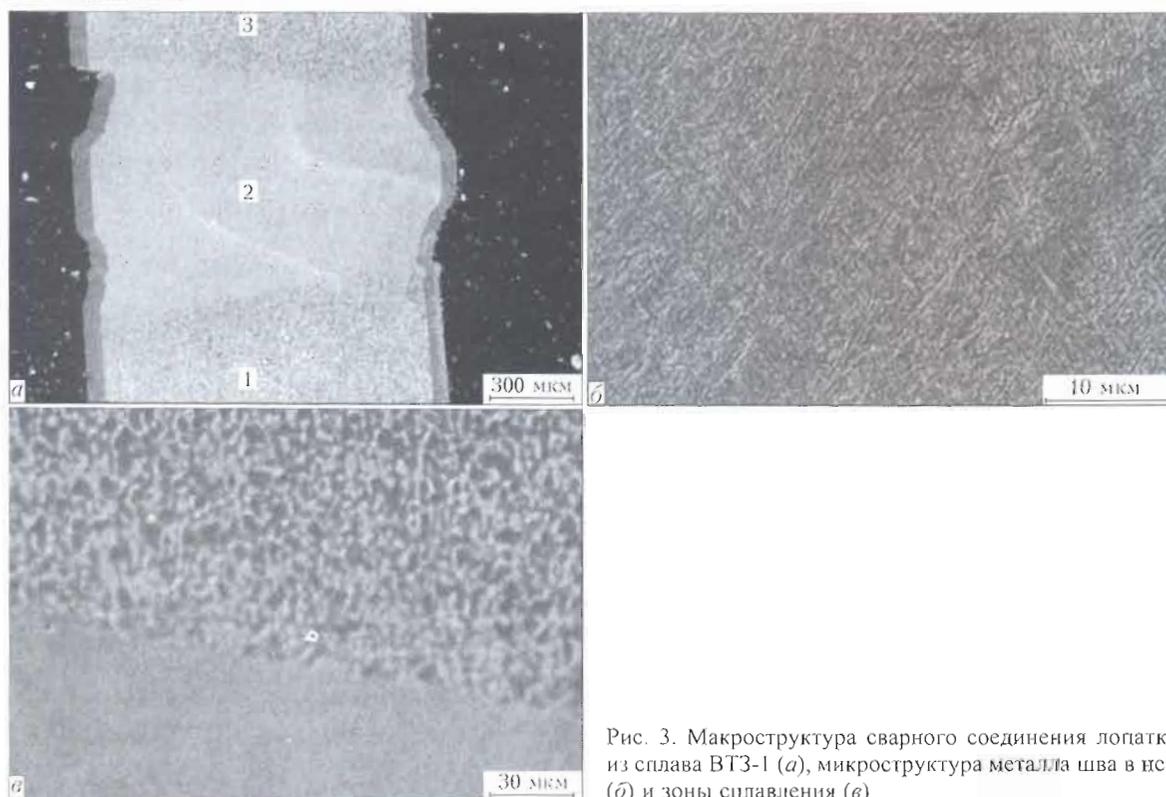


Рис. 3. Макроструктура сварного соединения лопатки из сплава ВТЗ-1 (а), микроструктура металла шва в исм (б) и зоны сплавления (в)

Химический состав (мас. %) основных компонентов в сварном шве, выполненном на лопатке из сплава ВТЗ-1

Участок сварного шва	Спектр анализа в точках по рис. 3, а	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Mo
Основа	1	6,48	0,62	89,18	0,16	0,14	3,42
Шов	2	6,44	0,43	89,46	—	0,13	3,53
Основа	3	6,07	0,58	89,74	—	—	3,62

тем, перегрев шва и ОШЗ титановых $\alpha+\beta$ -сплавов мартенситного типа может оказать негативное влияние на размер зерна металла, состояние его границ и соответственно ударную вязкость. Поэтому применять предварительную и (или) последующую термообработку после ЭЛС с целью получения высоких механических свойств сварного соединения следует осторожно. После оценки работоспособности полученных сварных соединений возможен при эксплуатационной нагрузке полный отказ от термообработки вне сварочной вакуумной камеры.

В настоящей работе благодаря отлаженной технике ЭЛС были получены бездефектные сварные соединения с приемлемой структурой металла ОШЗ.

Микроструктура поперечного сечения сварного соединения лопатки представлена на рис. 3, а. Ширина металла шва не превышает 1 мм. Структура металла шва характеризуется размером зерна 30...60 мкм. Металл шва имеет мартенситную структуру (рис. 3, б) с микротвер-

достью HV 4140 МПа. На участке ОШЗ (рис. 3, в) микротвердость составляет HV 3090 МПа. Основной металл имеет микротвердость HV 3090 МПа. Ширина ОШЗ, где наблюдался распад пересыщенного твердого раствора в результате термического воздействия, составляла 30...50 мкм.

Исследование химического состава металла шва, выполненного ЭЛС, показало, что в области сварного шва хром отсутствовал (таблица). Очевидно, в процессе сварки он сублимирует из расплава.

Результаты исследований механических свойств полученных сварных соединений показали, что данную технику ремонтной ЭЛС можно рекомендовать для промышленного применения.

1. *Электронно-лучевая* сварка направляющих лопаток паровых турбин / Л. И. Живага, С. И. Герман, Н. Е. Левенберг, А. А. Ситницкий // Материалы VII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке, г. Киев, 8-11 дек. 1980 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 27-40.
2. *Применение* электронно-лучевой сварки для восстановления лопаток паровых турбин / С. И. Герман, Н. Е. Левенберг, А. А. Ситницкий и др. // Там же. — 1981. — С. 40-41.
3. *Жеманок П., Петрик И.* Основные тенденции развития сварочного производства на ОАО «Мотор Сич». Проблемы и перспективы // Двигатель. — 2001. — № 3, май-июнь. — С. 30-32.
4. *Быков И., Кресанов И.* Прогрессивные процессы металлургического производства — основа обеспечения высокого качества продукции // Там же. — С. 28-29.
5. *Технология* восстановления лопаток газовых турбин / М. Л. Жадкевич, А. А. Бонларев, В. И. Зеленин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 53-54.

6. *Гайкин В.* Совершенство двигателей определяется совершенством технологии // Двигатель. — 2003. — № 6. — С. 11–16.
7. *Сравнительные исследования электронно-лучевой и дуговой сварки конструкций из кованных заготовок титанового сплава BT3-1 / В. А. Балабанов, В. В. Ковалев, В. Ф. Лупырь и др. // Материалы VII Всесоюзн. конф. по электронно-лучевой сварке, г. Киев, 8–11 дек. 1980 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 55–58.*
8. *Технологические особенности получения качественных сварных швов при ЭЛС толстолистовых титановых сплавов / В. В. Ардентов, А. И. Шестаков, В. Р. Петренко, Г. С. Расплетин // Там же. — С. 106–109.*
9. *Технология электронно-лучевой сварки / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.*
10. *Курочко Р. С., Иода А. В., Хорев М. А.* Термическая обработка сварных соединений сплава BT-23, выполненных электронно-лучевой сваркой // Авиац. пром-сть. — 1982. — № 5. — С. 58–59.

The method for repair of complex-configuration titanium blades with the 1...2 mm thick joint location by using EBW is considered. The software for achieving the high-efficiency welding parameters (with speed of up to 50 mm/s), which provide the quality weld metal, has been developed. Permission of refusal from heat treatment of the blades outside the vacuum welding chamber to provide the required quality of the welds on the titanium blades repaired by EBW is substantiated.

Посгулила в редакцию 17.12.2007



СВАРКА

8-я Международная специализированная выставка-конференция

2–4 декабря 2008 г.

г. Екатеринбург

Основные направления выставки:

- ✓ Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов
- ✓ Оборудование и технологии для наплавки и напыления
- ✓ Оборудование и технологии для плазменной, лазерной, газоплазменной сварки и резки
- ✓ Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- ✓ Оборудование и технологии для электрической контактной сварки
- ✓ Вспомогательное сварочное оборудование
- ✓ Оборудование и технологии для производства сварочных электродов
- ✓ Оборудование и технологии для пайки
- ✓ Спецодежда, средства индивидуальной защиты
- ✓ Материалы для сварки, наплавки, напыления, резки, пайки
- ✓ Средства и методы защиты от вредных производственных факторов в сварочном производстве
- ✓ Инструменты для сварки и механической обработки
- ✓ Промышленная вентиляция
- ✓ Методы обучения и повышения квалификации персонала

Организатор:

Екатеринбург, ул. Свердлова, 11а, оф. 505

Тел.: (343) 3-555-195, 370-33-74

[Http:// www.uv2000.ru](http://www.uv2000.ru)

E-mail: vystavka@r66.ru



БЕЗОПАСНЫЙ УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

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

Выполнен анализ источников и формы сигналов магнитных полей, создаваемых оборудованием при контактной сварке, с целью их достоверной гигиенической оценки в соответствии с новыми нормативами Украины. Приведены результаты исследований спектрального состава и напряженности магнитных полей при различных способах контактной сварки. Предложены рекомендации по защите сварщиков от магнитных полей.

Ключевые слова: контактная сварка, электромагнитное излучение, магнитные поля, напряженность, спектральный состав, предельно допустимые уровни, защита сварщиков

Широкое применение контактной сварки в автомобильной, авиационной, электронной и других отраслях промышленности Украины привело к созданию большого парка электрооборудования и сварочных машин (в основном переменного тока 50 Гц) различных типов и назначения мощностью более десятков и сотен киловольт на ампер. При эксплуатации этого оборудования на рабочих местах сварщиков генерируются магнитные поля (МП) значительной напряженности (до 80 кА/м).

В последнее время особое внимание уделяется вредному воздействию на организм электромагнитных полей (ЭМП) [1–4]. Одной из групп рабочих, которые подвергаются действию ЭМП большой интенсивности, являются сварщики. Заметим, что применительно к сварочным процессам санитарно-гигиеническое значение имеет только магнитная составляющая ЭМП [5].

Источником излучений является сварочный трансформатор, не полностью экранированный корпусом сварочной машины, и, как правило, неэкранированные сильноточные элементы сварочного контура (консоли, свечи, электроды). Результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют о локальном образовании МП рассеивания вблизи контактных машин. Сварочное оборудование может быть расположено близко к сварщику, а сварочные кабели могут находиться в прямом контакте с его телом (при сварке ручным инструментом в виде клещей, пистолетов и др.). Длительное воздействие указанного фактора негативно влияет на здоровье рабочих, вызывает определенные функциональные изменения в организме. ЭМП могут воздействовать на сердечно-сосудистую систему, вызывать патологические изменения нервной, эндокринной и других систем. Существуют также данные, свидетельствующие

о канцерогенном характере воздействия ЭМП. В связи с этим давно возникла острая необходимость в постоянном контроле электромагнитной обстановки на рабочем месте сварщиков и обеспечении безопасных условий их труда.

В последнее время в связи с введением в Украине новых нормативов ДСН 3.3.6.096–2002 [5] (регламентирующих условия безопасности при работе с постоянными МП; постоянными МП, создаваемыми выпрямленным трехфазным током; переменными МП частотой 50 Гц; ЭМП в диапазоне 1 кГц...300 МГц и импульсных ЭМП в спектральном диапазоне частот 0...1000 МГц) возникает необходимость в измерении и оценке сигналов МП с учетом их спектрального состава.

Цель данной работы — на основе анализа формы и интенсивности сигналов МП дать адекватную гигиеническую оценку электромагнитной безопасности при выполнении основных способов контактной точечной сварки и определить требуемую эффективность защиты от этих полей.

Характер МП при контактной сварке. Одним из основных факторов возникновения МП при контактной сварке является род тока источника питания (переменный, постоянный), запасаемая энергия (конденсаторная, индукционная сварка и др.) и режимы сварки.

Наибольшее влияние на выбор режимов сварки имеют электро- и теплопроводность свариваемого металла. Электропроводность определяет необходимое для сварки значение тока, теплопроводность — длительность нагрева и силу сжатия.

При нагреве свойства металла могут существенно изменяться. Необходимость сварки материалов с различными теплофизическими свойствами обуславливает следующие режимы точечной сварки: одноимпульсный (сварочный импульс); двухимпульсный (первый импульс дополнительный подогревающий) — «мягкий» режим сварки (длительность сварки примерно в 3,5 раза больше); трехимпульсный (два дополнительных импульса: подогревающий + отжигающий); режим для толстых листов при сво-

бодном охлаждении; модулированным импульсом тока.

Очень тонкие детали ($\leq 0,25$ мм) сваривают на особо жестких режимах с длительностью сварки менее 0,01 с. Жесткий режим осуществляется на конденсаторных машинах. Основной и дополнительный импульс тока имеют независимое регулирование и они могут подаваться с паузой или без нее. Основной импульс имеет модуляцию переднего фронта $t_{\phi} = 0,025$ с; $t_{св} = (0,03...0,07)$ с.

Шовная и рельефная сварка подобны точечной, режимы у них также одинаковые. Однако шовная сварка имеет, кроме того, шаговый и непрерывный режимы, когда сварочный ток может подаваться импульсами через продолжительные паузы или без них.

Наиболее широко применяемые углеродистые и среднелегированные стали имеют относительно невысокое электрическое сопротивление. Такие стали сваривают при длительном протекании тока, значение которого достигает 25 кА. При сварке цветных металлов и их сплавов при тех же толщинах требуются еще большие значения тока.

Анализ формы сварочного контура машин показывает, что она может быть отнесена к одному из классов геометрических фигур. В частности, для рассматриваемых машин контактной сварки она представляет незамкнутый с одной стороны прямоугольник, кабели подвесной точечной машины — две параллельные линии. Основным геометрическим размером конфигурации источника излучения для прямоугольника является половина расстояния между проводниками. Рабочая область сварщика (оператора) определяется относительно сварочного контура машины режимом ее работы и технологическим процессом обработки изделий.

Наличие в цепи (контуре) сварочного тока переменного параметра (сопротивления «сварочной точки») предопределяет преобразование (изменение) входного сигнала (спектра), форма сигнала МП полностью определяется формой кривой сварочного тока.

Одноимпульсная точечная и рельефная сварка переменным током частотой 50 Гц. При сварке переменным током частотой 50 Гц образуются МП, которые имеют форму радиоимпульсов (рис. 1). Радиоимпульс — это серия высокочастотных колебаний, которые могут быть представлены как результат 100%-й амплитудной модуляции высокочастотных колебаний видеоимпульсом. Электроаппаратура управления режимом сварки в этом случае, как правило, предусматривает регулирование длительности импульса сварочного тока $\tau_{и}$, фазовое регулирование тока (рис. 1, б) и модуляцию переднего и заднего фронтов импульсов.

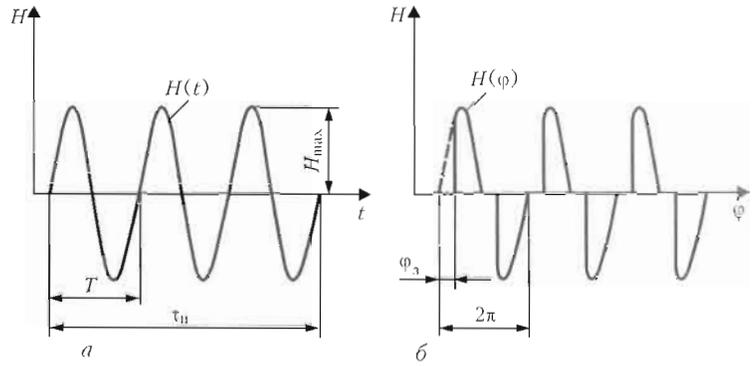


Рис. 1. Форма и характеристики радиоимпульсных сигналов одноимпульсных МП: а — регулирование длительности импульсно-сварочного тока; б — фазовое регулирование тока (обозначения см. в тексте)

Отметим, что в ранее действовавших санитарных нормах [6] допускалось, что радиоимпульсы МП, которые создаются при контактной сварке переменным током частотой 50 Гц, имеют незначительные искажения в результате переходных процессов в сварочной машине и переменного сопротивления в расплавленном металле. Принималось также, что сравнительно большая длительность этих импульсов ($\tau_{и} > 0,020$ с) и незначительные искажения формы синусоиды позволяют не учитывать состав спектра, считая, что основная часть энергии поля сосредоточена в области низких (до 50 Гц) частот (от нуля до $f = 1/\tau_{и}$ содержится 90 % всей энергии сигнала). В настоящее время эти допущения вряд ли можно считать корректными.

Известно также, что спектр импульса в форме отрезка синусоиды, который состоит из нескольких периодов n , определяется выражением [7]

$$H_{xx} = \int_0^{nT/2} e^{-j\omega t} \sin \omega_0 t dt = 2S_{xx} \int_{-nT/2}^{nT/2} e^{-j\omega t} \sin \omega_0 t dt = \frac{4j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} (-1)^n \sin \pi n \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (1)$$

где H_{xx} , S_{xx} — соответственно одно- и двухсторонняя спектральная плотность амплитуды напряженности МП; T — период колебания; ω —

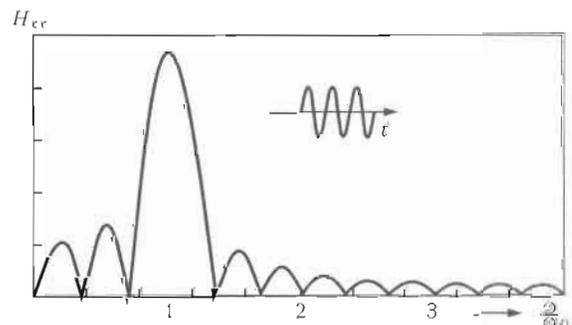


Рис. 2. Спектр отрезка синусоиды (фазовые распределения)

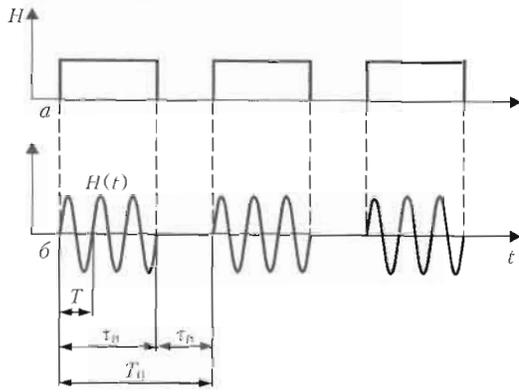


Рис. 3. Форма и характеристики радиоимпульсных сигналов многоимпульсных МП: а — характер изменения огибающей радиоимпульсов; б — пакки радиоимпульсов МП при многоимпульсной шовной сварке

круговая частота; n — количество периодов синусоиды с момента включения.

По сути — это текущий односторонний спектр синусоиды (рис. 2). Спектральная плотность амплитуды на частоте $\omega = \omega_0$ (50 Гц) увеличивается со временем линейно согласно выражению

$$H_{xx_n} \Big|_{\omega = \omega_0} = \frac{T}{2}, \quad (2)$$

т. е. в начале процесса спектр однородный (содержит большое количество гармоник) и лишь постепенно формируется максимум на частоте ω_0 .

Многоимпульсная шовная (двух- и трехимпульсная точечная и рельефная) сварка переменным током частотой 50 Гц. Импульсы МП, образующиеся при сварке в этом случае, повторяются через определенный промежуток времени и при шовной сварке образуют повторяющиеся серии, которые называются пачками импульсов. Возникающую последовательность радиоимпульсов (рис. 3, б) можно представить как результат изменения огибающей высокочастотного колебания в соответствии с последовательностью видеоимпульсов (рис. 3, а).

Подобную модуляцию часто называют импульсной. Однако здесь имеет место не модуляция, а включение источника сварочного тока в моменты возникновения импульсов и его выключение в моменты их прекращения. То обстоятель-

ство, что в начале каждого импульса колебание устанавливается заново, оказывает существенное влияние на спектр последовательности в зависимости от периода повторения импульсов T_n и скважности $Q = \tau_n / \tau_n$, где τ_n — время паузы.

Если имеющая место при рассматриваемых способах сварки и показанная на рис. 3, а последовательность видеоимпульсов является периодической и начальные фазы высокочастотного заполнения радиоимпульсов (рис. 3, б) одинаковы («привязаны» к фронту), то в результате модуляции получается последовательность радиоимпульсов, которая представляет собой периодическую функцию времени с периодом, равным периоду повторения видеоимпульсов T_n . Спектр подобного колебания, содержащий частоты, кратные частоте ω видеоимпульсов, показан на рис. 4.

Так же, как и в рассмотренном выше случае точечной сварки, электроаппаратура управления сварочной машины обеспечивает регулирование длительности импульса τ_n , фазовое регулирование тока ϕ_3 (см. рис. 1, где ϕ_3 — угол зажигания силовых тиристоров) и модуляцию переднего и заднего фронтов импульсов.

Конденсаторная сварка. При сварке постоянным током и запасаемой энергией создаются импульсы МП, имеющие форму видеоимпульсов. Видеоимпульсы — возрастание амплитуды положительной или отрицательной полярности от нуля до максимума и затем снижение до нуля (рис. 5). Форма видеоимпульса может быть различной: треугольной, ступенчатой, колоколообразной. При этом импульсы могут быть единичные (при точечной сварке) и могут повторяться через определенный промежуток времени (при шовной сварке).

Основными временными характеристиками импульсного МП являются длительность импульса τ_n , длительность паузы τ_n , период повторения T_n (скважность $Q = \tau_n / \tau_n$). Кроме того, импульс характеризуется длительностью фронта t_ϕ и среза t_c — временем возрастания и снижения напряженности в пределах от $0,1H_m$ до $0,9H_m$. Крутизна фронта характеризует скорость нарастания и убы-

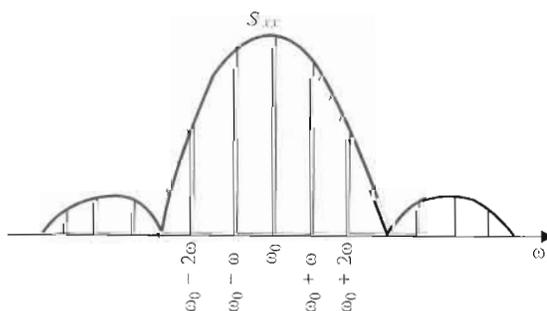


Рис. 4. Спектр многоимпульсной сварки

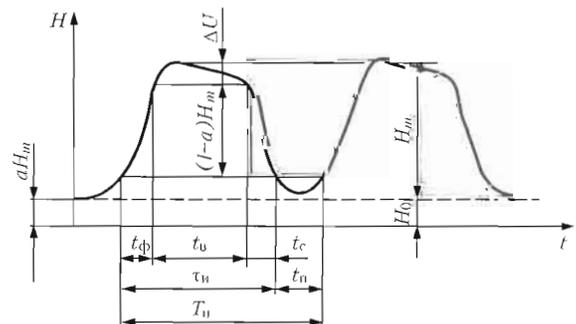


Рис. 5. Форма и параметры видеоимпульсных сигналов МП

вания напряженности МП соответственно $S_{\phi} = H_m/t_{\phi}$, $S_c = H_m/t_c$.

МП, образующиеся при сварке постоянным током и запасаемой энергией, являются непериодическими, их форма значительно отличается от гармонической. Спектр, образуемый подобными сигналами, зависит от длительности импульсов и их фронтов и определяется выражением

$$S_{xx}(j, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

где $S_{xx}(j, \omega)$ — двухсторонняя спектральная плотность напряженности МП; $H(t)$ — напряженность МП.

Уменьшение длительности импульса и увеличение крутизны фронтов ведут к расширению спектра в области высоких частот. На рис. 6, а показан теоретический спектр одиночного экспоненциального импульса при конденсаторной сварке, на рис. 6, б — внешний вид спектра пачки из трех одинаковых импульсов при интервале между импульсами $T_n = 3\tau_n$. Штриховыми линиями показана спектральная плотность одиночного импульса. С увеличением количества импульсов n в пачке спектральная плотность все более расщепляется и при $n \rightarrow \infty$ принимает линейчатую структуру спектра периодической функции. Это положение также относится к многоимпульсной сварке.

Таким образом, проведенный анализ рассматриваемых технологий и сварочного оборудования показывает, что при сварке в этих случаях в рабочей зоне образуются прерывисто-импульсные МП, т. е. поля, которые на протяжении определенного промежутка времени отличаются от нулевого значения и стохастически повторяются. Интенсивность облучения работающих зависит от типа используемого сварочного оборудования (амплитуды и длительности импульса сварочного тока, длительности паузы, количества циклов, длительности фронтов импульсов, фазового регулирования, $\cos \phi$ и др.), геометрических размеров и конфигурации источников МП, а также размещения рабочих мест относительно этих источников.

Нормирование МП. Предельно допустимые уровни (ПДУ) напряженности импульсных в спектральном диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц на рабочих местах персонала определяются, исходя из допустимой энергетической нагрузки и времени воздействия по формулам:

$$E_{\text{ПД}} = \sqrt{EH_{E_{\text{ПД}}}/T}, \quad (4)$$

$$H_{\text{ПД}} = \sqrt{EH_{H_{\text{ПД}}}/T}, \quad (5)$$

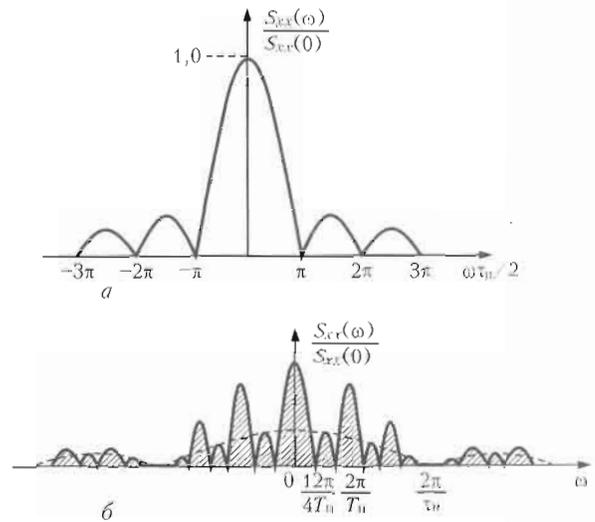


Рис. 6. Примеры спектров видеоимпульсов: а — теоретический спектр МП одиночного экспоненциального импульса при конденсаторной сварке; б — спектр МП пачки из трех одинаковых импульсов при интервале между импульсами $T_n = 3\tau_n$

где $E_{\text{ПД}}$ и $H_{\text{ПД}}$ — ПДУ напряженности электрического (В/м) и магнитного (А/м) полей; T — время воздействия, ч; $EH_{E_{\text{ПД}}}$ и $EH_{H_{\text{ПД}}}$ — предельно допустимые значения энергетической нагрузки соответственно электрического ((В/м)²·ч) и магнитного полей ((А/м)²·ч) в течение рабочего дня.

Предельно допустимые амплитудные значения напряженности МП в спектральных диапазонах частот определяются по табл. 1.

Если в диапазоне частот менее 300 МГц работают источники, для которых установлены разные ПДУ, необходимо придерживаться следующего требования:

$$\frac{E_1^2}{\text{ПДУ}_1^2} + \frac{E_2^2}{\text{ПДУ}_2^2} + \dots + \frac{E_k^2}{\text{ПДУ}_k^2} + \frac{H_1^2}{\text{ПДУ}_1^2} + \frac{H_2^2}{\text{ПДУ}_2^2} + \dots + \frac{H_k^2}{\text{ПДУ}_k^2} + \frac{W_1}{\text{ПДУ}_1} + \frac{W_2}{\text{ПДУ}_2} + \dots + \frac{W_k}{\text{ПДУ}_k} \leq 1. \quad (6)$$

Для рассматриваемых в настоящей статье случаев выражение (6) принимает вид

$$\frac{H_1^2}{\text{ПДУ}_1^2} + \frac{H_2^2}{\text{ПДУ}_2^2} + \dots + \frac{H_k^2}{\text{ПДУ}_k^2} = \sum_n \frac{H_{mk}}{\text{ПДУ}_k^2} \leq 1. \quad (7)$$

Допустимая продолжительность сварки $T_{\text{св. доп}}$ определяется из формул (5), (7).

При проведении экспериментов на данном этапе работ учитывались следующие предпосылки. Известен общий характер распространения МП вокруг вторичного контура с конфигурацией, показанной на рис. 7. На рис. 8 напряженность МП представлена в виде линий равной суммарной напряженности $H_0 = H_{x,y,z} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$. Действительная напряженность H_d в любой точке вы-

Таблица 1. Нормативные требования к МП

Параметр	Предельно допустимые амплитудные значения напряженности магнитного поля в спектральных диапазонах частот*								
	0...5 Гц	5...50 Гц	0,05...1 кГц	1...10 кГц	10...60 кГц	0,06...3 МГц	3...30 МГц	30...300 МГц	0,3...1 ГГц
$E_{ПД}$, В/м	60000	35000	3500	1000	300	200	150	100	80
$EH_{ПД}$ (В/м) ² ·ч	$3,2 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^6$	120000	7200	3200	1800	800	500
$E_{ПД}$, В/м (8 ч)	20000	5000	447	120	30	20	15	10	8
T , ч (при $E_{ПД}$)	0,89	0,16	0,13	0,12	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$H_{ПД}$, А/м	30000	10000	850	100	85	70	—	—	—
$EH_{ПД}$ (А/м) ² ·ч	$1,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^7$	70000	1300	900	400	—	—	—
$H_{ПД}$, А/м (8 ч)	4200	1400	94	13	11	7	—	—	—
T , ч (при $H_{ПД}$)	0,16	0,16	0,10	0,13	0,12	0,08	—	—	—

* Во всех случаях при определении диапазонов частот каждый диапазон исключает нижний и включает верхний предел частоты.

числяется по формуле: $H_d = H_0 I_{св}$. Данные из работы [8] были получены при длительном включении сварочного тока, длительность которого определяли временем «успокоения» стрелки измерительного милливольтметра и временем снятия показаний. В этой работе были определены уровни МП, которые влияют на работу находящейся поблизости электронно-измерительной и управляющей техники.

Анализ представленных данных показывает, что зона наименьшей напряженности МП располагается в плоскости XOZ перед контуром (рис. 8, а). Эксперименты проводили на машине точечной сварки МТ-1223 с номинальным длительным вто-

ричным током $I_{2H} = I_{св} = 5600$ А. На этом режиме основные параметры МП (H_m и t — время воздействия), создаваемых машинами контактной сварки переменным током частотой 50 Гц, по старым санитарным нормам [6] регламентировались графиком, приведенным на рис. 9. Так, на расстоянии 0,4 м на уровне точки соприкосновения электродов в плоскости XOZ (см. рис. 8, а) $H_m = 1,41 H_0 I_{св} = 3950$ А/м. При этом чистое время (суммарное время всех импульсов сварочного тока за рабочую смену) нахождения сварщика в этой зоне в течение рабочей смены не должно было превышать трех часов.

Методика определения напряженности МП. Учитывая, что в частотном диапазоне излучений 50...1000 Гц санитарная норма ужесточилась примерно в 15 раз по сравнению с диапазоном 5...50 Гц, в котором, как принималось ранее, эти излучения находятся, возникла необходимость экспериментального определения спектров напряженности импульсных МП. Для этого необходимо было первоначально разработать методику измерений и выбрать измерительную аппаратуру, определить спектры МП, проанализировать полученные данные в соответствии с новыми санитарными нормами [5], оценить влияние регулирования основных параметров сварочного цикла на спектры МП с целью их оптимизации и т. д. На этом этапе работ определяли спектры в зоне минимальной напряженности МП (рис. 7), что позволяет предварительно интерполировать полученные данные на все пространство рабочей зоны (рис. 8).

Требования новых санитарных норм к уровню импульсных электромагнитных излучений с учетом их спектрального состава однозначно определило использование в качестве регистрирующего прибора цифрового запоминающего осциллографа, совмещенного с персональным компьютером с соответствующим программным обеспечением. В качестве датчиков могут быть использованы приборы, основанные на гальваномаг-

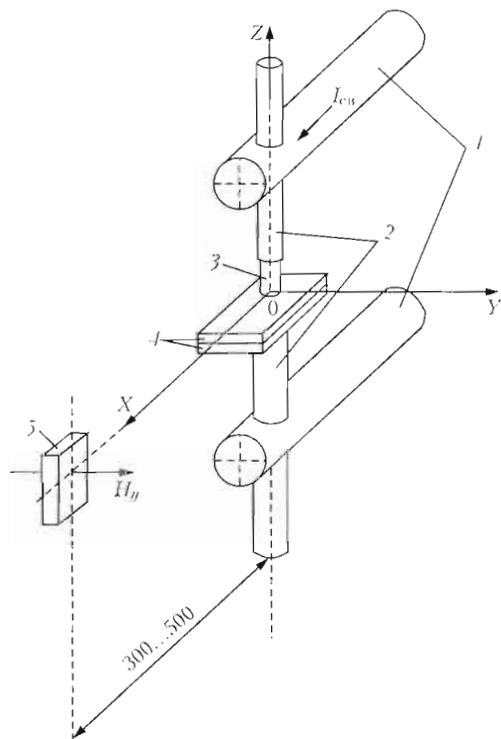


Рис. 7. Схема измерения напряженности МП: 1 — консоли сварочной машины; 2 — водоохлаждаемые свечи; 3 — электрод; 4 — свариваемые детали; 5 — датчик МП

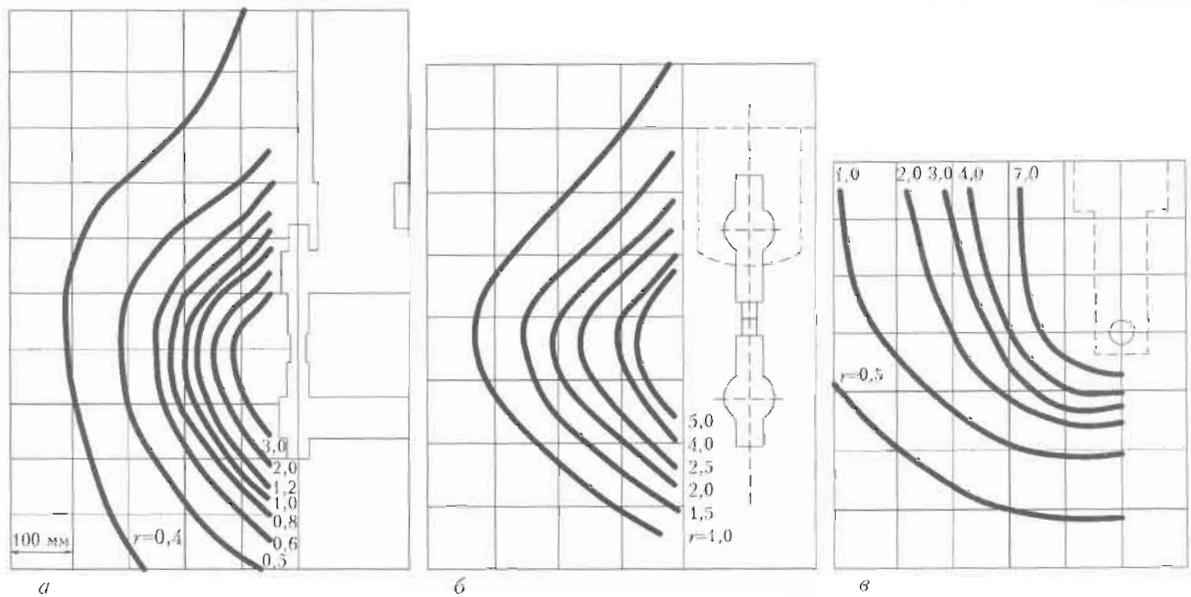


Рис. 8. Распределение напряженности МП в плоскости XOZ (а), YOZ (б), XOY (в)

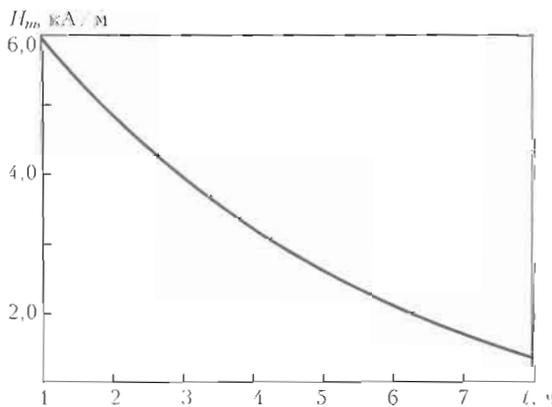


Рис. 9. Зависимость предельно допустимых значений напряженности непрерывных и прерывистых МП ($\tau_n \geq 0,02$ с; $\tau_n \leq 2,0$ с) частотой 50 Гц от времени воздействия

нитных явлениях в полупроводниках или индукционные катушки.

Для экспериментальной проверки изложенного выше, измерения и анализа исследуемых МП использовали следующие приборы: индукционный датчик магнитного поля ДМП-1; измеритель индукции магнитного поля ГФИ-1 (датчик Холла); осциллограф цифровой PCS-500 с функцией БПФ (быстрое преобразование Фурье) с ПК «Ezbook-700»; осциллограф цифровой запоминающий ТДС-1032 с функцией БПФ.

Аттестованные датчики и осциллографы обеспечивали измерения спектральных составляющих напряженности сигналов переменных и импульсных МП (см. табл. 1) от 10 до 160000 А/м. Нелинейность амплитудно-частотной характеристики датчика ДМП-1 в диапазоне частот 40...500 Гц не превышала ± 10 %, а датчика Холла в диапазоне 0,2...2000 Гц — ± 5 %.

С целью определения точности измерений была дана оценка погрешности приборов при наи-

более неблагоприятных сочетаниях (метод детерминированных оценок) частичных погрешностей, которая составила

$$\varepsilon_{пр} \cong \varepsilon_{датч} + \varepsilon_{осци} \cong 9 \%, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{датч}$ — основная погрешность датчиков ± 5 %; $\varepsilon_{осци}$ — погрешность осциллографов ± 4 %.

Случайная «сглаженная» ошибка спектральной оценки, усредненная по n_d (не перекрывающимся, отдельным одинаковым участкам реализации длиной $t_{из}$ [9]), составляла

$$\varepsilon_r \left[\left[\hat{H}_{xx}(f, t_{из}) \right]^2 \right] \cong \frac{1}{\sqrt{n_d}} = 14 \%$$

Результирующая погрешность оценки спектров составляла $\varepsilon = \varepsilon_{пр} + \varepsilon_r = 23$ %.

Результаты измерений и расчеты параметров МП выполнялись согласно требованиям [5], т. е.

$$\sum \frac{H_{mk}^2}{\text{ПДУ}_k^2} \cong \sum_k^{N-1} \frac{H_{xk}^2}{\text{ПДУ}_k^2} \quad \text{для каждого способа,}$$

условий экспериментов, параметров режимов сварки и частотного диапазона. При этом $H_{mk} = \sqrt{2} H_{xx}(f, t_{из}) = \sqrt{2} H_{xk}$ — амплитудное значение k -й гармоники (см. табл. 1 в 2), усредненное по $n_d = 50$ интервалам (опытам). Разрешение спектра по частоте $\Delta f = 1/t_{из}$, где время наблюдения $t_{из} = N \Delta t$ (Δt — период квантования сигнала, с; N — количество наблюдений для N -точечного ДПФ) (разрешение: АЦП)).

Результаты исследований. Измерения выполняли как в лабораториях Института электросварки, так и в производственных условиях предприятий, где используется контактная сварка. Ор-



ганизацию рабочих мест (размещение оборудования, силовых и сварочных кабелей и др.) можно считать типовой (произвольно оптимальной). Условия проведения измерений на рабочих местах при контактной сварке, сварочные режимы и результаты измерения параметров МП приведены в табл. 2. Режимы работы сварочного оборудования при измерении МП можно характеризовать как весьма средние по мощности, поэтому при работе этого оборудования на более высоких ступенях регулирования амплитудные параметры МП могут многократно превышать значения, приведенные в табл. 2. Полученные осциллограммы

и спектрограммы сигналов МП приведены на рис. 10–14.

Рассмотрим полученные результаты для каждого способа контактной сварки.

Контактная точечная сварка. Результаты исследований показали, что для всех видов контактной точечной сварки характерны следующие закономерности. Форма сварочного тока в виде короткой пачки (пачек) синусоидальных импульсов — отрезков синусоиды (рис. 10) определяет спектр МП, который имеет переходный характер (промежуточный между дискретным и сплошным). Составляющие спектра в частотном

Таблица 2. Результаты гигиенической оценки МП

Сварочное оборудование, способ сварки, род тока	Режим сварки		Зона измерения	Диапазон частот, Гц	$\sum \frac{H_{mk}^2}{ПДУ_k^2} T_{св. доп}^2, ч$
	Длительность цикла, с; вид импульса	Ступень трансформатора			
МТП-1110, контактная точечная (ручная), переменный ток (приварка листов оцинкованного металла к каркасу микроавтобуса)	0,650; 2 импульса с модуляцией переднего и заднего фронтов импульсов — один период	1 (минимальная)	Возле сетевого кабеля	5...50 50...1000	<<1; — 4,2; 1,9
	То же	То же	Кисти рук (между рукоятками сварочного пистолета на расстоянии 0,1 м от ферромагнитных частей)	5...50 50...1000	<<0,23; — 25,8; 0,31
	» »	4 (максимальная)	То же	5...50 50...1000	6,8; 1,17 172; 0,047
ЕЛОТОР-502 фирмы «Koster» (пистолет для приварки шпилек), дугостыковая, постоянный импульсный ток (приварка шпилек диаметром 3 мм к стальным листам)	0,28; импульс постоянного тока	—	» »	0...5 5...50 50...1000	<<1; — <<1; — 1,01; 8,0
МТК-2202 (стационарная машина), точечная сварка листового металла, переменный ток	0,360; 2 импульса с модуляцией переднего и заднего фронтов импульсов — 1 период	4 (максимальная)	В плоскости сварочного контура машины на расстоянии 0,3 м от точки контакта электродов	5...50 50...1000	<1; — 3,0; 2,7
	То же	То же	В плоскости сварочного контура машины на расстоянии 0,5 м от точки контакта электродов	5...50 50...1000	<<1; — 1,45; 5,5
	0,420; 1 импульс с модуляцией переднего и заднего фронтов импульсов — 1 период	» »	То же	5...50 50...1000	<<1; — 1,6; 5,0
	0,416; 1 импульс с модуляцией заднего фронта. Угол регулирования тиристоров ~40°	» »	В плоскости сварочного контура машины на расстоянии 0,3 м от точки контакта электродов	5...50 50...1000	<<1; — 23,7; 0,3
МТК-2201, стационарная машина для точечной конденсаторной сварки, постоянный ток (сварка тонколистового металла 0,8 мм)	10 мс; напряжение сварки 700 В	—	Грудь. Кисти рук (в плоскости сварочного контура на различных расстояниях от точки контакта электродов)	0...5 5...50 50...1000 0...5 5...50 50...1000	<<1; — <<1; — <<1; — <<1; — <<1; — 14,14; 0,64

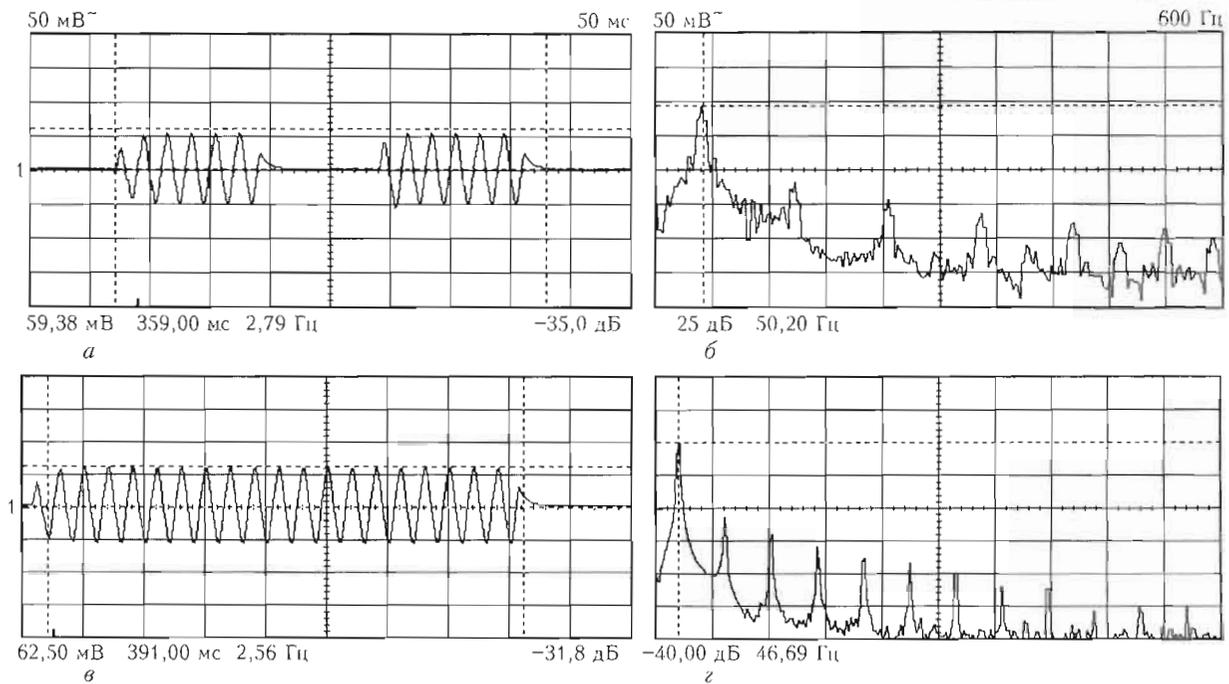


Рис. 10. Осциллограммы (а, в) и спектрограммы (б, г) МП контактной точечной сварки на машине МТК-2202: а — 2 импульса; в — 1 импульс

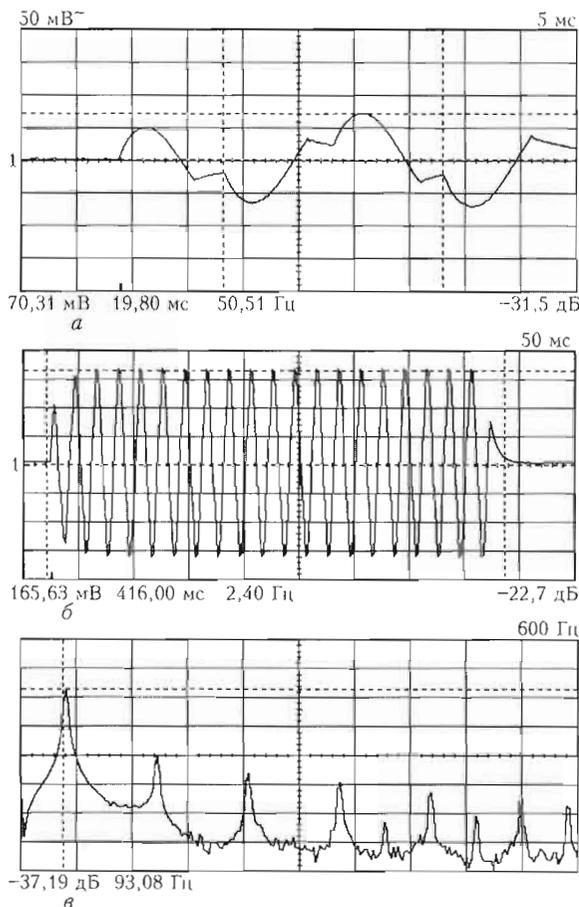


Рис. 11. Осциллограммы (а, б) и спектрограмма (в) МП контактной точечной сварки одним импульсом сварочного тока с фазовой регулировкой тиристорного контактора ($\varphi_3 \approx 40^\circ$)

диапазоне 50...1000 Гц определяют проблемы магнитной безопасности этого способа.

Режимы при точечной сварке можно считать достаточно разнообразными с точки зрения получаемых спектров МП, имеющими значительное влияние на его состав в зависимости от количества импульсов в пачке и количества пачек (до трех: подогревающий, сварочный и отжигающий).

Еще более значимым фактором, определяющим амплитуды гармоник спектра МП, является значение сварочного тока, т. е. мощностные показатели режима, определяемые «ступенью регулирования» сварочного трансформатора (при этом исследование влияния $\cos \varphi$ сварочных машин на форму сварочного тока и спектры сигналов МП на данном этапе работ не проводилось).

Фазовое регулирование тиристорных контакторов сварочного тока может иметь значительное влияние на магнитную обстановку в рабочей зоне и приводить к ее резкому ухудшению. В этом случае спектр МП смещается вправо с основной гармоникой 100 Гц (см. табл. 2 и рис. 11). При этом $T_{\text{св.доп}} \approx 0,3$ ч. Модуляция переднего и заднего фронтов импульсов существенного влияния на спектры МП не оказывает. Эти предварительные выводы можно априори перенести на способы рельефной и шовной сварки.

Отметим и неблагоприятные результаты, полученные при точечной контактной сварке ручным инструментом (клещи, пистолеты и др.). Осциллограммы и спектрограммы этого процесса приведены на рис. 12, условия проведения эксперимента — в табл. 2. На фотографиях (рис. 15), иллюстрирующих условия работы на киевском

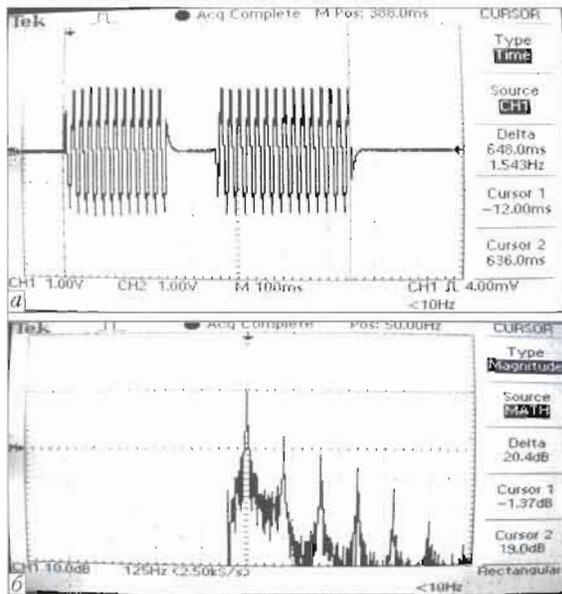


Рис. 12. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) МП между рукоятками пистолета МТП-1110 при ручной точечной контактной сварке

автомобиле при изготовлении кузовов микроавтобуса, можно наблюдать неблагоприятные пространственные размещения рабочего инструмента (сварочного пистолета) относительно тела сварщика во время работы. Учитывая, что на предприятии установлен 12-часовой рабочий день, длительность сварки $T_{св}$ с учетом длительности включения оборудования составляет несколько часов. Анализ полученных нами результатов измерений уровней МП показывает, что $T_{св,доп}$ для сварщика на этой технологической операции может составлять всего $T_{св,доп} \approx 0,047$ ч.

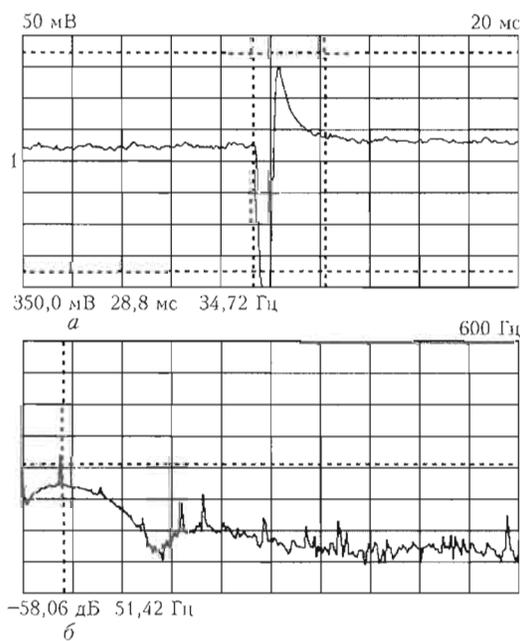


Рис. 13. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) МП конденсаторной точечной сварки на стационарной машине МТК-2201

Конденсаторная точечная сварка. Для всех видов конденсаторной точечной сварки на постоянном токе характерно, что форма сварочного тока в виде кратковременного экспоненциального видеопульса определяет сплошной спектр МП. Составляющие спектра в частотном диапазоне 5...1000 Гц, главным образом, определяют санитарные проблемы этого способа (см. табл. 2, рис. 13). В данном случае приведенная осциллограмма свидетельствует о неисправности электрической части конденсаторной машины МТК-2201, а именно «перебег» импульса через нуль при разряде конденсаторов, т. е. колебательный процесс при разряде должен исключаться. Таким образом, полученные данные отвечают реальным, но техническое состояние сварочной машины не отвечает техническим условиям. При этом $T_{св,доп} \approx 0,64$ ч.

Эти выводы можно интерпретировать и на ручную ударную конденсаторную сварку (ручная приварка шпилек диаметром 2...12 мм к листам пистолетом, установка УДК-701, разработка ИЭС им. Е. О. Патона) с очень вероятным допущением о более высоком магнитном излучении.

Дугостыковая сварка. При исследовании МП, которые возникают при сварке пистолетом «ELO-TOP» фирмы «Koester» (Германия), предназначенным для приварки шпилек диаметром 3...6 мм к листам импульсом постоянного тока (источник питания характеризуется отсутствием фазового регулирования тиристором), спектр сигнала МП имеет сплошной характер и смещен в диапазон частот 0...5 Гц (рис. 14). При этом $T_{св,доп} \approx 8$ ч,

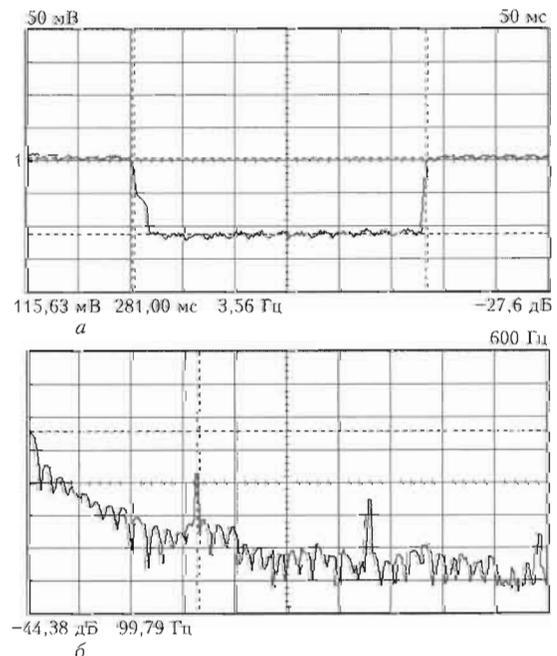


Рис. 14. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) МП дугостыковой точечной сварки пистолетом «ELO-TOP» (между рукоятками пистолета)



Рис. 15. Ручная контактная сварка пистолетом МТП-1110 на уровне плеча (а) и пояса (б)

т. е. обеспечивается минимальное влияние МП даже на кисти сварщика.

Рекомендации по защите сварщиков. Полученные результаты измерений напряженности МП дали возможность определить необходимую эффективность защиты при контактной электросварке (табл. 3). Под эффективностью защитных устройств понимается отношение напряженности МП (максимальное значение) на рабочем месте H_m к предельно допустимому $H_{ПД}$: $\Xi_3 = H_m / H_{ПД}$

Наиболее действенным решением проблем электромагнитной безопасности при контактной сварке могут служить технологические способы, а именно: оптимизация режимов контактной точечной, шовой и рельефной сварки не только с технологической точки зрения, но и электромагнитной безопасности (длительности, количества и модуляции импульсов, скважности, угла фазового регулирования тиристоров и т. д.); ограничение мощности контактных машин (особенно настольных машин, точечных клещей и пистолетов).

При этом разработчикам и изготовителям нового серийного сварочного оборудования необ-

Sources and shapes of signals of the magnetic fields generated by resistance welding equipment have been analysed to perform their reliable hygienic evaluation in line with the new standards of Ukraine. Results of examinations of spectral composition and intensity of the magnetic fields generated by using different resistance welding methods are given. Recommendations for protection of welders from the magnetic fields are suggested.

Таблица 3. Необходимая эффективность способов защиты при контактной сварке

Способ сварки	Максимальная напряженность МП на рабочем месте в диапазоне частот 50...1000 Гц, А/м	Необходимая эффективность защиты, раз
Точечная (клещи)	580	6...8
Точечная (стационарная)	290	3...4
Точечная (конденсаторная)	120	2
Дугостыковая (ручная, без фазового регулирования)	80	—
Шовная	—	2...3
Рельефная	—	2

ходимо учитывать условия их применения и действующие санитарные нормы, поскольку использование этого оборудования в промышленности будет ограничиваться уровнями электромагнитного излучения в рабочей зоне при испытаниях на максимальной ступени мощности сварочного трансформатора с различными комбинациями установок регулятора цикла сварки.

При превышении регламентируемых ДСН 3.3.6.096-2002 уровней электромагнитных излучений и недостаточности технологических мер по их снижению производственники должны обязательно применять такие известные дополнительные меры защиты работающих, как надлежащая организация рабочего места, предусматривающая защиту расстоянием, временем пребывания в опасной зоне, экранированием сварочного оборудования.

1. Weman K. Health hazards caused by electro-magnetic fields during welding // Svetsaren. — 1994. — 48, № 1. — P. 2.
2. Bourton M. A review of arc welding and electromagnetic compatibility. — [1995]. — 5 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-G100-95).
3. Epstein R. Electromagnetic fields: how big a problem in Europe? — [1995]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-C108-95).
4. Couderc M. P. Notes on magnetic fields in welding. — [1999]. — 24 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-99).
5. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. — К.: Мін-во охорони здоров'я, 2002. — 16 с.
6. СН 3206-85. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. — М., 1986. — 7 с.
7. Харкевич А. А. Спектры и анализ. — М.: Физматгиз, 1962. — 236 с.
8. Исследование напряженности магнитного поля при контактной сварке / Л. П. Чулошников, А. А. Чалев, Б. Д. Орлов, В. Н. Павлов // Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка. — 1980. — Вып. 3. — С. 5-6.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989. — 540 с.

Поступила в редакцию 01.11.2007



УДК 621.791.76:621.7.044.2

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕКОМПОЗЕРОВ И МЕШАЛОК НИКОЛАЕВСКОГО ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА

Л. Д. ДОБРУШИН, В. Г. ПЕТУШКОВ, доктора техн. наук, А. Г. БРЫЗГАЛИН, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен пример эффективного применения энергии взрыва для повышения надежности технологического оборудования Николаевского глиноземного завода путем снятия остаточных сварочных напряжений в сварных швах декомпозеров и мешалок (диаметр изделий до 14 м и высота до 34 м).

Ключевые слова: обработка взрывом, сварные декомпозеры, мешалки, сварные швы, остаточные напряжения, повышение ресурса эксплуатации

Энергетической основой коррозионного растрескивания металлов в щелочах являются напряжения растяжения [1–3]. Наличие остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливает растрескивание швов и приводит к появлению течей и опасности крупных аварий [4]. Снятие остаточных напряжений (ОН) в крупногабаритных металлоконструкциях термообработкой является весьма трудоемкой, дорогостоящей и малопродуктивной операцией [3, 4]. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология снятия ОН обработкой взрывом (ОВз), которая успешно использовалась при строительстве новых и расширении производства действующих глиноземных заводов бывшего СССР, Украины, а также в Югославии [2, 4, 5].

Существенное увеличение производственных мощностей, осуществляемое в последние годы ведущими мировыми производителями алюминия, возобновило настоятельную потребность в промышленном использовании этой технологии. В 2007 г. АО «РУСАЛ» завершило строительство 15 декомпозеров и двух мешалок на Николаевском глиноземном заводе с применением технологии ОВз для снятия ОН в сварных швах. Диаметр аппаратов 12 и 14 м, высота от 15 до 34 м при толщине сваренного металла (сталь Ст3сп) от 8 до 40 мм. Работы по ОВз выполнены по технологии и под руководством специалистов ИЭС им. Е. О. Патона силами НИЦ «Материалообработка взрывом». Успешное взаимодействие с монтажными организациями позволило органично «вписать» технологический процесс ОВз в график строительства баков и тем самым провести взрывные работы без задержки монтажно-сварочных работ.

Характерно, что ОВз осуществляли с помощью строго дозированных накладных зарядов взрыв-

чатого вещества (ВВ), размещаемых вдоль сварных швов на внутренней поверхности бака. Форма и логонная масса ВВ назначались в зависимости от толщины обрабатываемого металла. Заряды ВВ изготавливались заблаговременно, доставлялись к подлежащим обработке швам и монтировались на стенку бака с помощью клея (рис. 1). Контроль, проведенный ОВз, отличающейся высокой воспроизводимостью результатов, осуществляется по геометрии отпечатков заряда ВВ (рис. 2), что позволяет существенно сократить объем работ по измерению результирующих ОН. Важным моментом является также то, что при ОВз сам бак выполняет роль своеобразной взрывной камеры и служит защитой от вредного побочного воздействия взрыва на людей и близкорасположенные сооружения. Максимальная масса одновременно закладываемого заряда ВВ определяется, как правило, из условия обеспечения целостности остекления [4]. В зависимости от условий проведения взрывных работ и толщины обрабатываемого металла за один подрыв может быть обработано от 20 до 180 пог. м сварных швов. Многолетней практикой доказано, что для технологических объектов без стекол, контрольно-измерительной аппаратуры, а также коммуникаций ОВз опаснос-



Рис. 1. Монтаж заряда ВВ

© Л. Д. Добрушин, В. Г. Петушков, А. Г. Брызгалин, 2008

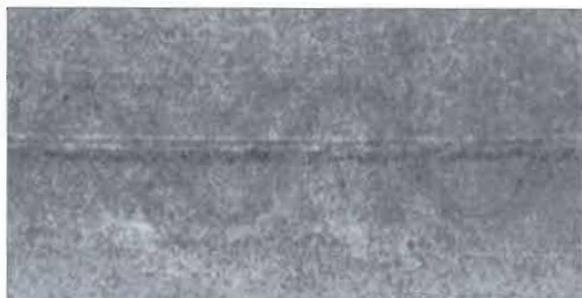


Рис. 2. След ВВ после ОВз

ти не представляет. Так, при ОВз двух мешалок Николаевского глиноземного завода ближайшее здание (бытовой корпус) было расположено в 40 м. Для обеспечения требуемой производительности взрывных работ впервые в практике было разработано, изготовлено и применено специальное защитное устройство, позволившее предотвратить разрушение стекол в бытовом корпусе, в том числе с уже имеющимися трещинами.

Технология ОВз не требует использования специального оборудования и энергоисточников.

Example is given of the efficient application of explosion energy for improving reliability of process equipment installed at the Alumina Plant by relieving residual welding stresses in welds on decomposers and mixers (diameter of components — up to 14 m, and height — up to 34 m).

Она достаточно проста и может быть реализована работниками любой специализированной организации под руководством разработчика технологии. Помимо сварных швов в баковых конструкциях, технология ОВз может быть использована также для снятия ОН в монтажных стыках технологических трубопроводов, однако, с применением при этом специальных мер обеспечения безопасности взрывных работ [5] в связи с наружным расположением зарядов ВВ.

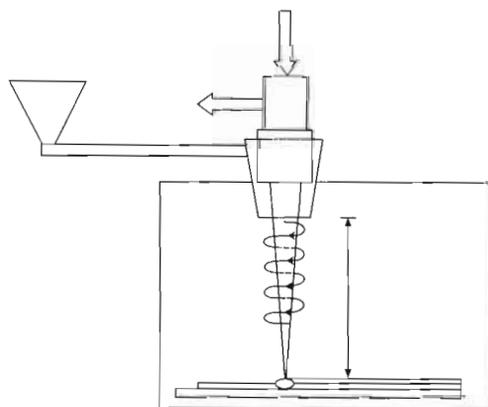
1. Щелочная хрупкость и повышение стойкости аппаратуры глиноземного производства / Под ред. В. И. Артемьева, О. И. Стеклова. — М.: ЦНИИТЭИцветмет, 1971. — 88 с.
2. Применение энергии взрыва для повышения коррозионной стойкости сварных соединений декомпозиеров / В. И. Артемьев, А. Н. Пашин, В. Г. Петушков, А. А. Сосков // Цвет. металлургия. — 1978. — № 5. — С. 37–40.
3. *Petushkov V. G.* Explosion treatment of welded joints / Ed. by V. E. Paton. — Harwood: Acad. publ. — 1994. — 95 p. — (Welding and Surfacing Review).
4. *Петушков В. Г.* Применение взрыва в сварочной технике. — Киев: Наук. думка, 2005. — 756 с.
5. *Сушков А. И., Троицкий И. А.* Металлургия алюминия. — М.: Металлургия, 1965. — 520 с.

Поступила в редакцию 18.03.2008

УДК 621.791(088.8)

ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА*

Способ электронно-лучевой наплавки подложки, при котором на поверхность подложки направляют пучок электронов, образуемый электронной пушкой, наплавляя присадочный материал, предпочтительно, имеющий форму порошка. При этом изменяют положение электронного пучка относительно подложки и направляют в зону наплавки инертный газ. Наплавляемый порошок вдувают в зону с помощью циклона. Инертный газ окружает пучок электронов и вдуваемый порошок. Патент Великобритании 2418166. D. Clark (Rolls-Royce Plc).



Способ и устройство для пайки присоединительных элементов с использованием индукционного тепла. Предложен способ пайки нескольких электрических соединений, согласно которому контактные элементы соединяют пайкой с несколькими поверхностями, расположенными на неметаллической пластине. Способ предусматривает использование инструмента, который на месте спайки создает магнитное поле, обеспечивающее индукционный нагрев. Форму и размер инструмента для пайки подбирают в соответствии с поверхностью, на которой расположено несколько мест спайки, подлежащих одновременному нагреву в ходе одной операции. Одновременно частоту приложенного к петле или катушке переменного напряжения приводят в соответствие с геометрией присоединительных элементов и устанавливают на возможно более низкое значение, в частности, 150 кГц. Этим при высокой рабочей скорости достигают улучшенного прогрева деталей, соединяемых пайкой, поскольку низкочастотные силовые линии имеют большую глубину проникновения. Предложено также устройство для осуществления способа. Заявка Германии 102004057630B3. R. Bernhard (Stain-Gobain Sekurit Deutschland GmbH).

Способ и машина для плазменной сварки покрытых стальных листов. Свариваемые листы, имеющие покрытие, которое кипит и испаряется при низкой температуре, устанавливают внахлестку и прожигают в верхнем листе или в обоих листах отверстия для удаления газов, выделяющихся из зоны сварки. Отверстие прожигают плазменной струей повышенной мощности. После этого снижают мощность горелки, подаваемого на плазменную горелку, и сваривают листы

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене «Изобретения стран мира» № 3 за 2007 г.