



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
О. К. Назаренко, В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
А. С. Зубченко (Россия)
М. Зиниград (Израиль)
В. И. Лысак (Россия)
У. Рейсен (Германия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пиларчик (Польша)
О. И. Стеклов (Россия)
Г. А. Туричин (Россия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
МА «Сварка» (издатель)

Адрес редакции:

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com
URL: www.rucont.ru

Редакторы:

Т. В. Юштина, И. Ф. Соколова
Электронная верстка:
И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Д. И. Середа

Свидетельство о государственной
регистрации KB 4788 от 09.01.2001
ISSN 0005-111X

Журнал входит в перечень
утвержденных Министерством
образования и науки Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

Журнал переиздается
на английском языке
ИЭС им. Е. О. Патона под названием
«The Paton Welding Journal»
ISSN 0957-798X

The Paton
WELDING JOURNAL

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>Борисов Ю. С., Демченко В. Ф., Лесной А. Б., Хаскин В. Ю., Шуба И. В.</i> Численное моделирование теплообмена и гидродинамики при лазерно-плазменной обработке металлических материалов	3
<i>Позняков В. Д., Жданов С. Л., Максименко А. А., Синеок А. Г., Герасименко А. М.</i> Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б	9
<i>Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Гончаренко Л. В.</i> Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения	16
<i>Хорунов В. Ф., Зволинский И. В., Максимова С. В.</i> Дуговая пайка низкоуглеродистых сталей	23
<i>Сомонов В. В., Бем Ш., Гайер М., Бертельсбек Ш.</i> Влияние индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов	28
<i>Илюшенко В. М., Новосельцев Ю. Г., Бусыгин С. Л.</i> Металлургические особенности плазменно-дуговой сварки хромовой бронзы	36
<i>Махненко О. В., Прудкий И. И.</i> Информационные системы выбора технологических параметров для дуговой сварки (Обзор)	39

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<i>Кравчук Л. А., Кушнерев А. В., Кожукало В. И.</i> Модернизация электронно-лучевой сварочной установки ЭЛУ-20	47
<i>Титаренко В. И., Лантух В. Н., Кашинский А. С.</i> Установки на базе токарных станков для наплавки прокатных валков	50
<i>Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А.</i> Плазменно-порошковая наплавка штоков энергетической арматуры	56
<i>Коломийцев Е. В.</i> Коррозионная стойкость сварных соединений судокорпусных материалов	59

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Пулька Ч. В., Сенчишин В. С., Гаврилюк В. Я., Базар М. С.</i> Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя	65
--	----

ХРОНИКА

Юбилейная сессия Общего собрания Национальной академии наук Украины	68
---	----

ИНФОРМАЦИЯ	69
------------------	----

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНТИ РЖ «Сварка» (Россия), «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL

EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
Guan Qiao (China)
A. S. Zubchenko (Russia)
M. Zinigrad (Israel)
V. I. Lysak (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
U. Reisinger (Germany)
O. I. Steklov (Russia)
G. A. Turichin (Russia)

FOUNDERS:

National Academy
of Sciences of Ukraine,
Paton Welding Institute,
IA «Welding» (publisher)

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com
URL: www.rucont.ru

Editors:

T. V. Yushchina, I. F. Sokolova
Electron galley:
I. R. Naumova, A. I. Sulima,
D. I. Sereda

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001
ISSN 0005-111X

All rights reserved

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

The journal is republished in English
by the E. O. Paton Electric Welding Institute
under title «The Paton Welding Journal»
ISSN 0957-798X

The Paton
WELDING JOURNAL

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Borisov Yu. S., Demchenko V. F., Lesnoy A. B., Khaskin V. Yu., Shuba I. V.* Numerical modeling of heat exchange and hydrodynamics in laser-plasma treatment of metallic materials 3
- Poznyakov V. D., Zhdanov S. L., Maksimenko A. A., Sineok A. G., Gerasimenko A. M.* Weldability of sparsely-alloyed steels of 06GBD and 06G2B types 9
- Rybakov A. A., Filipchuk T. N., Goncharenko L. V.* Cracks in welded joints of large-diameter pipes and measures of their prevention 16
- Khorunov V. F., Zvolinsky I. V., Maksimova S. V.* Arc brazing of low-carbon steels 23
- Somonov V. V., Boehm S., Geyer M., Bertelsbeck S.* Study on the effect of induction heating to prevent hot cracking during laser welding of aluminium alloys 28
- Makhnenko O. V., Prudkiy I. I.* Information systems for selection of arc welding parameters (Review) 36
- Ilyushenko V. M., Novoseltsev Yu. G., Busygin S. L.* Metallurgical features of plasma-arc welding of chromium bronze 39

INDUSTRIAL

- Kravchuk L. A., Kushneryov A. V., Kozhukalo V. I.* Modernization of electron beam welding installation of ELU-20 type 47
- Titarenko V. I., Lantukh V. N., Kashinsky A. S.* Equipment on base of lathe tools for mill roll hard-facing 50
- Pereplyotchikov E. F., Ryabtsev I. A.* Plasma-powder surfacing of rods of power stop valves 56
- Kolomijtsev E. V.* Corrosion resistance of welded joints of ship hull materials 59

BRIEF INFORMATION

- Pulka Ch. V., Senchishin V. S., Gavriluk V. Ya., Bazar M. S.* Effect of technological schemes of induction surfacing on stability of deposited layer thickness 65

NEWS

- Jubilee session of general meeting of the National Academy of Sciences of Ukraine 68

- INFORMATION 69

«Avtomaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».



УДК 621.791.72

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Ю. С. БОРИСОВ, В. Ф. ДЕМЧЕНКО, А. Б. ЛЕСНОЙ, В. Ю. ХАСКИН, И. В. ШУБА
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Предложена приближенная математическая модель, описывающая тепловые и гидродинамические процессы при комбинированной лазерно-плазменной наплавке. Рассматривается схема быстродвижущегося источника нагрева, обобщающая известную схему Н. Н. Рыкалина на случай совместного конвективно-кондуктивного переноса энергии в расплавленном металле. Плотности тепловых источников лазерного и плазменного источников нагрева различной мощности полагаются распределенными на поверхности пластины по нормальному закону с различными радиусами тепловых пятен; комбинированный источник полагается аддитивным. Уравнение локального теплового баланса на поверхности обрабатываемого изделия учитывает теплообмен излучением и потери тепла на испарение. Полагается, что движение расплава в условиях плазменного нагрева косвенного действия осуществляется под воздействием подъемной силы Архимеда и термокапиллярной силы. Проведена верификация математической модели и описаны результаты вычислительных экспериментов по исследованию формирования проплавленной зоны при воздействии лазерного и комбинированного лазерно-плазменного источников нагрева. Показано, что доминирующим силовым фактором, определяющим гидродинамику расплава, является сила Марангони. Изучено влияние конвективного переноса энергии на формирование расплавленной зоны. Библиогр. 8, табл. 4, рис. 8.

Ключевые слова: лазерно-плазменная наплавка, тепловые и гидродинамические процессы, моделирование, теплообмен, тепловой баланс, наплавка, проплавленная зона, сила Марангони

Постановка проблемы. Одной из актуальных проблем сварки, наплавки и других технологий обработки металлов с использованием плазменно-дугового, лазерного или комбинированного лазерно-плазменного нагрева является оценка результатов теплового воздействия источника тепла на обрабатываемое изделие. Вопросам теоретического и экспериментального исследования лазерного и плазменно-дугового воздействия на металлические материалы посвящено большое количество публикаций [1–3]. В то же время проблема совместного воздействия на металлы микроплазменной дуги (прямого или косвенного действия) и лазерного пучка, интерес к которой резко возрос при появлении комбинированных лазерно-микроплазменных технологий, изучена в гораздо меньшей степени.

Для адекватного теоретического описания процессов, протекающих при лазерно-микроплазменной наплавке металлических материалов, требуется принимать во внимание сложное взаимодействие различных физических процессов и явлений, связанных с нагревом и плавлением основного материала при воздействии комбинирован-

ного источника нагрева. С достаточно хорошим приближением можно полагать, что комбинированный лазерно-микроплазменный источник энергии является аддитивным, т. е. представляется в виде суммы распределенных по поверхности изделия лазерного и микроплазменного источников тепла.

В моделях теплового источника, генерируемого лазерным излучением, обычно учитывается поглощение лазерного излучения металлическим материалом и задается некоторый закон распределения плотности мощности по поверхности обрабатываемого материала. При анализе плазменной составляющей потока тепла примем во внимание, что комбинированная лазерно-микроплазменная наплавка осуществляется, как правило, с использованием плазмотронов косвенного действия, т. е. ток через обрабатываемое изделие не течет.

Тем не менее, тепловое взаимодействие бесштоковой плазмы с поверхностью изделия происходит за счет передачи кинетической и потенциальной энергии частиц плазмы, в результате которого формируется закон распределения тепловой мощности плазменного источника нагрева.

При тепловом воздействии источника нагрева с плотностью 10^4 Вт/см² и выше температура поверхности сварочной ванны может превышать

* Публикуется по материалам доклада, представленного на Шестой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 29 мая–1 июня 2012, пос. Кацивели.



температуру кипения на 10...20 K, вследствие чего потери тепла на испарение не только превосходят тепловые потери за счет конвективного и лучистого теплообмена вместе взятые, но и становятся сопоставимыми с плотностью теплового источника. Поэтому учет тепла на испарение является важным аспектом теоретического описания теплового воздействия комбинированного лазерно-плазменного источника нагрева на обрабатываемый материал.

Математическая модель. Будем исходить из положения о том, что формирование зоны расплавленного металла осуществляется в теплопроводностном режиме. Под этим термином понимается такой режим, при котором проплавленная зона основного металла формируется без образования выраженного парогазового канала (key-hole).

В соответствии с этим свободная поверхность расплавленного металла полагается недеформируемой, а источник тепла, действующий на изделие, — поверхностным.

Несмотря на малые объемы расплава, образующегося при наплавке с использованием комбинированного лазерно-микроплазменного источника энергии, скорость движения жидкого металла в расплавленном металле может оказаться достаточно высокой, а, следовательно, конвективный перенос энергии может играть заметную роль в формировании теплового состояния наплавляемого изделия.

При отсутствии протекания тока через металлическую ванну в качестве силовых факторов, действующих на расплавленный металл, выступают термогравитационная сила Архимеда и термокапиллярная сила Марангони.

Пусть $\{x', y', z'\}$ — неподвижная система декартовых координат, связанная со свариваемым изделием, ось z' которой направлена по направлению действия силы тяжести; t' — время. Введем подвижную систему координат $\{x, y, z\}$ следующим образом $x = x' - v_w t'$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$, где v_w — скорость перемещения источника нагрева.

При достижении квазистационарного теплового и гидродинамического состояния полная система уравнений гидродинамики и теплообмена записывается в виде

$$\begin{aligned} (V_x + v_w) \frac{\partial W}{\partial x} + V_y \frac{\partial W}{\partial y} + V_z \frac{\partial W}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (V_x + v_w) \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta V_x; \\ (V_x + v_w) \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta V_y; \\ (V_x + v_w) \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + \\ + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta V_z + g \beta_T T; \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где V_x, V_y, V_z — компоненты вектора скорости движения расплава; ν — кинематическая вязкость; P — давление; β_T — термический коэффициент объемного расширения расплава; g —

ускорение силы тяжести; $W = \rho \int_0^T c dT + \rho \chi \eta$ — эн-

тальпия; ρ — плотность; c — удельная теплоемкость материала; T — температура; χ — скрытая теплота кристаллизации; λ — коэффициент теплопроводности; $\eta = \eta(T, T_S, T_L)$ — объемная доля жидкой фазы в интервале температур кристаллизации; T_S, T_L — температура солидус и ликвидус. Уравнение (1) интегрируется в области $\Omega = \Omega_L \cup \Omega_S$, где Ω_L — сварочная ванна; Ω_S — нерасплавленный основной металл. Система уравнений (2) определена в области Ω_L .

Пусть $Pe = (v_w l)/a$ — тепловой критерий Пекле, где l — характерный геометрический размер (в данном случае — толщина наплавляемой пластины); a — коэффициент температуропроводности наплавляемого материала. При $Pe \gg 1$ хорошим приближением трехмерной задачи расчета температурного поля является схема быстродвижущегося источника, предложенная Н.Н. Рыкалиным [4] применительно к модели сварочного нагрева, сформулированной в рамках кондуктивного механизма переноса энергии в свариваемом изделии. В настоящей работе идея быстродвижущегося источника распространяется на случай совместного конвективно-кондуктивного переноса энергии. В рамках схемы быстродвижущегося источника пренебрегается переносом тепла в направлении движения источника сварочного нагрева и учитывается лишь теплопередача в поперечном сечении свариваемого изделия. Дополнительно к этому в уравнениях (2) положим $V_x = 0$, $\partial P / \partial x = 0$. Тогда система уравнений (1), (2) может быть записана в виде



$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + V_y \frac{\partial W}{\partial y} + V_z \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad y, z \in \Omega^*; \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta V_y; \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta V_z + g \beta_T T; \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \\ y, z \in \Omega_L^*, \end{cases} \quad (4)$$

где $\tau = x/v_w$, $\Omega^* = \{0 < y < L_y, 0 < z < L_z\}$ — поперечное сечение пластины. Уравнения гидродинамики (4) интегрируются в подлежащей определению области Ω_L^* , ограниченной свободной поверхностью расплава и фронтом кристаллизации. Геометрия области подлежит определению из решения тепловой задачи.

Граничные условия для уравнения (3) запишем в виде

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \alpha [T(y, L_z, t) - T_c] + \varepsilon \sigma [\bar{T}^4(y, L_z, t) - \bar{T}_c^4]; \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha [T(y, 0, t) - T_c] + \varepsilon \sigma [\bar{T}^4(y, 0, t) - \bar{T}_c^4] + q_v(T) + q_h(y, t); \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0, \quad (7)$$

где α — коэффициент теплообмена; T_c — температура окружающей среды; ε — приведенная степень черноты поверхности; σ — постоянная Стефана–Больцмана; $\bar{T}$ — абсолютная температура; $q_v(T)$ — потери тепла на испарение; q_h — плотность теплового потока, сообщаемого поверхности изделия источниками плазменного и лазерного нагрева. Тепловые потери на испарение с поверхности расплава оценивали в соответствии с моделью Найта [5, 6].

Распределения плотности теплового потока $q_h(y, t)$ как для лазерного излучения, так и плазменного источников энергии зададим в виде

$$q_h(y, t) = q_0 \exp(-k(\sqrt{(x_0 - v_w t)^2 + y^2})^n),$$

где x_0 — начальное смещение центра источника относительно начала неподвижной системы

координат $\{x', y', z'\}$. Обозначим через r_L, r_p — эффективные радиусы пятен лазерного и плазменного источников энергии (полагается, что в пятне эффективного радиуса выделяется 95 % мощности соответствующего источника), $a = \max\{r_L, r_p\}$. Если в качестве x_0 положить $x_0 = 1,2a$, то при $t = 0$ в начале подвижной системы координат плотность теплового потока комбинированного лазерно-плазменного источников нагрева будет практически равна нулю.

Полагая свободную поверхность расплава недеформируемой, граничные условия для уравнений гидродинамики (4) запишем в виде

$$V_z|_{z=0} = 0, \quad \nu \frac{\partial V_y}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{\beta_\sigma}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{z=0}, \quad (8)$$

где $\beta_\sigma = \frac{d\sigma}{dT}$, $\sigma = \sigma(T)$ — коэффициент поверхностного натяжения расплава. Второе из этих условий является балансом касательных напряжений, выписанное с учетом действия термокапиллярной силы Марангони. На фронте затвердевания задаются условия прилипания и непроницаемости, а при $y = 0$ условия симметрии

$$V_y|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial V_z}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0. \quad (9)$$

Численная реализация сформулированной модели осуществлялась с использованием совместного лагранжево-эйлерового метода и схем расщепления уравнений (3), (4) по физическим подпроцессам и пространственным переменным [7, 8].

Результаты расчетов. Для верификации модели были проведены экспериментальные исследования формы проплавленной зоны и зоны термического влияния при воздействии на металлическую пластину толщиной $L_z = 1$ см из стали 09Г2С источника лазерного излучения Nd:YAG мощностью $P_L = 1,25$ кВт (диаметр фокусирующей линзы $D_F = 5$ см, диаметр пучка на фокусирующей линзе $D_L = 4$ см, фокусное расстояние линзы $F = 30$ см, скорость перемещения источника нагрева $v_w = 60$ м/ч). При проведении численных исследований анализировали влияние гидродинамического фактора на формирование расплавленной зоны основного металла в следующих вариантах:

- 1) без учета конвекции расплава;
- 2) учитывается лишь свободная конвекция;
- 3) учитывается действие термокапиллярной силы;
- 4) совместное воздействие термогравитационной и термокапиллярной сил.

Результаты расчета, выполненные при $\eta = 0,32$, $r_L = 0,1$ см, приведены в табл. 1 и на рис. 1. В



Таблица 1. Влияние гидродинамических факторов на параметры проплавления

№ п/п	Вид оценки		H , см	B , см	V_y , см/с	V_z , см/с	T_{max} , °C
	Эксперимент		0,042	0,222	—	—	—
1	Расчет	без конвекции	0,051	0,168	0	0	2905
2		A	0,049	0,174	0,191	0,089	2896
3		M	0,045	0,234	51,101	16,205	2875
4		A + M	0,042	0,252	51,300	16,310	2874

Примечание. A — свободная конвекция; M — конвекция Марангони.

таблице приведены расчетные данные о ширине B и глубине проплавления H , а также о величине максимального перегрева поверхности металлической ванны и максимальных значениях компонент вектора скорости движения расплава. Из табл. 1 следует, что наиболее близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных достигается при воздействии на расплав термогравитационной и термокапиллярной сил, при этом доминирующим фактором, определяющим ширину проплавления, является термокапиллярная конвекция Марангони.

Направление течения расплава и его скорость (~50 см/с), обусловлены доминирующим влиянием силы Марангони, под воздействием которой потоки расплава переносят наиболее перегретый металл из приосевой части приповерхностных слоев ванны к периферии, способствуя увеличению ширины проплавления в полтора раза по сравнению с вариантом расчета, не учитывающим конвекцию расплава. На рис. 2 показано сопоставление результатов расчета очертаний ванны и

зоны термического влияния (см. табл. 1, № 4) с экспериментальными данными. На макрошлиф нанесены расчетная форма проплавленной зоны (кривая 1, изотерма $T = 1480$ °C) и граница зоны термического влияния (кривая 2 — изотерма $T = 750$ °C).

Как следует из рис. 2, наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных наблюдается при одновременном учете термогравитационной и термокапиллярной сил. Имеющееся отличие расчетных и экспериментальных данных по форме оплавленной зоны, вероятно, связано с деформацией свободной поверхности ванны под воздействием реакции отдачи паров. На рис. 3, 4 показано поле изотерм на поверхности пластины и в продольном сечении шва (координата $x = 0$ соответствует центру источника нагрева).

Из рис. 3–4 следует, что максимальная глубина и ширина проплавления основного металла смещена от центра источника нагрева в хвостовую часть на расстояние 0,06...0,08 см.

На рис. 5 показаны термические циклы в различных сечениях по высоте пластины. Из рисунка следует, что пластина прогревается выше температуры 750 °C на глубину менее 0,3 см со средним временем пребывания 0,15 с в температурном интервале 800...500 °C.

Результаты исследования влияния параметров режима лазерного нагрева (тепловой мощности лазерного излучения, радиуса теплового пятна,

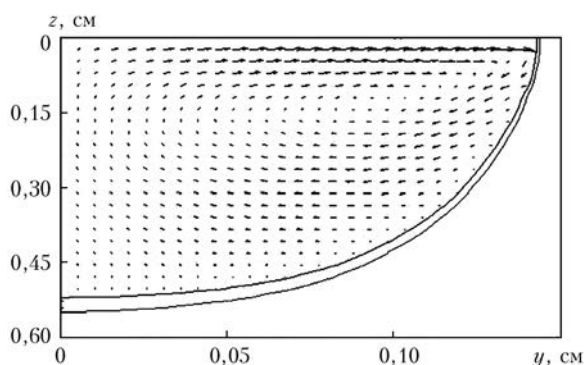


Рис. 1. Поле скоростей движения расплава в поперечном сечении металлической ванны (табл. 1, вариант № 4)

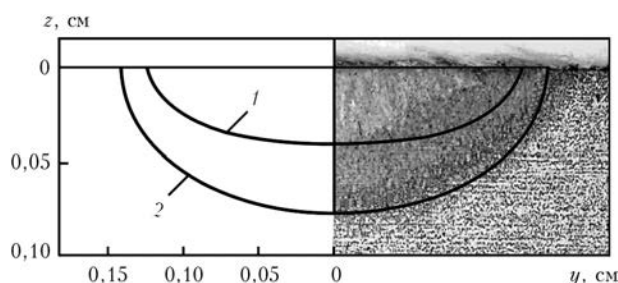


Рис. 2. Проплавленная зона и зона термического влияния при лазерном нагреве: 1, 2 — см. в тексте

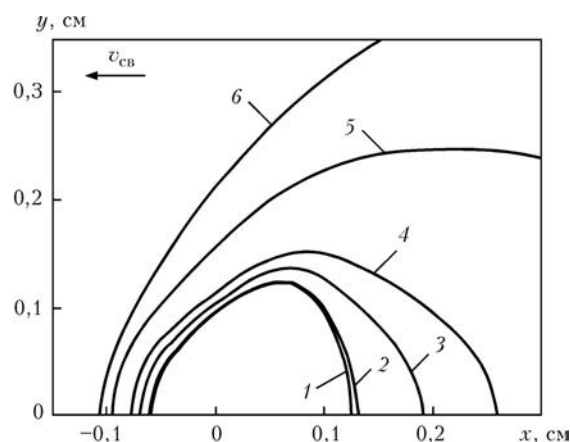


Рис. 3. Поле изотерм на поверхности пластины при $T = 1480$ (1), 1430 (2), 1000 (3), 600 (4), 250 (5), 100 (6) °C

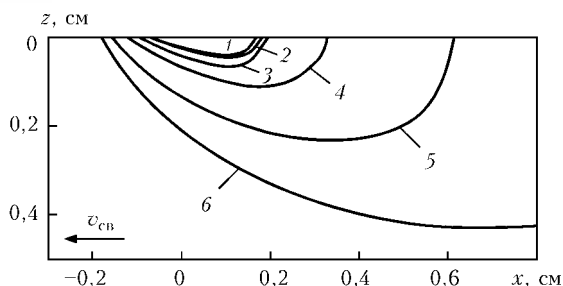


Рис. 4. Поле изотерм в осевом сечении шва при $T = 1480$ (1), 1430 (2), 1000 (3), 600 (4), 250 (5), 100 (6) °C

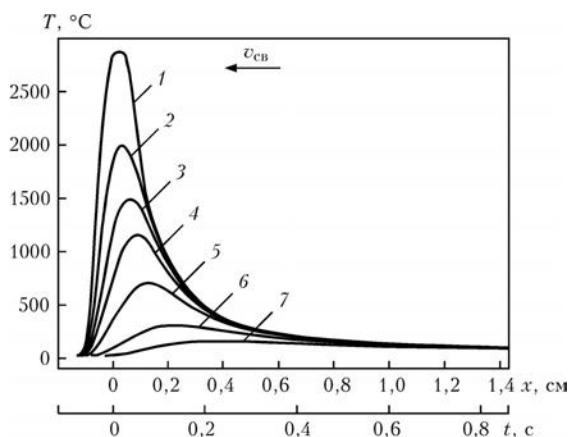


Рис. 5. Температурные циклы на оси шва для различных сечений по высоте пластины при $z = 0$ (1), 0,02 (2), 0,04 (3), 0,06 (4), 0,28 (5), 0,36 (6), 0,44 (7) см

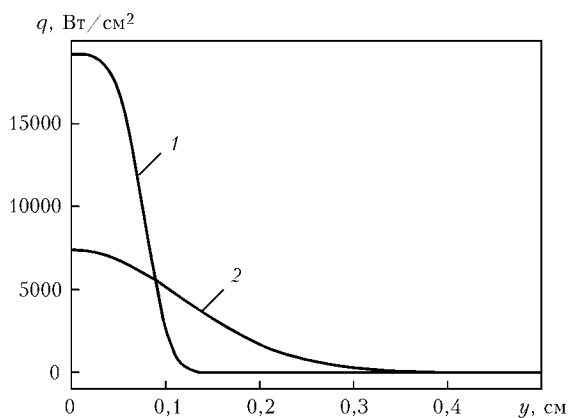


Рис. 6. Распределение удельного теплового потока лазерного (1) и плазменного (2) источников тепла на поверхности пластины ($r_L = 0,1$ см, КПД = 0,32, $P_L = 1250$ Вт, $r_p = 0,25$ см, КПД = 0,5, $P_p = 1300$ Вт)

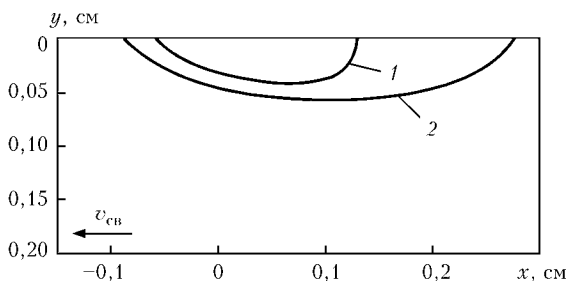


Рис. 7. Форма проплавленной зоны в осевом сечении шва ($T = 1480$ °C) при воздействии лазерного (1) и комбинированного лазерно-микроплазменного источников тепла (2)

Таблица 2. Влияние тепловой мощности, вводимой в пластину, на параметры проплавления при $v_w = 1,67$ см/с, $r_L = 0,1$ см

P_L , Вт	H , см	B , см	T_{max} , °C	V_x , см/с	V_y , см/с
200	0,0165	0,1094	1886	12,8	3,7
300	0,0339	0,1872	2518	38,2	12,6
400	0,0418	0,2526	2880	51,3	16,5
500	0,0455	0,2826	2920	54,9	17,3
600	0,0475	0,3022	2944	57,1	17,9

Таблица 3. Влияние радиуса теплового пятна нагрева на проплавление при $P_L = 400$ Вт, $v_w = 1,67$ см/с

r_L , см	H , см	B , см	T_{max} , °C	V_x , см/с	V_y , см/с
0,10	0,0418	0,2526	2880,65	51,30	16,50
0,12	0,0396	0,2338	2589,32	39,24	12,74
0,14	0,0346	0,2150	2274,98	27,45	8,42
0,16	0,0276	0,1920	2002,03	17,19	4,85
0,18	0,0171	0,1550	1748,69	7,62	2,04
0,20	0,0042	0,0712	1512,43	0	0

скорости перемещения источника нагрева) представлены в табл. 2–4.

Увеличение мощности от 200 до 400 Вт приводит к росту глубины проплавления в 2,5 раза, дальнейшее повышение мощности ($P_L > 400$ Вт) не оказывает существенного влияния на глубину проплавления, поскольку максимальная температура поверхности ванны жидкого металла становится выше температуры кипения основного материала пластины, соответственно этому возрастают тепловые потери на испарение металла с поверхности расплава.

Рассмотрим особенности нагрева пластины при воздействии комбинированного лазерно-микроплазменного источника энергии. При проведении вычислительного эксперимента полагали, что центры пятен лазерного и плазменного нагрева совпадают. Распределение плотности мощности каждого из указанных источников нагрева на поверхности обрабатываемого материала показано на рис. 6, где P_p — мощность плазменного источника.

На рис. 7, 8 показаны формы проплавленной зоны основного металла в продольном сечении

Таблица 4. Влияние скорости перемещения источника нагрева на проплавление при $P_L = 400$ Вт, $r_L = 0,1$ см

v_w , см/с	H , см	B , см	T_{max} , °C	V_x , см	V_y , см
1,0	0,051	0,3220	2890	51,6	16,7
2,0	0,039	0,2320	2872	50,4	16,2
3,0	0,032	0,1860	2742	45,2	14,5
5,0	0,023	0,1480	2453	30,7	10,7
10,0	0,010	0,1040	1956	9,8	2,0

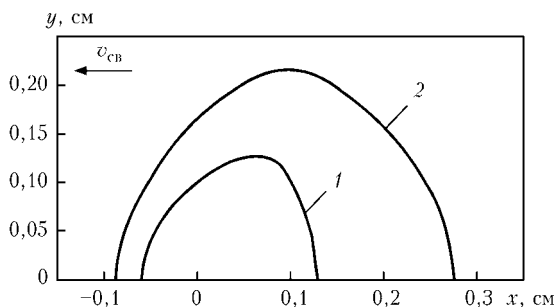


Рис. 8. Форма проплавленной зоны на поверхности пластины при воздействии лазерного (1) и комбинированного лазерно-микроплазменного (2) источников тепла

(рис. 7) и на поверхности (рис. 8) обрабатываемой пластины.

Расчетные данные показывают, что при воздействии комбинированного лазерно-микроплазменного нагрева ширина проплавленной зоны увеличивается в 1,5 раза по сравнению с лазерным. Благодаря этому при комбинированной лазерно-микроплазменной обработке можно получить существенно больший размер наплавленного валика.

Заключение. При воздействии источника лазерного нагрева на поверхность пластины в расплавленной зоне формируется интенсивное (~50 см/с) приповерхностное течение расплава, обусловленное доминирующим действием термокапиллярной силы, которая возникает за счет высокого градиента температуры (~7000 °C/см) на свободной поверхности металлической ванны. Это течение, направленное от осевой части ванны в сторону фронта плавления, интенсифицирует перенос энергии из перегретой при осевой части ванны в ее периферийную область и способствует

увеличению ширины проплавленной зоны. Влияние конвективного перемешивания ванны на глубину проплавления существенно меньше ввиду преимущественно приповерхностного течения расплава. Использование комбинированного лазерно-микроплазменного источника энергии для наплавки порошковыми материалами (в том числе — насыпными) позволяет увеличить ширину наплавленного валика по сравнению с лазерной наплавкой и повысить производительность процесса наплавки.

1. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. — М.: Мир, 1986. — 504 с.
2. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 208 с.
4. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 295 с.
5. Knight Ch. J. Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure // AIAA J. — 1979. — 17, № 5. — P. 519-523.
6. Демченко В. Ф., Кривцун И. В., Семенов И. Л., Туричин Г. А. Математическое моделирование процессов нагрева и конвективного испарения металла при воздействии импульсного лазерного излучения // Proc. of the IV intern. conf. «Beam technologies and laser applications», (Санкт-Петербург, 23–25 сент. 2009 г.). — Saint-Petersburg: Politechnical univ., 2009. — P. 81–85.
7. Ляшко И.И., Демченко В.Ф., Вакуленко С.А. Вариант метода расщепления уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости на лагранжево-эйлеровых сетках // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1981. — С. 43–47.
8. Демченко В.Ф., Лесной А.Б. Лагранжево-эйлеровый метод численного решения многомерных задач конвективной диффузии // Докл. НАН Украины. — 2000. — № 11. — С. 71–75.

Поступила в редакцию 24.01.2013

ПРОДУКЦИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ И БОЛГАРИИ

ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» заканчивает производство аппаратов использования тепла нейтрализации (ИТН) для ОАО «Дорогобуж» (Российская Федерация) и ООО «Неохим» АД (Болгария) — промышленных предприятий, специализирующихся на выпуске химической продукции.

Согласно контрактам две единицы оборудования предназначены для ОАО «Дорогобуж» и одна — для ООО «Неохим» АД. Аппараты используют для нейтрализации азотной кислоты газообразным аммиаком и получения раствора аммиачной селитры. Они будут установлены в Димитровграде (Болгария), а также в поселке Верхнеднепровский (Смоленская область Российской Федерации).

Как отмечает ведущий менеджер управления продаж НПО им. М. В. Фрунзе В. Фролов, сумские машиностроители не впервые сотрудничают с ООО «Неохим» АД. В 2010 г. предприятие поставило этой компании реактор каталитической очистки для линии по производству азотной кислоты. Специалисты НПО им. М. В. Фрунзе участвовали и в шефмонтаже оборудования.

Продукция торговой марки FRUNZE также работает и на ОАО «Дорогобуж». По словам ведущего менеджера управления продаж С. Антыкова, аппараты ИТН сумского производства эксплуатируются здесь уже свыше 25 лет. В настоящее время проходит их плановая замена.



УДК 621.791.011

СВАРИВАЕМОСТЬ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ 06ГБД и 06Г2Б

В. Д. ПОЗНЯКОВ, С. Л. ЖДАНОВ, А. А. МАКСИМЕНКО, А. Г. СИНЕОК, А. М. ГЕРАСИМЕНКО
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью настоящей работы явилось исследование свариваемости экономнолегированных ниобийсодержащих сталей 06Г2Б и 06Г2Б с пределом текучести более 390 МПа, а также оценка свойств их сварных соединений при различных технологических процессах сварки применительно к изготовлению уникальных строительных конструкций (мостов, резервуаров вместимостью 50...70 тыс. м³, доменных печей). На основе анализа термокинетической диаграммы, полученной с помощью быстродействующего дилатометра, и результатов испытаний модельных термоциклированных образцов установлена взаимосвязь при скоростях охлаждения $w_{6/5}$ в диапазоне 1,3...70 °С/с между структурой металла зоны термического влияния сварных соединений и их свойствами. С учетом результатов испытаний на замедленное разрушение сварных соединений установлен диапазон допускаемых погонных энергий сварки, обеспечивающий их высокую хладостойкость и склонность против образования холодных трещин. Рекомендуемые режимы сварки и сварочные материалы нашли применение при изготовлении из сталей 06ГБД и 06Г2Б сварных металлоконструкций нефтяных резервуаров большой вместимости и мостов. Библиогр. 8, табл. 5, рис. 8.

Ключевые слова: экономнолегированная сталь, свариваемость, термокинетическая диаграмма, скорость охлаждения, структура, имитированный металл зоны термического влияния, холодные трещины, технологическая проба

Рациональное использование современных экономнолегированных материалов с высокими показателями механических свойств (более 390 МПа) позволяет эффективно снижать металлоемкость и повышать надежность и долговечность металлоконструкций для машиностроения и строительства. Используемые стали содержат ограниченное количество (до 0,09 мас. %) углерода, марганца, ниобия. Для достижения требуемого комплекса их механических свойств используют как термическую, так и термомеханическую обработку (контролируемую прокатку). В отдельных случаях для повышения коррозионной стойкости в эти стали вводят медь в количестве до 0,3 мас. %.

Несомненными достоинствами экономнолегированных сталей по сравнению с такими известными материалами, как стали 09Г2С, 10ХСНД, являются их высокая хладостойкость и хорошая свариваемость [1–3]. В то же время известно, что в процессе изготовления сварных металлоконструкций сопротивляемость сварных соединений замедленному и хрупкому разрушениям может снижаться.

Цель настоящей работы состояла в детальной оценке свариваемости экономнолегированных ниобийсодержащих сталей 06ГБД и 06Г2Б с пределом текучести $\sigma_T \geq 390$ МПа, а также в исследовании свойств их сварных соединений при различных технологических процессах применительно к изготовлению уникальных строительных конструкций различного назначения (мостов, ре-

зервуаров вместимостью 50...70 тыс. м², доменных печей).

Стали марок 06ГБД и 06Г2Б (ТУ У 27.1-05416923-085:2006) разработаны Мариупольским НИИ конструкционных материалов «Прометей» и поставляются толщиной 8...50 мм. При этом путем варьирования режимов термической обработки и легирования регулируется получение четырех уровней прочностных свойств: $\sigma_T \geq 355, 390, 440$ и 490 МПа [4–6]. Требования к химическому составу и свойствам в соответствии с техническими условиями приведены в табл. 1, 2. При проведении настоящих исследований использовали стали 06ГБД (класс прочности С 390) и 06Г2Б (класс прочности С 440). Ранее проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования свидетельствуют о достаточно высокой сопротивляемости этих сталей слоистому и слоисто-хрупкому разрушению в направлении оси z [4]. По углеродному эквиваленту C_e их можно отнести к хорошосвариваемым ($C_e = 0,33...0,43$). Однако этот показатель ориентировочный, поэтому для окончательного решения о пригодности этих сталей к сварке потребовались дополнительные исследования.

Для изучения структурных превращений в металле зоны термического влияния (ЗТВ) стали 06ГБД под воздействием термических циклов сварки использовали быстродействующий дилатометр комплекса «Gleeble-3800» [7], в котором цилиндрические образцы диаметром 6 мм и дли-



Т а б л и ц а 1. Химический состав сталей 06ГБД и 06Г2Б, мас. %, не более

Марка стали, класс прочности	C	Si	Mn	Nb	V
06ГБД, 355	0,04...0,08	0,15...0,35	0,90...1,20	0,010...0,030	0,020...0,040
06ГБД, 390	0,04...0,08	0,25...0,50	1,10...1,40	0,010...0,030	0,020...0,050
06Г2Б, 440	0,04...0,08	0,25...0,50	1,30...1,60	0,030...0,050	0,030...0,070
06Г2Б, 490	0,05...0,09	0,25...0,50	1,50...1,70	0,030...0,050	0,040...0,070

Окончание табл. 1

Марка стали, класс прочности	Mo	Ti	Cr	Ni	Cu	S	P
06ГБД, 355	0,05	0,020	0,20	0,30	0,30	0,010	0,025
06ГБД, 390	0,08	0,020	0,20	0,30	0,30	0,010	0,025
06Г2Б, 440	0,10	0,020	0,20	0,30	0,30	0,010	0,025
06Г2Б, 490	0,12	0,025	0,20	0,30	0,30	0,010	0,025

ной 86 мм нагревали до температуры 1200 °С со скоростью 150 °С/с, а затем охлаждали в температурном интервале 600...500 °С с различными скоростями (1,3...70 °С/с).

Анализ термокинетической диаграммы (рис. 1) и микроструктур имитированного металла ЗТВ, охлаждающегося с различными скоростями, свидетельствует о том, что во всем исследуемом диапазоне (1,3...70 °С/с) на участке перегрева наблюдается ферритно-перлитная структура (рис. 2). При скоростях охлаждения $w_{6/5} \geq 27$ °С/с появляются выделения МАК-фазы, процентное содержание которой увеличивается от 1,2 до 5,72 % по мере повышения скорости охлаждения до $w_{6/5} = 70$ °С/с. При этом увеличивается как ее твердость от HV 140 до 171, так и балл зерна от 5 до 8...9.

Несмотря на однотипность структур (рис. 2, б–з) в них наблюдаются некоторые отличия по форме перлитной составляющей. Так, при $w_{6/5} = 10,1$ °С/с в структуре по границам ферритных зерен наблюдаются тонкие перлитные пластины (рис. 2, б). С повышением скорости охлаждения до $w_{6/5} = 27$ °С/с пластины перлита измельчаются и их становится больше. Кроме того, появляются отдельные равноосные зерна перлита (рис. 2, в). При максимальной скорости охлаждения в иссле-

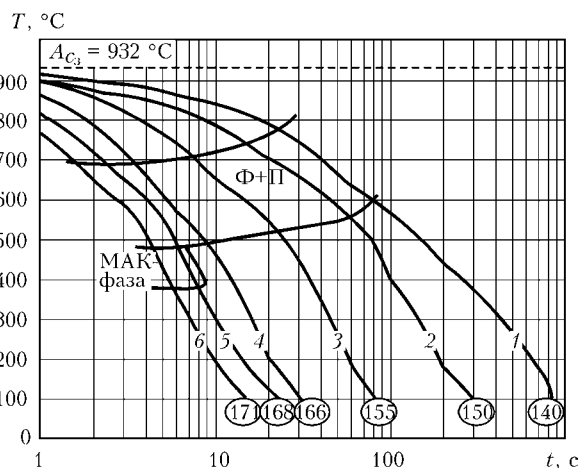


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали 06ГБД при различной скорости охлаждения $w_{6/5} = 1,3$ (1), 3,1 (2), 10,1 (3), 27 (4), 56,7 (5), 70 (6) °С/с

дуемом диапазоне $w_{6/5} = 70$ °С/с структура укрупняется, появляются крупные перлитные колонии наряду с пластинчатыми выделениями перлита по границам перлитных зерен (рис. 2, з).

Оценку механических свойств и сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению проводили в соответствии с методикой, описанной в работе [8]. На растяжение и ударный изгиб испытывали образцы размерами 150×12×12 мм, которые вырезали из заготовок стали 06ГБД и подвергали воздействию термических циклов сварки (нагрев до 1250 °С со скоростью 150 °С/с и охлаждение с различными скоростями в диапазоне 1,5...25 °С/с). Химический состав исследуемого проката различных толщин δ приведен в табл. 3, а результаты механических испытаний имитированного металла ЗТВ исследованной стали — на рис. 3–5.

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сталей 06ГБД и 06Г2Б

Марка стали, класс прочности	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	ψ_z , %	KV, Дж	при температуре испытаний, °C	
						–40	–60	–70
	не менее							
06ГБД, 355	355	450	22	55	25	98	78	59
06ГБД, 390	390	490	22	55	25	98	78	59
06Г2Б, 440	440	540	22	55	25	98	78	59
06Г2Б, 490	490	590	20	55	25	98	78	59

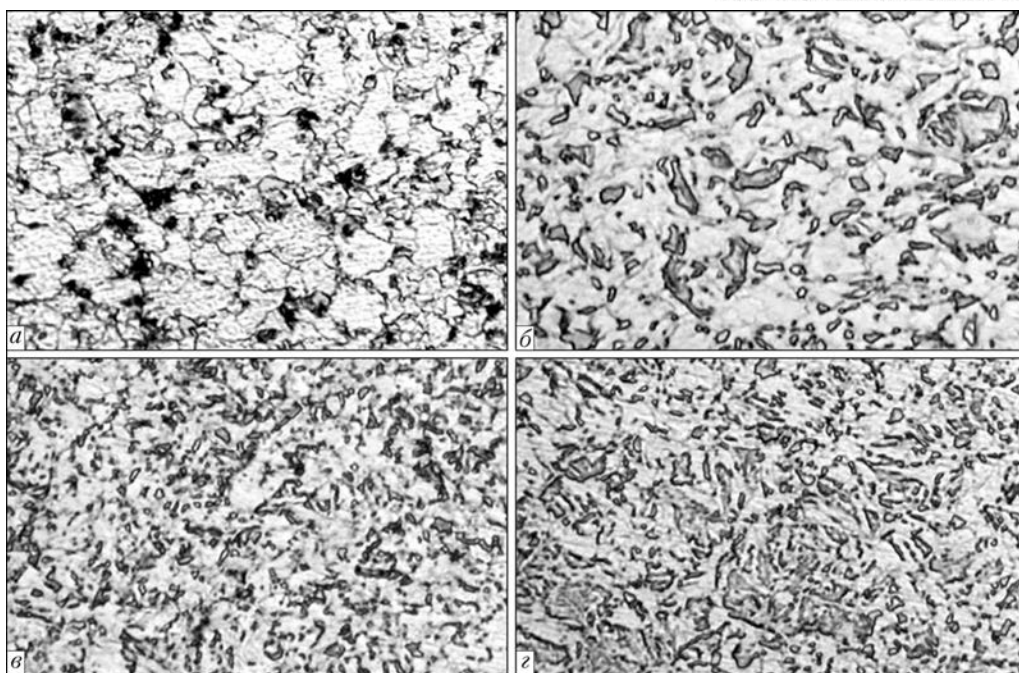


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 500$) образцов стали 06ГБД при охлаждении с различными скоростями $w_{6/5} = 1,3$ (а), 10,1 (б), 27 (г), 70 (з) $^{\circ}\text{C}/\text{с}$

Таблица 3. Химический состав исследуемого проката стали 06ГБД, мас. %

δ , мм	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu	Nb	V
12	0,066	1,20	0,20	0,008	0,006	0,14	0,13	0,22	0,019	0,04
14	0,069	1,22	0,18	0,009	0,008	0,13	0,12	0,21	0,021	0,05
20	0,066	1,23	0,19	0,010	0,009	0,22	0,13	0,22	0,021	0,05
32	0,064	1,24	0,17	0,011	0,011	0,23	0,10	0,20	0,020	0,05
40	0,070	1,22	0,17	0,018	0,010	0,21	0,12	0,21	0,019	0,05

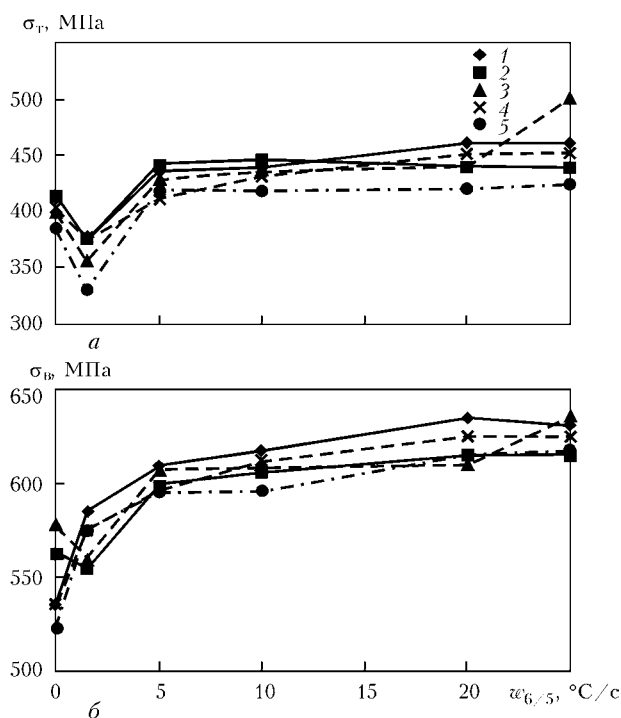


Рис. 3. Зависимость предела текучести (а) и предела прочности (б) стали 06ГБД от скорости охлаждения металла ЗТВ при разной толщине $\delta = 12$ (1), 14 (2), 20 (3), 32 (4) и 40 (5) мм

Анализ данных, полученных в результате испытания образцов на разрыв (табл. 3, рис. 3, а, б), показал, что с уменьшением скорости охлаждения монотонно снижаются показатели $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{в}}$, характеризующие прочность металла. Наиболее интенсивно снижаются значения предела текучести. Как свидетельствуют результаты механических испытаний, в интервале скоростей охлаждения $w_{6/5} = 1,5 \dots 3,0$ $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ имеет место разупрочнение металла ЗТВ, характеризующее уменьшением на 25...60 МПа показателей предела текучести металла ЗТВ по сравнению с исходными данными (рис. 3, а). При таких скоростях охлаждения металл ЗТВ имеет значения $\sigma_{\text{т}}$ ниже значений, установленных в нормативной документации на сталь. В то же время предел прочности металла ЗТВ во всем исследуемом диапазоне скоростей охлаждения не снижается ниже значений, регламентируемых техническими условиями на сталь.

На высоком уровне находятся пластические свойства металла ЗТВ. Несмотря на незначительное снижение показателей относительного удлинения с увеличением скорости охлаждения они превышают 22 % (рис. 4, а). В то же время по-

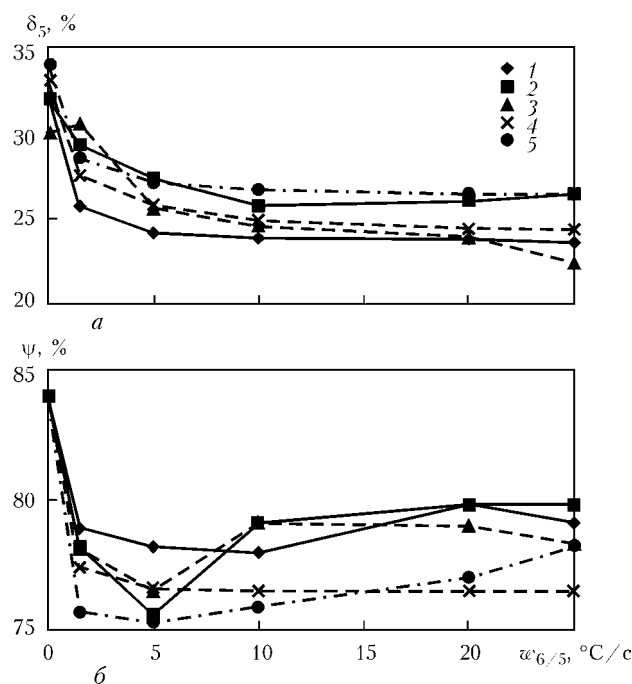


Рис. 4. Зависимость относительных значений удлинения (а) и сужения (б) металла ЗТВ стали 06ГБД от скорости охлаждения металла различной толщины $\delta = 12$ (1), 14 (2), 20 (3), 32 (4), 40 (5) мм

казатели относительного сужения практически не изменялись (рис. 4, б).

С уменьшением скорости охлаждения ударная вязкость металла ЗТВ снижается независимо от температуры испытаний. Однако при температуре 20 °С во всем исследуемом диапазоне остается достаточно высокой $KCV_{+20} \geq 170$ Дж/см² (рис. 5, а). Отрицательное влияние скорости охлаждения сказывалось при испытаниях образцов в условиях пониженных температур. Если для толщин 12 и 14 мм при скоростях охлаждения $w_{6/5} \geq 10$ °С/с характерны высокие значения хладостойкости (рис. 5, б), то в диапазоне скоростей охлаждения 1,5...10 °С/с наблюдается резкое снижение показателей ударной вязкости ($KCV_{-40} = 18...24$ Дж/см²) для всех толщин.

Установлено, что требуемый комплекс механических свойств металла ЗТВ может быть обеспечен при сварке на ограниченных тепловложениях, когда минимальные скорости охлаждения сварных соединений не опускаются ниже 10 °С/с.

Сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин оценивали по результатам испытаний образцов Имплант, Теккен и технологических стыковых проб «жесткая обварка». Для проведения испытаний по методу Имплант использовали цилиндрические образцы-вставки диаметром 6,0 мм с винтовым надрезом, изготовленные из проката сталей 06ГБД и 06Г2Б различной толщины. Скорость охлаждения металла ЗТВ образцов Имплант (в интервале 5...80 °С/с) регулировали, изменяя погонную энергию сварки

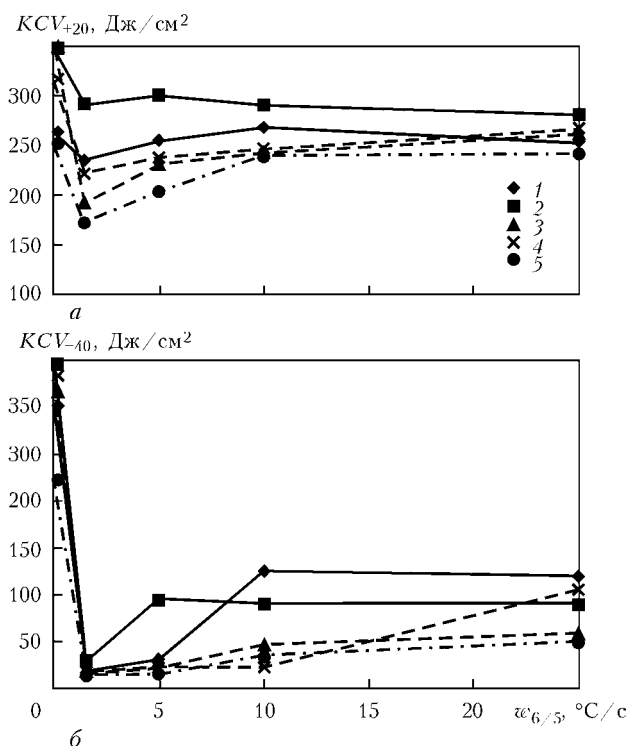


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости KCV для температуры испытаний +20 (а) и -40 °С (б) металла ЗТВ стали 06ГБД от скорости охлаждения металла при разной толщине проката $\delta = 12$ (1), 14 (2), 20 (3), 32 (4), 40 (5) мм

и протяженность связующих валиков. Содержание диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле электродами УОНИ-13/55 (при определении хроматографическим методом) изменяли от 5 до 15 мл/100 г. Осевое статическое нагружение образцов-вставок прикладывали после сварки и их охлаждения до температур 100...150 °С. Критерием стойкости металла ЗТВ к замедленному разрушению принимали максимальное растягивающее напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{\text{кр}}$, при котором в образцах Имплант не образуются трещины в течение 20 ч.

В результате установлено, что $\sigma_{\text{кр}}$ образцов Имплант стали 06Г2Б толщиной 30 мм при скоростях охлаждения, характерных для условий сварки без подогрева ($w_{6/5} \leq 25$ °С/с) и содержания $[H]_{\text{диф}} \leq 10$ мл/100 г, находятся на высоком уровне ($\sigma_{\text{кр}} \geq 0,8\sigma_T$ основного металла).

Это свидетельствует о том, что образование холодных трещин в металле ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей маловероятно. Однако при неблагоприятных условиях сварки холодные трещины могут образовываться в металле шва. Так, при повышении скорости охлаждения сварных соединений до 60...80 °С/с, характерных для сварки в условиях низких климатических температур, и увеличении содержания $[H]_{\text{диф}}$ до 15 мл/100 г исключить образование трещин можно, применив предварительный подогрев до температуры 60...90 °С. Это сопоставимо с данными,

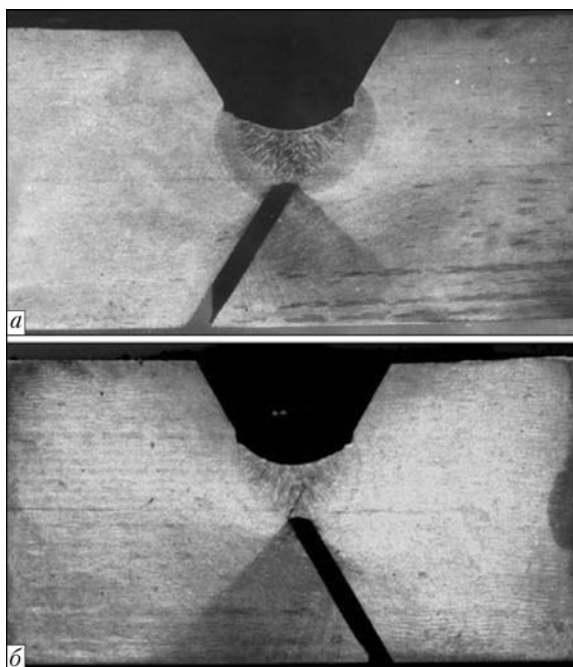


Рис. 6. Шлифы проб Теккен, выполненных электродами УОНИ-13/55 при концентрации $[H]_{\text{диф}} = 10$ (а) и 15 мл/100 г (б)

полученными при испытании проб Теккен из стали 06Г2Б. Было установлено, что при содержании диффузионного водорода в металле шва, не превышающем 10 мл/100 г, сварные соединения стали 06Г2Б хорошо сопротивляются замедленному разрушению. Трещины в пробах Теккен отсутствуют (рис. 6, а). При более высоких концентрациях $[H]_{\text{диф}}$ вероятность образования холодных трещин в сварных соединениях весьма высока, о чем свидетельствуют результаты испытаний проб Теккен, выполненных электродами УОНИ-13/55 с высоким содержанием диффузионного водорода ($[H]_{\text{диф}} \approx 15,0$ мл/100 г). При таких условиях сварки трещины в пробах зарождаются уже непосредственно после окончания выполнения корневого валика (через 3...5 мин после завершения сварки). Процесс развития трещины происходит также интенсивно. Через 10...15 мин после образования она была обнаружена на поверхности шва в концевой его части, а по истечении 2 ч после окончания сварки поразила все его сечение. Трещина зародилась и развивалась исключительно по металлу шва (рис. 6, б). Это косвенно подтверждают ранее полученные результаты испытаний образцов Имплант, которые свидетельствуют о высокой сопротивляемости замедленному разрушению металла ЗТВ стали 06Г2Б.

Сопротивляемость многослойных сварных соединений стали 06ГБД образованию холодных трещин оценивали по результатам испытаний технологических проб «жесткая обварка» (рис. 7, а). Проба представляет собой массивную плиту размером 400×400×40 мм, на которую устанавливали и приваривали по всему периметру стыковые соединения толщиной $S = 12, 14, 20$ мм с V- (рис. 7,

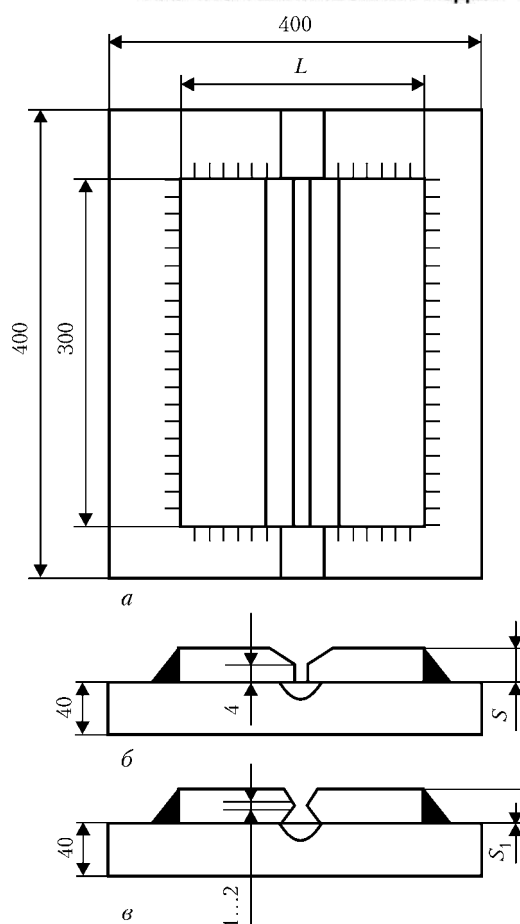


Рис. 7. Схемы жестких стыковых соединений для исследования сопротивляемости образованию холодных трещин (технологическая проба «жесткая обварка»)

б) и X-образной разделкой кромок (рис. 7, в) для толщин $S_1 = 12, 14, 20, 32, 40$ мм. В пробах предусмотрен обязательный зазор 1,5...2,0 мм, который служит концентратором напряжений при сварке соединений с притуплением 2...4 мм для обеспечения технологического непровара.

Пробы шириной $L = 300, 200, 100$ мм сваривали при различных температурах и режимах сварки, регулируя при этом тепловое воздействие источником нагрева, а именно: скорость и время охлаждения. Жесткость технологической пробы регулировали путем изменения ширины свариваемых пластин.

Критерием склонности к замедленному разрушению служит наличие-отсутствие трещин в металле шва и металле ЗТВ.

Механизированную сварку жестких стыковых соединений образцов стали 06ГБД шириной 100 и толщиной 12, 14 и 20 мм с V- и X-образной разделкой кромок выполняли в защитной газовой смеси $Ag + 18\% CO_2$ проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм на режиме $I_{\text{св}} = 180...200$ А, $U_{\text{д}} = 24...26$ В, $v_{\text{св}} = 10...12$ м/ч. Автоматическую сварку жестких стыковых соединений образцов толщиной 20, 32 и 40 мм с X-образной разделкой кромок выполняли проволокой Св-10НМА диа-

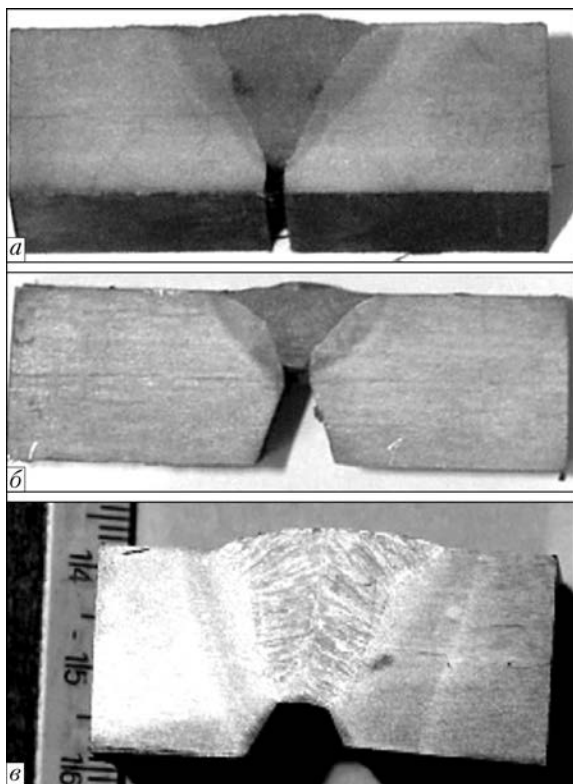


Рис. 8. Типичные макрошлифы, изготовленные из технологических проб «жесткая обварка» стали 06ГБД: а, б — механизированная сварка в защитных газах соответственно V- и X-образная разделка кромок толщиной 12 мм; в — автоматическая сварка под флюсом (X-образная разделка кромок толщиной 20 мм)

метром 4,0 мм под флюсом АН-22 на режимах $I_{св} = 500...550$ А, $U_{д} = 32...34$ В, $v_{св} = 22...26$ м/ч — корневые валики. На этих же режимах выполняли и последующую сварку образцов стали толщиной 20 мм. Сварные же соединения сталей толщиной 32 и 40 мм далее сваривали на более мощном режиме: $I_{св} = 550...600$ А, $U_{д} = 32...34$ В, $v_{св} = 20...22$ м/ч и $I_{св} = 700...750$ А, $U_{д} = 32...34$ В, $v_{св} = 24...26$ м/ч соответственно.

Процесс зарождения и развития трещин в пробах контролировали методом акустической эмиссии с помощью прибора ИКД 128. Для этого на образец непосредственно после сварки устанавливали специальные датчики. После сварки все

пробы выдерживали не менее 48 ч. Затем их визуально (с использованием лупы с пятикратным увеличением) контролировали для определения наличия-отсутствия трещин на поверхности сварного соединения. На завершающем этапе контроля проб «жесткая обварка» изготавливали макрошлифы, которые исследовали на микроскопе «НЕОФОТ-2» при десятикратном увеличении.

Полученные результаты также свидетельствуют о достаточно высокой сопротивляемости сварных соединений стали 06ГБД замедленному разрушению. Даже при максимальной жесткости проб (образцы шириной 100 мм) как при механизированной сварке в смеси газов, так и при автоматической сварке под флюсом в макрошлифах (рис. 8) холодные трещины в образцах обнаружены не были.

На основе проведенных исследований влияния термических циклов сварки на структуру и свойства металла ЗТВ сварных соединений стали 06ГБД установлены скорости охлаждения в температурном интервале 600...500 °С и рассчитаны режимы автоматической сварки под флюсом (табл. 4).

Исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона и заводских условиях, показали, что при сварке стали 06ГБД получение соединений с равноценными основному металлу механическими свойствами обеспечивают выпускаемые промышленностью сварочные материалы: проволока Св-08Г2С в сочетании с защитной газовой смесью $Ar + 18\% CO_2$, а также проволока Св-10НМА в сочетании с флюсом АН-47. Типичные показатели механических свойств сварных соединений стали 06ГБД различной толщины приведены в табл. 5. Следует заметить, что указанные выше сварочные материалы обеспечивают требуемый уровень механических свойств и на стали 06Г2Б класса прочности С 440.

Рекомендуемые режимы сварки и сварочные материалы нашли применение при изготовлении ответственных сварных металлоконструкций резервуаров большой вместимости для нефти и нефтепродуктов из стали 06Г2Б, а также при

Таблица 4. Рекомендуемые режимы автоматической сварки стыковых соединений с разделкой кромок стали 06ГБД класса прочности С 390 под флюсом проволокой сплошного сечения диаметром 4,0 мм и соответствующие им погонные энергии и скорости охлаждения металла шва и ЗТВ

δ, мм	Режим сварки			$q_{ш}$, Дж/см	$w_{6/5}$, °С/с, при начальной температуре сварного соединения, °С			
	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$v_{св}$, м/ч (см/с)		+5	+20	+120	+160
40	700...750	30...34	25 (0,7)	24600...29870	25,6...21,4	24,5...20,2	15,7...12,8	12,7...10,2
32	550...600	30...34	20 (0,555)	24380...30133	22,4...20,5	21,5...19,7	14,0...12,0	11,5...9,6
20	550...600	30...34	20...22 (0,555...0,611)	22141...30133	24,5...14,4	22,8...12,9	12,8...6,1	9,01...4,2
14	450...500	30...32	26 (0,722)	15325...18166	27,0...18,6	25,1...16,2	11,8...7,6	8,1...5,3
12	450...500	30...32	28 (0,777)	14241...16879	21,5...14,3	19,4...12,8	8,9...5,7	5,9...3,8



Таблица 5. Показатели механических свойств сварных соединений стали 06ГБД класса прочности С 390, выполненных автоматической сваркой под флюсом АН-47 проволокой Св-10НМА диаметром 4 мм

δ, мм	Форма разделки кромок	σ _в , МПа	α _{заг} , град	KCU, Дж/см ²				KCV, Дж/см ²				HV _{max}
				центр шва		ЗТВ		центр шва		ЗТВ		
				+20	−40	+20	−40	+20	−40	+20	−40	
40		528	180	183,5	93	330	330	142	64	305	300	208
32		534	180	160	101	334	315	146	56	300	298	208
20		550	180	196	102	347	344	122	40	Нет свед.	Нет свед.	208
14		566	180	194	95	326	314	157	43	306	300	208
12		582	180	166	110	290	289	142	55	298	296	201
12		560	180	214	91	330	322	123	41	305	295	192

изготовлении мостовых металлоконструкций из стали 06ГБД. Опыт эксплуатации этих конструкций из экономнолегированных сталей 06ГБД и 06ГБ2Б в Украине и Беларуси при нормальных климатических условиях свидетельствует о высокой надежности и правильности примененной технологии сварки.

1. *Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций* / Л. И. Миходуй, В. И. Кирьян, В. Д. Позняков и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 5. — С. 36–40.
2. *Морфологические особенности микроструктуры металла швов низколегированных сталей с ультранизким содержанием углерода* / В. Ф. Грабин, В. В. Головкин, В. А. Костин, И. И. Алексеев // Там же. — 2004. — № 7. — С. 17–22.
3. *Карбонитридное упрочнение низколегированных сталей* / М. И. Гольдштейн, Л. И. Гладштейн, С. А. Голованенко // Сталь. — 1977. — № 9. — С. 833–837.

4. *Хладостойкость и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390* / В. Д. Позняков, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 3. — С. 45–49.
5. *Иващенко Г. А., Демченко Ю. В. Основы выбора химического состава сталей повышенной прочности и хладостойкости для сварных конструкций* // Прогрессивные методы получения сварных соединений из конструкционных сталей и чугунов: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 110–116.
6. *Пилушенко В. Л. Влияние микролегирования на служебные характеристики стали* // Сталь. — 1987. — № 10. — С. 24–26.
7. *Григоренко Г. М., Костин В. А., Орловский В. Ю. Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей* // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–34.
8. *Саржевский В. А., Сазонов В. Я. Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75* // Там же. — 1981. — № 5. — С. 69–70.

Поступила в редакцию 07.02.2013

«ВСМПО Титан Украины» осваивает выпуск длинномерных титановых труб

«ВСМПО Титан Украина» (г. Никополь, Днепропетровская область) — дочерняя компания крупнейшего мирового производителя полуфабрикатов и изделий из титана и его сплавов корпорации «ВСМПО Ависма» (Свердловская область, Россия) намерена начать производство длинномерных тонкостенных труб.

По сообщению «ВСМПО Ависма» корпорация приобрела для «ВСМПО Титан Украины» две сварочные линии итальянского производства, что уже через год позволит украинской компании выйти на проектную мощность по выпуску труб диаметром от 12 до 60 мм, длиной до 26 м.

Ранее «ВСМПО Титан Украина» производила только холоднокатаные бесшовные трубы из титановых сплавов.

Источник: <http://www.ugmk.info/news>



ТРЕЩИНЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА И МЕРЫ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

А. А. РЫБАКОВ, Т. Н. ФИЛИПЧУК, Л. В. ГОНЧАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: rybakov@paton.kiev.ua

Рассмотрены случаи разрушения сварных магистральных газопроводов, в том числе после длительной эксплуатации, вызванные наличием трещиноподобных дефектов в сварных соединениях труб, образовавшихся при их изготовлении. Дан анализ основных причин возникновения таких дефектов в металле швов и зоне термического влияния с учетом особенностей технологических процессов производства и сварки труб. Показано, что трещины могут иметь различную ориентацию и происхождение, образовываться непосредственно в процессе сварки или на более поздних стадиях изготовления при выполнении смежных операций, например, экспандирования труб. Их образование обусловливается рядом причин технологического характера, например, перемещением свариваемых кромок труб в процессе сборки, некорректным выбором сварочных материалов (сварочной проволоки, флюса), локальным изменением химического состава металла шва или его структурной неоднородностью из-за попадания в шов экзогенных частиц, повышенной влажностью флюса и др. Описаны меры предупреждения образования трещиноподобных дефектов в сварных соединениях труб. Результаты исследований могут быть использованы в трубосварочном производстве для совершенствования технологии сварки и контроля трубной продукции, а также при обследовании трубопроводов в процессе их эксплуатации. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: дуговая сварка, магистральные газонефтепроводы, сварные соединения, разрушения, трещины, причины образования, предупреждение

Как свидетельствуют статистические данные [1, 2], основными причинами аварий линейной части магистральных газонефтепроводов являются так называемые строительные (образовавшиеся при выполнении строительно-монтажных работ) и эксплуатационные (преимущественно коррозионные, в том числе стресс-коррозионные) дефекты. Считают, что разрушения трубопроводов, обусловленные строительными причинами, наиболее часты в начальный период их эксплуатации [2]. По мере увеличения длительности работы трубопроводов, напротив, существенно возрастает количество разрушений из-за коррозионных повреждений.

В то же время, как свидетельствуют расследования ряда отказов магистральных трубопроводов, в том числе после длительной эксплуатации, их разрушения могут быть связаны с дефектами, образовавшимися в процессе изготовления труб, в частности, наличием трещиноподобных дефектов в сварных соединениях.

Так, при аварии на газопроводе диаметром 820 мм, последствия которой показаны на рис. 1, очагом разрушения явилась протяженная трещина в заводском продольном шве трубы. Длина трещины составляла 850 мм, глубина 4...6 мм (рис. 2). По всей протяженности дефект не распространялся за пределы наружного шва. Повер-

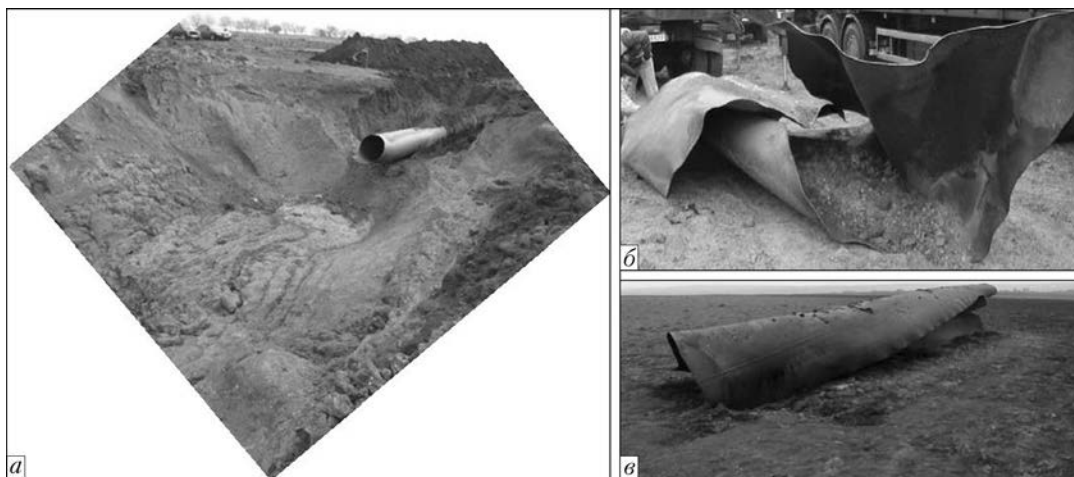


Рис. 1. Разрушение трубопровода (а) и фрагменты разрушившихся труб (б, в)



Рис. 2. Трещина в наружном продольном шве разрушившейся трубы диаметром 820 мм

хность трещины повреждена поверхностной коррозией, тогда как вне дефекта — в зоне развития разрушения (долома) коррозионные повреждения излома отсутствовали, что является дополнительным подтверждением образования трещины при изготовлении трубы. Разрыв трубопровода произошел после 35 лет его эксплуатации при давлении 4,5 МПа (рабочее давление газопровода 5,4 МПа). Трубы изготовлены из стали 17ГС толщиной 9 мм.

В сварном соединении магистрального газопровода диаметром 1420 мм, сооруженного в 1983 г. из труб с толщиной стенки 15,7 мм (сталь типа Х70), при внутритрубной диагностике выявлен дефект, классифицированный как «потеря металла». При контрольном шурфовании в продольном шве трубы обнаружена сквозная трещина, через которую вытекал транспортируемый газ (рис. 3). Истечение газа начиналось при давлении

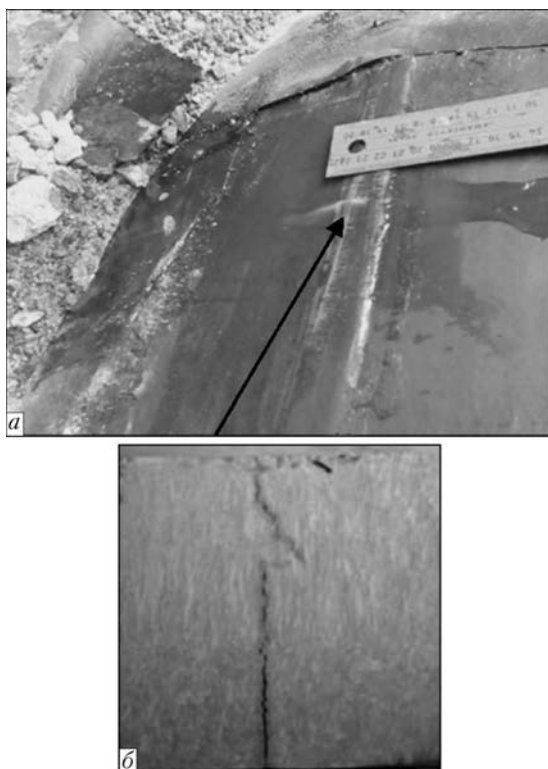


Рис. 3. Сквозная поперечная трещина в металле шва трубы диаметром 1420 мм: а — внешний вид трубы с трещиной в шве со стороны наружной поверхности; б — макрошлиф металла шва с трещиной (стрелкой обозначено истечение газа из трещины в продольном шве)

более 3 МПа, при меньшем давлении трещина закрывалась. Дополнительным неразрушающим контролем в этом же шве выявлена еще одна трещина, которая выходила на поверхность только внутреннего шва. Фрактографические исследования поверхности этих дефектов позволяют утверждать, что они также образовались в процессе изготовления трубы.

При гидравлических испытаниях вновь сооруженного нефтепровода произошло разрушение ряда труб размером 1220×19 мм из стали К60 (рис. 4). При этом зафиксировано давление 12,4 МПа (заводское испытательное давление 13,3 МПа). Трубы разорвались по околошовной зоне продольного заводского шва на длине примерно 1,6 м. Исследования на растровом микроскопе рельефа излома в зоне разрушения позволили установить, что оно развивалось от наружной поверхности трубы к внутренней, и, в основном, по вязкому механизму. Установлено, что причиной разрушений труб стали надрывы по зоне термического влияния продольного шва (рис. 4, б).

Таким образом, описанные случаи разрушений трубопроводов были вызваны наличием в сварных соединениях трещиноподобных дефектов, которые образовались еще на стадии производства труб. Ниже дан анализ условий и причин возникновения указанных дефектов в сварных соединениях труб с учетом применяемых технологических процессов их производства (здесь анализируются прямошовные трубы большого диаметра, сваренные дуговой сваркой под флюсом). Для удобства изложения материалов рассматриваемые дефекты условно объединены в отдельные

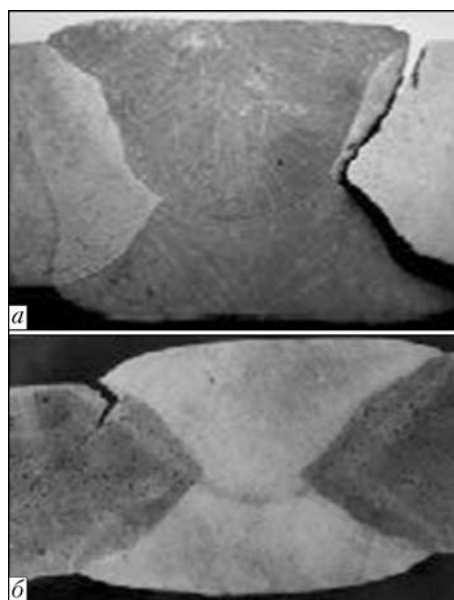


Рис. 4. Разрушение в околошовной зоне трубы диаметром 1220 мм: а — характер разрушения; б — надрыв в металле ЗТВ



группы, исходя из общих признаков и преобладающей причины их образования.

Продольные кристаллизационные трещины. Случаи образования трещин этого типа, аналогичных трещине, явившейся причиной описанного ранее отказа газопровода диаметром 820 мм, известны еще на ранней стадии освоения производства сварных труб большого диаметра [3]. Наиболее часто они возникали при применении устаревшей двухслойной технологии сварки. При такой технологии продольный шов прямошовной трубы сваривали в два слоя последовательно с наружной и внутренней поверхности трубы, причем первый, преимущественно наружный слой, выполняли в сборочно-сварочном стане в процессе сборки кромок трубной заготовки, что при чрезмерных деформациях этих кромок создает условия для образования продольных горячих кристаллизационных трещин. В 1960-х годах прямошовные трубы диаметром до 1220 мм изготавливали с применением такой технологии сварки и в больших количествах использовали для сооружения магистральных трубопроводов. На рис. 5 продольные трещины показаны на примере швов труб диаметром 820 мм из стали 14ХГС. На поверхности трещин видны грубые столбчатые кристаллиты, что подтверждает их горячее происхождение.

В начале 1970-х годов была разработана и реализована в трубосварочном производстве трехслойная технология сварки вначале спиральношовных, а затем прямошовных труб большого диаметра, при которой кромки трубных заготовок в момент их сопряжения свариваются в защитном газе сборочным (технологическим) швом [4]. Последний затем полностью переваривается наружным и внутренним рабочими слоями, выполняемыми под флюсом. Такая технология позволила устранить образование в швах продольных трещин, связанных с перемещениями свариваемых кромок. Следует отметить, что современные нормативные документы предусматривают обяза-



Рис. 5. Продольная трещина в наружном шве трубы из стали 14ХГС, обусловленная действием преимущественно силового фактора: *а* — вид со стороны наружного шва; *б* — поверхность излома

тельное применение при сооружении ответственных газонефтепроводов труб, сваренных по трехслойной технологии с предварительным соединением кромок технологическим швом. Это же требование, на наш взгляд, следует оговаривать при заключении контрактов на поставку труб. Что касается старых трубопроводов, то в них возможность присутствия таких дефектов не исключена, в том числе из-за отсутствия в период их строительства достаточных средств неразрушающего контроля сварных соединений труб.

Продольные трещиноподобные дефекты, связанные с усадочной рыхлостью в швах. Дефекты этого типа (рис. 6) образуются при многодуговой сварке под флюсом с повышенной скоростью вследствие, как указано в работе [5], обособления хвостовой части сварочной ванны и кристаллизации последних порций жидкого металла в условиях затрудненной усадки. Глубина усадочных рыхлостей (показано стрелкой на рис. 6, *а*) обычно небольшая (0,3...0,5 мм). Однако трещины, которые иногда сопровождают рыхлость, могут иметь большую глубину. Такие трещины располагаются по центру шва и имеют, как и в предыдущем случае, межкристаллитный характер. В работе [5] показано, что вероятность образования

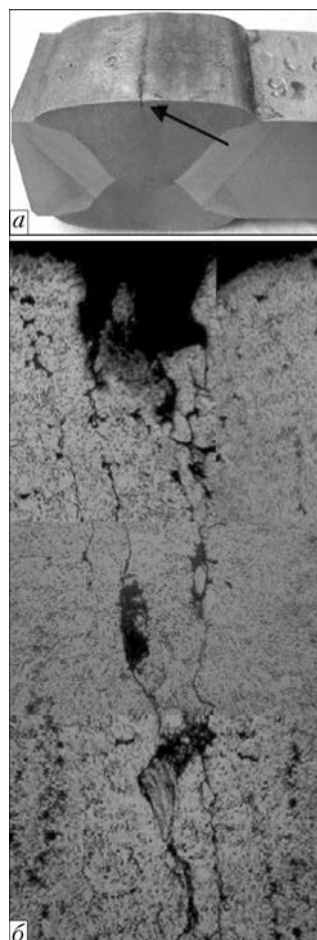


Рис. 6. Макрошлиф с усадочной рыхлостью по центру шва (*а*) и микроструктура ($\times 250$) этого участка (*б*)

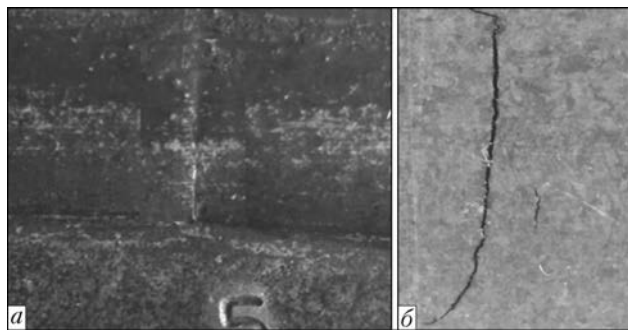


Рис. 7. Холодные поперечные трещины, образовавшиеся в швах со структурами закалочного типа: *a* — поперечная трещина на внешней поверхности шва; *б* — продольный макрошлиф

усадочной рыхлости возрастает с повышением скорости многодуговой сварки и применением плавного флюса среднего и крупного гранулометрического состава. В случае использования при сварке труб агломерированного флюса усадочные рыхлости, как правило, отсутствуют.

Холодные поперечные трещины в швах могут образовываться вследствие воздействия двух основных факторов [6–8]: формирования в металле шва закалочных структур и/или наличия избыточного водорода. Вид холодной поперечной трещины в продольном шве трубы, обусловленной, преимущественно, структурным фактором, показан на рис. 7. Установлено, что трещины этого типа в металле шва труб из типовой микролегированной стали класса прочности К56–К65 возникают в связи с повышенным его легированием, в первую очередь марганцем, молибденом, ниобием, ванадием, что способствует образованию структур закалочного типа с высокой твердостью $HV_{49} = 280 \dots 350$. В двухсторонних сварных соединениях труб такие трещины чаще всего зарождаются в металле локальных хрупких зон первого шва с повышенной твердостью, образующихся при повторном нагреве во время выполнения второго шва. Разрушение имеет, преимущественно, внутрикристаллитный характер.

Особенности образования *холодных поперечных трещин водородного происхождения* исследовали на примере сварных соединений труб диаметром 914 мм из стали Х65 (рис. 8). Трещины выходили на поверхность наружного, внутреннего или обоих швов. Особых отличий структуры в металле зоны образования трещин от обычной не выявлено. Структуры закалки в швах отсутствовали. Не выявлены также полигонизационные границы, которые могли бы свидетельствовать о повышенном микролегировании шва. Твердость по Виккерсу металла шва не превышала критический уровень с точки зрения трещинообразования ($HV_{49} = 260$). Вместе с тем исследованиями на растровом микроскопе выявлено сосредоточение мелких пор в зоне трещины, что свидетельствует о ее водородном происхождении (рис. 8). Аналогичные поры выявлены и в районе сквозной поперечной трещины, ставшей причиной отказа ранее упомянутого газопровода диаметром 1420 мм.

Данные работы [8] подтверждают представление о замедленном характере образования поперечных трещин водородного происхождения в металле швов труб. В связи с этим выявление их непосредственно в процессе изготовления труб затруднено.

При изготовлении труб наиболее вероятным источником повышенной концентрации диффузионно-подвижного водорода в металле швов является применение флюса повышенной влажности, а также ускоренное охлаждение сварного соединения перед выполнением ультразвукового контроля.

Трещины разной ориентации металлургического происхождения, обусловленные локальным изменением химического состава металла швов труб, могут образовываться из-за различных причин, в основном, вследствие попадания в шов экзотических частиц. Например, известны случаи возникновения трещин в металле швов в связи с мес-

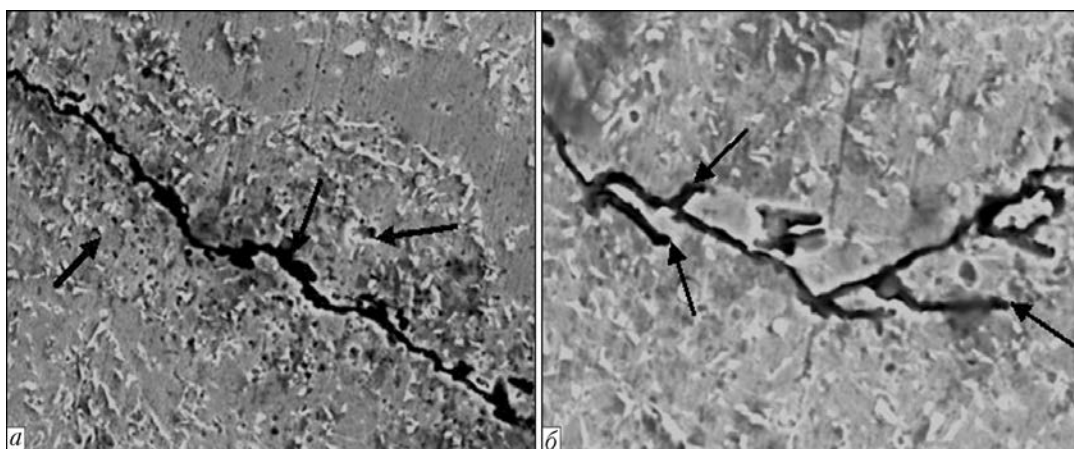


Рис. 8. Трещины водородного происхождения в металле шва трубы, выполненной под флюсом ($\times 1400$): *a* — скопление пор в зоне трещины; *б* — примеры торможения развития микротрещин порами



тным его обогащением углеродом, марганцем и формированием структурных составляющих с высокой твердостью. Такие трещины, в частности, выявляли в швах труб при использовании плавленного флюса АН-60 и АН-67Б из-за его загрязнения частицами футеровки печи в процессе изготовления [9]. Трещины этого типа разной ориентации располагались как в наружном, так и во внутреннем шве, имели нитевидный характер и, в основном, небольшие размеры, однако, в ряде случаев они распространялись на все сечение шва. Образование трещин в металле швов труб может быть вызвано также грубыми неметаллическими (шлаковыми) включениями экзогенного характера из загрязненного флюса при его повторном использовании и некачественной сепарации.

Зафиксированы случаи образования трещин в местах локального обогащения металла швов труб медью а иногда и цинком (рис. 9). Трещины зарождались в поверхностных слоях шва и развивались перпендикулярно его оси на глубину до 15 мм. Загрязнение металла шва указанными элементами может быть связано с оплавлением мунштуков или контактных плашек сварочных аппаратов, в том числе из-за нарушения стабильности многодугового процесса сварки под флюсом, например, при повышенном напряжении дуг, что приводит к шунтированию дуг шлаковой коркой. Образующиеся при этом трещины имеют относительно небольшие размеры, что затрудняет их выявление неразрушающими методами.

Трещины в ремонтируемых участках швов труб, где проводили исправление выявленных дефектов (пор, шлаковых включений, непроваров и др.) с предварительным их удалением и последующей многопроходной механизированной многослойной сваркой под флюсом, образуются, как правило, в связи с неблагоприятными структурными характеристиками металла «ремонтного» шва. Трещины развиваются преимущественно в продольном направлении, зарождаются, как правило, в последнем слое «ремонтного» шва, а затем распространяются в металле предыдущих слоев этого шва и ЗТВ.

Установлено, что исследуемые трещины могут быть отнесены к холодным, а их образование

обусловлено постепенным увеличением от слоя к слою массовой доли легирующих элементов (марганца, кремния, молибдена, хрома и др.) при выполнении многопроходных швов сварочными материалами, обычно применяемыми для этих целей в трубном производстве. Например, в случае использования флюса АН-60 и проволоки Св-08Г1НМА для исправления дефектного участка продольного шва трубы из стали 10Г2ФБ содержание марганца в последнем (четвертом) слое «ремонтного» шва возросло до 1,97 %, кремния — до 0,98 %, а молибдена до 0,53 % (в первом слое этого шва количество указанных элементов находилось на уровне 1,69, 0,45 и 0,16 %, соответственно). Чрезмерный уровень легирования металла последних слоев шва приводило к формированию участков структуры верхнего бейнита с высокой твердостью, пониженной пластичностью и вязкостью, обогащению ферритной матрицы кремнием, также снижающим ее пластичность, образованию развитой системы полигонизационных границ с микротрещинами. Более подробно вопросы оптимизации химического состава и структуры металла в участках швов труб, подвергаемых ремонту, будут рассмотрены в наших дальнейших публикациях.

Трещины-надрывы в околошовной зоне сварных соединений, аналогичные приведенным на рис. 4, могут образовываться при выполнении операции экспандирования труб, необходимой для обеспечения требуемых их размеров. Возникновение таких трещин является следствием действия ряда факторов: чрезмерных отклонений профиля трубы в районе сварного соединения от круглой формы перед экспандированием, неплавного перехода от усиления шва к основному металлу и неблагоприятных структурных характеристик металла в участках, прилегающих ко шву, обусловленных сварочным нагревом. Чаще всего случаи образования трещин-надрывов наблюдаются в период освоения производства труб нового сортамента или более высокого уровня прочности. Небольшие размеры этих дефектов и расположение в районе геометрического концентратора затрудняет их выявление неразрушающими методами контроля. Именно трещины-надрывы в околошовной зоне, образовавшиеся при экспандировании труб, стали причиной рассмотренных ранее разрушений магистрального трубопровода диаметром 1220 мм.

Таким образом, изучение причин аварий магистральных трубопроводов и проведенные на трубосварочных заводах исследования технологических сварочных и смежных процессов позволили установить особенности расположения, причины и механизм образования трещиноподобных дефектов в швах труб, предназначенных для использования при сооружении магистральных тру-

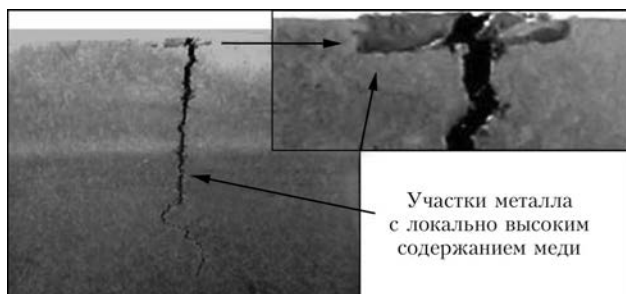


Рис. 9. Трещины в металле шва в участках локального обогащения медью (в правом углу фрагмент трещины, $\times 6$)



бопроводов. С учетом этих данных разработан и частично реализован на действующих трубосварочных предприятиях комплекс мер по снижению вероятности возникновения таких дефектов и повышению достоверности методов контроля. Например, как отмечалось ранее, практически повсеместно при изготовлении труб ответственного назначения используется трехслойная технология сварки (с предварительным выполнением сборочного шва) взамен устаревшей двухслойной сварки. Сварку труб выполняют только под керамическим флюсом вместо плавленного, в котором возможно присутствие отслоившихся частичек футеровки печи и других посторонних частиц. На большинстве трубных заводов исключена операция ускоренного охлаждения швов перед УЗК. В значительной мере усовершенствованы оборудование и схема контроля сварных соединений труб, в том числе за счет увеличения количества УЗ-преобразователей и др. Более полный перечень мер, рекомендованных для предупреждения

возникновения трещиноподобных дефектов в швах труб большого диаметра, свариваемых дуговой сваркой под флюсом, приведен в таблице.

Вместе с тем для повышения гарантии отсутствия трещиноподобных дефектов в швах труб, на наш взгляд, помимо технологических мер и совершенствования средств и методов контроля, в нормативных документах Заказчика на трубы необходимо устанавливать дополнительные требования к технологическому процессу их производства, например, ограничение влажности флюса, введение норм предельно допустимых содержаний легирующих элементов в стали и металле швов, контроль применяемых сварочных материалов и формы трубной заготовки перед экспандированием, регистрацию параметров сварочного процесса и его аттестацию перед началом производства труб и др.

Результаты данных исследований могут быть использованы также для совершенствования методов диагностики магистральных трубопроводов.

Рекомендованные меры для предупреждения возникновения трещиноподобных дефектов в швах труб большого диаметра, свариваемых дуговой сваркой под флюсом

Типы трещин	Меры предотвращения образования трещин
Продольные кристаллизационные трещины в наружных швах, обусловленные действием преимущественно силового фактора	Применение трехслойной технологии сварки с предварительным соединением кромок труб сборочным (технологическим) швом Формовка трубных заготовок, исключающая чрезмерные деформации кромок при сборке
Продольные трещины в металле швов труб, связанные с усадочной рыхлостью	Улучшение формы шва (устранение «седловины», ограничение ширины шва) Ограничение угла наклона «на спуск» стана для сварки внутренних швов труб в пределах не более 20 мин. Применение керамического флюса Контроль качества флюса
Холодные поперечные трещины в металле швов водородного происхождения или обусловленные образованием закалочных структур	Контроль влажности флюса (влажность флюса должна быть не более 0,03 %) Ограничение легирования металла шва (в первую очередь молибдена не более 0,3 % и ниобия не более 0,03 %) Исключение операции ускоренного охлаждения УЗ-контролем сварных соединений (при необходимости этой операции время между окончанием сварки и началом охлаждения должно быть не менее 1 ч, а температура шва — не более 80 °С) Для новых марок трубной стали и сварочных материалов контроль твердости металла первого шва, в том числе с целью выявления в его корне локальных зон повышенной твердости (более HV 260)
Трещины различной ориентации металлургического происхождения в металле швов	Применение агломерированного флюса и контроль его качества Контроль качества поверхности сварочной проволоки Регистрация параметров сварочного процесса и контроль его стабильности Контроль состояния наконечников сварочных мундштуков
Трещины в ремонтных участках заводских швов, выполняемых с применением многослойной сварки	Применение сварочной проволоки с ограниченным количеством молибдена (до 0,3 %) и никеля (до 0,6 %), а также агломерированного алюминатно-основного флюса Аттестация процесса сварки для ремонта сварных соединений труб
Трещины-надрывы в околошовной зоне сварных соединений	Контроль трубной заготовки и формы сварного соединения перед экспандированием (отклонение профиля поверхности трубы от теоретического круга в районе сварного соединения не должно превышать 0,15 % $D_{\text{н}}$). Улучшение формы шва (например, угол перехода шва к основному металлу должен быть не менее 120°) Ограничение величины экспандирования (до 0,9 %), особенно для толстостенных труб повышенной прочности Дополнительное ограничение предельно допустимого содержания легирующих элементов, в частности, углерода (в зависимости от уровня прочности), молибдена (не больше 0,20 %), ниобия (не больше 0,05 %), в том числе для трубной стали повышенной прочности, например, X80



1. Кузнецов В. В., Ляпин А. А., Монахов Р. Е. Сравнительный анализ статистических данных по аварийности на магистральных трубопроводах в России и в Западной Европе // Нефть, Газ и Бизнес. — 2007. — № 1-2. — С. 49–56.
2. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. — М.: Елима, 2004. — 1097 с.
3. Мандельберг С. Л., Рыбаков А. А., Сидоренко Б. Г. Стойкость сварных соединений трубных сталей против кристаллизационных трещин // Автомат. сварка. — 1972. — № 3. — С. 1–4.
4. Сварка в CO₂ сборочных швов прямошовных труб большого диаметра / С. Л. Мандельберг, А. А. Рыбаков, Л. И. Файнберг и др. // Там же. — 1972. — № 11. — С. 56–58.
5. Мандельберг С. Л., Семенов С. Е. Образование усадочных раковин на поверхности шва при многодуговой сварке под флюсом с повышенной скоростью // Там же. — 1962. — № 6. — С. 17–20.
6. Мандельберг С. Л., Буслинский С. В., Богачек Ю. Влияние водорода на образование холодных трещин в швах при сварке трубных сталей // Там же. — 1984. — № 2. — С. 2–5.
7. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
8. Гривняк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 215 с.
9. Мандельберг С. Л. Многодуговая сварка на повышенной скорости с колебанием электрода // Автомат. сварка. — 1965. — № 2. — С. 8–13.

Поступила в редакцию 12.02.2013

Вагон габарита RIC — достойное пополнение номенклатурного ряда пассажирских вагонов отКВСЗ

На Крюковском вагоностроительном заводе прошло заседание межведомственной приемочной комиссии, на котором рассмотрены результаты испытаний пассажирского спального вагона локомотивной тяги модели 61-7034 для международного сообщения габарита RIC на тележках модели 68-7047 для железных дорог с шириной колеи 1520 мм и тележках модели 68-7044 для железных дорог с шириной колеи 1435 мм. Итогом проведенных испытаний стало подтверждение соответствия вагона заявленным характеристикам и безопасность его эксплуатации.

Межведомственная комиссия определила, что конструкция нового вагона повышенной комфортности на тележках с пневмоподвешиванием производства ПАО «КВСЗ» соответствует современному техническому уровню пассажирских вагонов. Было принято решение присвоить комплект конструкторской документации на этот пассажирский вагон литеру 01 и разрешить Крюковскому вагоностроительному заводу изготовление опытной партии из 20 вагонов.

Новый этап в реализации проекта по модернизации вагонов Киевского метрополитена

После завершения всех процедур с японской стороной по запуску контракта Крюковский вагоностроительный завод получил авансовый платеж и начинает создание первого модернизированного поезда метро для Киевского метрополитена.

Кратко напомним суть дела: Киевская городская государственная администрация и ее глава Александр Попов предложили проект использования «зеленых инвестиций», которые Украина получает по Киотскому протоколу, — модернизировать 95 вагонов столичного метрополитена. Проект получил поддержку правительства. Не истратив ни одной копейки бюджетных средств, столичный метрополитен обновит подвижной состав Святошинско-Броварской линии, который на 90% состоит из морально и физически устаревших вагонов серии «Е», «Еж».

КВСЗ разрешили серийный выпуск новой цистерны

Вагон-цистерна модели 15-7076 предназначен для перевозки широкого спектра жидких (невязких) нефтепродуктов. Может эксплуатироваться по всей сети железных дорог Украины и государств-участников Содружества Совета по железнодорожному транспорту с шириной колеи 1520 мм. Вагон-цистерна имеет раму усиленной конструкции и котел повышенной прочности. Ходовая часть — две двухосные тележки модели 18-7055. Срок службы — 32 года. 28 февраля 2013 г. межведомственной приемочной комиссией было принято решение о ее постановке на серийное производство. Администрация и профсоюзный комитет КВСЗ подписали колдоговор.



УДК 261.791.317.5

ДУГОВАЯ ПАЙКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

В. Ф. ХОРУНОВ, И. В. ЗВОЛИНСКИЙ, С. В. МАКСИМОВА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Статья посвящена исследованию процесса дуговой пайки тонколистовой стали 08кп при использовании припоя БрКМц 3-1. Рассмотрены особенности растекания припоя в условиях дугового нагрева неплавящимся электродом с применением различных защитных сред. Показано, что наилучшее растекание достигается в смеси аргона с 10 мас. % водорода. Расчетным путем произведено сравнение тепловложения при дуговой сварке и пайке: погонная энергия (для конкретного случая) составила соответственно 1200 и 516,7 Дж/см. Показана возможность уменьшения тепловложения за счет использования импульсного процесса. Выявлены особенности формирования стыковых и нахлесточных соединений. При пайке стыковых соединений зазор может регулироваться в широких пределах (0,2...0,8 мм), а при пайке нахлесточных соединений этот параметр находится в более узких пределах. Однако в целом применение нахлесточных соединений представляется более перспективным. На основе данных оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что на границе соединения образуется силицидная прослойка, где содержание кремния может превышать 10 мас. %. Структура шва представляет собой твердый раствор с отдельными выделениями по границам зерен фазы с повышенным содержанием кремния. Показано, что при пайке на оптимальных режимах прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет 330...390 МПа. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов. Библиогр. 11, рис. 8.

Ключевые слова: сварка, дуговая пайка, низкоуглеродистые стали, припой, защитная среда, растекание припоя, покрытие, прочность соединений

Пайка — один из важнейших технических процессов современного производства. Бурное развитие различных отраслей промышленности обусловило ее широкое применение прежде всего в автомобилестроении и других отраслях, где необходимо соединять конструкции из тонкостенных материалов, в том числе имеющих защитные покрытия (цинка, алюминия и др.). Это обусловлено тем, что пайка как процесс формирования соединений материалов осуществляется при температурах ниже температуры плавления паяемого материала.

В настоящее время пайка наряду со сваркой является одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений. Разнообразие технологических задач диктует необходимость применения различных методов нагрева при пайке. Дуга является одним из перспективных источников нагрева для получения паяных соединений. В настоящее время способы пайки с применением дугового нагрева используются при соединении узлов из тонколистовых, в том числе оцинкованных, заготовок, например кузовов автомобилей [1–11]. Однако некоторые способы дуговой высокотемпературной пайки, в частности, дуговая пайка неплавящимся электродом в защитных газах, плазменная пайка, исследованы мало.

Целью настоящей работы являлось изучение возможности дуговой пайки низкоуглеродистых

сталей с использованием в качестве припоя стандартного сплава на основе меди БрКМц 3-1.

Для проведения экспериментов был подготовлен специальный стенд, который включал аппарат для аргонодуговой сварки «Master TIG MLS 2300» фирмы «Kemppi», устройство для подачи проволоки диаметром 0,8...1,6 мм с диапазоном плавного регулирования в пределах 0...130 мм/с (468 м/ч) и устройство для перемещения горелки со скоростью 0,5...25 мм/с (90 м/ч). Присадочную проволоку подавали под дугу, т. е. она не находилась под напряжением, что расширяло пределы регулирования параметров дуговой пайки.

Для проведения экспериментов использовали указанный выше припой в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Температура ликвидуса сплава составляла 1020 °С. В качестве подложек использовали образцы стали 08кп размером 150×60×1 мм в горизонтальном положении. Исследовали влияние погонной энергии, зазора, времени импульса, скорости подачи припоя на параметры шва.

Естественно, интересно было определить изменение погонной энергии при переходе от сварки к дуговой пайке. В качестве отправной точки отметим, что режим сварки указанного образца под защитой аргона проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм был следующий: $I = 100$ А, $U = 10,8$ В, $v_{св} = 22,7$ м/ч, $v_{пр} = 10$ мм/с.

Эффективная мощность дуги составляла примерно 750 Дж/с, погонная энергия — около 1250 Дж/см. Можно было ожидать, что в случае применения металла со значительно более низкой

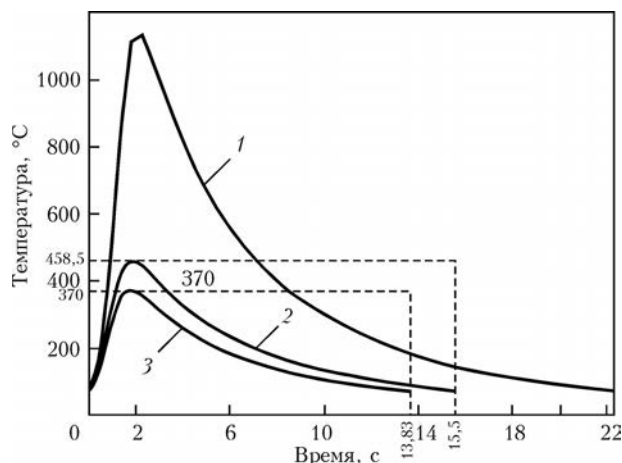


Рис. 1. Термический цикл дуговой сварки и пайки стали 08 кп на разных режимах: 1 — сварка ($I = 100$ А, $U = 10,8$ В, $v_{св} = 22,7$ м/ч, $v_{пр} = 10$ мм/с); 2 — пайка ($I = 60$ А, $U = 9,5$ В, $v_{п} = 22,7$ м/ч, $v_{пр} = 15$ мм/с, $\delta = 0,4$ мм); 3 — пайка в импульсном режиме ($I_{и} = 100$ А, $I_{п} = 10$ А, $U = 10,2$ В, $v_{п} = 22,7$ м/ч, $v_{пр} = 6$ мм/с, $v = 5$ Гц, $\tau_{и} = 30$ %, $\delta = 0,04$ мм)

температурой плавления энергии для образования соединения потребуется меньше. Действительно, при дуговой пайке погонная энергия составляет примерно 625 Дж/см ($I = 60$ А, $U = 9,5$ В, $v_{п} = 22,7$ м/ч, $v_{пр} = 15$ мм/с). Значение тепловложения может быть уменьшено за счет применения импульсного режима. Так, при пайке на режиме 3 (рис. 1) погонная энергия составляет около 416,7 Дж/см.

Для оценки изменения тепловложения при переходе от сварки к дуговой пайке были произведены расчеты по известным формулам. Соотношение термических циклов в точке, удаленной от центра шва на 0,6 мм, показано на рис. 1.

Из приведенных данных следует, что переход от сварки к дуговой пайке позволяет существенно понизить тепловложение и тем самым уменьшить возможность прожогов и деформаций в процессе получения соединений.

Данных о поведении припоев в условиях дугового нагрева явно недостаточно. В частности, не существует общепринятой методики для изучения процесса растекания в рассматриваемых условиях. Поэтому нами использованы известные рекомендации, которые были приспособлены к дуговому нагреву (рис. 2).

Эксперименты по смачиванию стали 08кп проводили по ГОСТ 23904–79 «Определение площади растекания припоя». Для этого были изготовлены образцы размером 40×40×1 мм и навески припоя БрКМц 3-1 диаметром 4 мм (массой 0,42 г). Для контроля температуры использовали хромель-алюмелевую термопару, которую приваривали к образцу для получения горячего спая. Контроль температуры производили прибором ТРМ-202. В качестве защитных газов использовали аргон, гелий и смесь $Ar + 10\% H_2$. Навеску припоя располагали строго в центре подложки для равно-

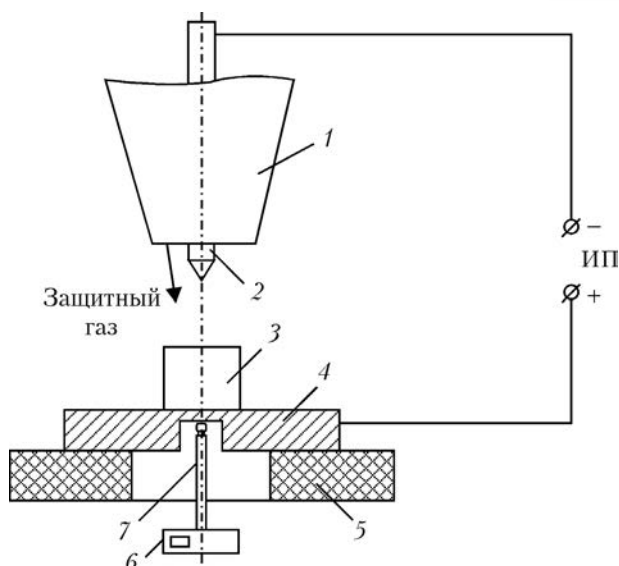


Рис. 2. Схема эксперимента по растеканию припоя в условиях дугового нагрева: 1 — сопло; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — навеска припоя; 4 — подложка; 5 — изолятор; 6 — регистратор температуры; 7 — термопара

мерного нагрева. Расстояние от торца электрода до навески составляло 2 мм.

Температуру процесса смачивания ограничивали и она превышала на 30 °С температуру ликвидуса припоев, т. е. для припоя БрКМц 3-1 составляла 1050 °С. Эксперименты по смачиванию производили на постоянном и переменном токе с разной формой импульса. Полученные наплавки фотографировали и обрабатывали на компьютере по программе AutoCard 2002.

Как видно из рис. 3, площадь растекания существенно зависит от состава защитной среды. Наилучшие результаты достигнуты в смеси аргона с водородом. Кроме того, площадь растекания возрастает и с увеличением диаметра электрода.

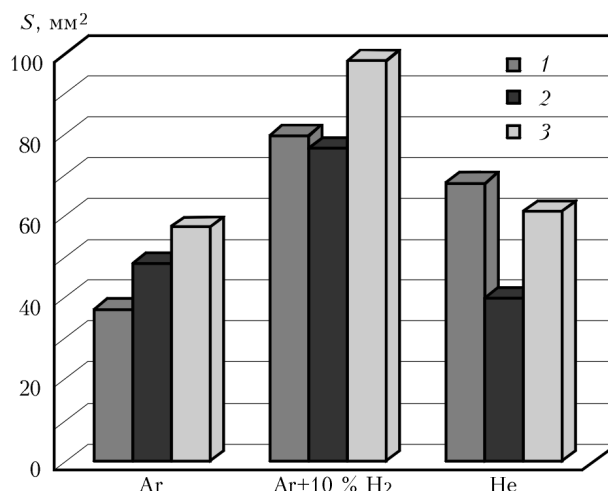


Рис. 3. Диаграммы площади растекания припоя БрКМц 3-1 по стали 08кп в зависимости от защитной среды и рода тока: 1 — постоянный ток; 2 — переменный ток (синусоидальный); 3 — переменный ток с прямоугольной формой импульса

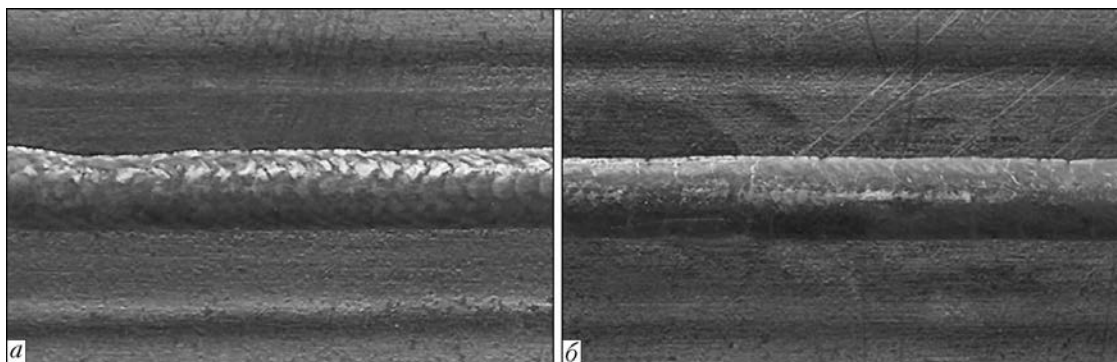


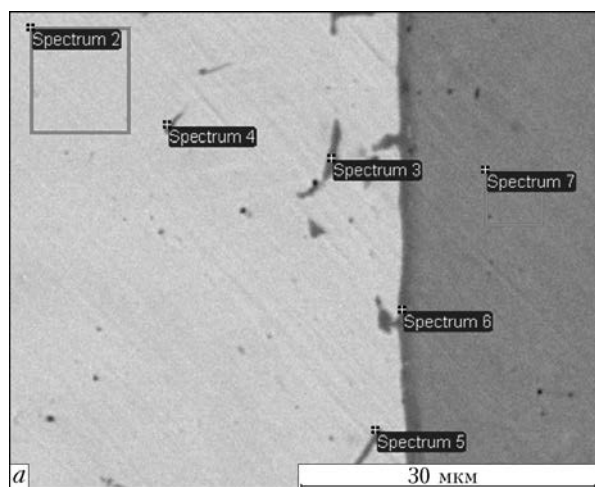
Рис. 4. Внешний вид швов стыковых соединений, паянных припоем БрКМц 3-1 на разных режимах: *a* — $I_{\text{н}} = 100 \text{ A}$, $I_{\text{п}} = 10 \text{ A}$, $U = 10,1 \text{ В}$, $v = 5 \text{ Гц}$, $\tau_{\text{н}} = 30 \%$, $v_{\text{п}} = 22,7 \text{ м/ч}$, $v_{\text{пр}} = 6 \text{ мм/с}$, $Q = 416,7 \text{ Дж/см}$; *б* — $I_{\text{н}} = 100 \text{ A}$, $I_{\text{п}} = 10 \text{ A}$, $U = 10,3 \text{ В}$, $v = 10 \text{ Гц}$, $\tau_{\text{н}} = 30 \%$, $v_{\text{п}} = 22,7 \text{ м/ч}$, $v_{\text{пр}} = 10 \text{ мм/с}$, $Q = 525 \text{ Дж/см}$

С практической точки зрения применение гелия из-за его высокой стоимости вряд ли целесообразно, а вот на смесь аргона с водородом как на перспективную защитную среду следует обратить внимание.

С использованием указанного выше припоя получено хорошее формирование стыковых и нахлесточных соединений. При получении стыковых соединений на оптимальных режимах полностью отсутствовало разбрызгивание, поверхность швов была гладкой. Хорошее формирование паяных швов можно получить при различном сочетании режимов дуговой пайки, в том числе импульсной (рис. 4), однако интегральным критерием качества

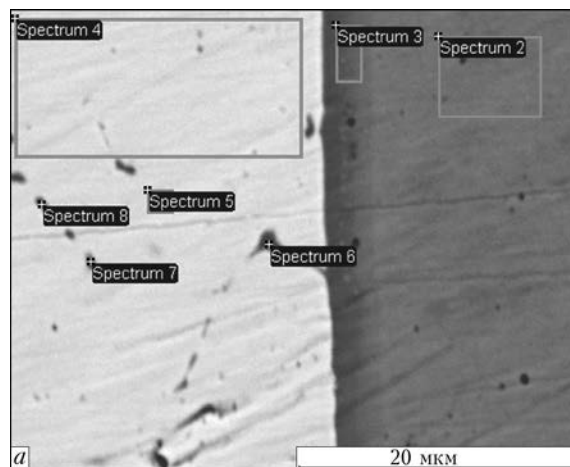
швов является погонная энергия. При этом изменение величины зазора при пайке стыковых соединений в пределах $0,2 \dots 0,6 \text{ мм}$ мало влияет на качество швов.

При рассмотрении микроструктуры соединений, полученных на различных режимах, отмечено, что во всех случаях при пайке припоем БрКМц 3-1 на границе соединения появлялась резко травящаяся прослойка, которая на нетравленном шлифе выглядит светлой, т. е. имеет повышенную твердость. Поскольку припой содержит 3 мас. % кремния, нами было сделано предположение, что это силицид. Для получения данных о конкретном химическом составе этой прослойки



№ спектра	Химический состав, мас. %			
	Si	Mn	Fe	Cu
2	3,87	1,13	0,89	94,12
3	12,93	2,74	40,3	44,02
4	14,74	10,15	32,33	42,78
5	10,29	1,47	47,66	40,58
6	12,04	0,83	78,91	8,21
7	0,16	0,24	99,47	0,13

Рис. 5. Микроструктура границы соединения стали 08кп, выполненного припоем БрКМц 3-1 на режиме $I = 19 \text{ A}$, $U = 8,9 \text{ В}$, $v_{\text{п}} = 7,2 \text{ м/ч}$, $v_{\text{пр}} = 2 \text{ мм/с}$, толщина основного материала 1 мм, диаметр присадочной проволоки 1,2 мм (*a*) и химический состав металла в местах проб (*б*)



№ спектра	Химический состав, мас. %			
	Si	Mn	Fe	Cu
2	0,15	0,26	99,11	0,48
3	10,19	0,67	84,91	4,24
4	2,41	0,92	2,53	94,13
5	3,01	0,93	1,63	94,44
6	4,93	1,26	17,32	76,5
7	3,9	1,13	4,23	90,74
8	3,43	1	2,38	93,19

Рис. 6. Микроструктура границы соединения стали 08кп, паянного припоем БрКМц 3-1 на режиме $I = 30 \text{ A}$ (постоянный), $U = 10,8 \text{ В}$, $v_{\text{п}} = 2 \text{ мм/ч}$, $v_{\text{пр}} = 4 \text{ мм/с}$, толщина пластины 1 мм, диаметр присадочной проволоки 1,2 мм, зазор 0 (*a*) и химический состав металла в местах проб (*б*)

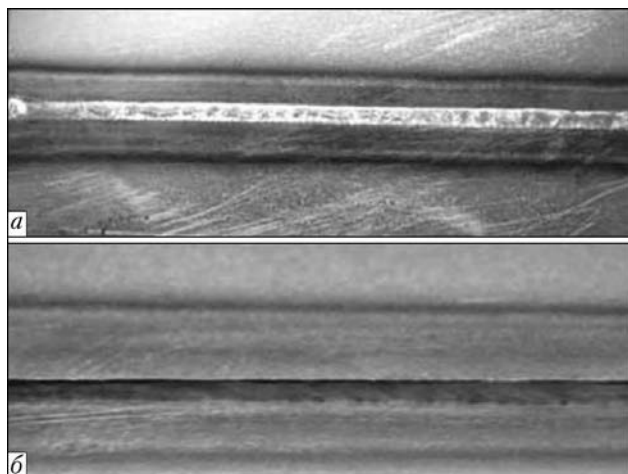


Рис. 7. Внешний вид нахлесточных соединений, выполненных дуговой пайкой на режиме $I_{\text{н}} = 100 \text{ А}$, $I_{\text{п}} = 10 \text{ А}$, $U = 10,2 \text{ В}$, $v = 5 \text{ Гц}$, $v_{\text{п}} = 22,7 \text{ м/ч}$, $v_{\text{пр}} = 6 \text{ мм/с}$, $\tau_{\text{и}} = 60 \%$: а — прямой шов; б — обратный

были проведены исследования на сканирующем микроскопе «CamScan», оснащенный энергодисперсионным спектрометром «Energy-200».

Микроструктура и результаты микрорентгеноспектрального анализа шва, выполненного при тепловложении $591,7 \text{ Дж/см}$, представлены на рис. 5. Основной металл и припой сохраняют свой исходный состав практически без изменения. Однако вдоль паяного шва (на границе соединения) кристаллизуется фаза, содержащая повышенную долю кремния до 12 мас. %, т. е., действительно, это силицид (рис. 5, спектр 6). Более того, в паяном шве вдоль границ зерен основного металла выделяется фаза, содержащая примерно от 10 до 15 мас. % кремния (рис. 5, спектры 3–5).

При увеличении тепловложения примерно до 1125 Дж/см ширина силицидной прослойки возрастает (рис. 6), хотя фазовый состав принципиально не меняется.

Эксперименты по пайке нахлесточных соединений проводили с учетом данных, полученных

при пайке стыковых соединений низкоуглеродистой стали 08кп. Как указывалось выше, для получения качественных стыковых соединений необходимо было обеспечить тепловложение в пределах $416,7...583,3 \text{ Дж/см}$. Для нахлесточных соединений этот уровень тепловложения оказался недостаточным. При повышении тепловложения за счет увеличения времени импульса примерно на 70 % формируется хорошая прямая (рис. 7, а) и обратная галтель (рис. 7, б).

Следует отметить, что нахлесточные соединения наиболее характерны для пайки, и есть основания полагать, что они и будут составлять основной вид соединений в промышленности.

Прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет (при снятом усилении) $330...390 \text{ МПа}$; в состоянии после пайки разрыв происходит по основному металлу. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов.

Как отмечалось выше, приведенные результаты экспериментов дуговой пайки низкоуглеродистой стали получены при использовании современного оборудования с широкими возможностями управления дуговым процессом. Поэтому переход к применению микроплазменного нагрева с использованием установки МПУ-4 оказался не эффективным, достичь тех же результатов при том же тепловложении не удалось. При увеличении погонной энергии до 1275 Дж/см удалось получить хорошее формирование шва со стороны дуги при зазоре 0,2; 0,4; 0,6 мм, однако обратная галтель образуется только при зазоре 0,6 мм, причем местами зазор едва заполнен (рис. 8).

Проанализировав полученные данные, следует отметить, что при пайке стыковых соединений на малых токах повышение тепловложения в исследуемых пределах не дало ожидаемого эффекта: постепенно увеличивалось количество металла в

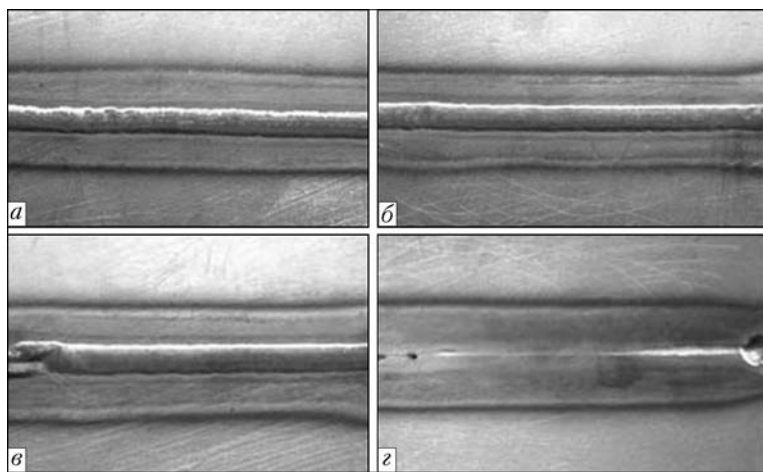


Рис. 8. Внешний вид швов, паянных на режиме $I = 28 \text{ А}$, $U = 15,2 \text{ В}$, $v_{\text{п}} = 7,2 \text{ м/ч}$, $v_{\text{пр}} = 4 \text{ мм/с}$ при зазоре 0,2 (а), 0,4 (б), 0,6 (в), 0,6 мм (г) (обратная галтель)

шве со стороны дуги, а обратный шов формировался только при достаточно большом зазоре (0,6...0,8 мм), т. е. нижняя кромка стыка не прогревалась, и припой не мог заполнять зазор. При пайке нахлесточных соединений создаются более благоприятные условия для формирования соединений, причем диапазон благоприятных режимов расширяется. Так, была сделана приставка к указанной выше установке «Master TIG MLS 2300», которая позволила осуществлять управление этим процессом в широком диапазоне мощности. В результате оказалось возможным получение результатов, близких к таковым при использовании дугового нагрева.



Выводы

1. Исследованный в работе припой БрКМц 3-1 хорошо растекается по стали 08кп и образует качественные стыковые и нахлесточные соединения без заметного растворения в жидком припое основного металла.

2. Наиболее благоприятной защитной средой для дуговой пайки с использованием исследуемого припоя является смесь аргона с 10 мас. % водорода.

3. Использование сплавов со значительно меньшей, чем сталь, температурой плавления позволяет радикально изменить уровень тепловложения при получении неразъемных соединений. Так, при пайке пластин толщиной 1 мм тепловложение составляет примерно 416...625 Дж/см. Для сварки таких же образцов необходима погонная энергия 1166...1250 Дж/см.

4. Прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет (при снятом усилении) 330...390 МПа; в состоянии после пайки разрыв происходит по основному металлу. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов.

1. WIG-Loeten verzinkter Bleche // Bleche Rohre Profile. — 1999. — **46**, № 7/8. — С. 16.
2. Verfahren zum MSG-Loeten und Verwendung eines Schutzgases. Заявка 19952043. Германия. МПК⁷ B23K 3/04, B23K 1/08. / F. Tischter. — Заявл. 28.01.1999. Опубл. 03.05.2001.
3. Knopp N., Killing R. Hartloeten verzinkter Feinbleche mit dem Lichtbogen sicher und wirtschaftlich [Teil 2] // Der Praktiker. — 2004. — № 1. — С. 8–12.
4. Hackl H. MIG-Loeten von verzinkten Duennblechen // Technica (Suisse). — 1998. — **47**, № 25/26. — С. 54–58.
5. Hackl H. MIG-brazing of galvanised thin sheets and profiles // Welding and Cutting. — 1998. — **50**, № 6. — P. 102–104.
6. Hackl H. Loeten statt Schweißen steigert Qualitaet von PKWS Stahlmarkt: Informationen ans Stahjndustries // Stahlhandel und Verarbeitung. — 2001. — **51**, № 1. — С. 68–69.
7. Hackl H. Loeten statt Schweißen // Bleche Rohre Profile. — 2000. — **47**, № 12. — С. 110.
8. Verzinkte Bleche MIG-Loeten // Ibid. — 2003. — **50**, № 1. — С. 24–25.
9. Hackl H. Beim MIG-Loeten eruebricht sich das Nachverzinken // Ind.-Anz. — 2002. — **124**, № 23/24. — С. 38–39.
10. Grzybicki M., Jakubowski J. Comparative tests of welding of sheets made of car body steel using the CMT and MIG/MAG methods // Przegląd Spawalnictwa. — 2009. — № 10. — С. 32–36.
11. Rozanski M. Modern weldbrazing methods // Ibid. — 2010. — № 9. — С. 24–28.

Поступила в редакцию 05.02.2013

ОАО «ТУРБОАТОМ» ЗАКЛЮЧИЛО КРУПНЕЙШИЙ КОНТРАКТ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 25 ЛЕТ

ОАО «Турбоатом» (г. Харьков) заключило контракт на изготовление и поставку паровой турбины мощностью 1100 МВт с конденсатором для блока № 4 Ростовской АЭС (Россия).

Турбина-«миллионник» имеет высокие конкурентоспособные показатели на уровне мировых требований.

В соответствии с контрактными обязательствами ОАО «Турбоатом» осуществит проектирование, изготовление и поставку цилиндра высокого давления, трех цилиндров низкого давления, системы регулирования и парораспределения, системы маслоснабжения, конденсатор и другое вспомогательное оборудование. При производстве оборудования будут применены новые технологии сварки роторов, литья деталей, а также будет продолжена модернизация станочного парка завода.

Сроки поставки конденсатора — июль 2014 г., турбины — март 2015 г.

Изготовление будет проводиться по согласованному графику на протяжении 2012–2014 гг., а отгрузка отдельными узлами — в 2014–2015 гг.

Общий вес оборудования составляет около 5 тыс. т.

Срок ввода энергоблока № 4 Ростовской АЭС в эксплуатацию запланирован на июнь 2017 г.

Стоимость контракта составляет более 100 млн. дол.

На Ростовской АЭС работают 2 энергоблока с турбинами мощностью 1000 МВт, изготовленными ОАО «Турбоатом»: блок № 1 пущен в 2001 г., блок № 2 — в 2010 г.

С пуском блока № 3 Ростовской АЭС в 2014–2015 гг. это будет уже 19-я турбина-«миллионник», изготовленная ОАО «Турбоатом» и введенная в эксплуатацию. Всего на данный момент успешно работают 18 аналогичных турбин на АЭС Украины, России и Болгарии (Южно-Украинская, Запорожская, Калининская, Балаковская, Ростовская АЭС и АЭС Козлодуй). Эти агрегаты хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации, первые турбины уже отработали около 200 тыс. ч. Отличительная особенность турбин мощностью 1000...1100 МВт — тихоходное исполнение (1500 об/мин), что дает целый ряд преимуществ по экономичности, надежности, безопасности, удобству в эксплуатации и ремонтупригодности.



ВЛИЯНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. В. СОМОНОВ¹, Ш. БЕМ², М. ГАЙЕР², Ш. БЕРТЕЛЬСБЕК²

¹ Институт лазерных и сварочных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета.
195251 Россия, Санкт-Петербург. E-mail: vlad@ltc.ru

² University of Kassel. 34125 Germany, Kassel. E-mail: s.bertelsbeck@uni-kassel.de

Настоящая работа посвящена исследованию влияния индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов. Используются образцы из алюминиевых сплавов систем Al–Mg–Si и Al–Si толщиной 2 мм. Представлены результаты численного моделирования температурных полей и полей напряжений, образующихся в процессе индукционного нагрева, а также результаты экспериментальной проверки моделирования индукционного нагрева. Библиогр. 25, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: лазерная сварка, индукционный нагрев, алюминиевые сплавы, моделирование, SYSWeld, термические напряжения, горячие трещины

Алюминиевые сплавы широко используют в различных отраслях машиностроения благодаря возможности снижения удельного веса конструкции, приемлемым прочностным характеристикам в сочетании с низким удельным весом [1]. Кроме того, им также присуща высокая коррозионная стойкость [2]. Применение сварных конструкций из алюминия существенно ограничено из-за их склонности к образованию трещин при сварке [3, 4].

В последнее время для сварки алюминиевых конструкций все чаще используют современные лазеры, например, волоконные или дисковые, что позволяет получать относительно большое проплавление при небольшой погонной энергии [5]. Это в свою очередь уменьшает коробление и сводит к минимуму последующую обработку, сокращая этапы производства. При лазерной сварке алюминиевых сплавов также существуют проблемы, связанные с их склонностью к трещинообразованию в результате быстрого охлаждения расплава во время сварочного процесса.

Целью проводимых исследований является изучение влияния индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов за счет уменьшения скорости охлаждения сварного шва и околосварочной зоны.

Горячие трещины при лазерной сварке алюминиевых сплавов. В алюминиевых конструкциях трещины преимущественно формируются во время затвердевания шва, возникая при усадке и кристаллизации эвтектических фаз в середине сварного шва [6]. В. Пеллини, а затем и Т. Кляйн

с Г. Дэвисом утверждают, что склонность к образованию горячих трещин в сплавах систем легирования Al–Mg–Si и Al–Si связана с «критическим интервалом», т. е. расстоянием между дендритами, растущими в противоположных друг другу направлениях при кристаллизации шва [7].

У. Фойрер предположил, что трещины появляются в «мягкой» (квазиравновесной двухфазной) зоне, если скорость охлаждения междендритной жидкости меньше или равна скорости усадки [8]. Т. С. Пивонка и М. К. Флеминг при рассмотрении трещинообразования основываются на уравнении Р. Пойссеуля, которое описывает градиент давления, вызывающий течение жидкости по «междендритному пути» [9]. Все эти объяснения связаны с особенностями кристаллизации сплавов, и склонность к горячим трещинам может быть определена путем получения кривых охлаждения при тепловой калориметрии. Для некоторых бинарных сплавов проверяются типичные С-образные кривые, когда склонность к трещинообразованию является функцией от содержания растворенных элементов [10]. Первое количественное описание образования трещин было предложено Н. Н. Прохоровым в середине XX века [10–12], который считал механическую деформацию растяжения причиной образования трещин. Он не учитывал металлургические условия в «мягкой зоне», т. е. образование микроструктур при кристаллизации в двухфазной области и не давал точного количественного критерия для прогнозирования склонности к трещинообразованию. Большинство работ по моделированию затверде-



вания трещин в сварных швах основаны на подходе Н. Н. Прохорова, т. е. без учета накопления деформаций и дефектов микроструктуры. Однако эти критерии рассматривают лишь некоторые механические условия, например, критическое значение напряжения или скорости деформации. Критерий М. Раппаца и других авторов учитывает охлаждение междендритной жидкости и деформации растяжения твердого тела перпендикулярно к направлению роста дендритов. По их мнению, горячие трещины зарождаются при достижении кавитацией давления критического значения, которое может быть рассчитано по физико-химическим свойствам сплава и микроструктурным размерам материала [13]. Склонность к образованию горячих трещин во время сварки традиционно оценивается для случая, когда напряжение или деформация изменяются во время процесса. Так, Н. Кониглиу в своих исследованиях основывается на концепции улучшения свариваемости за счет увеличения содержания в алюминиевых сплавах кремния, восприимчивость к образованию трещин у него определяется критической скоростью деформации, возникающей во время сварки [14].

Моделирование технологического процесса индукционного нагрева пластин из алюминиевых сплавов. В последнее время наблюдаются два подхода к моделированию появления трещин, основанные на учете локализации образования трещин. В первом подходе, предложенном М. Шихахаром [15, 16], за основу был взят физический механизм образования трещин из механики разрушения твердых тел. В качестве критерия образования трещин выбран уровень напряжения в системе жидкость–твердое тело.

Для моделирования трещин он использовал специальную вычислительную технику и метод конечных элементов. Предположения о существовании металлургических условий в двухфазной области не учитываются. Значения напряжения в системе сравнивают с критическим значением, полученным ранее путем корреляции с поверхностной энергией расплава. Поверхностная энергия считается известной и имеет определенное значение для конкретной температуры, при этом рассматривается аспект локального образования трещин. Этот подход имеет несколько недостатков:

- экспериментально определить поверхностную энергию при высоких температурах очень сложно;
- поверхностная энергия расплава существенно зависит от изменений в химическом составе;
- очень небольшое количество поверхностно-активного элемента в расплаве может привести к изменению поверхностной энергии более чем в десять раз;

- расчетное напряжение в двухфазной области чувствительно к механическим свойствам при высоких температурах. Систематические ошибки были обнаружены в измерениях на основе таких свойств, как предел текучести, что может привести к существенным ошибкам в расчетах.

Второй подход к моделированию разработан Р. М. Хильбенгером [17–19] в нем за основу взята теория Пеллини. Моделирование горячих трещин, как и в предыдущем подходе, реализуется с помощью метода конечных элементов. Локализация растягивающих напряжений в пленке жидкости в остальном расплаве учитывается путем введения «жидкого» элемента в середину сварного шва, имеющего очень низкую текучесть в температурном диапазоне ликвидус–солидус. За критерий трещинообразования им взята максимально допустимая деформация «жидкого» элемента в двухфазной области. Параметры критической деформации устанавливаются экспериментально. Подход Хильбенгера подобно методу Шихахара позволяет получить визуальное представление о зарождении и распространении трещин.

Если попытаться обобщить теоретические представления, то горячие трещины образуются при критическом сочетании значений следующих факторов:

- температурного интервала хрупкости в период кристаллизации металла шва;
- минимальной пластичности в температурном интервале хрупкости $\delta_{\min}$;
- темпа высокотемпературной сварочной деформации α [20].

В литературе предлагается несколько способов предотвращения образования горячих трещин при лазерной сварке, такие, например, как введение присадочного материала, предварительный подогрев образцов в печи, использование защитного флюса во время сварки для предотвращения активного взаимодействия сварочной ванны с внешней средой, использование параллельного подогрева лазером меньшей мощности для компенсации растягивающих напряжений, возникающих в сварном шве. Сообщается также о том, на процесс лазерной сварки можно влиять с помощью магнитного поля. Например, может быть увеличена глубина проплавления, изменено сечение, могут быть подавлены периодические дефекты шва под названием «хампинг» [21].

Лазерная сварка с применением индукционного нагрева значительно снижает градиенты температуры на границе шва и свариваемого металла, что благоприятно сказывается на технологической прочности сварного соединения [22].

Использование компьютерного моделирования процесса зачастую позволяет резко снизить затраты на разработку бездефектной технологии

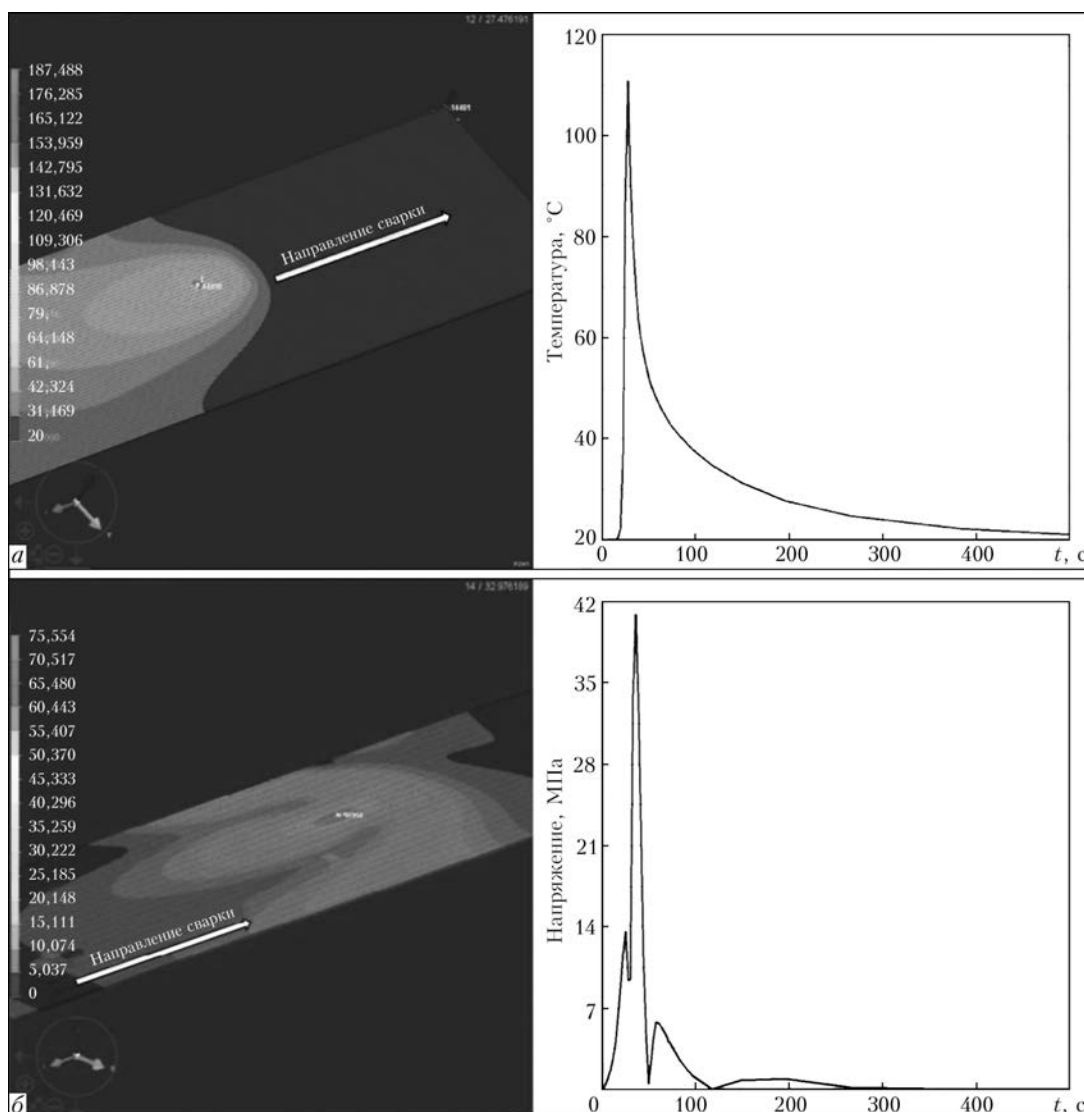


Рис. 1. Результаты расчета полей температуры (а) и напряжения (б)

за счет уменьшения объема экспериментальных исследований. Сегодня в обрабатывающей промышленности существует необходимость в создании алгоритмов для получения оптимальных параметров режима лазерной сварки на основе компьютерных моделей процессов, которые позволяют получать сварные швы без дефектов [23]. В ходе исследований смоделирован технологический процесс в компьютерном программном пакете SYSWeld 2012. В настоящее время существует множество пакетов программного обеспечения и инструментов моделирования, подразделяющихся на специализированные и универсальные программы. Специализированные пакеты используют при моделировании ограниченного количества систем и процессов. В большинстве случаев универсальные программы являются коммерческими разработками. С их помощью можно выполнять широкий спектр приложений, моделировать большое количество физических процессов и систем со сложной геометрией. Одним из них является универсальный программный пакет SYSWeld.

Он реализует конечно-элементную схему расчета, применяется при статическом и динамическом анализе конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности, анализе усталостных характеристик и позволяет моделировать электромагнитные поля, гидрогазодинамические, акустические и другие процессы.

Основной задачей проводимых исследований являлось улучшение технологии лазерной сварки алюминиевых сплавов путем предотвращения или уменьшения образования горячих трещин в сварных швах. Это достигается путем термонаведения сжимающих напряжений в зону сварки, которые генерируются при индукционном нагреве поверхности пластины одновременно с лазерной сваркой.

В ходе моделирования нагрева образцов отслеживали уровень возникающих внутренних термических напряжений [24].

С помощью численной модели, созданной в SYSWeld, исследованы поля температур и термических напряжений, возникающие в результате индукционного нагрева образцов. При построении

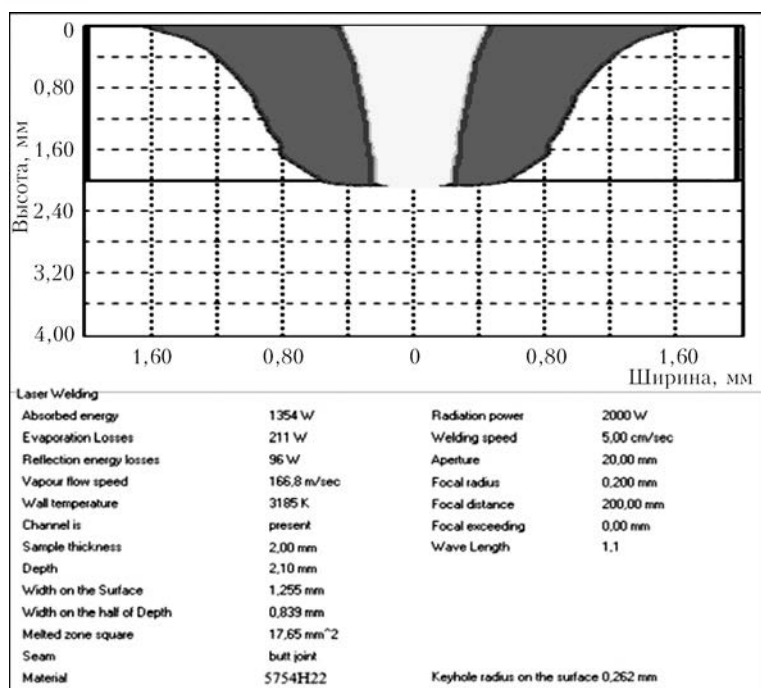


Рис. 2. Результаты моделирования лазерной сварки алюминиевого сплава 5754 H22 в LaserCAD

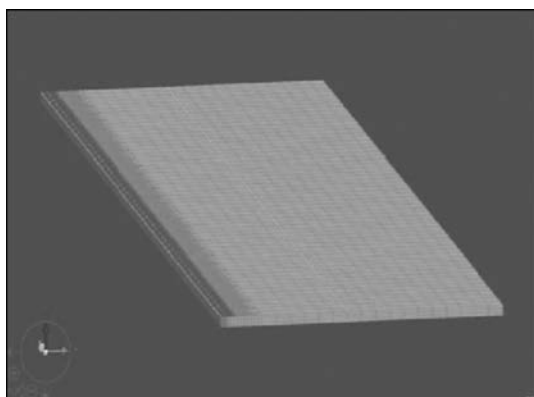


Рис. 3. Трехмерная геометрическая модель лазерной стыковой сварки сплава 6082 T4 толщиной 2 мм с индукционным нагревом околошовной зоны, построенная в SYSWeld 2012

модели учитывали, что при индукционном нагреве металлических заготовок в переменном электромагнитном поле КПД установки, как правило, не превышает 60 % [25]. Во время исследований моделировали процесс одностороннего индукционного нагрева пластины из алюминиевого сплава при ее перемещении. Подготовка файла для расчета включала создание трехмерной геометрической модели образца с определенными характеристиками источника индукционного нагрева и задание условий охлаждения, фиксации об-

разцов и параметров процесса нагрева. На выходе получали два файла с результатами изменения во времени полей температуры и напряжений (рис. 1).

В качестве нижней границы значений термических напряжений был взят предел упругости. При достижении определенного предела в металле начинают возникать пластические деформации. Для алюминиевых сплавов этот предел составляет более 30 МПа. Конечной задачей являлось получение параметров индукционного нагрева, при которых в околошовной зоне возникали бы термические напряжения, компенсирующие растягивающие напряжения в сварном шве. Затем результаты моделирования проверяли экспериментально.

Для определения оптимальных параметров режима сквозного проплавления пластин был смоделирован процесс лазерной стыковой сварки. Моделирование проводили с использованием программного пакета LaserCAD, разработанного Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом (рис. 2). При расчете использовали следующие параметры: мощность лазерного излучения 2 кВт, диаметр луча 0,4 мм, фокусное расстояние 200 мм, длина волны излучения примерно 1 мкм, скорость сварки 50 мм/с. В результате глубина проплавления составила 2,1, ширина шва — 3 мм. По сути наблюдался эффект кинжального проплавления, характерный для лазерной сварки. Затем выполняли моделирование процесса лазерной стыковой сварки совместно с индукционным нагревом двумя равноудаленными от места стыка индукторами. С целью экономии компьютерной мощности и времени на расчет процесс моделировали только для половины сварочного стыка. Изображение трехмерной геометрической модели представлено на рис. 3.

Материалы и методика экспериментов. При проведении экспериментов использовали плоские образцы размером 600×150×2 мм двух марок алюминиевых сплавов 6082 T4 (сплав системы Al–Si–Mg–Mn, российский аналог АД35) и 5754 H22 (сплав системы Al–Mg, российский аналог АМг3) соответственно. Химический состав и механические свойства материалов приведены в табл. 1 и

Таблица 1. Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784–97, мас. %

Марка сплава	Марка российского аналога	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5754	АМг3	Основа	0,5...0,8	0,5	0,1	0,3...0,6	3,2...3,8	0,05	0,2	0,1
6082	АД35	»	0,7...1,3	0,5	0,1	0,4...1,0	0,6...1,2	0,25	0,2	0,1



Таблица 2. Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Тип обработки	$\sigma_{0,2\%}$, МПа	Предел прочности на разрыв, МПа	Предел прочности при сдвиге, МПа	Удлинение, %	Твердость по Виккерсу HV
6082	T4	170	260	170	19	75
	T6	310	340	210	11	100
	0	60	130	85	27	35
5754	0	100	215	140	25	55
	H22	185	245	150	15	75
	H24	215	270	160	14	80

2. Перед экспериментом поверхности пластин очищали от жира и грязи ацетоном.

Для исследований использовали специально разработанный экспериментальный стенд (рис. 4), оснащенный коаксиальным индуктором KI-112-U-30° фирмы IFF GmbH, Германия (рис. 5). Составные части стенда вместе с их характеристиками представлены ниже:

линейный привод фирмы «Festo»
EGC-80-800-TB-KF-0H-GK с каркасом стенда,
собранным из алюминиевых профилей
максимальная скорость перемещения, мм/с 2000
Оборудование для индукционного нагрева
фирмы IFF GmbH:
генератор импульсов EW100W:
максимальная мощность, кВт 10
мощность импульса, % 0...750
частота импульсов, кГц 8...20
чиллер: температура эксплуатации, °C 18...30
коаксиальный индуктор KI-112-U-30°
максимальное время процесса при использовании
максимальной мощности импульса, с 0...100
допустимый зазор для использования, мм 0,2...0,5
температура нагрева, °C 0...300

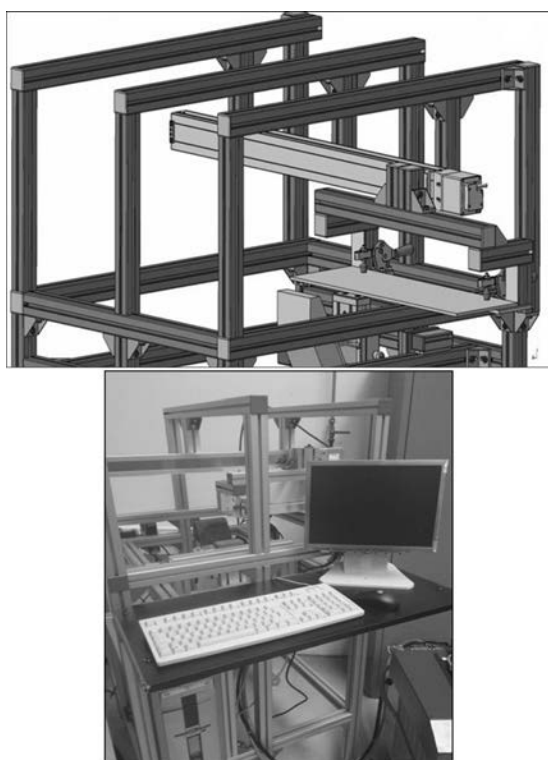


Рис. 4. Экспериментальный стенд

В ходе экспериментов производили индукционный нагрев пластин, при этом пластины перемещали со скоростью, равной скорости сварки, полученной в результате моделирования. Осуществляли онлайн измерение температуры в трех разных зонах и линейного изменения размеров во время индукционного нагрева. Повышение температуры фиксировали с помощью двухканального измерителя температуры GMH 3250 фирмы «Greisinger electronic GmbH» (Германия) и потенциометра IAS838 фирмы «Mastech» с функцией измерения температуры (рис. 6).

Перемещение (изменение) температурного поля регистрировали с помощью инфракрасной камеры и измерителя температуры Raynger MX4 фирмы «Raytek GmbH», Германия (рис. 7).

Некоторые результаты измерения температуры представлены в табл. 3. Как видно из таблицы, процесс индукционного нагрева описывается параметрами на двух стадиях:

- 1) параметрами процесса разогрева индуктора: шаг 1;
- 2) параметрами процесса индукционного нагрева пластины в движении: шаг 2.

Выбранные параметры процесса на шаге 1:
частота импульсов в индукторе $f_1 = 12,5$ кГц,



Рис. 5. Коаксиальный индуктор KI-112-U-30° с генератором импульсов EW100W и чиллером



Таблица 3. Результаты измерения температуры

№ п/п	Перемещение, мм	$T_{уст}$, °C	Время регулирования t , с	Шаг 1			Шаг 2			
				f_1 , кГц	PWM_1 , %	Время ₁ , с	f_2 , кГц	PWM_2 , %	Время ₂ , с	v , мм/с
1	500	300	1	12,5	750	10	13	600	10	50
2	500	300	1	13,5	750	10	15	700	10	50
4	500	300	1	12,5	750	10	13	600	10	50
5	500	300	1	12,5	750	10	15	600	10	50
11	483	300	1	12,5	750	5	15	700	10,5	50
12	483	300	1	12,5	750	5	13	700	10,5	50
13	483	300	1	12,5	750	5	13	700	10,5	50

Окончание табл. 3

№ п/п	Направление перемещения при нагреве, расстояние между центром индуктора и краем пластины	Зазор между индуктором и пластиной перед нагревом			T перед нагревом, °C			T во время нагрева, °C		
		зазор p_1 , мм	зазор p_2 , мм	зазор p_3 , мм	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
1	Справа налево, 60 мм	1,0	0,9	0,25	21,4	21,5	22	237,4	86,7	40
2		1,5	1,0	0,7	35,2	28	25	246,2	93,9	53
4		0,5	0,5	0,5	23,1	24,4	26	297,8	86,6	52
5		1,0	0,3	0,25	21,4	21,4	21	266,8	96,4	42
11	Справа налево, 40 мм	0,25	0,25	0,25	24	23,3	22,9	146	122,7	83
12		0,25	0,25	0,25	26	24,9	23,7	143	141,3	97,4
13		0,25	0,25	0,25	28	27,1	25,4	144	142,7	97,8

мощность импульсов в процентах от максимально вырабатываемой генератором $PWM_1 = 750\%$,

время нагрева $Время_1 = 5$ с,

установленная максимальная температура нагрева индуктора $T_{уст} = 300$ °C.

Выбранные параметры процесса на шаге 2:

частота импульсов в индукторе $f_2 = 13$ кГц,

мощность импульсов в процентах от максимально вырабатываемой генератором $PWM_2 = 700\%$,

время нагрева $Время_2 = 10,5$ с,

длина перемещения 483 мм,

скорость перемещения 50 мм/с,

зазор между индуктором и пластиной перед нагревом 0,25 мм.

Зарегистрированные значения температуры колебались в пределах 100...140 °C. При этом термические напряжения в околошовной зоне изменялись в пределах от 38 до 50 МПа, что совпадает с результатами моделирования. Скорость нагрева до высокой температуры зависела от количества повторных нагревов. Это объясняется изменением внутренней структуры материала и его восприимчивостью к индукционному нагреву после нагрева до температуры более 140 °C. Существует также зависимость и от положения индуктора по отношению к краю пластины. Чем ближе к краю, тем меньше мощность необходима

для нагрева и генерации необходимого уровня напряжений. Однако близко к краю располагать индуктор нельзя из-за быстрой деформации пластины в этом случае. Невозможно было поддерживать параметры нагрева пластины в процессе ее движения на постоянном уровне.

Примеры температурных полей, полученных в ходе экспериментов, представлены на рис. 8.

В будущем планируется проведение экспериментальной проверки результатов моделирования для лазерной сварки, используя излучение, генерируемое иттербиевым волоконным лазером YLS 10000 с максимальной выходной мощностью 10кВт, производства фирмы «IPG» (рис. 9).

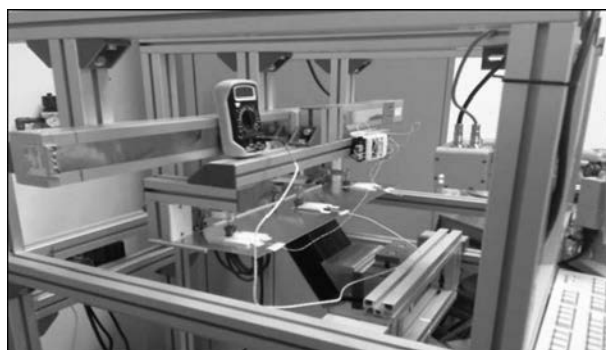


Рис. 6. Изображение двухканального измерителя температуры GMH 3250, потенциометра IAS838 и метода измерения температуры во время индукционного нагрева пластин

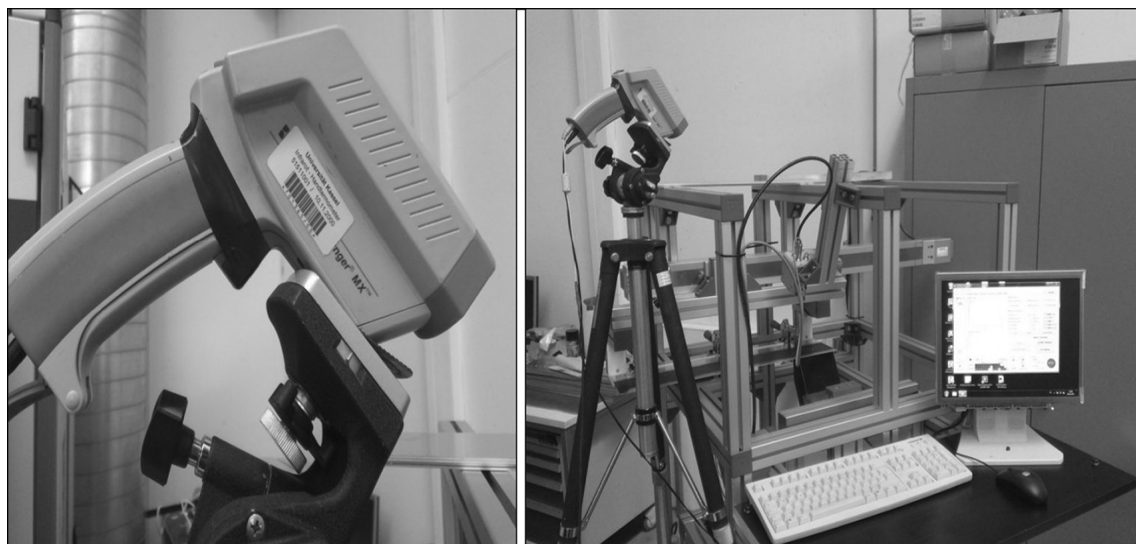


Рис. 7. Изображение инфракрасного термометра Raynger MX4 и момент измерения температурного поля



Рис. 8. Изображения температурных полей, полученные в ходе экспериментов



Рис. 9. Волоконный иттербиевый лазер YLS 10000

Перемещение луча будет осуществляться роботом фирмы «Reis Robotics», Германия (рис. 10).

Заключение. На данном этапе исследований установлено, что в результате индукционного нагрева пластин из алюминиевых сплавов 6082 Т4

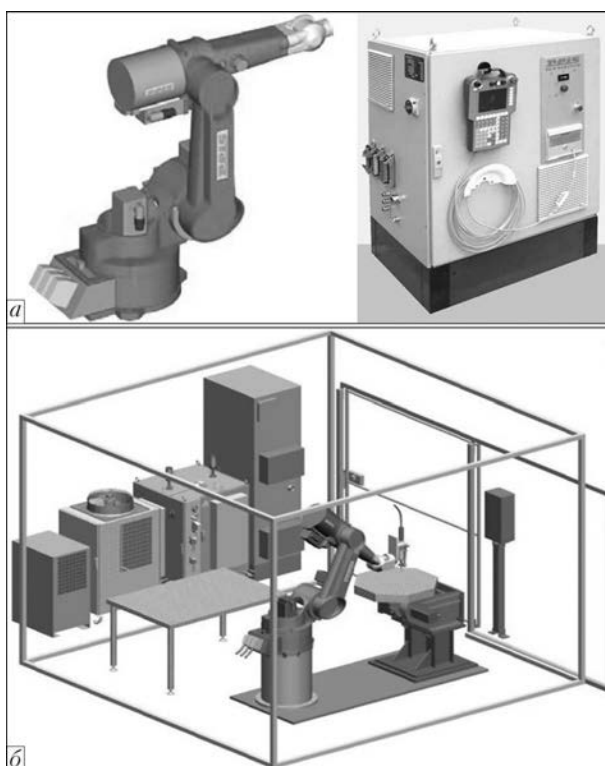


Рис. 10. Изображение робота REIS RV60-60 фирмы «Reis Robotics», Германия (а) и общее расположение оборудования для лазерной сварки (б)

и 5754 Н22 толщиной 2мм в них возникают температурные поля, генерирующие поля растягивающих термических напряжений. Можно достичь уровня генерируемых термических напряжений, способного компенсировать нежелательные внутренние напряжения в сварном шве, приводящие к образованию горячих трещин при лазерной сварке. Подобраны режимы индукционного нагрева, дающие необходимый дополнительный подогрев.

Установлено, что уровень термических полей сильно зависит от первоначальной мощности ис-



точника нагрева и постоянства зазора между поверхностью индуктора и алюминиевой пластины. На скорость нагрева пластины влияет и первоначальная структура сплава. В ходе и проведенных опытов по многократному индукционному нагреву пластины с последующим охлаждением на воздухе после каждого нагрева зафиксировано, что средняя регистрируемая температура увеличивается на несколько градусов. В дальнейшем запланировано проведение проверочных экспериментов по лазерной сварке совместно с индукционным нагревом для подтверждения результатов моделирования.

Авторы благодарят Министерство образования и науки Российской Федерации за поддержку при проведении исследования, которое финансировалось в рамках совместной программы «Михаил Ломоносов» Немецкого общества международных обменов DAAD и Министерства образования и науки России.

1. Lang A. Schweißen von Aluminiumwerkstoffen im Fahrzeugbau // Jahrbuch Schweißtechnik, 1997.
2. Ostermann F. Anwendungstechnologie Aluminium. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
3. Cam G., dos Santos J. F., Kocak M. Laser and electron beam welding of Al-alloys. Rev. — Geestacht: GKSS-Forschungszentrum, 1997.
4. Brune E. Schweißer Maschinenmarkt // Schweissen von Aluminiumwerkstoffen. — 2005. — 106, № 25/26.
5. Thomy C., Seefeld T., Vollertsen F. Schweißen mit Hochleistungsfaserlasern // Werkstatttechnik. — 2005. — № 10. — S. 815–820.
6. Ploshikhin V. et al. Integrated mechanical-metallurgical approach to modeling solidification cracking in welds // Hot cracking phenomena in welds. — Berlin: Springer, 2005.
7. Clyne T. W., Davies G. J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems // British Foundry. — 1981. — 74. — P. 65.
8. Feurer U. Influence of alloy composition and solidification conditions on dendrite arm spacing, feeding and hot tearing properties of aluminum alloys // Proc. Intern. symp. on engineering alloys (Delft, The Netherlands, 1977). 1977. — P. 131–145.
9. Piwonka T. S., Flemings M. C. Pore formation in solidification // Transact. of AIME. — 1966. — 236. — P. 1157.

10. Prokhorov N. N. Hot cracking during welding. — Moscow: Mashgiz, 1952.
11. On problem of «hot» (crystallization) cracks / A. A. Bocharov, N. N. Rykalin, N. N. Prokhorov et al. // Svaroch. Proizvodstvo. — P. 5–7.
12. Prokhorov N. N. The technological strength of metals at crystallization during welding // Ibid. — P. 1–8.
13. Rappaz M., Drezet J.-M., Gremaud M. A new hot-tearing criterion // Metallurg and materials transact. A. — 1999. — 30. — P. 449–455.
14. Coniglio N. Aluminum alloy weldability: Identification of weld solidification cracking mechanisms through novel experimental technique and model development: BAM-Diss. — Berlin, 2008. — 208 p.
15. Shibahara M., Serizawa H., Murakawa H. Finite element method for hot cracking analysis under welding using temperature dependent interface element // Modeling of Casting. — Aachen: Shaker, 2000. — P. 844–851.
16. Shibahara M., Serizawa H., Murakawa H. Finite element method for hot cracking analysis using temperature dependent interface element // Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. — London: IOM com., 2001. — P. 253–267.
17. Bergmann H. W., Hilbinger R. M. Numerical simulation of centreline hot cracks in laser beam welding of aluminum close to the sheet edge // Mathematical Modeling of Weld Phenomena 4. — London: IOM com., 1998. — P. 658–668.
18. Considering of dynamic mechanical boundary conditions in the characterization of a hot cracking test by means of numerical simulation / R. M. Hilbinger, H. W. Bergmann, W. Kohler, F. Palm // Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. — London, 2001. — P. 847–862.
19. Hilbinger R. M. Heißrissbildung beim Schweißen von Aluminium in Blechrandlage. — Bayreuth: Universität Bayreuth, 2000.
20. Vasiliev V. I., Illiashchenko D. P., Pavlov N. V. Introduction to fundamentals of welding. — Tomsk: TPU, 2010. — 338 p.
21. Lindenau D. Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen: Diss. — Stuttgart, 2007. — 188 S.
22. Gotbel G. Erweiterung der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen heißrissgefährdeter Werkstoffe: Diss.—Dresden, 2007. — 176 S.
23. Rapoport E. Ya. Optimization of processes of induction heating of metal. — Moscow: Metallurgiya, 1993. — 279 p.
24. Grigoriant A. G., Shiganov I. N., Chirkov A. M. Hybrid laser welding technology: Handbook. — Moscow: N. E. Bauman MGTU, 2004. — 52 p.
25. Korshikov S. E., Zaikin N. V., Rybalko G. S. Simulation of temperature fields and thermal stresses during heating of aluminum billets rotated in the direct current magnetic field // Bulletin of Samara State Technical University Engineering. — 2010. — № 2.

Поступила в редакцию 13.03.2013

«Зоря-Машпроект» получил оборудование от Института электросварки им. Е. О. Патона



Институт электросварки им. Е. О. Патона поставил оборудование для сварки компании «Зоря-Машпроект». Новая установка для электронно-лучевой сварки (УЭЛС-2), осуществляющая сварку турбинных и компрессорных дисков в роторы или так называемые барабаны, была введена в эксплуатацию.

Приобретение установки направлено на расширение пропускной способности мощностей предприятия в связи с наращиванием объемов производства.



МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ

В. М. ИЛЮШЕНКО¹, Ю. Г. НОВОСЕЛЬЦЕВ², С. Л. БУСЫГИН²

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² Сибирский федеральный университет. РФ, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: rector@kgtu.runnet.ru

Дуговая сварка изделий из хромовой бронзы сопряжена со склонностью металла швов к образованию горячих трещин. Приведены результаты исследований по изысканию мер предупреждения образования горячих микротрещин в металле швов хромовой бронзы БрХ08 больших толщин, выполненных плазменно-дуговой сваркой. Показано, что основной причиной образования дефектов в металле шва является подсос в плазменную дугу кислорода воздуха, что приводит к интенсивному окислению хрома в сварочной ванне и попаданию металла шва в зону максимальной хрупкости сплавов Cu–Cr. Учитывая, что одной шлаковой защиты большого объема ванны жидкого металла, образующейся при плазменно-дуговой сварке по слою флюса на мощных режимах ($I_{св} = 1000 \dots 1400$ А, $U_d = 48 \dots 55$ В), недостаточно для получения качественного шва, сделан вывод о целесообразности долегирования металла шва хромом и малыми добавками эффективного раскислителя — титана. Для этих целей разработана специальная присадочная проволока марки ППБрХТ 12-2, применение которой в сочетании с подобранным флюсом позволило успешно решить задачу промышленного изготовления сварных крупногабаритных изложниц кристаллизаторов электрометаллургических печей. Библиогр. 9, рис. 5.

Ключевые слова: хромовая бронза, плазменно-дуговая сварка, кристаллизация, структура, трещины

При изготовлении крупногабаритных сварных конструкций из хромовой бронзы БрХ08, таких как изложницы кристаллизаторов электрометаллургических печей, для получения качественных сварных швов необходимо обеспечить начальные тепловые условия разогрева металла для образования сварочной ванны. Ограниченные мощности обычной дуговой сварки не позволяют компенсировать отвод тепла в свариваемый металл и, как правило, требуют применения предварительного и сопутствующего подогрева. Данный недостаток исключен при разработке [1–3] процесса плазменно-дуговой сварки меди и хромовой бронзы, позволяющего обеспечить значительное удельное тепловложение в свариваемые кромок и регулировать энергетические и газодинамические параметры плазменной струи в широком диапазоне.

Для стабилизации плазменной струи плазмообразующий газ в плазматрон вводят тангенциально, что вызывает вихревое состояние газового потока, и подсос определенного количества воздуха в зону дуги. Это, в свою очередь, приводит к окислению жидкого металла, вследствие чего хром, находящийся в основном металле (ОМ) (0,8...1,2 %), выгорает в сварочной ванне до 0,1...0,2 % и металл шва попадает в зону максимальной хрупкости (рис. 1). В сформировавшемся металле шва образуются горячие микротрещины (рис. 2), которые не обнаруживаются рентгенографическими, капиллярными и цветными методами контроля, но развиваются и проявляются при дальнейших технологических операци-

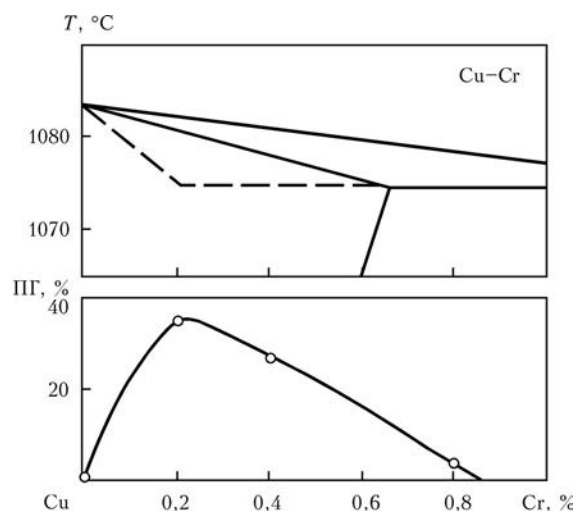


Рис. 1. Влияние хрома на порог горячеломкости (ПГ) сплавов системы Cu–Cr [4]

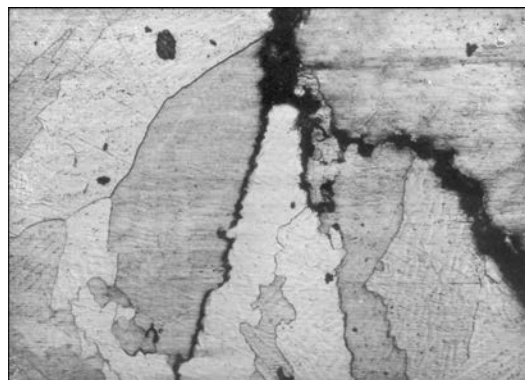


Рис. 2. Микротрещины в металле сварного шва бронзы БрХ08, $\times 300$



ях, сопровождаемых деформациями и нагревом изделия.

Оценка склонности к образованию трещин сплавов Cu–Cr с различным содержанием хрома, проведенная по методике, описанной в работе [5], на образцах типа «рыбий скелет», показала, что минимальной склонностью к образованию трещин обладает металл с содержанием хрома в пределах 0,5...1,0 % (рис. 3).

Известно, что запас технологической прочности при сварке (стойкость против образования горячих трещин) зависит от соотношения трех характеристик: температурного интервала хрупкости (ТИХ), деформационной способности в этом интервале и интенсивности нарастания упругопластической деформации по мере снижения температуры (темпа деформации).

Величина ТИХ определяется химическим составом сплава, дендритной ликвацией, размером и формой кристаллитов, скоростями охлаждения и деформации. Ориентировочно ее можно оценить по диаграмме состояния с учетом неравномерности кристаллизации и влияния примесей. Пластичность сплава в ТИХ зависит от соотношения объемов твердой и жидкой фаз, размеров и формы кристаллитов, характера распределения жидкой фазы, химической и соответствующей структурной микронеоднородности, скорости деформации. Темп деформации определяется термическим коэффициентом линейного расширения, жесткостью сварного соединения, характером распределения температуры (определяющим степень концентрации деформаций), а также формоизменением свариваемых изделий.

Анализ трещин, образующихся при плазменно-дуговой сварке меди и хромовой бронзы, показал, что они являются межкристаллитными с окисленной поверхностью и имеют кристаллизационный характер. Исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона, показали, что кристаллизационные трещины вызваны наличием вредных примесей (висмут, теллур, сера, кислород и др.) [5, 6]. Вредное действие этих примесей обусловлено их общими физико-химическими свойствами: ограниченной растворимостью в меди, образованием легкоплавких эвтектик, поверхностной активностью по отношению к меди. Поэтому механизм влияния вредных примесей на склонность к образованию кристаллизационных трещин связан с эффектом адсорбционного понижения пластичности и прочности (механизм жидкометаллической хрупкости) [7].

При кристаллизации однофазного сплава на последних стадиях происходит резкое повышение концентрации вредных примесей и вследствие их поверхностной активности снижается работа зарождения трещин. При кристаллизации двухфазного сплава на последней стадии еще остается жидкость и обогащение вредными примесями не происходит. Поэтому для повышения стойкости к образованию кристаллизационных трещин медь необходимо легировать элементами, способствующими образованию двухфазного сплава, например, хромом в определенных концентрациях.

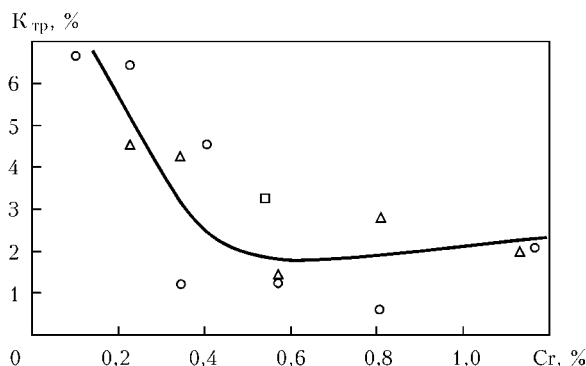


Рис. 3. Зависимость технологической прочности хромовой бронзы от содержания хрома

Хром ограниченно растворим в меди в твердом состоянии (при температуре эвтектики 1072 °С растворимость хрома достигает 0,65 %) и является одним из элементов, незначительно снижающих электро- и теплопроводность меди [8]. Поэтому при плазменно-дуговой сварке хромовой бронзы для предупреждения образования кристаллизационных трещин необходимо компенсировать угар хрома и долегировать металл шва таким образом, чтобы содержание хрома в нем было на уровне ОМ. Следует также отметить, что хром является эффективным модификатором (рис. 4), что уменьшает обогащение границ зерен вредными примесями.

Для компенсации угара хрома была создана специальная присадочная порошковая проволока ППБрХТ 12-2 [2], содержащая около 10...15 % Cr, чем обеспечивается необходимое долегирование металла шва хромом. Введение в проволоку 1,5...3 % Ti (эффективного раскислителя), способствует не только раскислению металла сварочной ванны, но и уменьшению угара хрома. Кроме того, как следует из результатов исследований [9], микролегирование швов хромовой бронзы БрХ08 титаном в количестве 0,04...0,07 % также повышает их стойкость к образованию трещин и увеличивает деформационную способность сварных соединений.

В условиях производства наиболее простым способом подачи присадочной проволоки в зону сварки является ее укладка вдоль стыка с последующей засыпкой слоя флюса.

Учитывая, что плазменно-дуговая сварка меди и хромовой бронзы больших толщин (до 40...50 мм)

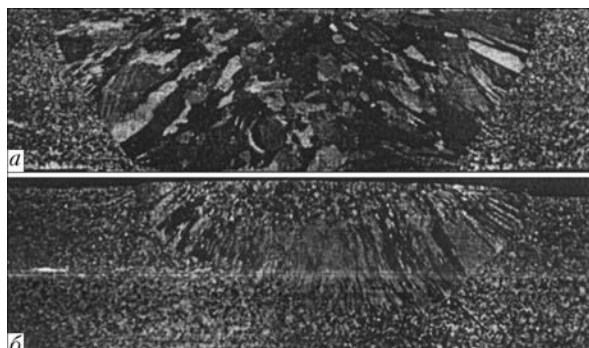


Рис. 4. Микроструктуры металла сварного шва бронзы БрХ08 с разным содержанием хрома: а — 0,2 %; б — 1,2 %



Рис. 5. Изложница кристаллизатора для вакуумной электро-дуговой выплавки титановых слитков (бронза БрХ08, толщина 40 мм)

выполняется на мощных режимах ($I_{св} = 1000...1400$ А, $U_d = 48...55$ В) и образующаяся ванна жидкого металла имеет значительные размеры (более 80×160 мм для металла толщиной 40 мм), защита такого объема жидкого металла от воздействия воздуха является непростой задачей. Решить ее дополнительной газовой защитой за счет конструкции плазмотрона, и без того достаточно сложной, не просто. Кроме того, увеличение расхода инертного газа с целью защиты расплавленного металла от воздуха вызывает выплескивание жидкого металла из ванны. В связи с этим плазменно-дуговая сварка проводится по слою флюса, высота которого 15...20 мм. Экспериментальным путем выбрана бинарная смесь флюсов марки АН-26 и АФ-4А в соотношении 10:1, где добавка хлоридного флюса, ошлаковывая тугоплавкую оксидную пленку Cr_2O_3 , улучшает отделимость шлаковой корки.

На основании выполненных исследований была разработана промышленная технология плазменно-дуговой сварки хромовой бронзы больших толщин, которая успешно освоена при изготовлении уникальных сварных кристаллизаторов электрометаллургических печей (рис. 5).

1. Усовершенствование технологии плазменно-дуговой сварки изделий из меди и хромовой бронзы / В. М. Илюшенко, В. Е. Седов, В. А. Аношин и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 11. — С. 31–32.
2. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1981. — 608 с.
3. Новосельцев Ю. Г. Технологические особенности плазменной сварки крупногабаритных конструкций из меди и ее сплавов. — Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 2008. — 152 с.
4. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. — М.: Наука, 1966. — 300 с.
5. Исследование влияния примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди / В. М. Илюшенко, В. А. Аношин, А. Н. Бондаренко и др. // Сб. докл. 1-й Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 217–221.
6. О влиянии примесей на склонность к образованию трещин при сварке меди / В. М. Илюшенко, В. А. Аношин, А. М. Жердев, В. И. Карманчук // Сб. докл. 2-й Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 335–337.
7. Гликман Е. Э., Горюнов Ю. В. Механизм жидкометаллической хрупкости и других проявлений эффекта Ребиндера в металлических системах // Физ.-хим. мех. материалов. — 1978. — № 4. — С. 20–30.
8. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. — М.: Металлургиздат, 1956. — 560 с.
9. Влияние титана на пластичность металла шва при сварке сплава БрХ08 под флюсом / А. П. Шипулин, К. Г. Зобнина, Л. К. Босак, В. М. Илюшенко // Свароч. пр-во. — 1974. — № 4. — С. 25–27.

Поступила в редакцию 13.02.2013



X Международный конкурс сварщиков «Золотой кубок Бенардоса»

12-16 августа 2013

Южный, Одесская обл. (Украина)

На конкурс приглашаются сварщики из Украины и других стран, имеющие опыт работы.

Конкурс будет проходить в следующих номинациях:

- ручная дуговая сварка покрытым электродом
- дуговая сварка металлическим плавящимся электродом в активных газах
- дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертных газах
- газовая сварка

Победители и призеры конкурса в личном и командном зачетах награждаются: памятными кубками Бенардоса, дипломами Общества сварщиков Украины, ценными подарками и денежными премиями, международными сертификатами сварщика.

Организаторы конкурса:

Общество сварщиков Украины
Одесское областное Общество сварщиков Украины
Одесский припортовый завод

Полная информация о конкурсе представлена на сайтах: www.tzu.key.ua и www.tzu.od.ua



УДК 621.791.75

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

О. В. МАХНЕНКО, И. И. ПРУДКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены существующие компьютерные программные обеспечения (ПО), позволяющие проводить выбор оптимальных технологических параметров дуговой сварки конструкционных сталей. Проведен анализ преимуществ и недостатков рассмотренных ПО с точки зрения их применения сварщиком-технологом при разработке на производстве технологического процесса сварки. По функциональным возможностям рассмотренные ПО принадлежат к различным группам программных продуктов. ПО «Вертикаль» с модулем «Система расчета режимов сварки» относится к группе САПР. ПО Magsim, «Система компьютерного анализа свариваемости сталей», VirtualARC, Welding Simulation Suite, Simufact Welding можно отнести к специализированным системам инженерного анализа для моделирования технологических процессов. К этой группе программных продуктов можно отнести коммерческие ПО конечно-элементного анализа общего назначения, такие как Abagus, Ansys, LS-Dyna, Catia и др., которые являются близкими к специализированным системам по функциональным возможностям моделирования технологических процессов сварки и термической обработки. На основе анализа преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей. Библиогр. 17, рис. 10.

Ключевые слова: программное обеспечение, математическое моделирование, технологический процесс, сварка, сварочные материалы, термическая обработка

В настоящее время развитие научно-технического прогресса привело к широкому использованию компьютерных технологий на стадии подготовки производства. Во всем мире создается большое количество специального программного обеспечения (ПО), позволяющего виртуально воспроизводить различные технологические процессы.

Сокращение сроков разработки и повышение требований по качеству производства сварных конструкций вызвало создание целого ряда компьютерных программ, которые облегчают и ускоряют работу инженера-сварщика или инженера-технолога по разработке новых сварных конструкций и технологий сварки. Эти программные продукты можно условно разделить на две основные группы: системы автоматического проектирования технологических процессов (САПР ТП), которые, как правило, интегрированы с системами 3D-моделирования для решения конструкторских задач, и системы инженерного анализа для моделирования технологических процессов сварки.

В ИЭС им. Е. О. Патона было создано сварочное ПО Arcweldsys (системы выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей), которое предназначено для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств

математического моделирования [1]. В данной статье проанализированы преимущества и недостатки наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки и сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей.

К группе САПР ТП относится ПО «Вертикаль», модуль «Система расчета режимов сварки» (рис. 1, 2), разработанное фирмой «Ascon» (Рос-

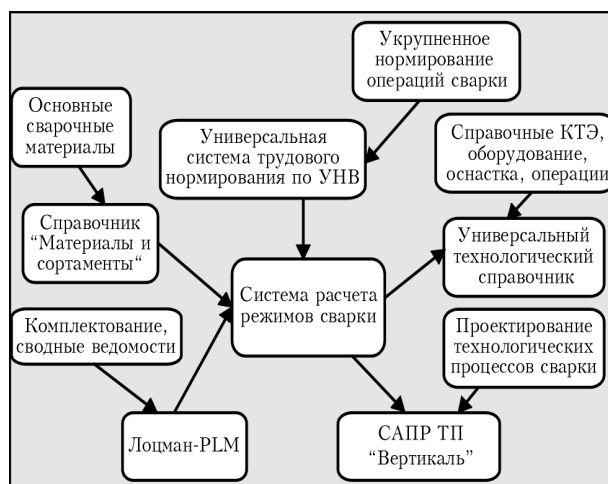


Рис. 1. Принципиальная схема модуля «Система расчета режимов сварки»

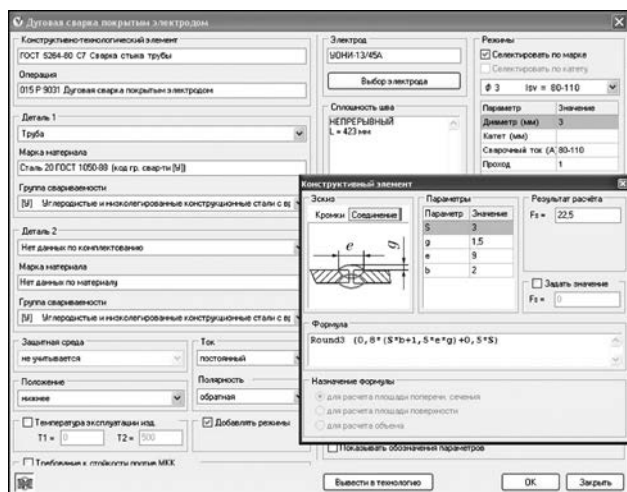


Рис. 2. Окно программы «Вертикаль»

сия) для комплексной автоматизации работ технолога-сварщика при проектировании техпроцессов сварки [2–4]. Для работы САПР ТП «Вертикаль» необходима установленная ранее система 3D-моделирования «Компас» или другая аналогичная система. Модуль работает в структуре САПР и решает следующие задачи: автоматизированный подбор режимов для основных процессов сварки, автоматизированный подбор и расчет норм расхода сварочных материалов, расчет расхода электроэнергии и основного времени на технологический переход.

При проектировании техпроцессов сварки и подборе режимов в модуле учитываются конструктивные элементы сварных швов, положение шва в пространстве, применяемые материалы, характеристики оборудования и другие необходимые параметры. Способ сварки деталей может быть указан для всего шва или отдельно для каждого сварочного прохода, возможен автоматизированный подбор сварочных материалов с учетом требований к межкристаллитной коррозии и условиям эксплуатации сварной конструкции.

Подбор сварочных материалов и технологических параметров сварки осуществляется на ос-

нове информационного банка знаний, включающего соответствующие справочники «Материалы и сортамент», «Универсальный технологический справочник» (рис. 1). Фактически модуль является расчетно-информационной системой, в основе которой не используется моделирование процесса сварки. Большое количество сервисных функций, облегчающих составление документации по техпроцессу сварки, делает это ПО достаточно удобным для технолога-сварщика на производстве. К недостаткам ПО «Вертикаль» с модулем «Система расчета режимов сварки» можно отнести возможное возникновение проблем при подборе технологических параметров сварки в случае новых материалов или способов сварки, для которых нет данных в имеющейся базе данных и базе знаний, а также достаточно высокую трудоемкость и стоимость внедрения этой системы в производство, связанную с необходимостью установки системы 3D-моделирования и САПР ТП «Вертикаль», что также обуславливает высокую стоимость.

На базе совместных исследований Тульского государственного университета (Россия) с техническим университетом г. Ахена (Германия) создано ПО Magsim (рис. 3) для численного анализа, диагностики и параметрической оптимизации процесса дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах [5–7]. ПО Magsim можно отнести к системам инженерного анализа для моделирования технологических процессов. С его помощью у инженера-сварщика появляется возможность моделировать влияние параметров режима сварки на качество формирования сварного соединения с целью снижения количества экспериментальных образцов. ПО позволяет проводить статистическую оценку влияния отклонений технологических параметров при сварке на качество шва, а также автоматически определять оптимальные параметры.

К недостаткам Magsim в первую очередь относится то, что результаты моделирования сварки ограничены только проблемой формирования сварного соединения, хотя кроме этой информации для инженера-сварщика на производстве при разработке технологии сварки необходимо получение и других технологических данных, например, механических свойств сварного соединения, риска образования горячих и холодных трещин и т. п.

Наиболее мощной специализированной системой моделирования технологических процессов сварки и термической обработки является набор программных продуктов, объединенных в линейку Welding Simulation Suite [8, 9]. Разработчиком такой системы является французская фирма «ESI Group», которая является одним из лидеров по созданию САПР и моделированию технологических процессов. В указанный набор ПО входят:

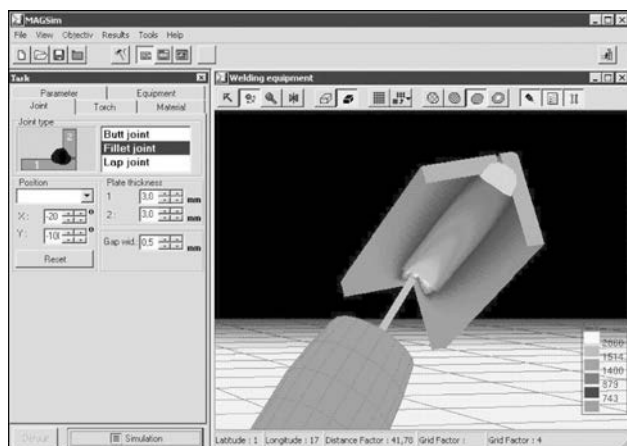


Рис. 3. Окно программы Magsim

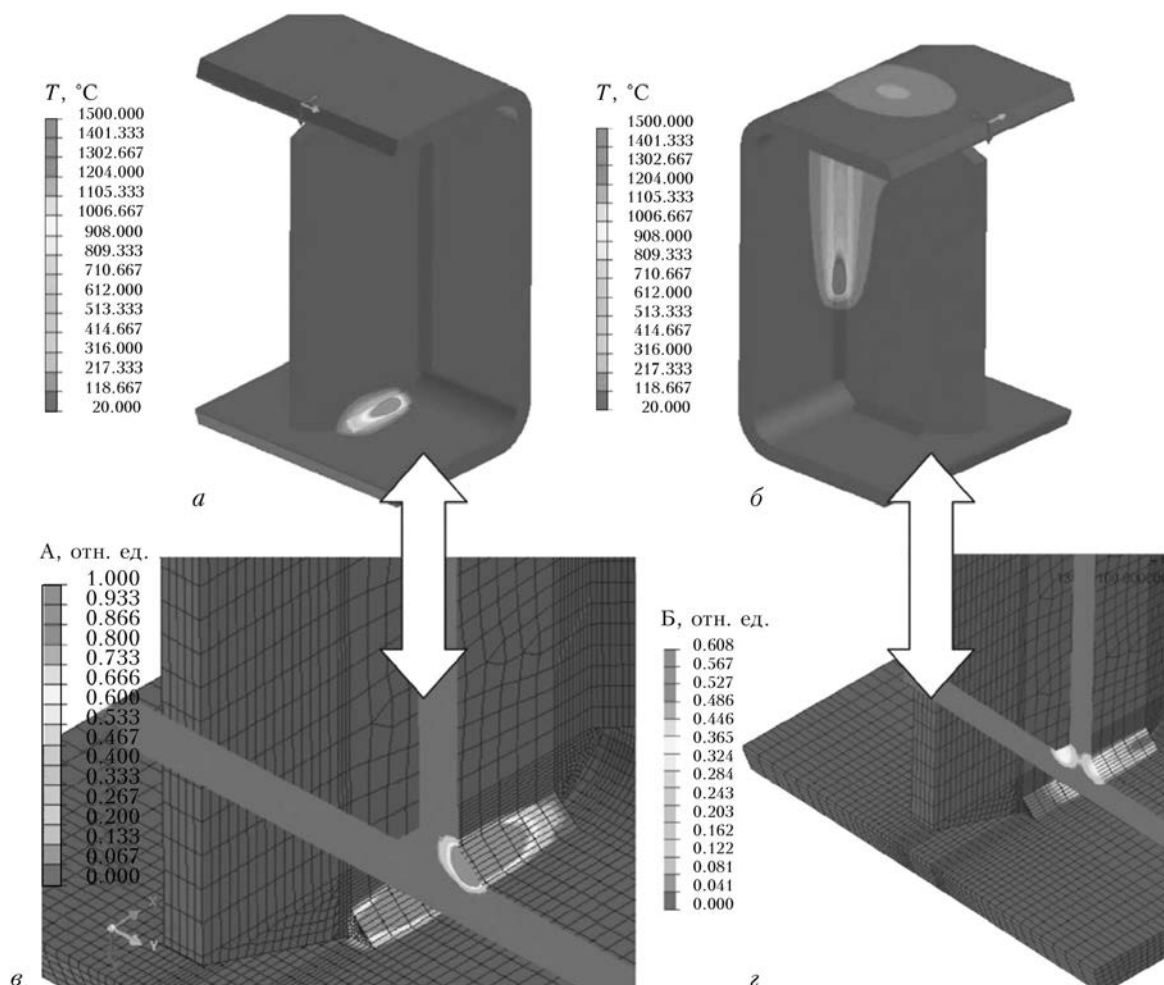


Рис. 4. Результаты, полученные в ПО Sysweld/Visual-Weld: а, б — распределение тепловых полей; в, г — относительное содержание соответственно аустенита (А) и бейнита (Б) в шве

— ПО Sysweld/Visual-Weld — для моделирования локальных участков сварных конструкций;

— ПО Weld Planner — для моделирования процесса сварки тонколистовых конструкций;

— ПО Pam-Assembly — для моделирования процессов сборки-сварки геометрически сложных крупногабаритных конструкций.

Программа Sysweld/Visual-Weld позволяет моделировать процессы сварки и термической обработки, временные и остаточные напряжения и деформации сварного узла или конструкции, механические характеристики и прочность материалов, подвергнутых указанным технологическим обработкам (рис. 4). Моделирование сварочных процессов включает все типы технологий сварки с учетом механических, тепловых и металлургических свойств материала. Модели и базы данных, которые включены в ПО Sysweld/Visual-Weld, позволяют проводить анализ теплометаллургических процессов для сталей и алюминиевых сплавов. Программа работает с термокинетическими диаграммами, которые описывают процесс фазовых переходов (рис. 5).

ПО имеет возможность получения геометрической модели сварного узла или конструкции, созданной в среде какой-либо САПР. Результаты расчетов, в том числе напряжения и деформации, могут быть экспортированы для дальнейших расчетов в другие дополнительные расчетные модули, разработанные фирмой «ESI Group», такие как:

— Systus — изучение зарождения и распространения усталостных трещин;

— Pam-Stamp — анализ процессов штамповки сварных листовых деталей;

— Pamcrash — анализ разрушений сварных конструкций.

Программный набор Welding Simulation Suite характеризуется во многих случаях избыточными возможностями и сложностью для инженера-сварщика на производстве, требует специальных знаний по применению расчетных методов и длительного периода обучения пользователя, имеет высокую стоимость.

Также специализированной системой моделирования технологических процессов сварки является модуль Simufact Welding [10], входящий в систему общего инженерного анализа различных

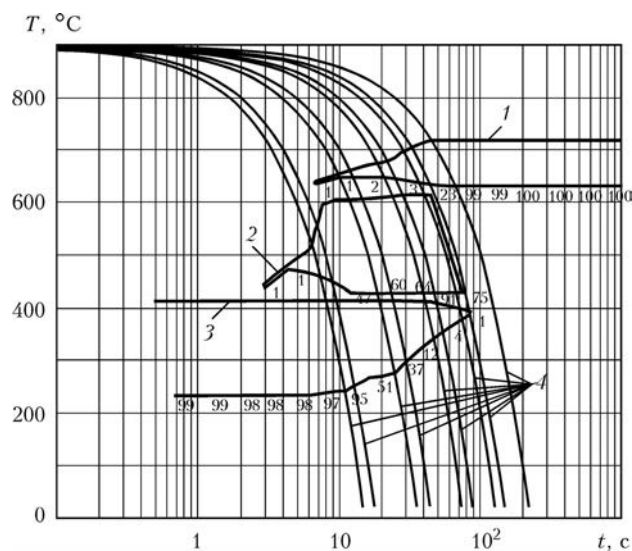


Рис. 5. Программное представление термокинетической диаграммы в ПО Sysweld/Visual-Weld: 1–4 — соответственно фазы № 1–4

технологических процессов Simufact (Simufact Engineering GmbH, Germany) [11]. Указанный модуль в первую очередь предназначен для прогнозирования сварочных деформаций, но также позволяет оценивать свойства зоны проплавления (ЗП) и ЗТВ. Проблемно-ориентированный пользовательский интерфейс помогает инженеру-сварщику проводить достаточно сложное моделирование физико-металлургических процессов при сварке. ПО основано на сочетании аналитических подходов и нелинейного численного моделирования. По описанию разработчика ПО характеризуется следующей функциональностью:

- синхронизированный по времени контроль работы нескольких сварочных роботов;
- быстрый расчет различных вариантов, отличающихся параметрами сварки;
- быстрое изменение параметров процесса сварки (последовательности и скорости сварки, параметров сварочного нагрева и условий закреплений);

оптимизация размеров и свойств ЗП, ЗТВ, а также уровня сварочных напряжений и деформаций.

К преимуществам ПО Simufact Welding можно отнести достаточно широкие возможности моделирования процесса сварки с целью прогнозирования качества формирования сварного соединения, в том числе многопроходного, определения свойств ЗП и ЗТВ с учетом структурных превращений, временных и остаточных сварочных напряжений и деформаций. Несмотря на использование достаточно сложных математических моделей, ПО ориентировано на инженерное применение на производстве. Отличительной способностью ПО является возможность проведения оптимизации роботизированной сварки и осуществления контроля синхронизированной работы сварочных роботов на производстве.

Близкими к специализированным системам по функциональным возможностям моделирования технологических процессов сварки и термической обработки являются коммерческие пакеты конечно-элементного анализа общего назначения, такие как Abaqus, Ansys, LS-Dyna, Catia и др. В последних версиях некоторых из этих пакетов появились специализированные расчетные модули для моделирования процессов сварки [12].

Например, Abaqus не является специализированным сварочным ПО, но может применяться для моделирования движущихся источников тепла и проведения анализа тепловых и механических процессов при сварке (рис. 6). Анализ тепловых процессов проводится с помощью пользовательских подпрограмм [13]:

Dflux — используется для определения теплотеноса при сварке в случае концентрированного теплового потока, который движется вдоль линии сварки, имитируя движение сварочного источника нагрева;

Garcon — используется для активации теплопроводности между основным и присадочным материалом, когда сварочный источник проходит определенный элемент;

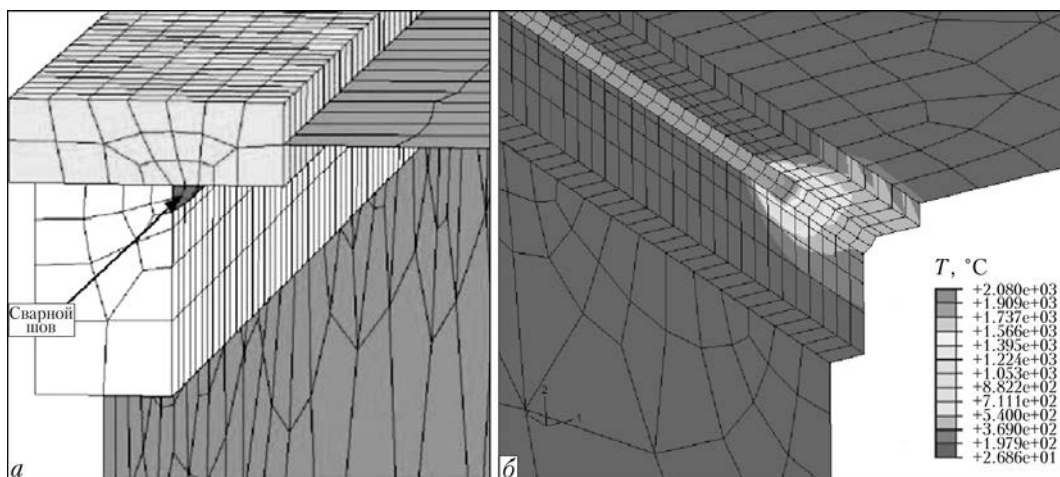


Рис. 6. ПО Abaqus: а — конечно-элементная модель сварного узла; б — распределение тепловых полей



Film — используется для активации теплопроводности для имитации процесса охлаждения, когда сварочный источник проходит определенный элемент.

Результаты теплового анализа используются как входные данные для решения механической задачи, в результате которой определяются сварочные напряжения и деформации. Для проведения моделирования теплометаллургических процессов при сварке необходима разработка своими силами или покупка у стороннего разработчика дополнительных программных модулей, учитывающих микроструктурные превращения в сталях при сварочных температурных циклах. К недостаткам также можно отнести высокую сложность программы, необходимость длительного обучения работе с ней, высокую стоимость. Все эти факторы делают ПО Abaqus, как и другие коммерческие ПО конечно-элементного анализа общего назначения, малопривлекательными для разработки технологии сварки инженером-сварщиком на производстве.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» (рис. 7) [14, 15], которая включает инже-

нерную часть для оперативного анализа технологических вариантов сварки типовых соединений, реализованную на основе программного комплекса «Свариваемость легированных сталей» [16] и базе данных свойств материалов.

Традиционно выбор рационального варианта сварочных материалов для дуговой сварки современных конструкционных сталей связан с достаточно большим количеством экспериментов, в ходе которых получают сравнительные результаты по целому ряду параметров: условиям формирования и химическому составу металла шва или ЗП, микроструктуре металла ЗП и ЗТВ, склонности к образованию горячих трещин, стандартным механическим характеристикам (твердости, пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению и сужению, ударной вязкости) в различных участках сварного соединения, а также специальным свойствам (длительной прочности при соответствующих температурах, коррозионной стойкости и т. д.). Все это требует для конкретного основного материала проведения соответствующих испытаний каждого альтернативного варианта сварочных материалов и режимов сварки. Учитывая существующий

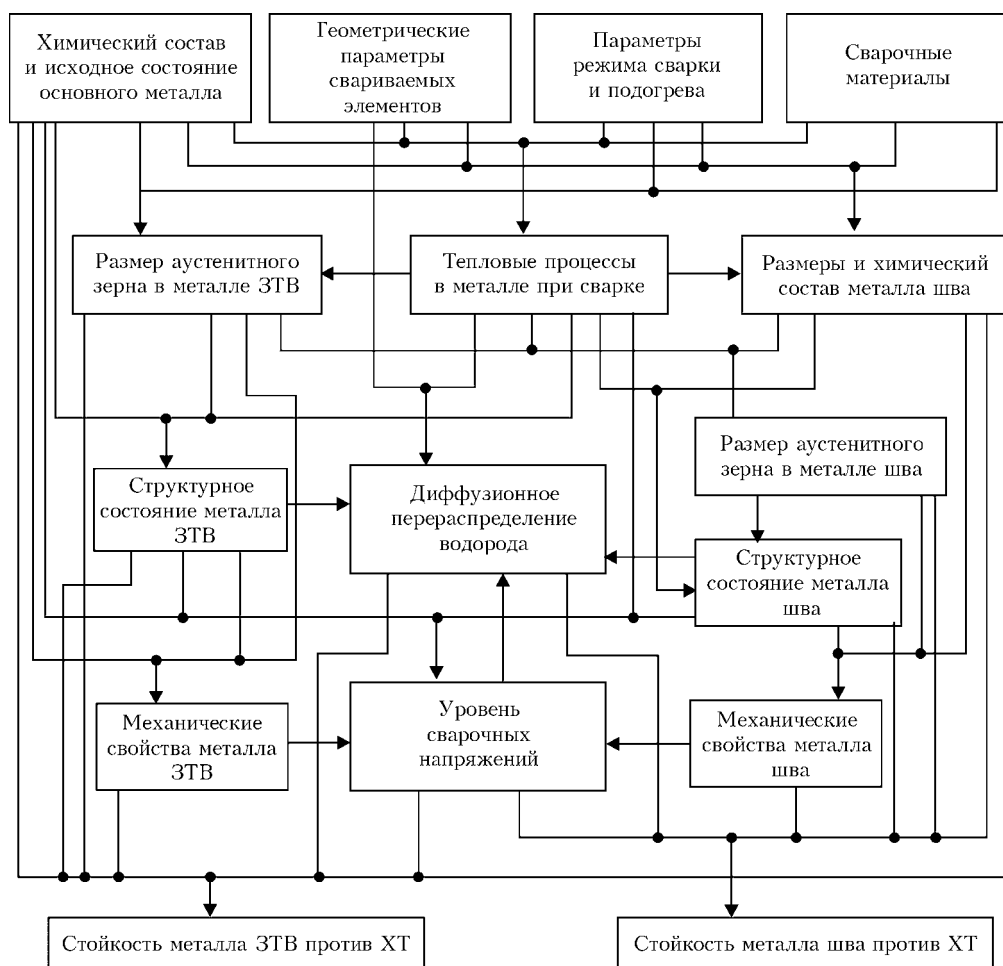


Рис. 7. Схема взаимосвязей показателей свариваемости низколегированных сталей с процессами, протекающими в металле при сварке, в ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей»

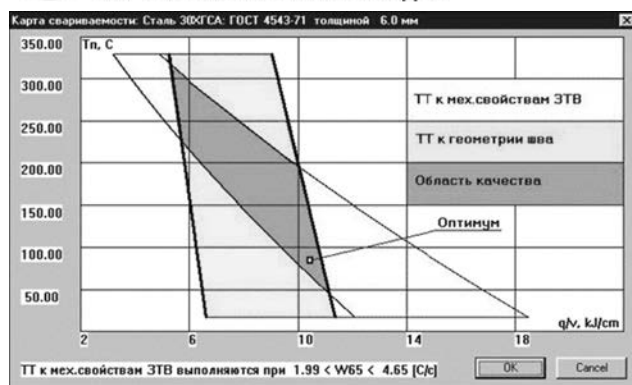


Рис. 8. Построение области качества при оптимизации теплового режима сварки в ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей»

большой ассортимент сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей, обоснованный выбор рационального варианта экспериментальным путем требует либо большого опыта, либо многочисленных экспериментов.

ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» позволяет значительно сократить трудоемкость проектирования технологии сварки и решать задачи оптимизации технологических параметров процесса многослойной сварки низколегированных сталей. Комплексный анализ технологических вариантов сварки выполняется путем моделирования совокупности протекающих в металле физико-металлургических процессов, формирующих показатели свариваемости. Оптимизация теплового режима сварки проводится для обеспечения требуемого комплекса свойств металла ЗТВ. На этом этапе расчета определяются параметры режима сварки и подготовки кромок соединения, обеспечивающие получение сварного шва заданных размеров, а также температура подогрева для достижения требуемого структурного состояния металла ЗТВ и стойкости к образованию холодных трещин (рис. 8).

ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» создано с целью более доступного моделирования процесса многослойной сварки для инженера-сварщика на производстве.

Для облегчения настройки роботизированного сварочного оборудования в условиях современного высокотехнологичного производства разработано ПО VirtualARC (разработчик компания «АВВ», Швейцария), которое является эффективным инструментом выбора оборудования и параметров процесса МИГ/МАГ сварки. ПО имеет удобный графический интерфейс, сочетает 2D-моделирование, данные экспериментальных измерений и нейронные сети для прогнозирования формирования сварного шва при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей.

Результаты моделирования физики дуги, тепло- и массопереноса используются в качестве входных данных нейронной сети для прогнози-

рования качества и размеров сварного шва, а также возможных дефектов сварки. Основные функции ПО VirtualARC по данным разработчика [17]:

- планирование технологического процесса МИГ/МАГ сварки;
- настройка МИГ/МАГ параметров сварки;
- прогнозирование формы и проплавления сварного шва;
- прогнозирование геометрических параметров сварного шва;
- прогнозирование геометрических дефектов сварки;
- оценка стоимости сварки;
- формирование технологической документации;
- оптимизация производительности и качества сварочного процесса.

Таким образом, основной специализацией ПО VirtualARC является выбор оптимального оборудования и режимов сварки с позиции качественного формирования сварного соединения при МИГ/МАГ сварке низкоуглеродистых сталей. К недостаткам можно отнести то, что программа не учитывает структуру и механические свойства получаемого сварного соединения. Класс низкоуглеродистых сталей также ограничивает практическое применение ПО.

В начале 2000-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона была разработана компьютерная система Arcweldsys [1], предназначенная для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе альтернативных сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования и соответствующего информационного обеспечения. В качестве исходной информации в системе используются паспортные данные фирмы-изготовителя сварочных материалов относительно вариантов сварочных материалов, рекомендуемых для дуговой сварки данного типа конструкционной стали; режимов дуговой сварки; коэффициентов наплавки; химического состава наплавленного металла. Эти данные вводятся в систему пользователем одновременно с указанием типа свариваемой конструкционной стали (основного материала) и ее химического состава.

В результате система выдает пользователю для каждого альтернативного варианта следующую информацию:

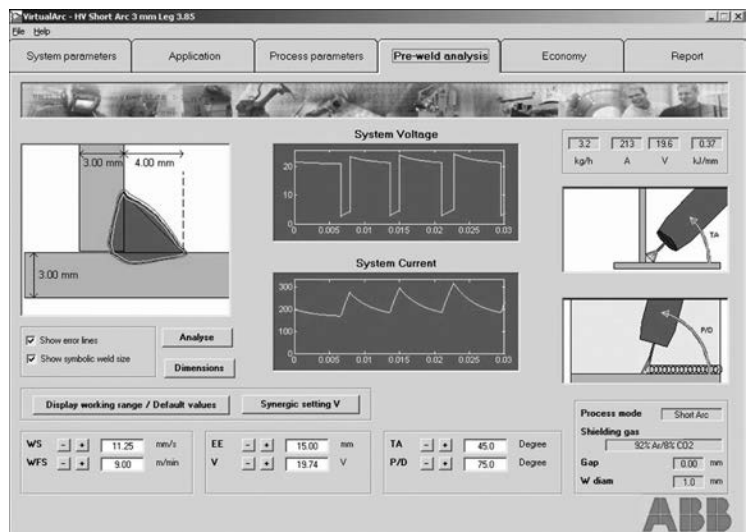
- размер и форму ЗП для корневого шва и последующих проходов (условия формирования сварного шва, риск прожога и пр.);
- химический состав металла ЗП;
- микроструктурный состав металла ЗП и ЗТВ;
- механические свойства (твердость, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость);



KCV при температурах $-20...-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗП и ЗТВ;

риск образования горячих и холодных трещин.

В процессе практического применения системы были выявлены следующие основные недостатки: неудовлетворительная точность расчета температурных полей в случае сварки с большой скоростью движения источника нагрева вследствие применения расчетных алгоритмов в рамках двухмерных задач; невозможность моделирования сварки для таких материалов, как нержавеющая сталь, алюминиевые и титановые сплавы; неудобный интерфейс программы. Но в основном система оказалась достаточно эффективной, нашла целый ряд заказчиков в Украине, Рис. 9. Окно программы VirtualARC



также с ее помощью были выполнены многочисленные исследования специалистами ИЭС им. Е. О. Патона.

На основе рассмотрения преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки и в результате проведенного анализа эффективности применения разработанной компьютерной системы, а также с учетом развития современной компьютерной техники и расчетных методов математического моделирования, физико-химических и металлургических процессов при сварке целесообразным является дальнейшее совершенствование существующей версии компьютерной системы. Такое усовершенствование происходит на основе доработки математических моделей и расчетных алгоритмов по определению температурных полей (циклов) для различных типов сварных соединений, в том числе за счет применения трехмерных моделей, расширения области применения системы на класс нержавеющих сталей за счет добавления новых математических моделей и соответствующих расчетных алгоритмов по определению дополнительной важной для инженера-сварщика информации. Например, степени сенсibilизации металла вследствие сварочного цикла при многопроходной сварке нержавеющих сталей, усовершенствование и дополнение баз данных по свойствам основного и сварочных материалов, в том числе введение в банк данных свойств материалов термокинетических диаграмм в цифровом виде для более точного описания фазовых превращений при сварочном температурном цикле, создание более удобного и интуитивно понятного пользовательского интерфейса системы с дополнительными служебными функциями по автоматизированному оформлению технологической документации.

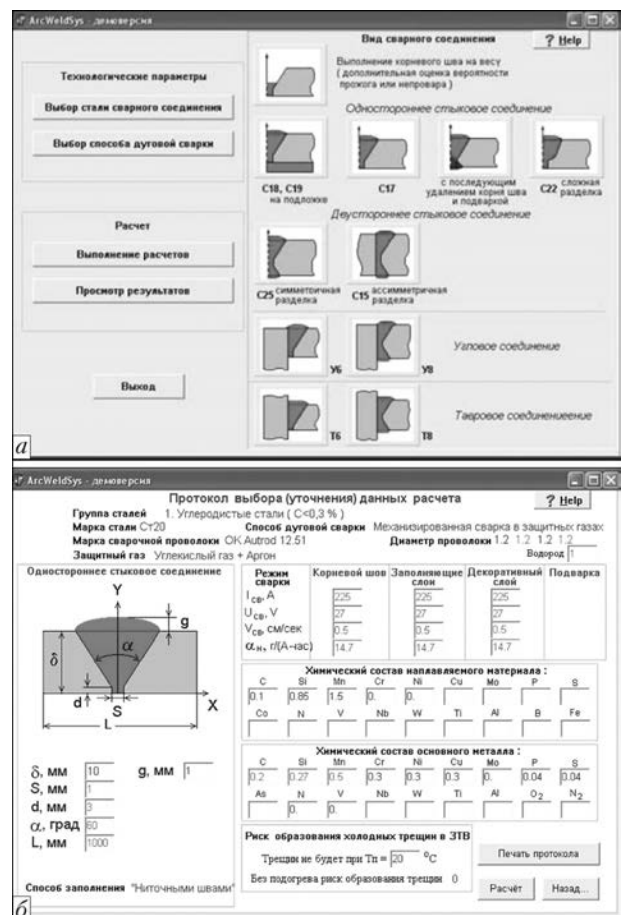


Рис. 10. Интерфейс программы Arcweldsys: а — основное окно; б — протокол выбора данных расчета

Выводы

1. Анализ существующих в Украине и за рубежом программных продуктов в области моделирования технологии сварки показал, что современный инженер-сварщик имеет достаточно мощные ин-



струменты по разработке новых сварных конструкций и технологий сварки.

2. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создано специализированное сварочное ПО Arcsweldsys (системы выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей), которое предназначено для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования.

3. В результате сравнения преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей, направленные на повышение точности получаемых прогнозных результатов и удобства в работе с ней инженера-сварщика.

1. Махненко В. И., Королева Т. В., Лавриненко И. Г. Компьютерная система выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 14–18.
2. САПР ТП «Вертикаль», модуль «Система расчета режимов сварки». — <http://www.ascon.kiev.ua>
3. Гуляев В. Конфигуратор конструктивно-технологических элементов и режимов сварки для САПР ТП «Вертикаль» // Оборудование и Инструмент для профессионала. Сер. Металлообработка. — 2012. — № 5 (электрон. изд.).

4. Гуляев В., Хармац И. Автоматизация проектирования технологических процессов сварки // САПР и графика. — 2008. — № 4. — С. 90–92.
5. Magsim. — <http://comhightech.tsu.tula.ru/software/magsim-r.htm>
6. Судник В. А., Иванов А. В., Дилтай В. Анализ эффективной мощности импульсной дуги при MAG-сварке сталей методом математического моделирования с экспериментальной проверкой: Сб. избр. тр. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. — Тула: ТулГУ, 1999. — С. 64–80.
7. Die Simulationswerkzeuge des ISF: MAGSim, BeamSim, SimWeld / I. Dikshev, U. Diltthey, J. Gollnick et al. // Sitzung der DVS-Arbeitsgruppen I 1 und I 2. — Rostock, Deutschland, 24.06.2004.
8. ESI Welding Simulation Suite. — <http://esi-russia.ru/taxonomy/term/5>.
9. Биленко Г. Моделирование процессов сварки в программных продуктах ESI на примере детали локомотива // Металлург. — 2012. — № 3. — С. 18–21.
10. Wohlmuth M. Practical design of industrial welding processes // Welding and Cutting. — 2011. — № 6. — P. 346–347.
11. SIMUFACT. WELDING. — <http://www.simufact.com>
12. Pakos R., Szymczak M. Przegląd programów komputerowych do przewidywania odkształcen i symulacji procesów spawalniczych na wczesnych etapach produkcji // Przegląd Spawalnictwa. — 2010. — № 3. — S. 32–39.
13. Abaqus. — <http://abaqus.com>
14. Макаров Э. Л., Коновалов А. В. Система компьютерного анализа свариваемости и технологии сварки конструкционных легированных сталей // Свароч. пр.-во. — 1995. — № 3. — С. 6–9.
15. Коновалов А. В. Программное обеспечение для численного анализа показателей свариваемости низколегированных сталей при многослойной сварке // «Наука и Образование». — 2004. — № 10 (электрон. изд.).
16. Куркин А. С., Макаров Э. Л. Программный комплекс «Сварка» — инструмент для решения практических задач сварочного производства // Сварка и Диагностика. — 2010. — № 1. — С. 16–23.
17. Virtualarc. — <http://www.abb.ua>

Поступила в редакцию 10.01.2013

«МОТОР СИЧ» БУДЕТ ОСНАЩАТЬ СВОИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ЧЕШСКИЕ САМОЛЕТЫ L-159

Крупнейший в СНГ производитель авиадвигателей и газотурбинных установок компания «Мотор Сич» (Запорожье) будет поставлять двигатели Au-222-28 для самолетов L-159 производства «Aero Vodochody» (Чехия). Об этом заявил председатель совета директоров «Мотор Сичи» В. Богуслаев. По его словам, компания уже подписала соответствующий протокол с чешской стороной.

В данный момент на самолеты L-159 устанавливают дорогостоящие американские двигатели. «Из-за того, что там стоят дорогие американские двигатели, эти самолеты мало кто покупает. Наши двигатели не хуже, но стоят значительно дешевле, что поможет продавать эти самолеты лучше», — отметил В. Богуслаев.

Кроме того, он сообщил, что учебно-боевые самолеты L-39, которые являются основными при подготовке военных летчиков в России, получают новые модернизированные двигатели производства «Мотор Сич» большей мощности. Опытный экземпляр самолета с таким двигателем уже прошел летные испытания в Одессе.

«Учебно-боевые самолеты чешского производства L-39, остающиеся на данный момент основной машиной для подготовки российских летчиков, будут модернизировать и ремонтировать в Ейске», — сообщил В. Богуслаев журналистам. По его оценке, до 2020 г. L-39 останется основным самолетом первоначального обучения для базовой подготовки российских летчиков.

«Мотор Сич» планирует также разработать новый более экономичный двигатель для ближне-магистральных украинских самолетов Ан-148 и Ан-158. Кроме того, запорожское предприятие намеревается начать поставки в США двигателей для американских вертолетов «Sikorsky S-61».



УДК 621.791.72.039

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРОЧНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛУ-20

Л. А. КРАВЧУК, А. В. КУШНЕРЕВ, В. И. КОЖУКАЛО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Электронно-лучевая сварочная установка универсального типа ЭЛУ-20, разработанная НИАТ (Россия), в большинстве случаев не обеспечивает выполнение современных требований, предъявляемых к технологии и оборудованию. По заказу пользователей в ИЭС им. Е. О. Патона на базе установки ЭЛУ-20 был разработан и создан специализированный комплекс для электронно-лучевой сварки с автоматическими системами управления и использованием распределенных компьютерных систем. Такой подход позволил реализовать ряд технологических возможностей по автоматическому управлению параметрами сварочного электронного пучка, программному перемещению и наклону электронно-лучевой пушки, визуальному программированию траектории стыка в режиме реального времени, работе вакуумной системы откачки. Windows — ориентированный интерфейс пользователя обеспечил графическое составление и редактирование программ сварки, трехмерное отображение образов изделия и траекторий стыка в процессе сварки. Библиогр. 2, рис. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая установка, вакуумная камера, электронно-лучевая пушка, система откачки, координатные оси перемещения, наклона и вращения, компьютерное управление, интерфейс, видеонаблюдение, фокусировка, программирование траектории стыка, мастер-программа, напряжение запитывания

Как показал опыт применения универсальной установки типа ЭЛУ-20, разработанной НИАТ, в большинстве случаев для выполнения современных требований ведущих отраслей промышленности назрела необходимость ее модернизации. В первую очередь это относится к вакуумной системе откачки, высоковольтному источнику питания, электронно-лучевой сварочной пушке, системе управления параметрами сварочного электронного пучка, системе слежения за стыком и визуального наблюдения за процессом сварки, а также механизмам перемещения и наклона пушки, загрузочной тележке и вращателям изделия.

По заказу пользователя (ОАО «Мотор-Січ», г. Запорожье) в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ на базе установки ЭЛУ-20 был разработан и создан специализированный комплекс для электронно-лучевой сварки (ЭЛС) с автоматическими системами управления (АСУ) и использованием распределенных компьютерных систем [1]. Такой подход обеспечил реализацию следующих технологических возможностей:

перемещение по пяти осям (три координаты X , Y , Z для перемещения электронно-лучевой пушки (ЭЛП), координата наклона пушки VG , ось вращения вращателя);

одновременное синхронное перемещение по любым трем координатным осям с линейной интерполяцией;

синхронное с перемещениями управление параметрами сварочного электронного пучка;

проведение сварки в двух режимах: автоматическая и ручная сварка;

Windows — ориентированный интерфейс пользователя, обеспечивающий графическое составление и редактирование программ сварки, трехмерное отображение образов и траекторий стыка в процессе сварки;

объединение нескольких подпрограмм в одну программу;

визуальное программирование траектории стыка в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах;

автоматическое управление вакуумной системой и высоковольтным источником питания;

протоколирование всех команд управления и параметров сварочного процесса в графическом и табличном виде;

диагностику отдельных подсистем (вакуумная система, высоковольтный источник питания, система перемещений, параметры сварочного процесса).

Вакуумная камера прямоугольной формы с внутренними размерами $3000 \times 2000 \times 2000$ мм (длина $\times$ ширина $\times$ высота) и объемом 12 м^3 снабжена одной откатной дверью, шарнирно подвешенной на балке подвески двери (рис. 1). Дверь с помощью электропривода имеет возможность перемещаться вдоль балки, открывая проем для подачи загрузочной тележки на позицию сварки. Передняя стенка вакуумной камеры (со стороны оператора-сварщика) снабжена смотровыми иллюминаторами, а также лампами освещения и видеокамерой наблюдения. На задней стенке рас-

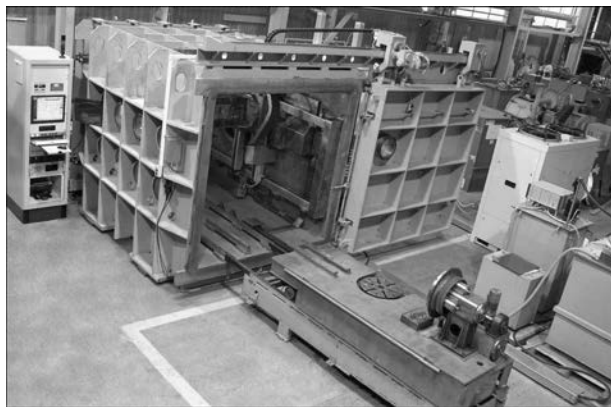


Рис. 1. Внешний вид электронно-лучевой установки ЭЛУ-20 после модернизации

положены механизмы перемещения сварочной ЭЛП по координатам X , Y , Z и наклона пушки VG , а также вакуумная система откачки.

Блок доработанной сварочной ЭЛП из состава аппаратуры ЭЛА-60Б с коллектором вторично-эмиссионного сигнала системы видеонаблюдения РАСТР [1, 2], турбомолекулярным насосом, вакуумными датчиками и экраном тепловой защиты пушки установлен на поворотной балке для наклона пушки в плоскости XZ (координата VG) (рис. 2). Перемещение сварочной ЭЛП по координатам X , Y , Z осуществляется с помощью линейных модулей. Управление перемещениями осуществляется от привода SINAMICS S120 (фирма «Siemens»), обеспечивая точность позиционирования не хуже $\pm 0,05$ мм. Применение в ЭЛП керамического высоковольтного изолятора и металлического вольфрамового катода диаметром 3 мм позволило получить при ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 60$ кВ ток электронного пучка в диапазоне $I_{\text{п}} = 0 \dots 500$ мА и наработку катода не менее 40 ч.

Вакуумная система откачки установки, разрабатанная и созданная на базе современного вакуумного оборудования, обеспечивает необходимое разрежение в сварочной камере и электронно-лу-



Рис. 2. Блок доработанной сварочной ЭЛП с механизмами перемещения по координатам X , Y , Z и наклоном по координате VG

чевой пушке в автоматическом режиме при компьютерном управлении (рис. 3). Время достижения рабочего давления в камере ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) и пушке ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.) составило не более 30 мин. Windows — ориентированный интерфейс при управлении по командам оператора-сварщика позволил реализовать следующие режимы работы вакуумной системы:

«Откачка» — режим откачки воздуха из вакуумной камеры и пушки как во время подготовки к сварке, так и непосредственно в процессе ее выполнения;

«Ожидание» — дежурный режим, позволяющий сохранить безопасное состояние установки под вакуумом при включенных диффузионных насосах;

«Напуск» — режим вентиляции вакуумной камеры и пушки до состояния готовности к открытию дверей вакуумной камеры;

«Стоп» — режим остановки работы вакуумной системы с отключением диффузионных насосов;

«Ручной» — режим ручного управления оборудованием вакуумной системы при поиске и устранении неисправностей;

«Холодная откачка» — включение режима «Откачка» без включения диффузионных насосов.

Программа автоматического управления вакуумной системой отслеживает и отображает состояние оборудования на экране монитора АСУ, используя обозначения состояния клапанов, затворов и вакуумных насосов.

Для получения изображения места сварки на мониторе АСУ в режиме реального времени применена аппаратура видеонаблюдения РАСТР. Изображение поверхности свариваемого изделия формируется по сигналам от датчика вторично-эмиссионных электронов, установленного на ЭЛП в непосредственной близости от места сварки (рис. 2). Четкая картина сварочного процесса с образованием лицевого валика шва отображается



Рис. 3. Вакуумная система откачки установки ЭЛУ-20 с автономным водяным охлаждением вакуумных насосов, ЭЛП и источника питания (чиллер типа BL365-16, фирма «Lahntech-nik», Германия)



на мониторе АСУ и, в отличие от традиционных оптических систем наблюдения, не подвергается влиянию паров свариваемого металла. Применение дополнительного компьютера, который решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры видеонаблюдения РАСТР изображению поверхности изделия, а также интерфейса НМІ (Human Machine Interface) обеспечило выполнение функций автоматического визуального проектирования траектории стыка, корректировки ухода стыка и слежение за стыком.

Windows — ориентированный интерфейс пользователя позволяет составлять в виде графиков и таблиц мастер-программы сварочного процесса для различных конфигураций изделий. Мастер-программа может включать до пяти подпрограмм — «Чистка», «Частичная прихватка», «Сплошная прихватка», «Сварка», «Косметика». В таблицах задаются значения тока сварки, тока фокусировки, скорости сварки, величины рабочего расстояния от торца ЭЛП до изделия, тип и амплитуда технологической развертки, амплитуда и направление отклонения электронного пучка. При выполнении процесса ЭЛС в автоматическом режиме предусмотрена возможность ручной корректировки параметров: ток сварки в пределах $\pm 10\%$, ток фокусировки в пределах $\pm 5\%$ режима программы. Сварка по программе может быть выполнена в режиме импульсной модуляции тока сварки с заданием частоты следования импульсов и длительности импульса.

Подпрограмма «Чистка» применяется для очистки поверхностей стыкуемых кромок изделия от загрязнений и оксидов остросфокусированным маломощным электронным пучком. Значение тока фокусировки для расположения фокуса электронного пучка на поверхности изделия определяется с помощью системы видеонаблюдения РАСТР. Режим очистки электронным пучком обычно выполняется на скорости перемещения 10 мм/с, с разверткой пучка по кругу диаметром 10 мм и током сварки 15 мА.

Интерфейс оператора-сварщика обеспечивает возможность задания двух типов вращателей: горизонтальный вращатель W_x (горизонтальная ось вращения) и вертикальный вращатель W_z (вертикальная ось вращения). При составлении и корректировке сварочных программ с использованием вращателей в таблице указывается скорость вращения и направление вращения.

Переход на программное ведение процесса ЭЛС в заводских условиях предъявляет более жест-

кие требования как к оборудованию, так и к технологическому процессу. Для обеспечения воспроизводимости геометрии сварных швов может быть применена следующая методика тестирования сварочной ЭЛП. На мониторе АСУ кроме информации о параметрах электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение, ток пучка, ток фокусировки, ток бомбардировки, ток накала) приведено значение напряжения записания на управляющем электроде пушки. Отслеживая изменение напряжения записания на определенную величину при номинальном токе пучка, оператор-сварщик может прогнозировать работоспособность вольфрамового термокатода и вовремя определить необходимость его замены.

Технические характеристики электронно-лучевой установки ЭЛУ-20 после модернизации:

Габаритные размеры установки, мм:	
длина	9000
ширина	7700
высота	3100
Внутренние размеры вакуумной камеры, мм:	
длина	3000
ширина	2000
высота	2000
Рабочее давление в вакуумной камере, мм рт.ст.,	
не выше	$1 \cdot 10^{-4}$
Рабочее давление в ЭЛП, мм рт.ст., не выше	$5 \cdot 10^{-5}$
Время достижения рабочего давления в вакуумной камере и ЭЛП, мин, не более	
камера и ЭЛП, мин, не более	30
Время напуска воздуха в вакуумную камеру, мин	
камера и ЭЛП, мин, не более	2
Перемещение ЭЛП по координатам, мм, не менее	
X-X	2000
Y-Y	900
Z-Z	800
Скорость перемещения ЭЛП по координатам X-X, Y-Y, Z-Z, мм/с	
камера и ЭЛП, мм/с	1,66...25
Точность позиционирования ЭЛП по координатам X-X, Y-Y, Z-Z, мм	
камера и ЭЛП, мм	$\pm 0,05$
Угол поворота ЭЛП в плоскости XOZ, град	
камера и ЭЛП, град	0...90
Количество вращателей для свариваемых изделий, шт.:	
с горизонтальной осью вращения	1
с вертикальной осью вращения	1
Скорость вращения планшайб вращателей, об/мин	
камера и ЭЛП, об/мин	0,06...12
ЭЛП и аппаратура ЭЛА-60Б:	
ускоряющее напряжение, кВ	60
диапазон регулирования сварочного тока, мА	0...500
рабочее расстояние электронного пучка, мм	100...400
частота технологических разверток пучка, Гц, не более	1000
угол отклонения пучка, град	$\pm 3,5$
ресурс работы катода, ч	40
сварка в импульсном режиме с частотой, Гц	5...600
Система наблюдения и слежения за стыком РАСТР:	
точность совмещения электронного пучка со стыком, мм	$\pm 0,1$
увеличение объекта наблюдения	5

1. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
2. Наблюдение процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Там же. — 1993. — № 5. — С. 35–38.

Поступила в редакцию 24.01.2013



УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ НАПЛАВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

В. И. ТИТАРЕНКО, В. Н. ЛАНТУХ, А. С. КАШИНСКИЙ

ООО «НПП РЕММАШ». 52005, Днепропетровская обл., пгт Юбилейный, ул. Совхозная, 74.

E-mail: remmash_firm@ukr.net

На предприятиях ряда отраслей промышленности периодически возникает необходимость применения автоматической дуговой наплавки для ремонта изнашиваемых деталей и узлов с использованием специализированных установок. В работе рассмотрены подходы, практикуемые малым предприятием, при разработке и изготовлении сварочно-наплавочного оборудования на базе токарных станков различных типов. Приведены примеры комплектации таких установок и их использования при наплавке прокатных валков. Модернизация и обновление парка наплавочного оборудования в этом случае сопряжены с минимальными затратами. Библиогр. 3, рис. 6.

Ключевые слова: дуговая наплавка, изношенные детали и узлы, специализированные установки, токарный станок, проектирование и изготовление, модернизация, прокатные валки

На многих промышленных предприятиях широко применяется автоматическая дуговая наплавка, поэтому в настоящее время актуальна проблема замены предельно изношенных наплавочных установок или расширения их парка. Серийно такие установки практически не выпускаются и на некоторых предприятиях для решения этих задач применяют наплавочные установки на базе токарных станков различных типов. В зависимости от назначения и размеров наплавляемых деталей выбирается тип токарного станка. Установки комплектуются сварочными автоматами типа А-1406, А-1416 и выпрямителями с соответствующими параметрами [1, 2].

ООО «НПП РЕММАШ», специализирующееся на разработке и изготовлении сварочно-наплавочного оборудования, за последние годы накопило опыт создания и модернизации установок для наплавки прокатных валков, успешно сотрудничая с металлургическими предприятиями Украины. При разработке и изготовлении подобного наплавочного оборудования были использованы подходы, которые ООО «НПП РЕММАШ» применяет при создании любой установки [3]:

- анализ существующей у потенциального заказчика технологии наплавки, разработка вариантов ее усовершенствования с применением новых наплавочных материалов;

- анализ имеющихся аналогичных установок;
- использование блочного принципа комплектации установок;

- конкретизация параметров установки под требования заказчика;

- придание установке принципов универсальности;

- максимальное оснащение установки необходимым вспомогательным оборудованием и оснасткой;

- максимальное привлечение к проектированию и изготовлению оборудования предприятий-смежников;

- привлечение специалистов заказчика к процессу разработки и изготовления оборудования.

Использование этих подходов позволяет ООО «НПП РЕММАШ» в короткие сроки изготовить и внедрить в производство наплавочные установки на базе токарных станков «под ключ».

В качестве примера можно привести модернизацию установки для наплавки валков заготовительных станов ОАО «ДМК им. Ф. Э. Дзержинского», г. Днепропетровск. До этого в течение длительного времени для наплавки валков этих станов на комбинате использовали наплавочную установку на базе вальцетокарного станка, созданную силами комбината. Многолетняя эксплуатация привела к значительному износу основных узлов установки, в результате значительно понизилось качество наплавочных работ.

Специалистами ООО «НПП РЕММАШ» и службы главного прокатчика ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат» была разработана концепция и техническое задание (ТЗ) на модернизацию существующей наплавочной установки. В ТЗ были поставлены следующие основные задачи:

- базовый вальцетокарный станок необходимо использовать только для закрепления и вращения наплавляемых прокатных валков;

- наплавочный автомат должен быть закреплен и передвигаться на механизме, не имеющем жесткой механической связи с вальцетокарным станком; при этом должна быть предусмотрена воз-

возможность их отвода из зоны действия грузоподъемных механизмов при установке и снятии валков;

в системе управления процессом наплавки должен быть предусмотрен механизм автоматического перевода мундштука наплавочного автомата на шаг наплавки;

устройство для сбора и подачи флюса должно обеспечивать уборку использованного флюса, очистку его от шлаковых корок и надежную подачу в флюсовый бункер наплавочного автомата для повторного использования;

при разработке и изготовлении новых агрегатов и узлов необходимо учесть возможность дальнейшей модернизации установки.

Исходя из поставленных в ТЗ задач, была предложена компоновка агрегатов и узлов, которая в сочетании с базовым вальцетокарным станком позволила получить высокотехнологичную установку для наплавки прокатных валков заготовительных станков (рис. 1). В качестве устройства для закрепления и перемещения наплавочного автомата А-1406 была использована передвижная поворотная колонна с траверсой 1. Тележка 6, на которой смонтирована колонна, передвигается по рельсам, установленным параллельно продольной оси станка и закрепляемых в станке прокатных валков. Колонну с автоматом можно устанавли-

вать в рабочее положение перед наплавкой каждого калибра валка. Это дает возможность выводить наплавочный автомат из рабочей зоны, что важно при установке и снятии валка.

Функцию перемещения рабочего вдоль оси наплавляемого валка на шаг наплавки передали модернизированному наплавочному автомату А-1406 7, для чего усовершенствовали электрическую схему автомата. У наплавочного автомата также заменили флюсоаппаратуру. В качестве источника питания дуги использовали сварочный выпрямитель КИУ-1201 4.

В состав флюсоаппаратуры входят: тележка 9, передвигающаяся по направляющим станины станка в зону наплавки (для сбора смеси использованного флюса со шлаком); шнековый конвейер 14; вибросито 12; бункер-накопитель просеянного флюса 13; эжектор, обеспечивающий подачу флюса с помощью сжатого воздуха во флюсовый бункер наплавочного автомата; емкость для сбора шлака 16.

Перед началом наплавки тележку 9 устанавливают под наплавляемым валком. В процессе наплавки использованная смесь флюса и шлака сыпается в тележку, откуда поступает в приемные окна шнекового конвейера. Конвейер подает смесь шлака и флюса на вибросито, которое разделяет смесь на шлак, сыпавшийся в емкость

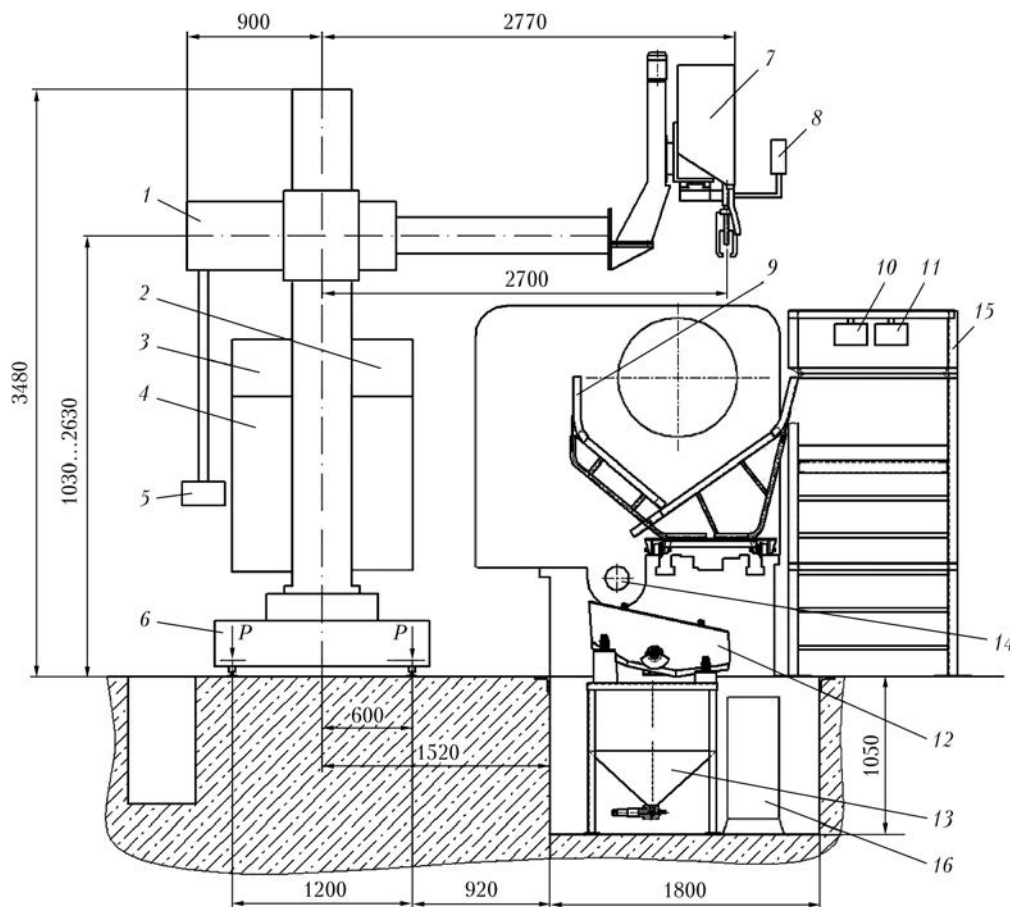


Рис. 1. Схема модернизированной установки для наплавки прокатных валков заготовительных станков: 1–16 — см. в тексте

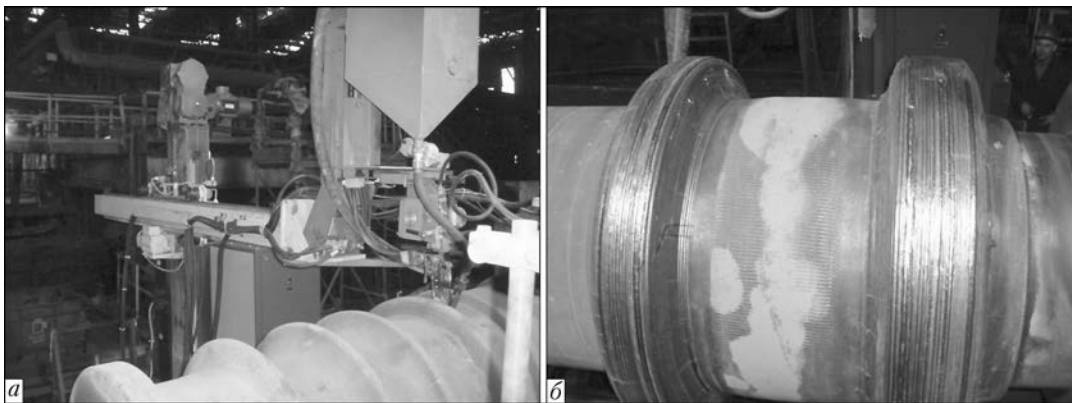


Рис. 2. Установка РМ-11 для наплавки прокатных валков заготовительных станков (а) и фрагмент наплавленного прокатного валка (б)

для сбора шлака и просеянный флюс, попадающий в бункер-накопитель. Из бункера флюс с помощью эжектора подается во флюсобункер автомата А-1406 для повторного использования.

В состав установки также входит механизм передвижения задней бабки станка, служащий второй опорой для наплавляемого валка. Механизм, состоящий из электроприводной лебедки и набора блоков, позволяет передвигать заднюю бабку при установке в станок валков различной длины.

Работой установки управляют с нескольких пультов, используя шкафы управления 2, 3. Основной пульт управления 8 закреплен на наплавочном автомате. С его помощью проводится оперативное управление тремя основными агрегатами установки: передвижной поворотной колонной, вальцетокарным станком и наплавочным автоматом. Функции вспомогательного управления установкой, не требующие оперативного вмешательства, с целью разгрузки основного пульта были вынесены еще на два пульта 10 и 11, расположенные на перилах рабочей площадки наплавщика 15. С пульта 10 управляют виброситом, шнековым конвейером и наладочным вращением наплавляемого валка. С пульта 11 включают и регулируют подачу сжатого воздуха в эжектор флюсоподающего устройства. Дополнительный пульт 5, расположенный в районе площадки со шкафами управления, предназначен для управления поворотной колонной в процессе подготовительных и ремонтных операций.

На рис. 2, а показан общий вид установки РМ-11 для наплавки валков заготовительных станков, а на рис. 2, б — фрагмент наплавленного на ней прокатного валка.

Предприятием ООО «НПП РЕММАШ» для ОАО «ЕВРАЗ-ДМЗ им. Петровского» на базе токарного станка DXW 1000/3x5000 РК-1 была создана установка РМ-12 для наплавки валков заготовительных и сортовых станков горячей прокатки. Привод станка был модернизирован и обеспечивал вращение валка с наплавочной ско-

ростью. Суппорт станка был выведен из рабочей зоны, используемой для наплавки.

Кроме токарного станка DXW 1000/3x5000 РК-1 в состав наплавочной установки (рис. 3) вошли такие агрегаты, как сварочный автомат А-1416УХЛ4 5 в комплекте со сварочным выпрямителем КИУ-1201. Установка была укомплектована выносным пультом управления, в котором продублированы базовые элементы стационарного пульта управления. Это позволяет управлять процессом наплавки (контролировать его) с рабочей платформы наплавщика 7; флюсобункером объемом 250 дм³; стойкой 8 для размещения бухты проволоки массой до 1 т; самоходной тележкой 4 для размещения и передвижения сварочного автомата, базирующейся на раме 3.

Для обеспечения требуемой рабочей скорости перемещения тележки используют программируемый контроллер, позволяющий выбрать необходимую скорость в пределах 1...30 мм/мин.

Устройство для сбора флюса и шлака 6, состоящее из тележки и корыта, устанавливают под наплавляемым валком и перемещают вдоль оси станка DXW 1000/3x5000 РК-1.

Установка РМ-12 (рис. 4) внедрена на ОАО «ЕВРАЗ-ДМЗ им. Петровского» и уже более двух лет успешно используется для наплавки прокатных валков.

Предварительный и сопутствующий подогрев, а также отпуск или замедленное охлаждение после наплавки являются обязательными технологическими операциями при наплавке прокатных валков из средне- и высокоуглеродистых сталей. Как правило, при наплавке прокатных валков используют индукционный нагрев или нагрев газовыми горелками. Оба эти способа имеют свои достоинства и недостатки, и предприятие само решает, какой из них использовать в каждом конкретном случае.

Для ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», которое для нагрева валков традиционно использует индукторы, предприятие ООО «НПП РЕММАШ» разработало и изготовило индуктор, позволяющий

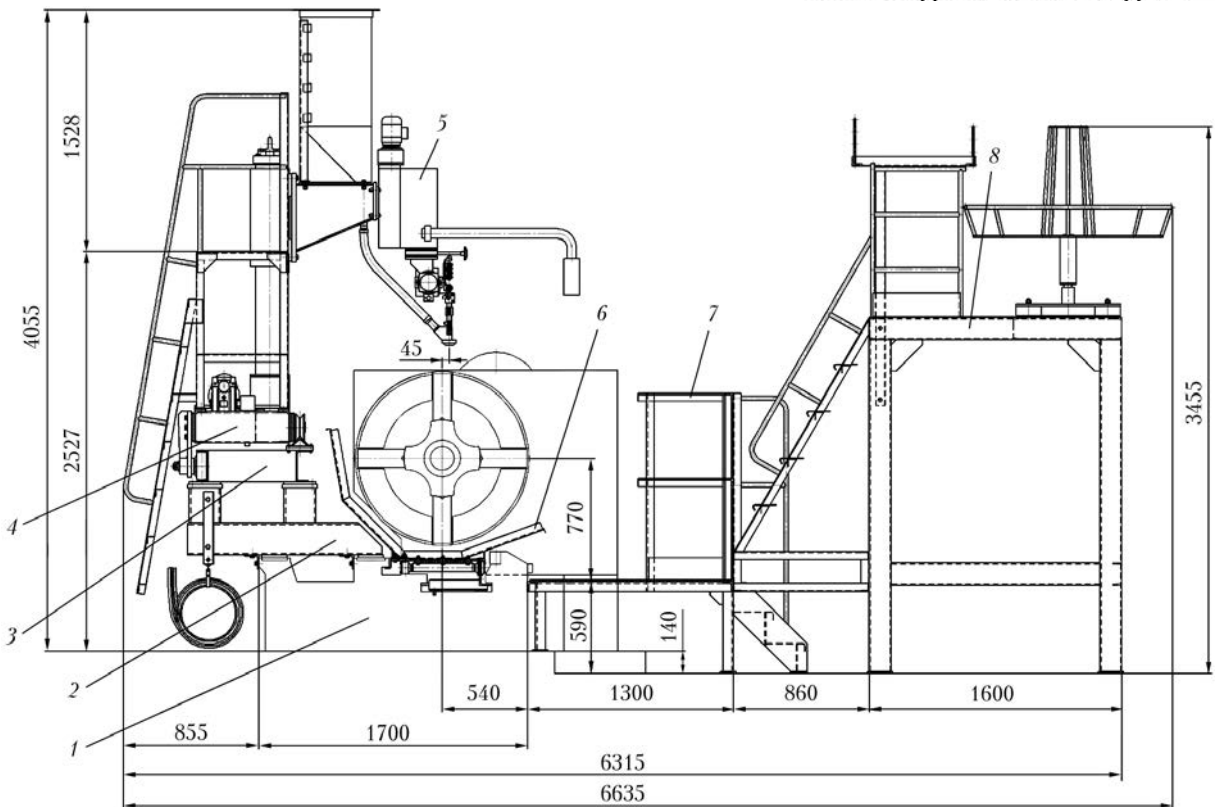


Рис. 3. Схема установка РМ-12 на базе токарного станка DXW 1000/3x5000 РК-1: 1–8 — см. в тексте

нагревать прокатные валки во всем диапазоне их диаметров от 690 до 910 мм.

Индуктор (рис. 5) состоит из катушки, изготовленной из медной трубки 4, магнитопроводов неподвижного 6 и подвижного 1, изготовленных из пластин трансформаторного железа, корпуса-каркаса 2, состоящего из сварных секторов и клеммной доски 3. Индукторная катушка набрана из двух секций, концы которых выведены на клеммную доску. Внутри медной токоведущей трубки (наружный диаметр 14 мм, внутренний — 10 мм) циркулирует охлаждающая вода. Каждую из секций катушки изолируют лакотканью, а всю катушку в собранном виде — асбестовым полотном, пропитанным лаком. Электрические слои катушки соединяют последовательно, гидравлические — параллельно. К началу и концу каждого слоя припаяны штуцера, которые выведены на клеммную доску 3. Изоляция класса F, допустимая температура обмотки не должна превышать 200 °С. Расход воды при нагреве валка диаметром 910 мм до 500 °С составляет 7,2 л/мин, а валка диаметром 690 мм — 6,5 л/мин. В режиме поддержания температуры валка при наплавке (400...420 °С) расход не более 5,0 л/мин.

Магнитопроводы расположены в корпусе-каркасе радиально шестью секциями по окружности каркаса через 60°. Каждая секция состоит из одного неподвижного магнитопровода 6, установленного в средней части каркаса, и двух подвижных магнитопроводов 1, установленных с двух

сторон на периферии каркаса. При установке в индуктор для нагрева изделий разного диаметра (690...910 мм), подвижные магнитопроводы перемещаются в обоймах для создания оптимального воздушного зазора между поверхностью нагреваемого изделия и торцами подвижных магнитопроводов. При выборе величины зазора между



Рис. 4. Установка РМ-12 для наплавки прокатных валков

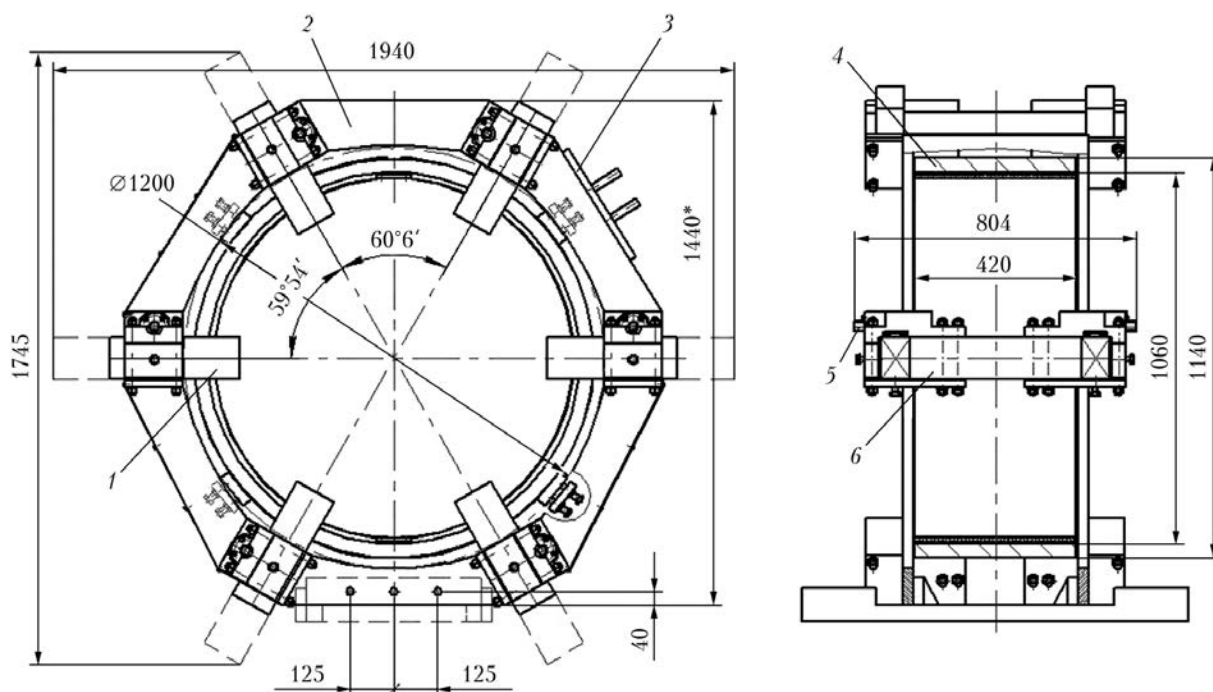


Рис. 5. Схема индуктора электромагнитного РМ-6: 1–6 — см. в тексте

подвижными магнитопроводами и поверхностью нагреваемого изделия необходимо учитывать, что отсутствие такого зазора недопустимо. Излишне уменьшенный зазор приводит к перегреву магнитопроводов, а увеличенный — к повышению времени нагрева. Поэтому для каждого типоразмера валков такой зазор при средней величине 10...20 мм выбирается экспериментальным путем. Время разогрева участка валка длиной 490 мм от 250 до 400 °С — 1,5 ч. Основные характеристики индуктора: номинальное напряжение питающей сети 380 В, номинальный ток 260 А, коэффициент мощности 0,506.

Индуктор успешно применяют в вальцетокарном цехе ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» для предварительного, сопутствующего и после-наплавочного нагрева всех наплавляемых стальных валков диаметром 690...910 мм.

Для подогрева валков, наплавляемых на установке РМ-12 (ОАО «ЕВРАЗ-ДМЗ им. Петровского»), разработан стенд РМ-14, в котором нагревающим элементом являются газозвушные горелки. Стенд (рис. 6) состоит из приводной 1 и неприводной 4 секций роликоопор и комплекта газозвушных горелок 2.

Приводная секция представляет собой раму, на которой установлены две приводные роликоопоры, а также закреплен винт, служащий для сведения и разведения роликоопор при настройке на разные диаметры нагреваемых валков. Управление приводами вращения роликоопор осуществляется от общего шкафа управления, закрепленного на раме. Неприводная секция представляет собой раму, на которой установлены две не приводные роликоопоры, а также закреплен винт, выполняющий функции аналогичные функциям винта из приводной секции. Кроме этого они име-

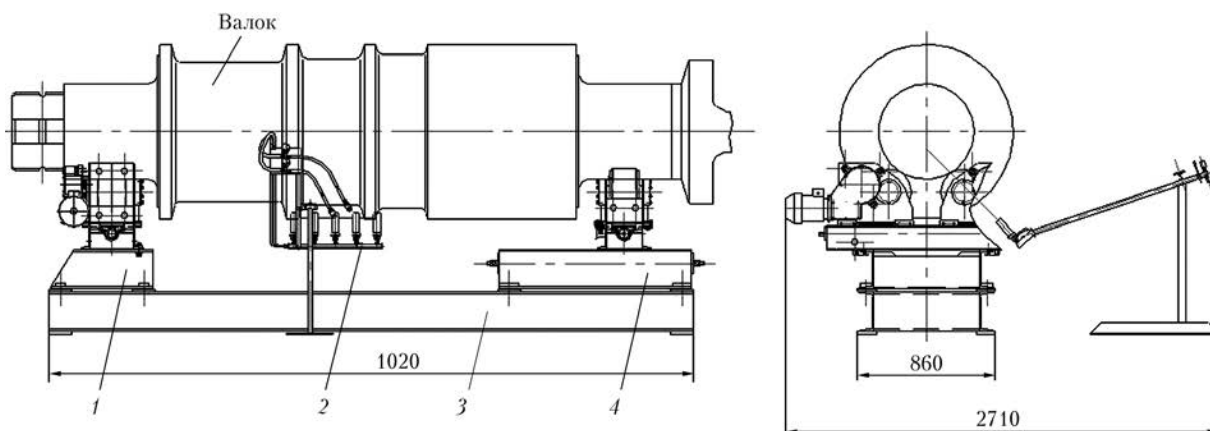


Рис. 6. Схема стенда РМ-14 для нагрева прокатных валков перед наплавкой: 1–4 — см. в тексте



ют винтовой механизм для передвижения в осевом направлении относительно приводной секции (для осуществления подогрева различных по длине валков). Приводная и не приводная секции смонтированы на общей раме 3.

Комплект газоздушных горелок 2 состоит из пяти горелок ГВ-ВК2, одного коллектора на пять горелок, подвижной рамы, стойки и панели управления горелками. Работают горелки на природном газе (давление 0,08 МПа) и сжатом воздухе (давление 0,3 МПа). Количество комплектов газоздушных горелок выбирает заказчик или рассчитывает разработчик (заказчиком предоставляются технические требования по нагреву прокатных валков или других деталей).

Описанные в данной статье подходы к разработке и приведенные примеры изготовления и внедрения наплавочного оборудования показывают одно из направлений, позволяющее с минимальными затратами выполнить модернизацию и обновление оборудования для наплавки прокатных валков.

1. *Восстановление дуговой наплавкой под флюсом штоков и плунжеров шахтных гидрокрепей* / Ю. М. Кусков, И. А. Рябцев, Ю. В. Демченко, А. М. Денисенко // Сварщик. — 2008. — № 2. — С. 6–11.
2. *Наплавочный участок по ремонту деталей гидроэнергетического оборудования в АО «Сакэnergгоремонт»* / Ю. М. Кусков, И. А. Рябцев, Ю. В. Демченко, А. М. Денисенко // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 57–59.
3. *Опыт разработки и изготовления сварочно-наплавочных установок* / В. И. Титаренко, О. В. Ткаченко, Д. Ю. Матико и др. // Там же. — 2009. — № 3. — С. 27–30.

Поступила в редакцию 30.01.2013

13-я Международная научно-техническая конференция ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

3–7 июня 2013

Крым, г. Ялта,
пгт Гаспра, санаторий «Парус»

Тематика конференции:

Научные основы инженерии поверхности:

- материаловедение,
- физико-химическая механика материалов,
- физико-химия контактного взаимодействия,
- износ- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя,
- функциональные покрытия и поверхности,
- технологическое управление качеством деталей машин,
- вопросы трибологии в машиностроении.

Технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей

Метрологическое обеспечение ремонтного производства

Экология ремонтно-восстановительных работ.

В рамках конференции будет проведен практический семинар «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горно-металлургической, машиностроительной промышленности и на транспорте»

Тематика семинара:

Сварка, наплавка и родственные реновационные процессы при изготовлении и ремонте деталей: оборудование, материалы, технологии.

Адрес организационного комитета:

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины

04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2.

Тел./факс: (38044) 430-85-00

E-mail: atmu@ism.kiev.ua



ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА ШТОКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ

Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ, И. А. РЯБЦЕВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выбран присадочный порошок на основе железа 15X19H9M4C5ГЗД и разработана технология механизированной плазменной наплавки уплотнительных и цилиндрических поверхностей штоков (шпинделей) арматуры, которые эксплуатируются на тепловых и атомных электростанциях. Металл, наплавленный этим порошком, обладает необходимыми эксплуатационными свойствами и по сравнению с ранее применяемыми для этой цели никелевыми сплавами имеет более низкую цену. Применение плазменно-порошковой наплавки штоков энергетической арматуры взамен ручной дуговой покрытыми электродами и автоматической дуговой порошковыми проволоками позволило улучшить качество наплавленного металла, снизить припуски на механическую обработку, а также снизить расходы на наплавку и увеличить ресурс эксплуатации запорной арматуры. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, наплавочные порошки, оборудование для наплавки, запорная арматура, штоки, шпиндели

Опыт применения механизированной плазменной наплавки в производстве энергетической арматуры свидетельствует о значительных технических и экономических преимуществах этого способа по сравнению с ручной дуговой наплавкой. Наряду с более высокой производительностью, меньшим расходом дорогих и дефицитных наплавочных материалов, лучшими условиями труда, обеспечивается также более высокое качество наплавленных деталей.

Для плазменной наплавки деталей энергетической арматуры широко используют сплавы на основе никеля и кобальта. Сплавы этих типов обладают высокими технологическими и эксплуатационными свойствами. Однако они имеют большой недостаток — высокую стоимость. В настоящее время для наплавки деталей арматуры различного назначения разработаны более дешевые сплавы на основе железа. Однако, как указывалось выше, на многих предприятиях стран СНГ для этой цели до сих пор применяют ручную электродуговую наплавку штучными электродами или механизированную электродуговую наплавку порошковыми проволоками. Электродуговую наплавку деталей арматуры выполняют, как правило, в три слоя, что ведет к перерасходу наплавочных материалов и увеличению продолжительности процесса наплавки [1, 2].

В серийном производстве штоки (шпиндели) арматуры изготавливаются из стали 25Х1МФ, а их уплотнительные поверхности наплавливают вручную в 3-4 слоя электродами ЦН-12М в медном водоохлаждаемом кокиле (рис. 1). Технологический процесс предусматривает предваритель-

ный подогрев заготовок и последующий отпуск наплавленных деталей. Непостоянство твердости по высоте наплавленного слоя, наличие шлаковых включений, пор и других дефектов, а также низкая производительность ручного труда — это те факторы, которые присущи этой технологии наплавки.

В ИЭС им.Е. О. Патона разработана технология механизированной плазменной наплавки деталей арматуры, в частности, уплотнительной и цилиндрической поверхностей штоков (шпинделей), порошком сплава на основе железа 15X19H9M4C5ГЗД [3]. Этот способ наплавки позволяет наносить тонкие слои металла при небольшом проплавлении (5...10%) основного металла. Размеры наплавливаемых валиков можно регулировать в широких пределах: толщина наплавленного

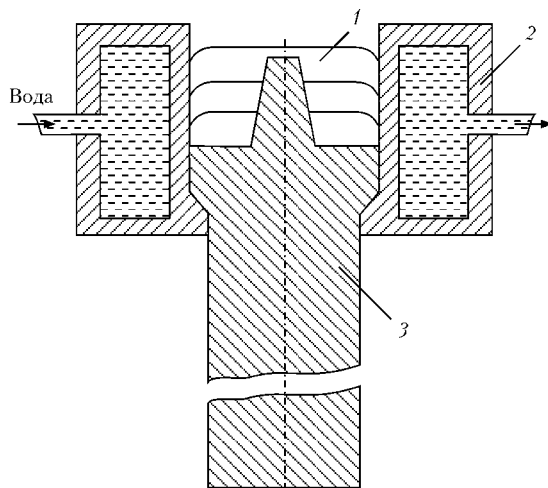


Рис. 1. Схема ручной электродуговой наплавки штоков вентилей DN 50: 1 — наплавленный металл; 2 — водоохлаждаемый медный кокиль; 3 — заготовка штока

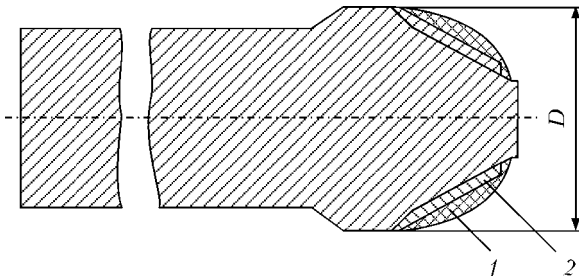


Рис. 2. Схемы разделки и наплавки штоков DN 50: 1 — наплавленный металл до механической обработки; 2 — то же после механической обработки

слоя $\delta = 1...6$ мм, ширина — $b = 4...50$ мм. При использовании этой технологии снижаются затраты на присадочные материалы, обеспечиваются высокая производительность, хорошее качество наплавленного металла, значительно облегчаются условия труда и достигается увеличение ресурса арматуры [4].

Для плазменно-порошковой наплавки уплотнительной поверхности штоков используют схему, представленную на рис. 2. Для предотвращения стекания наплавленного слоя и качественного формирования наплавленного валика заготовка штока под наплавку имеет выступ диаметром D и длиной $5...7$ мм. Форма поперечного сечения валика при оптимальных условиях наплавки напоминает лежащую каплю.

По сравнению с ручной многослойной наплавкой, плазменно-порошковая наплавка примерно в два раза уменьшает расход присадочного материала.

Помимо конической уплотнительной поверхности на штоках износу подвергается также цилиндрическая контактная поверхность. Как показала проверка эксплуатационной стойкости арматуры в производственных условиях, доля поврежденных штоков по этой поверхности достигает 15% [5]. Применяемые в настоящее время способы упрочнения: азотирование, борирование, хромирование, газотермическое или электродуговое напыление не в полной мере отвечают требованиям современного арматуростроения.

Хорошие результаты и в этом случае дает плазменно-порошковая наплавка. Наплавку цилиндрических поверхностей штоков производят по винтовой линии в один слой порошками на основе никеля, кобальта и железа.

Важным технологическим параметром при наплавке цилиндрических деталей по винтовой линии является величина смещения плазмотрона с зенита [4]. Проведенные исследования показали, что эта величина возрастает с увеличением диаметра заготовки и скорости наплавки (рис. 3). Причем увеличение диаметра расширяет диапазон оптимальных значений смещения. С повышением скорости наплавки формирование валиков становится более чувствительным к изменению вели-

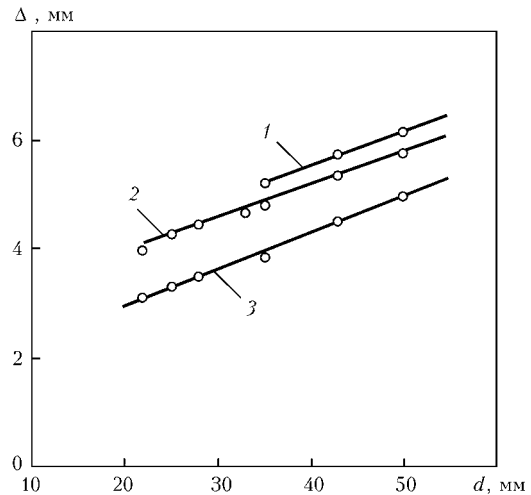


Рис. 3. Влияние диаметра заготовки d и скорости наплавки на величину смещения ΔZ плазмотрона с зенита: 1 — 7; 2 — 5; 3 — 3,6 мм

чины смещения, так как при этом соответственно увеличивается ток и подача порошка, а, следовательно, и длина сварочной ванны. Уменьшение смещения ухудшает формирование и приводит к увеличению проплавления.

Штоки диаметром $25...30$ мм наплавляют в один слой, без предварительного подогрева, при производительности 3 кг/ч. Более крупные детали можно наплавлять с производительностью до 5 кг/ч. Наплавляемая поверхность заготовки штока располагается параллельно срезу сопла плазмотрона на расстоянии $7...9$ мм. Расход газа поддерживают в пределах: плазмообразующего и транспортирующего — по $1,5...2,0$, защитного — $8...10$ л/мин. Ток дуги, подача порошка, скорость наплавки и смещение с зенита выбирают таким образом, чтобы обеспечить требуемые размеры валика и хорошее формирование наплавленного слоя (рис. 4).

В таблице приведены основные параметры режима плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей штоков вентиля DN 40 и DN 50, а на рис. 5 показаны наплавленные руч-

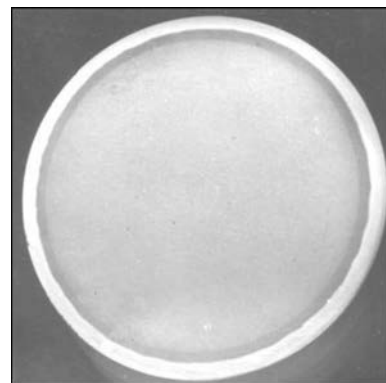


Рис. 4. Макрошлиф поперечного сечения цилиндрической части штока задвижки DN 50, наплавленного плазменно-порошковым способом



Рис. 5. Заготовки штоков вентилей DN 50, наплавленные ручным электродуговым (а) и плазменным (б) способами наплавки

Основные параметры режима плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей штоков вентилей DN 40 и DN 50

Диаметр штока, мм	Ток наплавки, А	Расход порошка, г/мин	Смещение плазмотрона, мм	Время одного оборота, мин
40	160	35	5,0	0,68
50	180	40	6,5	1,00

ным дуговым и плазменно-порошковым способами заготовки штоков.

В производственных условиях полуавтоматическую наплавку штоков выполняют на установке, смонтированной на базе аппарата А1756 (конструкция ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона).

В состав установки (рис. 6) входят: аппарат А1756, манипулятор, станина, шкаф управления и источник питания ВДУ-504. Манипулятор состоит из станины, редуктора с электродвигателем, пневмопатрона и токоподвода. В исходном положении пневмопатрон разжат, а манипулятор наклонен в сторону аппарата.

Основные элементы технологии плазменной наплавки: автоматическое зажатие заготовки, перемещение манипулятора с помощью пневмомеханической системы под плазмотрон в рабочее положение и автоматическое включение вращения заготовки и возбуждения плазменной дуги. По окончании наплавки и подачи команды «Стоп» осуществляют автоматическую заварку кратера, завершение процесса наплавки и возвращение манипулятора в исходное состояние. После наплавки партию деталей помещают в печь и производят термообработку.

При плазменной наплавке с малым проплавлением основного металла уже на расстоянии 0,5...1,0 мм от линии сплавления достигается заданная твердость наплавленного металла [3]. Для обеспечения высокой работоспособности деталей после механической обработки достаточно иметь слой наплавленного металла толщиной 1,8...2,5 мм. Практически эту толщину выдерживают в пре-

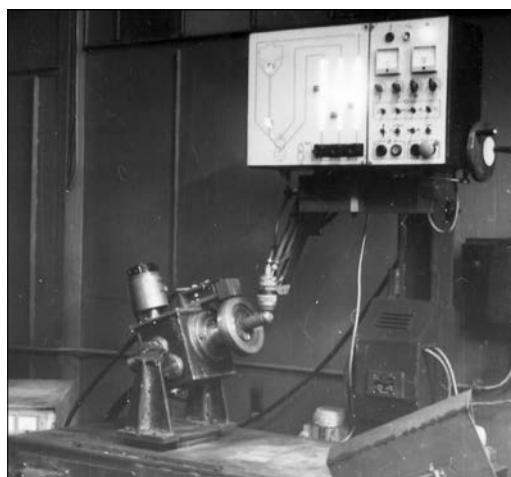


Рис. 6. Установка для наплавки уплотнительных поверхностей штоков вентилей

делах 2,0...2,5 мм. Разброс значений твердости металла на одной заготовке не превышает *HRC* 5.

Механизация наплавочного процесса с применением высокоэффективной защиты наплавленного металла аргоном позволила значительно уменьшить вероятность образования дефектов (поры, шлаковые включения, несплавления), свойственных ручной электродуговой наплавке штучными электродами и механизированной дуговой наплавке порошковыми проволоками.

Разработана технология автоматизированной плазменной наплавки порошком сплава на основе железа 15X19N9M4C5ГЗД уплотнительных и цилиндрических поверхностей штоков. Металл, наплавленный этим порошком, обладает необходимыми эксплуатационными свойствами и по сравнению с ранее применяемыми для этой цели никелевыми сплавами имеет более низкую цену. Показано, что плазменно-порошковая наплавка обеспечивает получение необходимого состава наплавленного металла уже в первом слое. Она также обеспечивает отличное формирование и высокое качество наплавленного металла.

1. Химическая макронеоднородность металла, наплавленного различными электродными материалами / В. Б. Еремеев, Ю. В. Стреляный, В. А. Корбут, Л. В. Песня // Свойства и испытания наплавленного металла: Теоретические и технологические основы наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 36–42.
2. Степин В. С., Старченко Е. Г. Применение дисперсионно-твердеющих Cr–Ni–Si-сталей для элементов затворов и наплавки уплотнительных поверхностей арматуры ТЭС и АЭС // Арматуростроение. — 2010. — № 3. — С. 66–69.
3. Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Свойство сплавов на основе железа для плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей арматуры // Автомат. сварка. — 2011. — № 9. — С. 31–35.
4. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнология, 2007. — 296 с.
5. Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменно-порошковая наплавка в арматуростроении. — Киев: Екотехнология, 2007. — 63 с.

Поступила в редакцию 31.01.2013



УДК 621.791:669.14.15

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. КОЛОМИЙЦЕВ

ПАО «ММК им. Ильича». 87504, г. Мариуполь, ул. Левченко, 1.

E-mail: natalya.rassokhina@ilyichsteel.com

Опыт эксплуатации морских паромов свидетельствует о неравномерной общей коррозии корпусов в области сварных соединений. Целью данной работы было исследование коррозионной стойкости судокорпусных сталей и их сварных соединений применительно к условиям эксплуатации паромов серии «Сахалин» второго поколения. Методика исследования предусматривала оценку коррозионных характеристик судокорпусных материалов в различных условиях: определение стационарных электродных потенциалов и скорости общей коррозии низколегированных судокорпусных сталей, исследование коррозионной стойкости сварных соединений этих сталей в быстро движущейся морской воде. Полученные результаты позволяют рекомендовать в качестве основного металла для корпусов паромов серии «Сахалин» второго поколения следующие стали: для ледового пояса — стали марок 15ГБ и 10ГНБ, для наружной обшивки подводной части корпуса, второго дна и переборок — стали марок А27 и Д32 по ТУ 14-1-4264–87. Сварку сталей 15ГБ, 10ГНБ и А27 следует выполнять как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами. Сталь Д32 может свариваться безникелевыми материалами. Библиогр. 10, табл. 6, рис. 1.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, судокорпусные стали, сварные соединения, электродные потенциалы, морская вода, продолжительность испытаний

За последние десятилетия условия эксплуатации судов значительно ужесточились. Возросла скорость движения, расширилась география и интенсивность их плавания. К таким судам, в частности, относятся паромы серии «Сахалин», эксплуатирующиеся в Татарском проливе. Корпуса паромов, изготовленные из марганцовистых сталей 09Г2 и 10Г2С1Д (ледовый пояс), подвержены неравномерной коррозии, особенно в околосварной зоне. Это приводит к необходимости подварки поврежденных мест, замене листов обшивки, что увеличивает продолжительность и стоимость доковых ремонтов, снижая эффективность эксплуатации.

Поскольку корпуса судов более 70 лет изготавливаются сварными, а не клепаными и коррозионная стойкость сварных соединений очень часто значительно уступает коррозионной стойкости основного металла, возникает необходимость коррозионных испытаний сварных соединений.

Имеется достаточно обширный материал по коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных свариваемых корпусных сталей в морской воде [1–5].

Коррозия стали 09Г2 характеризуется значительной неравномерностью поражений поверхности. Средняя скорость коррозии составляет 0,16...0,25 мм/год. С увеличением скорости течения морской воды до 10 м/с в районах с умеренным климатом скорость коррозии низколеги-

рованных сталей может возрастать до 1 мм/год [3, 4].

Коррозионный износ листов наружной обшивки корпусов паромов «Сахалин» составлял 0,3...0,5 мм/год. Наибольшее относительное утонение наблюдалось у листов днищевой и скуловой обшивки. Значительные коррозионные разрушения имели место в районах монтажных швов, выполненных ручной сваркой, а также в местах пересечения сварных швов и в районе отстойной цистерны.

Усиленную избирательную коррозию в виде борозд вдоль сварных швов (с обеих сторон) наблюдали в металле ЗТВ пазовых, стыковых швов и швов приварки основного набора — до 1 мм/год, в ряде случаев были сквозные прорывания (свищи), которые хорошо видны на рисунке. Бороздковые разрушения металла ЗТВ являются следствием усиленной коррозии анодной (подкаленной) зоны, примыкающей к сварному шву [4].

Из-за усиленного коррозионного износа наружной обшивки паромов «Сахалин» через 8–10 лет эксплуатации приходилось проводить замену листов общей площадью до 1800 м² и подварку сварных швов до 2000 м.

Причинами повышенного коррозионного износа подводной части паромов «Сахалин» являются:

— неэффективность рекомендованных средств противокоррозионной защиты при эксплуатации в ледовых условиях;



Коррозионные повреждения (свищи) наружной обшивки подводной части паромов «Сахалин» первого поколения

— недостаточная коррозионно-эрозионная стойкость сталей 10Г2С1Д, 10ХСНД и особенно 09Г2.

Одним из путей решения данной проблемы является применение новых корпусных материалов с повышенной коррозионной стойкостью, а также строгое соблюдение технологии сварочных работ, включая выбор сварочных материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование коррозионной стойкости новых и существующих корпусных сталей и их сварных соеди-

нений, а также выбор оптимального сочетания основных и сварочных материалов для повышения стойкости (долговечности) корпусов паромов «Сахалин» второго поколения. При выборе низколегированных корпусных сталей исходили из того, что их коррозионная стойкость должна превышать коррозионную стойкость стали марки 09Г2, при этом стойкость сварных соединений должна быть на уровне стойкости основного металла, т. е. необходимо оптимальное сочетание марок стали, сварочных материалов и технологии их сварки.

Для исследования коррозионной стойкости основного металла и сварных соединений изготовили стандартные по ОСТ 5.9255–76 [6] сварные образцы размерами (10...14)×80×200 мм из сталей марок 09Г2, А27, Д32, 15ГБ, 10ХСНД, 10ГНБ.

Стали марок 09Г2, А27, 15ГБ прошли нормализацию, Д32 (ТУ 14-1-4264–87) [7], 10ХСНД, 10ГНБ (ТУ 14-1-4603–89) [7] — закалку с отпуском.

Химический состав и механические свойства исследуемых сталей представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Сварные соединения выполняли ручной, полуавтоматической и автоматической сваркой с применением безникелевых и никельсодержащих сварочных материалов. Сварочные материалы и режимы сварки приведены в табл. 3.

Каждый вариант марки стали, способа сварки, сварочного материала представлен тремя образцами. Исследования включали:

определение стационарного электродного потенциала основного металла и показателей скорости коррозии массовым методом в спокойной морской воде;

определение показателей коррозии сварных соединений в быстродвижущейся синтетической морской воде (СМВ) профилографированием.

Таблица 1. Химический состав корпусных сталей, мас. %

Марка стали (категория), ГОСТ, ТУ	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	Al	Ti	Nb
09Г2 ГОСТ 5521–93	0,10	1,65	0,32	0,022	0,032	0,03	0,02	0,05	0,014	—	—
Д32 ТУ 14-1-4264-87	0,09	1,24	0,28	0,035	0,023	0,20	0,11	0,30	0,050	0,017	—
15ГБ (Е36) ГОСТ 5521–93	0,16	1,30	0,31	0,012	0,017	0,08	0,06	Следы	0,021	0,009	0,020
10ХСНД (Е40) ГОСТ 5521–86	0,10	0,53	0,84	0,023	0,015	0,65	0,70	0,50	0,021	—	—
10ГНБ (Е40) ТУ 14-1-4603–89	0,10	1,37	0,33	0,005	0,02	0,77	0,05	0,12	—	—	0,034
А27 ТУ 14-1-4264–87	0,11	0,47	0,22	0,029	0,012	0,23	0,10	0,38	—	—	—



Таблица 2. Механические свойства исследуемых сталей

Марка стали (категория), ГОСТ, ТУ	Толщина листа, мм	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел теку- щества σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Работа удара KV, Дж, при T, °C		
					0	-40	-60
09Г2 ГОСТ 5521-86	15	523	363	34,0	—	62; 38; 50	—
Д32 (Е32) ТУ14-1-4264-87	20	510	345	27,0	—	180; 190; 180	—
15ГБ ГОСТ 5521-86	16	517	365	33,6	—	62; 38; 50	—
10ХСНД ГОСТ 5521-86	32	540	405	31,6	—	74; 69; 64	—
10ГНБ ТУ14-1-4603-89	10	570	468	29,3	—	—	215; 251
A27 ТУ14-1-4264-87	18	435	295	35,0	124; 103	—	—

Таблица 3. Сварочные материалы и режимы сварки

Способ сварки	Сварочные материалы	Диаметр электрода, мм	Режимы сварки		
			$I_{св}$, А	U_d , В	$v_{св}$, м/ч
Ручная	Электроды: ИТС-4 С, УОНИ-13/45	4	140...160	—	—
	Э-138/50Н	5	180...200	—	—
Полуавтоматическая в CO ₂	Сварочная проволока марок Св-08Г2С, Св-08ГСНТ	1,2	140...160	22...24	—
	Св-08ГСМТ	1,6	180...200	22...24	—
Автоматическая под флюсом	Сварочная проволока марок Св-08А, Св-10ГН, флюс ОСЦ-45	5	850...900	40...42	28...30

Определение стационарного электродного потенциала проводили в спокойной СМВ океанского состава [9] на образцах размером 5×30×50 мм. Замеры проводили с применением цифрового вольтметра Ц-1413, в качестве электрода сравнения использовали насыщенный каломельный электрод, а затем результаты замеров пересчитывали относительно водородного электрода.

Определение скорости коррозии в спокойной СМВ (база испытаний 3000 ч) проводили массовым методом. Затем, учитывая относительно равномерный характер коррозии данных сталей, пересчитывали в глубинный показатель и усредняли по трем образцам.

Результаты замеров потенциалов и скорости коррозии низколегированных сталей представлены в табл. 4.

Как видно из таблицы, значения электродных потенциалов сталей 10ХСНД, 10ГНБ, 15ГБ, А27, Д32 близки между собой и составляют от -0,45 до -0,48 В, а стали 09Г2 более отрицательны — от -0,48 до -0,50 В. Скорости коррозии распределяются примерно таким же образом, а именно: у сталей 15ГБ, 10ХСНД, 10ГНБ глубинный показатель — 0,069...0,071 мм/год, у стали 09Г2 —

Таблица 4. Стационарные электродные потенциалы и скорости коррозии исследуемых сталей в спокойной среде (СМВ)

Марка стали	Стационарный электродный потенциал φ , В	Глубинный показатель скорости коррозии I , мм/год
09Г2	-0,48...-0,50	0,074
A27	-0,45...-0,46	—
Д32	-0,45...-0,46	—
15ГБ	-0,46...-0,47	0,070
10ГНБ	-0,47...-0,48	0,071
10ХСНД	-0,45...-0,47	0,069

0,074 мм/год. Испытания в спокойной воде сталей категории А27 и Д32 не проводились.

Таким образом, на основании полученных результатов можно отметить, что стали А27, Д32, 15ГБ, 10ХСНД и 10ГНБ имеют повышенную коррозионную стойкость по сравнению со сталью 09Г2. Для сталей А27, Д32, 10ХСНД и 10ГНБ это можно объяснить более высоким содержанием в них никеля и меди. Для стали 15ГБ вопрос остался не выясненным.



Таблица 5. Максимальная и средняя скорости коррозии основного металла сварных соединений исследуемых сталей

Марка стали	Скорость коррозии I , мм/год		Показатель неравномерности коррозии
	максимальная	средняя	
09Г2	1,46	0,97	1,51
Д32	1,95	0,94	2,07
15ГБ	1,46	0,98	1,49
10ГНБ	1,06	0,62	1,71
10ХСНД	1,26	0,70	1,80
А27	2,03	1,00	2,03

Коррозионные испытания сварных образцов проводили в быстро движущейся среде в соответствии с требованиями ОСТ 5.9255–76.

Параметры испытаний: среда — СМВ, температура среды 32 ± 2 °С, скорость 10 м/с, продолжительность испытаний 1000 ч.

После испытаний поверхности образцов, подвергшихся коррозии, профилографировали методом непрерывного сканирования с применением электронно-механического профилографа ЭМП-1. Профилограммы поверхности образца снимали по четырем дорожкам в масштабе по оси абсцисс 1:1, по оси ординат 200:1.

Результаты испытаний усреднены по трем образцам и представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, значения средних скоростей коррозии основного металла сталей А27, Д32, 09Г2, 15ГБ существенно не отличаются друг от друга и составляют 0,94...1,00 мм/год при максимальной 1,49...2,03 мм/год.

Средняя скорость коррозии основного металла сталей 10ХСНД и 10ГНБ составляет 0,62...0,70 мм/год, что существенно выше коррозионной стойкости сталей 09Г2, А27, Д32, 15ГБ.

Значение показателей коррозионной стойкости различных зон сварных соединений исследованных сталей в быстро движущейся среде представлены в табл. 6.

Коррозионную стойкость зон сварных соединений оценивали относительно коррозионной стойкости основного металла, считая ее удовлетворительной, когда скорость коррозии шва или металла ЗТВ находилась в пределах 0,8...1,2 скорости коррозии основного металла [10].

На основании анализа данных табл. 6 можно отметить следующее:

коррозионная стойкость швов, выполненных безникелевыми сварочными материалами (ИТС-4С, УОНИ-13/45, Св-08Г2С, Св-08А) для всех сталей, как правило, равна или ниже коррозионной стойкости основного металла;

коррозионная стойкость швов, выполненных никельсодержащими сварочными материалами

(Э-138/50Н, Св-08ГСНТ, Св-10ГН), выше или равна коррозионной стойкости основного металла.

Рассматривая коррозионную стойкость металла ЗТВ, можно отметить, что усиленная коррозия металла ЗТВ наблюдается у стали 09Г2 для всех способов сварки. В остальных случаях коррозионная стойкость металла ЗТВ равна или выше коррозионной стойкости основного металла. Так, для сварных соединений стали марок 15ГБ и 10ГНБ наблюдается равностойкость металла ЗТВ по сравнению с основным металлом, а для сталей 10ХСНД, А27 и Д32 — повышенная коррозионная стойкость металла ЗТВ.

Таким образом, оптимальную коррозионную стойкость металл ЗТВ имеет при сварке стали Д32 безникелевыми материалами; для сталей 15ГБ и 10ГНБ при сварке как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами; для стали А27 при ручной сварке двумя видами материалов, а при автоматической сварке — безникелевой проволокой.

Из анализа данных коррозионной стойкости металла шва следует, что наибольшая однородность коррозии металла шва и основного металла отмечается в случае сочетания основного и сварочного материала с близким химическим составом. При использовании никельсодержащих сварочных материалов наиболее благоприятные результаты получены для стали марок 10ХСНД и 10ГНБ. Для стали марок 09Г2, 15ГБ, А27, Д32 лучшие результаты получены при применении безникелевых сварочных материалов.

Проводя интегральную оценку коррозионной стойкости как металла ЗТВ, так и металла шва, можно сделать заключение, что только стали А27, Д32, 15ГБ и 10ГНБ удовлетворяют требованиям равностойкости зон сварных соединений.

Учитывая требования проектантов о том, что для ледового пояса необходимы стали класса прочности 36 или 40, а для наружной обшивки подводной части — 27 или 32, для паромов «Сахалин» второго поколения были рекомендованы следующие материалы:

— для ледового пояса: стали марок 15ГБ (Е36, ГОСТ 5521–86) и 10ГНБ (Е40, ТУ 14-1-4603–89), причем автоматическая сварка может выполняться как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами, а ручная — для стали 15ГБ безникелевыми, для стали 10ГНБ никельсодержащими материалами;

— для наружной обшивки подводной части, второго дна, переборок: стали А27 и Д32, сварные соединения которых должны выполняться безникелевыми материалами. Монтажный стык ледового пояса с нижней частью судна должен выполняться безникелевыми материалами при сварке стали 15ГБ со сталями А27 и Д32 или ни-



Т а б л и ц а 6. Показатели коррозионной стойкости металла зон сварных соединений исследуемых сталей в быстродействующей среде

Марка стали	Способ сварки	Марка и тип сварочного материала	Показатель скорости коррозии зон сварного соединения I , мм/год						Показатели неравномерности коррозии		
			основной металл		ЗТВ		металл шва		$I_{\text{ом}}^{\text{max}}$	$I_{\text{ЗТВ}}^{\text{ср}}$	$I_{\text{ш}}^{\text{ср}}$
			max	средний	max	средний	max	средний	$I_{\text{ом}}^{\text{ср}}$	$I_{\text{ом}}^{\text{ср3}}$	$I_{\text{ом}}^{\text{ср}}$
09Г2	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	1,24	0,83	1,49	1,18	0,74	0,53	1,49	1,42	0,64
			1,31	0,86	1,46	1,16	0,71	0,41	1,52	1,35	0,48
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,70	1,18	1,66	1,28	1,74	1,32	1,44	1,08	1,12
			1,28	0,94	1,82	1,55	0,38	0,25	1,36	1,65	0,27
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,50	1,01	1,55	1,14	1,66	1,21	1,49	1,13	1,20
			1,71	0,98	1,48	1,13	1,67	0,88	1,74	1,15	0,90
Д32	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	2,07	0,98	1,24	0,74	1,98	1,15	2,11	0,76	1,17
			1,86	0,99	1,29	0,83	0,90	0,51	1,88	0,84	0,52
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,78	0,86	1,25	0,81	1,62	0,81	2,07	0,94	0,94
			2,07	0,94	0,84	0,60	0,92	0,48	2,20	0,64	0,51
А27	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	2,22	1,20	1,36	0,93	2,51	1,14	1,85	0,78	0,95
			1,97	1,03	1,07	0,79	0,98	0,57	1,91	0,77	0,55
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,93	1,01	1,18	0,73	2,70	1,78	1,91	0,72	1,76
			2,10	0,96	1,09	0,70	1,32	0,73	2,18	0,73	0,77
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,75	0,83	1,24	0,79	1,78	0,83	2,11	0,95	1,00
			3,19	0,99	1,15	0,74	1,39	0,11	2,21	0,75	0,72
10ГНБ	Ручная	УОНИ-13/45	1,03	0,55	0,77	0,57	1,30	0,77	1,81	1,04	1,40
15ГБ (Е36)	Ручная	ИТС-4С4 Э-138/50Н	1,24	0,81	1,04	0,83	1,14	0,78	1,53	1,02	0,96
			1,25	0,88	0,98	0,72	0,79	0,53	1,42	0,82	0,60
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,18	0,82	0,90	0,72	1,61	1,25	1,44	0,88	1,52
			1,75	1,30	1,49	1,25	0,98	0,77	1,35	0,96	0,59
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,58	1,14	1,42	1,02	1,81	1,25	1,39	0,89	1,10
			1,73	0,94	1,41	1,10	1,35	0,98	1,84	1,17	1,04
10ГНБ (Е40)	Ручная	Э-138/50Н	1,19	0,74	0,95	0,67	1,17	0,74	1,61	0,91	1,00
	Полуавтоматическая	Св-08ГСМТ	1,00	0,56	0,77	0,54	1,15	0,86	1,79	0,96	1,54
	Автоматическая	Св-10ГН Св-10ГН	1,08	0,59	0,78	0,54	1,20	0,66	1,83	0,92	1,12
			0,95	0,57	0,55	0,42	0,84	0,53	1,67	0,74	0,93
10ХСНД (Е40)	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	1,24	0,65	0,69	0,39	1,02	0,63	1,91	0,60	0,97
			1,26	0,72	0,73	0,43	0,89	0,53	1,75	0,60	0,74
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,25	0,72	0,97	0,51	1,32	0,96	1,74	0,71	1,33
			1,29	0,70	0,70	0,51	0,77	0,58	1,84	0,73	0,83
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,41	0,76	0,58	0,43	1,27	0,94	1,86	0,57	1,24
			1,16	0,65	0,58	0,43	0,64	0,51	1,78	0,66	0,78

кельсодержащими при сварке стали 10ГНБ с А27 и Д32.

В дальнейшем целесообразно провести исследования коррозионной стойкости сварных соединений сталей в таком сочетании, как сталь Д32 со сталью марок 15ГБ и 10ГНБ.

Выводы

1. Стали 09Г2, 10Г2С1Д (ГОСТ 5521–86) в составе наружной обшивки корпуса паромов «Сахалин» первого поколения имеют недостаточную коррозионную стойкость, что приводит к необходимос-

ти замены через 8-10 лет до 2000 м² обшивки на каждом пароме.

2. Из исследованных марок сталей коррозионную стойкость, превышающую стойкость стали 09Г2, имеют стали А27, Д32 (ТУ 14-1-4264–87), Е36 (15ГБ), 10ХСНД и 10ГНБ.

3. С позиции стойкости к коррозии сварных соединений для работы в составе корпуса паромов «Сахалин» могут быть рекомендованы следующие материалы:

— для ледового пояса — стали 15ГБ (Е36, ГОСТ 5521-86) и 10ГНБ (Е40, ТУ 14-1-4603–89);



— для наружной обшивки подводной части корпуса, второго дна и переборок — стали А27 и Д32 по ТУ 14-1-4264-87.

4. Сварка сталей 15ГБ, 10ГНБ и А27 при ручном и автоматическом способах может выполняться как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами. Сталь Д32 должна свариваться безникелевыми материалами.

5. Изложенные выше рекомендации по применению проката из конкретных марок стали (А27, Д32 и Е36) по ГОСТ 5521-86 и ТУ 14-1-4264-87 относятся также ко всем маркам в пределах соответствующих класса прочности (27, 32 и 36).

1. Богорад И. Я., Искра Е. В. Коррозия и защита морских судов. — Л.: Судостроение, 1973. — 392 с.
2. Коррозия. Справочник / Под ред. Л. Л. Шрайера. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.

3. Коррозия и защита судов. Справочник / Под ред. Е. Я. Люблинского и В. Д. Пирогова. — Л.: Судостроение, 1987. — 376 с.
4. Черток Ф. К. Коррозионный износ и долговечность сварных соединений. — Л.: Судостроение, 1977. — 144 с.
5. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И. В. Семеновой. — М.: Физматлит, 2002. — 336 с.
6. ОСТ 5.9255-76. Металлы и покрытия для судостроения. Методы ускоренных коррозионных испытаний.
7. ТУ 14-1-4264-87. Прокат толстолистовой для судостроения.
8. ТУ 14-1-4603-89. Прокат толстолистовой свариваемый корпусной из низколегированной стали для конструкций судов и морских технических сооружений.
9. Томашов Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 591 с.
10. Маркович Р. А. Ускоренные коррозионные испытания сварных соединений // Тр. ЦНИИ МФ. — 1980. — Вып. 257. — С. 25-36.

Поступила в редакцию 15.10.2012

Конференция «Ti-2013 в СНГ»

26–29 мая 2013

Украина, Донецк



Межгосударственная ассоциация «Титан» и Национальная академия наук Украины приглашают принять участие в XI Международной конференции «Ti-2013 в СНГ».

Тематика конференции:

Обзор рынка титана в странах СНГ и мире

Национальные программы развития отрасли

Динамика развития сфер применения титана

Новые достижения в области металловедения и металлургии титана

Анализ рынка ферротитана

www.titan-association.com



УДК 621.793.927.7:669.018.25

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТОЛЩИНЫ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ

Ч. В. ПУЛЬКА, В. С. СЕНЧИШИН, В. Я. ГАВРИЛЮК, М. С. БАЗАР

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя.

46001, Тернополь, ул. Русская, 56. E-mail: v_gavryliuk@mail.ru

При изготовлении и ремонте режущего инструмента сельхозтехники находит применение индукционная наплавка. Наплавленные слои повышают износостойкость инструмента. При этом важным является учет толщины наплавленного слоя. В статье представлены результаты исследований геометрических характеристик слоя металла, наплавленного индукционным способом износостойкими порошкообразными материалами по четырем технологическим схемам. Показано, что применение экранов, горизонтальной вибрации и вращения наплавляемой детали повышает стабильность геометрических характеристик слоя наплавленного металла на 22 % по сравнению с традиционной индукционной наплавкой. Разработана методика для измерения геометрических характеристик слоя металла, наплавленного индукционным способом, которая позволяет повысить точность измерения, а также контролировать стабильность толщины слоя при разработке новых технологических процессов индукционной наплавки тонких плоских деталей. Библиогр. 8, рис. 3.

Ключевые слова: индукционная наплавка, индуктор, режимы наплавки, тепловой и электромагнитный экраны, толщина наплавленного слоя, вращение, горизонтальная вибрация

В сельхозмашиностроении индукционную наплавку используют для повышения износостойкости лемехов плугов, культиваторов, ножей-ботворезов и т. д. [1, 2]. Особую сложность представляет задача наплавки тонких стальных дисков — ножей-ботворезов свеклоуборочных комбайнов зубчатой формы, относительно больших размеров и сложной конфигурации (рис. 1). Диаметр диска ножа-ботвореза составляет 420 мм, ширина наплавленного слоя 30 мм, толщина основного и наплавленного металла соответственно 3 и $1^{+0,5}_{-0,2}$ мм [3]. При этом ширина зоны наплавки больше высоты самого зуба.

Как правило, механическая обработка слоев, наплавленных индукционным способом на рабочие органы сельскохозяйственных машин, не производится. По этой причине важное значение име-

ет выбор таких режимов наплавки, которые бы обеспечивали заданные значения геометрических характеристик наплавленных слоев непосредственно после наплавки. В первую очередь это касается толщины наплавленного слоя металла, от которой зависит износостойкость и самозатачивание наплавленных рабочих органов. Кроме того, при разработке новых технологических процессов с использованием индукционной наплавки [3] очень часто необходимо контролировать и сравнивать влияние того или иного технологического процесса наплавки на геометрические характеристики наплавленного слоя металла.

Целью данной работы является исследование влияния технологических схем индукционной наплавки износостойкими порошкообразными сплавами на размеры слоев наплавленного металла.

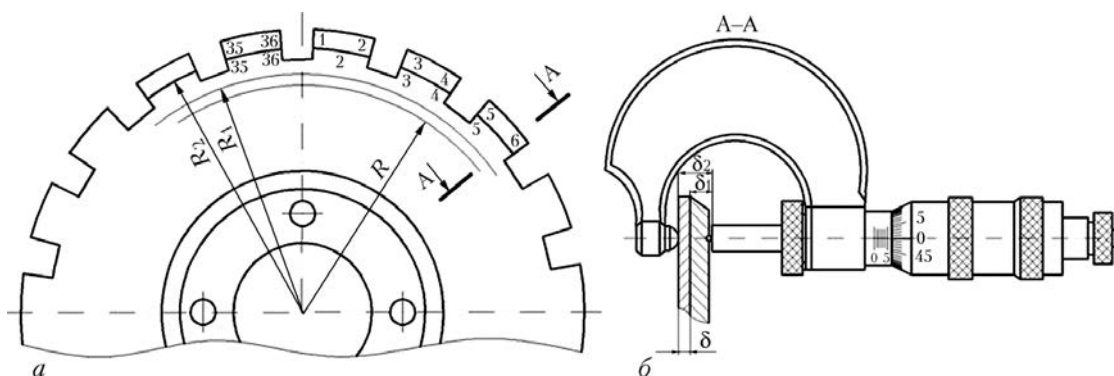


Рис. 1. Схема конфигурации ножа-ботвореза свеклоуборочного комбайна (а), сечение ножа по А–А с устройством для замера толщины наплавленного слоя (б)

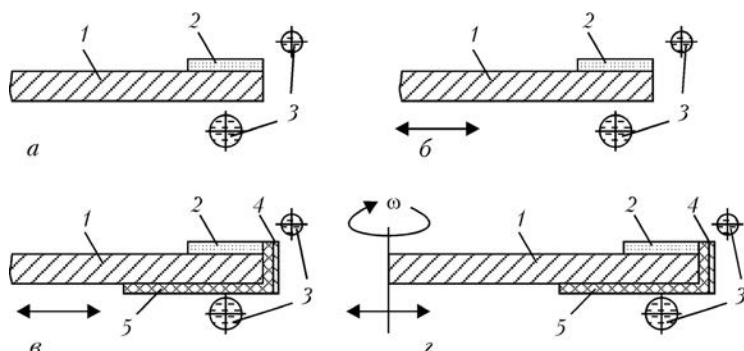


Рис. 2. Схемы индукционной наплавки, используемые при проведении исследований: *а* — без вибрации наплавляемой детали; *б* — с горизонтальной вибрацией наплавляемой детали; *в* — с горизонтальной вибрацией наплавляемой детали с использованием теплового и электромагнитного экранов; *г* — то же, но с дополнительным вращением наплавляемой детали; 1 — деталь; 2 — слой наплавленного металла; 3 — двухвитковый кольцевой индуктор; 4, 5 — соответственно электромагнитный и тепловой экраны. Стрелками показано направление приложения вибрации и вращения

Поскольку существующие методы и приборы для оценки геометрических характеристик наплавленных слоев сложны в конструктивном исполнении [4] и дают большую погрешность при измерении, в работе уделено внимание современным устройствам и методикам измерений, которые позволяют замерять толщину наплавленного металла с большей точностью и меньшей погрешностью.

В данной работе исследованы геометрические характеристики наплавленных слоев для четырех технологических схем индукционной наплавки тонких дисков (рис. 2, *а-г*) [5, 6]. Толщину наплавленного слоя изучали по следующей методике.

На диске с помощью специального устройства с шариком на торце выполняли полусферические выемки в 36 точках по окружности радиусом $R_2 = 202,5$ мм, как показано на рис. 1, *а*, со стороны, противоположной наплавляемой поверхности диска (см. рис. 1, *б*). Затем с помощью микрометра, а также другого шарика аналогичного диаметра, служащего опорой для губок микрометра (одна губка которого полусферическая, а другая — с плоской поверхностью), измеряли толщину δ_1 основного металла до наплавки (см. рис. 1, *б*). Шарик необходим для повышения точности измерения толщины наплавленного металла в каж-

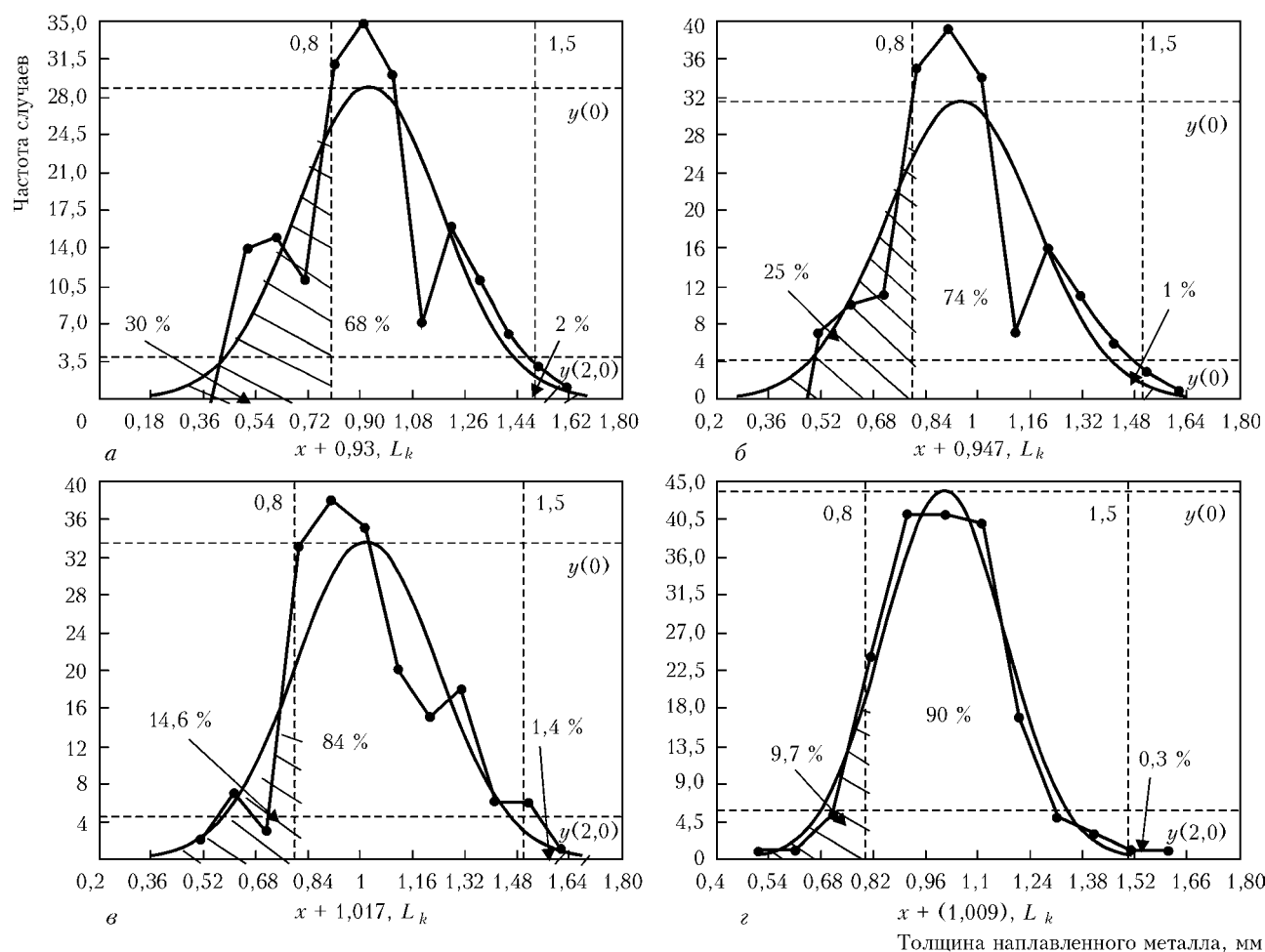


Рис. 3. Кривые нормального распределения толщины слоя металла (сплошная кривая $y(x)$) и кривые рассеяния фактических размеров (ломаная кривая y_k) по схемам соответственно рис. 2, *а-г*



дой из 36 точек, поскольку при индукционной наплавке тонких дисков на поверхности, противоположной наплавляемой, образуется окалина, при измерении микрометром толщины наплавленного металла без шариков могут возникнуть большие погрешности.

Толщину δ наплавленного слоя определяли как разницу толщин наплавленного диска δ_2 и основного металла δ_1 . При исследовании использовали диски, изготовленные из стали ВСт3 и наплавленные индукционным способом порошкообразным сплавом ПГ-С1 (сормайт-1). Для наплавки использовали высокочастотный генератор ВЧГ6-60/0,44.

Обработку результатов измерений толщины наплавленного слоя производили с помощью методов математической статистики [7, 8] по специально разработанному алгоритму.

Кривые рассеяния фактических размеров и кривые нормального распределения толщины наплавленного слоя для исследуемых схем индукционной наплавки приведены на рис. 3. Незащищенные области, находящиеся под кривой нормального распределения, теоретически представляют собой процентную долю деталей, у которых толщина наплавленного металла находится в поле допуска.

При индукционной наплавке по схеме рис. 2, *з* в поле допуска попадают 90 % замеров толщин наплавленного металла, что на 22 % больше, чем при наплавке по схеме рис. 2, *а*. В этом случае более равномерная толщина наплавленного слоя достигается за счет совместного использования горизонтальной вибрации, тепловых и электромагнитных экранов, а также центробежных сил, обеспечивающих равномерное распределение жидкого металла в зоне наплавки.

Выводы

1. Разработанная методика для измерения геометрических характеристик слоя металла, наплавленного индукционным способом, позволяет повысить точность измерения, а также контролировать стабильность толщины слоя при разработке новых технологических процессов и режимов индукционной наплавки тонких плоских деталей.

2. Технология индукционной наплавки ножевых ботворезов с горизонтальной вибрацией наплавляемой детали с использованием теплового и электромагнитного экранов и дополнительного вращения наплавляемой детали повышает стабильность геометрических характеристик слоя наплавленного металла на 22 % по сравнению с традиционной индукционной наплавкой без использования экранов и дополнительного механического воздействия на кристаллизующийся наплавленный металл.

1. *Рябцев И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
2. *Сенчишин В. С., Пулька Ч. В.* Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин // Автомат. сварка. — 2012. — № 9. — С. 48–54.
3. *Пулька Ч. В.* Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків: Дис. д-ра техн. наук. — К., 2006. — 368 с.
4. *Болъ А. А.* Развитие индукционной наплавки в сельскохозяйственном машиностроении // Технология. — 1984. — Вып. 3. — С. 38.
5. *Влияние вибрации на структуру и свойства металла, наплавленного индукционным методом* / Ч. В. Пулька, О. Н. Шаблій, В. С. Сенчишин и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 1. — С. 27–29.
6. *Пулька Ч. В., Гаврилюк В. Я., Сенчишин В. С.* Совершенствование оборудования и технологии индукционной наплавки // Свароч. пр-во. — 2013. — В печати.
7. *Колкер Я. Д.* Математический анализ точности механической обработки деталей. — Киев: Техніка, 1976. — 200 с.
8. *Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И.* Планирование эксперимента в технике. — Киев: Техніка, 1984. — 200 с.

Поступила в редакцию 30.01.2013

Корпорация ВСМПО-АВИСМА обретает новых партнеров в медицинском сообществе

Корпорация ВСМПО-АВИСМА приняла участие в крупнейшей медицинской выставке «American Academy of Orthopaedic Surgeons», которая состоялась с 19 по 23 марта в Чикаго. Впервые в этом году корпорация разместила в павильонах всемирного салона свой стенд, представив образцы титановых прутков, труб, листов и плит, изготовленных в соответствии с международным стандартом, предъявляемым к производителям медицинских изделий. Во время работы выставки состоялось подписание трехлетнего контракта на поставку титанового проката для компании «Orchid Orthopedic Solutions» — крупнейшего производителя имплантатов.

ЮБИЛЕЙНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

12 марта 2013 г. исполнилось 150 лет со дня рождения гениального ученого, выдающегося общественного деятеля и организатора науки, первого президента Украинской академии наук академика Владимира Ивановича Вернадского. В этот день состоялась юбилейная сессия Общего собрания Национальной академии наук Украины, посвященная чествованию В. И. Вернадского. На юбилейную сессию были приглашены высшие должностные лица государства и научная общественность.

Программа сессии включала вступительное слово президента НАН Украины академика НАН Украины Б. Е. Патона, доклад главы Комиссии НАН Украины по научному наследию академика В. И. Вернадского академика НАН Украины А. Г. Загороднего, выступление генерального директора Национальной библиотеки Украины им. В. И. Вернадского НАН Украины академика НАН Украины А. С. Онищенко, выступление директора Института общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского НАН Украины академика НАН Украины С. В. Волкова, а также вручение Золотых медалей им. В. И. Вернадского НАН Украины академику НАН Украины Н. В. Багрову и академику РАН Н. П. Лавёрову, телемост с антарктической станцией Украины им. В. И. Вернадского, премьеру видеофильма о жизни и деятельности академика В. И. Вернадского.



Владимир Иванович Вернадский — гениальный всемирно известный ученый, выдающийся общественный деятель, организатор и первый президент Украинской академии наук родился 12 марта 1863 г. в Петербурге. Основные знания Владимир Иванович получил на естественном отделении физико-математического факультета Петербургского университета.

Владимир Иванович принадлежит к выдающимся фигурам XX столетия. Его всесторонняя деятельность оставила глубокий след в истории мировой науки. Академик В. И. Вернадский обогатил естественные науки глубокими идеями, которые стали основой для новых ведущих направлений в современной геологии, минералогии, гидрогеологии; обосновал ряд научных проблем, имеющих практическое значение.

Владимир Иванович — основоположник науки о биосфере и ноосфере, он основал всемирно известные школы минералогов и геохимиков, был первым исследователем основных биогеохимических закономерностей строения и состава Земли. Особое внимание уделял вопросам химического состава земной коры, атмосферы и гидросферы.

Работы ученого послужили платформой для новых наук и научных направлений в геохимии, биогеохимии, космохимии, радиохимии, радиогеологии, гидрогеологии. Он является автором свыше 400 научных работ.

С именем Владимира Ивановича Вернадского тесно связано основание Украинской академии на-

ук. Он раскрыл весомое значение академической формы организации национальной науки в новых условиях, когда возросло значение развития естественных наук для экономического прогресса государства и гуманитарных — для национального самоутверждения. Такой взгляд объективно был нацелен на утверждение Украины как независимого государства.

Владимир Иванович разработал концептуальные тезисы относительно создания академии как общенационального масштабного научного центра, мощного объединения государственных научных учреждений. Среди них: библиотека, архив, геологические учреждения, национальные музеи, институты для природоведческих и гуманитарных наук. При его непосредственном участии подготовлен первый проект Устава Украинской академии наук. Он же стал первым президентом академии. Благодаря В. И. Вернадскому уже на начальном этапе создания и функционирования Украинской академии наук был заложен мощный потенциал для дальнейшего развития академической науки в Украине. Начиная с 1973 г. в НАН Украины учреждена Премия им. В. И. Вернадского.

Владимир Иванович Вернадский был и навсегда останется в истории человечества гениальным ученым, не только человеком Земли и Космоса, а большим Сыном украинского народа, Человеком, чье имя навечно вписано в историю Национальной академии наук Украины.

Пресс-релиз

Правила для авторов журнала «Автоматическая сварка»

*Журнал «Автоматическая сварка» издается ежемесячно
с 1948 г. на русском языке, ISSN 005-111X.*

*Перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка» издается
под названием «The Paton Welding Journal» с 2000 г., ISSN 0957-798X.*

Публикация статей в журнале бесплатная, гонорар не выплачивается.

1. Стандартный объем статьи 8–10 страниц текста (включая таблицы, библиографический список, реферат, 5–6 рисунков, объем обзорной статьи может быть увеличен до 12–14 страниц. Текст печатается через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman, 12 кегль.

Материал должен быть изложен кратко, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте. На литературу, таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

Рисунки не следует перегружать второстепенными данными. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

Публикацию статьи ускорит представление ее в электронном виде по e-mail в формате Word for Windows. Иллюстрации представляются в отдельных файлах в формате *.tif (300 dpi) для растровой графики или *.cdr (версии не выше 11.0, 600 dpi) для векторной.

2. В статье должно быть не более 5 авторов (других, принимавших участие в работе, можно указать в сноске). В сведениях об авторах следует указывать место работы и адрес, должность, ученую степень, адрес, телефон. Кроме того, следует указать почтовый адрес организации на русском и английском языках (лучше взять с официального сайта) и адрес электронной почты одного из авторов (организации).

3. Статья должна быть дополнена рефератом и ключевыми словами (от 7 до 10). Реферат (объем 1400–1600 знаков с одним пробелом между словами) должен достаточно полно раскрывать содержание статьи. В нем должны быть отражены цели и задачи, методы, результаты, область применения, выводы.

4. Каждая статья должна быть снабжена библиографическим списком, включающим не менее 8–10 ссылок (собственные работы авторов должны составлять не более четверти списка; ссылки на источники от 2000 г. обязательны).

Цитируемая в статье литература должна быть оформлена в следующем порядке:

для книг — фамилия, инициалы автора(ов), полное название, город, издательство, год издания, общее количество страниц;

для журнальных статей — фамилия, инициалы автора(ов), название статьи, журнал, год издания, номер, том, номер или выпуск, страницы; иностранные издания приводятся на языке оригинала;

для статей в сборнике — название статьи, авторы, название сборника, номер выпуска (или тома), место издания, издательство (или издающая организация), страницы начала и конца статьи; для интернет-ссылок: название ресурса, режим доступа.

5. Рукопись статьи должна быть подписана всеми авторами (или одним автором от имени авторского коллектива). К рукописи прилагается лицензионный договор по передаче авторских прав редакции журнала на публикацию статьи. Форма договора на сайте издательства или может быть выслана редакцией по электронной почте (по запросу). Несоответствие материалов указанным требованиям (п. 1–5) может служить поводом для отказа в публикации.

6. Авторы статьи должны придерживаться принципов издательской этики издательства Elsevier, исключающие плагиат в какой бы то ни было форме. Подробно с принципами издательской этики можно ознакомиться на сайте издательства или получить по электронной почте (по запросу).

7. Авторы статьи получают без оплаты по одному экземпляру соответствующих номеров журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal» (по запросу).

Контакты редакции журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»:

тел.: (38044) 200-63-02, тел./факс: (38044) 200-82-77.

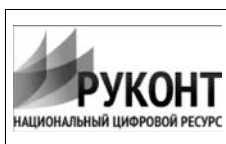
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

ПОДПИСКА — 2013 на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	2700 руб.	5400 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайтах:

www.patonpublishinghouse.com; <http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2012 гг. и текущие выпуски 2013 г.

Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
- Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
- Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
- Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
- 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию
- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

© Автоматическая сварка, 2013

Подписано к печати 13.03.2013. Формат 60Ф84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,12. Усл.-отт. 9,94. Уч.-изд. л. 10,40 + 5 цв. вклеек.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ «ASKAYNAK» ПРЕДСТАВЛЯЕТ ООО «Триада Сварка»*

Каждый раз, когда вы открываете упаковку сварочных электродов «ASKAYNAK», будьте уверены — у вас в руках высококачественный продукт, который изготовлен на высокотехнологичном оборудовании, прошел множество проверок и испытаний, одобрен и подтвержден множеством сертификатов, в том числе и системой «УКРСЕПРО». И самое важное, приобретая электроды у официального представителя или в его дилерской сети, вы заранее оградите себя от покупки некачественного товара или подделки, так как электроды этой марки поставляются исключительно через единственного официального представителя. На данный момент в качестве представителя завода по производству сварочных материалов «ASKAYNAK» в Украине выступает ООО «Триада Сварка», г. Запорожье.



Компания «ASKAYNAK», основанная в 1974 г., является совместным предприятием с «LINCOLN ELECTRIC» — мировым лидером в области проектирования, разработки и производства продукции для дуговой сварки. Партнерские отношения начались в 1992 г., когда было подписано соглашение о сотрудничестве, и «ASKAYNAK» стал эксклюзивным дистрибьютором сварочного оборудования «LINCOLN ELECTRIC» в Турции. В 1998 г. это соглашение было парафировано как полноценное партнерство с приобретением «LINCOLN ELECTRIC» 50-процентной доли компании. Это позволило укрепить позиции «ASKAYNAK» на рынке сварочных технологий и наладить тесные связи с «LINCOLN ELECTRIC». Были разработаны новые производственные мощности, созданы совместные представительства и альянсы в 21 стране мира, расширена сеть дистрибьюторов и офисов по продажам, охватывающих более 160 стран мира.

Промышленные предприятия всего мира сталкиваются с повышенными требованиями к эффективному и своевременному производству своей продукции. Под брендом «ASKAYNAK» выпускаются сварочные и наплавочные электроды, проволока для сварки в среде защитных газов (MIG/MAG) и для сварки под слоем флюса, широко применяемой в разных отраслях промышленности, в то время как продукция под брендом «КОВАТЕК» главным образом предназначена для ремонтных и восстановительных работ. В данной информационной подборке уделяется внимание материалам для наплавки и проведения ремонтно-восстановительных работ.

Электроды для наплавки

AS SD ABRA Nb — наплавочный электрод с основным покрытием. Наплавленный металл чрезвычайно стойкий к абразивному износу при контакте как с мелкими, так и с крупными (в том числе с высокой твердостью) абразивными частицами и с умеренными ударными нагрузками. Скомпактированные карбиды хрома и ниобия равномерно распределены в структуре наплавленного металла, который проявляет исключительно высокую стойкость в коррозионных средах, и показывает лучшую сопротивляемость износу в коррозионной среде, чем обычные наплавочные электроды.

Область применения. Рабочие изнашиваемые поверхности, зубья ковшей экскаваторов, землеройные машины, земснаряды, дробилки, размалывающие молоты, прокатные вальцы и пр. Не рекомендуется наплавка более чем в три слоя. В случаях, если требуется наплавка больших толщин, рекомендуется в качестве буферного слоя использовать электроды AS P 308Mn или AS P 312. Очень важно перед наплавкой в качестве буферного слоя использовать электроды AS P 308Mn, если наплавка проводится на сталь, содержащую 12...14 мас. % марганца.

AS SD ABRA Cr — наплавочный электрод с основным покрытием. Наплавленный металл чрезвычайно стойкий к износу в среде мелких и крупных абразивных частиц с очень высокой



* Статья на правах рекламы.

Марка электрода	Химический состав легирующей части наплавленного металла, мас. %		
	C	Cr	Nb
AS SD ABRA Nb	3,4	22	10
AS SD ABRA Cr	4,5	33	—

Марка электрода	Твердость наплавленного металла	Твердость карбидов
AS SD ABRA Nb	55...57	Более 1500
AS SD ABRA Cr	58...62	1400...1500

твердостью. В наплавленном металле содержится большое количество равномерно распределенных карбидов хрома.

Область применения. Рабочие части конвейеров, ковшовые транспортеры, винты экструдеров, размалывающие и измельчительные валцы, лезвия шнеков, земснаряды, прессвинты, направляющие в керамической промышленности. Не рекомендуется использовать наплавки более чем в три слоя. Рекомендуемая промежуточная температура наплавки — 300...500 °С.

Выше в таблицах представлены химический состав и твердость наплавленного металла разными электродами. Указанные выше электроды сертифицированы в системе «УКРСЕПРО».

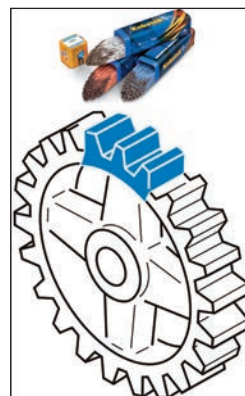
Наплавочные электроды серии КОВАТЕК — профессиональные решения для проведения ремонтно-восстановительных работ

Kobatek 382 в основном применяется для выполнения наплавки изношенных или сломанных зубьев зубчатых колес, звездочек цепной передачи и роликовых подшипников. Может использоваться при очень низких значениях сварочного тока, т. е. при пониженном тепловложении в основной металл (низкопогонной энергией), благодаря чему позволяет получать очень хорошие результаты при локальных ремонтных работах на деталях, прошедших тепловую обработку или трудносвариваемых для сварки.

Механические свойства наплавленного металла: предел текучести 640...660 МПа; предел прочности на разрыв 800...860 МПа; относительное удлинение ($L = 5d$) 20...25 %; твердость (HB) 220...260.

Рекомендуемые режимы сварки:

Диаметр×длина, мм 2,50×250; 3,25×350; 4,00×350
 Режим А, ток, А 60...80; 90...100; 125...150
 Режим Б, ток, А 40...50; 60...80; 90...120
 Масса упаковки, кг 2,5; 5; 5



Справка. Режим А применяется в случаях, когда проводят работы с массивными деталями, или в случаях, когда необходимо проводить наплавку на большие участки изношенной поверхности при условии, что изделие имеет значительную толщину и массивно. Режим Б применяется в случаях, когда необходимо проводить работы с небольшими участками во избежание перегрева и коробления поверхности. Он позволяет добиться минимального тепловложения в наплавляемый металл. К тому же при использовании режима Б происходит минимальное перемешивание наплавленного металла с основным, что позволяет добиться высоких характеристик.

Kobatek 352 применяется для ремонта трещин и мест износа колес цепной передачи рабочих машин для сложных условий эксплуатации, ведущих шестерен, гусеничных ходовых частей и корпуса ковшей, выполнения сварных соединений на этих деталях и буферного слоя шва перед выполнением твердой наплавки. Является идеальным электродом для сварки деталей из литой стали, содержащей 12...14 мас. % марганца и обладающей высокой ударной вязкостью.

Механические свойства наплавленного металла: предел текучести 640...660 МПа; относительное удлинение ($L = 5d$) 40...44 % твердость (после сварки) (HB) 160...200; твердость (после наплавки) (HB) 400...440.

Рекомендуемые режимы сварки:

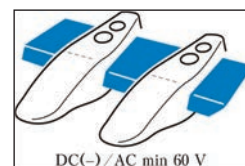
Диаметр×длина, мм 3,25×350; 4,00×350
 Режим А, ток, А 140...160; 210...240
 Режим Б, ток, А 100...160; 140...190
 Масса упаковки, кг 5; 5



Kobatek 578 при выполнении этим электродом наплавки в один слой достигается твердость наплавленного металла HRC 60-65 без образования на поверхности наплавленного металла шлака. Он обеспечивает отличный результат при сварочных работах в местах, требующих стойкости к абразивному износу, таких как роторы дробилок, молотковых, гусеничных и дисковых дробилок, наковален, грохотов, зубьев и ножей ковшей, вальцовых прессов, роликов, шнековых транспортеров. Для выполнения многослойной наплавки рекомендуется выполнить буферный слой шва с применением **Kobatek 352**.

Рекомендуемые режимы сварки:

Диаметр×длина, мм 3,25×350; 4,00×350
 Режим А, ток, А 150...170; 190...220
 Режим Б, ток, А 100...120; 140...160



Руководитель проектов, инженер ООО «Триада Сварка», В. В. Ефименко