Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 6 (685)
Июнь 2010

Издается с 1948 года

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

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

ИЗДАТЕЛЬ:
Международная ассоциация «Сварка»

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

Редакторы:
Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
И. Р. Наумова, И. В. Петушков, А. И. Сулима

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечни утвержденных ВАК Украины и Российской Федерации изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кривцун И. В., Демченко В. Ф., Крикент И. В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом 3

Махненко В. И., Маркашова Л. И., Бердникова Е. Н., Шекера В. М., Оноприенко Е. М. Кинетика роста коррозионных трещин в трубной стали 17Г1С 12

Сом А. И., Зельниченко А. Т. Численный расчет тепловых процессов при центробежной плазменной порошковой наплавке 16

Дмитрик В. В., Барташ С. Н. Особенности повреждаемости сварных соединений паропроводов по механизму ползучести 22

Кравчук Л. А. Устранение подрезов при ЭЛС со сквозным и несквозным проплавлением 26

Белый А. И. Влияние основных технологических параметров плазменной наплавки на свойства композиционного наплавленного металла 30

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Кучук-Яценко С. И., Качинский В. С., Игнатенко В. Ю., Гончаренко Е. И., Коваль М. П. Прессовая сварка магнитоуправляемой дугой деталей автомобильного сортамента 33

Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) 38

Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанив Б. В. Изготовление буровых долот для добычи рассеянного метана в шахтных выработках 48

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Сидоренко П. Ю., Рыжов Р. Н. Использование импульсных электромагнитных воздействий для управления процессом переноса электродного металла при дуговой сварке 52

По страницам журнала «Welding Journal», 2009, № 7/8 54

ХРОНИКА

Некоторые вопросы контроля качества сварки (по материалам конференций в области неразрушающего контроля) 58

Международная научно-техническая конференция «Наука и техника — фронту» 60

Торжественный митинг по случаю юбилея Победы в Великой Отечественной войне 62

О. Г. Касаткину — 75 63

ИНФОРМАЦИЯ 64

© НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, МА «Сварка», 2010

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

№ 6 (686)
June 2010
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko, A. T. Zelnichenko, 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, V. I. Makhnenko, 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)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
V. I. Lysak (Russia)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
G. A. Turichin (Russia)
Zhang Yanmin (China)

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

PUBLISHER:
International Association «Welding»

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

Editors:
E. N. Kazarova, T. V. Yushtina
Electron galley:
I. R. Naumova, I. V. Petushkov, A. I.Sulima

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved
This publication and each of the articles contained here in are protected by copyright
Permission to reproduce material contained in this journal must be obtained in writing from the Publisher

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Krivtsun I. V., Demchenko V. F., Krikent I. V. Model of processes of heat-, mass- and electrical transfer in anode region and welding arc column with refractory cathode 3

Makhnenko V. I., Markashova L. I., Berdnikova E. N., Shekera V. M., Onoprienko E. M. Kinetics of growth of corrosion cracks in pipe steel 17G1S 12

Som A. I., Zelnichenko A. T. Numerical calculation of heat processes in centrifugal plasma-powder surfacing 16

Dmitrik V. V., Bartash S. N. Peculiarities of damageability of welded joints of steam pipelines by creep mechanism 22

Kravchuk L. A. Removal of undercuts in EBW with through and incomplete penetration 26

Belyi A. I. Effect of main technological parameters of plasma surfacing on properties of composite deposited metal 28

INDUSTRIAL

Kuchuk-Yatsenko S. I., Kachinsky V. S., Ignatenko V. Yu., Goncharenko E. I., Koval M. P. Magnetically-impelled arc butt welding of parts of automobile assortment 33

Kah P., Salminen A., Martikainen J. Different laser-arc hybrid welding processes (Review) 38

Khorunov V. F., Maksimova S. V., Stefaniv B. V. Manufacture of drilling bits for dissipated methane production in mines 48

BRIEF INFORMATION

Sidorenko P. Yu., Ryzhov R. N. Application of pulsed electromagnetic effects for control of electrode metal transfer process in arc welding 52

Review of journal «Welding Journal» No.7/8, 2009 54

NEWS

Some problems of welding quality control (review of materials of conferences in the field of NDT) 58

International Scientific-Technical Conference «Science and technology — for the front» 60

Ceremony on the ocassion of jubilee of Victory in the Great Patriotic War 62

O. G. Kasatkin is 75 63

INFORMATION 64

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title ***«The Paton Welding Journal»***
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board.

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2010

УДК 621.791.75:625.791.72:537.523.5

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-, МАССО- И ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА В АНОДНОЙ ОБЛАСТИ И СТОЛБЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **В. Ф. ДЕМЧЕНКО**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. В. КРИКЕНТ, канд. техн. наук (Днепродзержин. гос. техн. ун-т)

Основным отличием предложенной математической модели сварочной дуги от известных моделей электрических дуг атмосферного давления является учет многокомпонентности дуговой плазмы, обусловленной испарением металла анода и конвективной диффузией металлического пара в столбе дуги. Модель может быть использована для численного анализа тепловых, газодинамических и электромагнитных характеристик дуговой плазмы при сварке неплавящимся электродом и плазменной сварке в инертных газах, а также для моделирования теплового и динамического воздействия дуги на поверхность сварочной ванны.

Ключевые слова: сварка неплавящимся электродом, плазменная сварка, электрическая дуга, столб дуги, многокомпонентная плазма, анодная область, анодное падение потенциала, математическая модель

Существует множество моделей для численного исследования процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в плазме электрической дуги, а также процессов ее взаимодействия с электродами при различных способах дуговой сварки [1–14]. Однако в большинстве из них дуговая плазма предполагается однокомпонентной, т. е. содержащей атомы и ионы защитного или плазмообразующего газа, чаще всего инертного. Плазма реальных сварочных дуг, как правило, многокомпонентна, поскольку наряду с частицами газа содержит атомы и ионы испаряющегося материала электродов, и в первую очередь анода. Таким образом, при построении адекватной математической модели сварочной дуги необходимо учитывать многокомпонентность дуговой плазмы.

Еще одной важной характеристикой указанной модели должна быть ее самосогласованность, позволяющая учитывать взаимосвязь физических процессов, которые протекают на электродах и в приэлектродных областях плазмы, с процессами в столбе дуги. Следует отметить, что в большинстве работ по комплексному моделированию электрической (в том числе сварочной) дуги используют весьма упрощенные модели приэлектродных областей [4, 6, 9–12], тогда как в работах, посвященных исследованию приэлектродных явлений (например, [15] и цитируемая там литература), недостаточное внимание уделяется процессам, происходящим в столбе дуги.

Поскольку теории катодных явлений, а также процессов в прикатодной плазме электрической дуги с тугоплавким (неиспаряющимся) катодом разработаны достаточно подробно [16–19], целью настоящей работы является разработка самосогласованной математической модели физических процессов, протекающих в анодной области и столбе сварочной дуги (электрической дуги с испаряющимся анодом) при сварке неплавящимся электродом и плазменной сварке в инертном газе (рис. 1).

Для описания процессов в дуговой плазме, граничащей с поверхностью испаряющегося анода, используем подход, предложенный в работах [20–22], в рамках которого прианодная плазма условно делится на три зоны (рис. 2). Первая зона, непосредственно примыкающая к поверхности анода, — это слой пространственного заряда, где на-

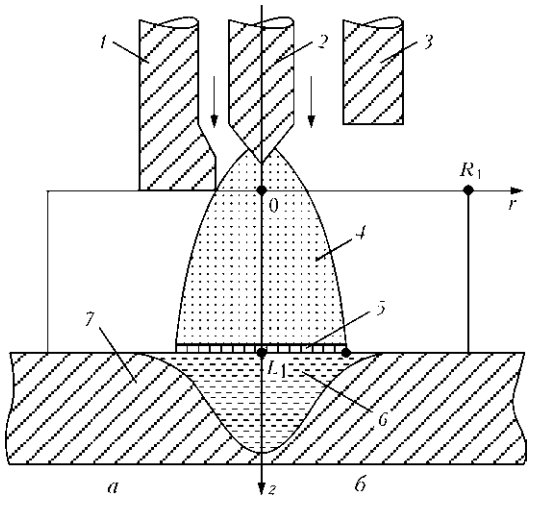


Рис. 1. Схемы процессов плазменной сварки (*а*) и сварки неплавящимся электродом (*б*): *1* — плазмоформирующее сопло; *2* — тугоплавкий электрод (катод); *3* — сопло для подачи защитного газа; *4* — столб дуги; *5* — анодная область дуги; *6* — сварочная ванна; *7* — свариваемое изделие (анод)

© И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, И. В. Крикент, 2010

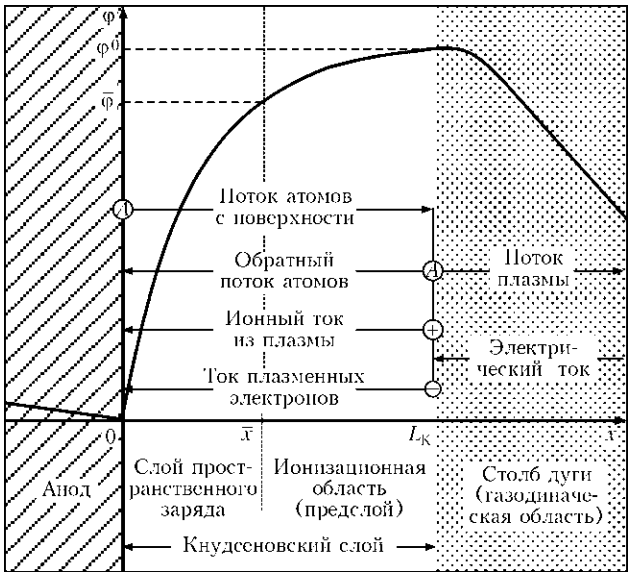


Рис. 2. Структура прианодного слоя плазмы, потоки частиц и распределение потенциала в анодной области сварочной дуги: $\bar{\varphi}$ — значения потенциала на границе слоя пространственного заряда; *A* — атомы; + — ионы; – — электроны; остальные обозначения см. в тексте

рушается условие квазинейтральности плазмы и происходит основное падение потенциала между плазмой и анодом. Этот слой можно считать бесстолкновительным, поскольку при давлении, близком к атмосферному, и характерных для рассматриваемых условий значениях температуры электронов $T_e \sim 1$ эВ [23, 24] толщина этого слоя $\bar{x}$, соизмеримая с радиусом Дебая $r_D \sim 1 \cdot 10^{-8}$ м (здесь и далее черта над буковой означает, что величина относится к внешней границе слоя пространственного заряда), оказывается существенно меньше характерной длины свободного пробега частиц плазмы $l \sim 1 \cdot 10^{-7} \ldots 1 \cdot 10^{-5}$ м (в настоящей работе оценки выполнены для Fe-плазмы атмосферного давления).

Вторая зона — это ионизационная область неизотермической квазинейтральной плазмы (предслой), где происходит генерация заряженных частиц за счет ионизации плазменными электронами атомов газа, десорбирующихся с поверхности металлического анода и испаряющихся атомов металла. Образующиеся здесь ионы ускоряются в сторону поверхности анода электрическим полем, создаваемым более подвижными электронами, и рекомбинируют вблизи этой поверхности. Таким образом, в пределах ионизационной области нарушаются условия локального ионизационного равновесия, а кроме того, происходит заметное изменение потенциала плазмы, которое может быть соизмеримо с его падением в слое пространственного заряда.

На расстоянии от поверхности анода, равном нескольким длинам свободного пробега тяжелых частиц, находится граница кнудсеновского слоя, которую будем сопоставлять с границей анодной области и за которой начинается третья зона — газодинамическая область плазмы, где устанавливается локальное термодинамическое равновесие. Следует отметить, что эта область также может быть условно разделена на две зоны — тепловой пограничный слой, в пределах которого происходит выравнивание температур электронов T_e^0 и тяжелых частиц T_h^0 с температурой плазмы в столбе дуги T, и собственно столб дуги [23].

В связи с тем, что толщина кнудсеновского слоя существенно меньше $L_K \sim 1 \cdot 10^{-4}$ м радиуса кривизны поверхности анода (сварочной ванны) $R \sim 1 \cdot 10^{-3}$ м, при описании процессов, протекающих в анодной области, последнюю можно считать плоской. Поскольку L_K значительно меньше характерного масштаба изменения параметров плазмы в газодинамической области, при рассмотрении процессов переноса, протекающих в столбе дуги, анодную область можно считать бесконечно тонкой. Таким образом, с точки зрения математического описания процессов в дуговой плазме, ее можно разделить на две области: анодную (или кнудсеновский слой) и столб дуги (или газодинамическую область), для которой первая область является поверхностью разрыва. В соответствии с этим самосогласованная математическая модель процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области сварочной дуги с тугоплавким катодом должна включать две взаимосвязанные модели: модель тепловых, электромагнитных, газодинамических и диффузионных процессов, протекающих в многокомпонентной плазме столба дуги и модель анодной области дуги, позволяющую сформулировать граничные условия на поверхности анода, необходимые для решения уравнений модели столба дуги, а также определяющую характеристики теплового и динамического воздействия дуги на поверхность сварочной ванны.

Рассмотрим сначала модель процессов электро-, массо- и энергопереноса в анодной области сварочной дуги.

Модель анодной области. При описании процессов, протекающих в анодной области дуги с испаряющимся анодом, считаем, что плазма на внешней границе этой области характеризуется следующими параметрами: n_e^0 — концентрация электронов; $n_{\alpha Z}^0$ — концентрация атомов (зарядовое число $Z = 0$) и ионов ($Z = 1$) защитного или плазмообразующего газа (сорт частиц $\alpha = g$), атомов ($Z = 0$) и ионов ($Z = 1, 2$) металлического пара ($\alpha = m$); Ze — заряд иона; e — элементарный заряд; T_h^0 — температура тяжелых частиц, предполагаемая одинаковой для всех сортов атомов и ионов, но отличная от T_e^0 (двухтем-

пературная модель плазмы); m_e — масса электрона; M_α — массы тяжелых частиц (атомов и ионов) газа ($\alpha = g$) и металла ($\alpha = m$); j_a — плотность электрического тока на поверхности анода. Как отмечено выше, анодная область может считаться плоской, поэтому значения n_e^0, $n_{\alpha Z}^0$, T_e^0, T_h^0 и j_a можно рассматривать как локальные, соответствующие данной точке поверхности анода, которая характеризуется локальным значением температуры T_s.

Считаем, что перенос тока на анод осуществляется только электронами и ионами, приходящими из плазмы (предполагаем, что ионы, попавшие на поверхность анода, рекомбинируют там и возвращаются назад в виде атомов, а поток электронов, эмитируемых анодом, пренебрежимо мал). Тогда суммарная плотность электрического тока на поверхности анода может быть представлена в виде

$$j_a = j_e - j_i \; (j_a > 0), \tag{1}$$

где j_e — плотность электронного тока, поступающего на анод; $j_i = \sum_{\alpha = m, g;\, Z \ge 1} j_{\alpha Z}$ — суммарная плотность ионного тока (для ионов всех сортов и зарядов).

Электронную компоненту плазмы в пределах анодной области с достаточной точностью можно считать бесстолкновительной, а температуру электронов — практически постоянной по ее толщине. Кроме того, поскольку потенциал плазмы оказывается, как правило, выше потенциала анода [24], электроны тормозятся электрическим полем, а ионы ускоряются по направлению к поверхности анода. В этом случае плотность электронного тока на анод составляет [23]

$$j_e = \frac{1}{4} e n_e^0 v_{T_e} \exp\left(-\frac{e\varphi^0}{kT_e^0}\right), \tag{2}$$

где $v_{T_e} = \sqrt{\dfrac{8kT_e^0}{\pi m_e}}$ — тепловая скорость электронов на внешней границе анодной области; k — постоянная Больцмана; φ^0 — потенциал плазмы относительно поверхности анода ($\varphi^0 > 0$).

Для нахождения ионных токов необходимо рассмотреть процессы в ионизационной области, где происходит генерация ионов и их ускорение в сторону анода. Для этого используем подход [25], основанный на предположении, что длина свободного пробега ионов относительно кулоновских столкновений между собой значительно меньше длины ионизации и длины их пробега при столкновении с атомами (характерные значения указанных величин соответственно $l_{ii} \sim 1 \cdot 10^{-7}$ м; $l_{ion} \sim 1 \cdot 10^{-6}$ м; $l_{ia} \sim 1 \cdot 10^{-5}$ м). Это позволяет считать, что ионы в предслое интенсивно максвеллизируются и приобретают общую скорость направленного движения, значение которой на границе ионизационной области со слоем пространственного заряда определяется выражением

$$\overline{V}_i \equiv v_i(\overline{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha = m, g;\, Z \ge 1} k(ZT_e^0 + T_h^0) n_{\alpha Z}^0}{\sum_{\alpha = m, g;\, Z \ge 1} M_\alpha n_{\alpha Z}^0}};$$

$$\left(\overline{V}_i = \frac{w^0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4 \sum_{Z \ge 1} k(ZT_e^0 + T_h^0) n_{\alpha Z}^0}{(w^0)^2 \sum_{Z \ge 1} M_m n_{mZ}^0}} - 1 \right] \right). \tag{3}$$

Первое соотношение в формуле (3) соответствует диффузионному режиму испарения ($w^0 \approx \approx 0$) [22], тогда как выражение в скобках — конвективному режиму испарения металла анода ($w^0 > 0$), где w^0 — нормальная к его поверхности скорость пара на границе анодной области.

Выбирая в качестве границы предслоя со слоем пространственного заряда такое значение $\overline{x}$, при котором нарушается условие квазинейтральности плазмы [26], находим концентрацию заряженных частиц на этой границе [22]

$$\overline{n}_e \equiv n_e(\overline{x}) = n_e^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right); \; \overline{n}_{\alpha Z} \equiv n_{\alpha Z}(\overline{x}) = n_{\alpha Z}^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right), \quad \alpha = m, g;\, Z \ge 1. \tag{4}$$

Тогда ионные токи на поверхность анода можно записать следующим образом:

$$j_{\alpha Z} = Z e n_{\alpha Z}^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \overline{V}_i \;, \; \alpha = m, g;\, Z \ge 1. \tag{5}$$

При конвективном режиме испарения анода величину exp(–1/2) в (4), (5) следует заменить на

$$\exp\left[-\frac{(w^0)^2 \sum_{Z \ge 1} M_m n_{mZ}^0}{8 \sum_{Z \ge 1} k(ZT_e^0 + T_h^0) n_{mZ}^0} \times \right.$$

$$\left. \times \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \sum_{Z \ge 1} k(ZT_e^0 + T_h^0) n_{mZ}^0}{(w^0)^2 \sum_{Z \ge 1} M_m n_{mZ}^0}} \right\}^2 \right].$$

Зная значение электронного и ионного тока на поверхности анода, из уравнения (1) легко найти потенциал плазмы φ^0 относительно этой поверхности или анодное падение потенциала U_a:

$$U_a \equiv -\varphi^0 = -\frac{kT_e^0}{e}\ln\left(\frac{en_e^0 v_{T_e}}{4\left[j_a + \sum\limits_{\alpha=m,g;\,Z\geq 1} j_{\alpha Z}\right]}\right). \quad (6)$$

Расчет значений j_e, $j_{\alpha Z}$ и U_a требует знания температуры T_e^0, T_h^0 и концентрации n_e^0, $n_{\alpha Z}^0$ заряженных частиц на внешней границе анодной области. Предполагая, что многокомпонентная плазма в столбе дуги является ионизационно равновесной, состав такой плазмы на границе с анодной областью можно определить, использовав следующую систему уравнений:

уравнение Саха с учетом неидеальности плазмы

$$\frac{n_e^0 n_{\alpha Z+1}^0}{n_{\alpha Z}^0} = \left(\frac{2\pi m_e kT_e^0}{h^2}\right)^{3/2} \frac{2\theta_{\alpha Z+1}}{\theta_{\alpha Z}} \exp\left[-\frac{e(U_{\alpha Z} - \Delta U_Z)}{kT_e^0}\right], \quad \alpha = m, g;\ Z \geq 0, \quad (7)$$

где h — постоянная Планка; $\theta_{\alpha Z}$ — статистические суммы для тяжелых частиц сорта α, находящихся в зарядовом состоянии Z; $U_{\alpha Z}$ — потенциалы ионизации (для перехода частиц сорта α из зарядового состояния Z в $Z + 1$); $\Delta U_Z = \dfrac{e(Z+1)}{r_D}$ — снижение потенциалов ионизации, обусловленное взаимодействием заряженных частиц плазмы;

$$r_D = \left[kT_e^0 / 4\pi e^2 \left(n_e^0 + \frac{T_e^0}{T_h^0} \sum_{\alpha=m,g;\,Z\geq 1} n_{\alpha Z}^0 Z^2\right)\right]^{-1/2};$$

условие квазинейтральности плазмы

$$n_e^0 = \sum_{\alpha=m,g;\,Z\geq 1} n_{\alpha Z}^0 Z; \quad (8)$$

закон парциальных давлений

$$p = n_e^0 kT_e^0 + \sum_{Z\geq 0} n_{mZ}^0 kT_h^0 + \sum_{Z\geq 0} n_{gZ}^0 kT_h^0 - \Delta p. \quad (9)$$

Здесь p — давление плазмы вблизи анода; $\Delta p = \dfrac{1}{6}\dfrac{e^2}{r_D}\left(n_e^0 + \sum\limits_{\alpha=m,g;\,Z\geq 0} n_{\alpha Z}^0 Z^2\right)$ — снижение давления за счет неидеальности плазмы [27].

Для замыкания системы уравнений (7)–(9) необходимо еще одно условие, определяющее концентрацию частиц металлического пара на внешней границе анодной области. При диффузионном режиме испарения предполагается, что скорость диффузии частиц пара мала, т. е. состояние пара близко к насыщению. В качестве такого условия можно выбрать равенство парциального давления тяжелых частиц испаренного металла на этой границе давлению насыщенного пара p_s над поверхностью расплавленного металла, имеющего температуру T_s:

$$\sum_{Z\geq 0} n_{mZ}^0 kT_h^0 = p_s \equiv p_0 \exp\left[\frac{\lambda_v}{k}\left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_s}\right)\right], \quad (10)$$

где p_0 — атмосферное давление; T_B — температура кипения; λ_v — работа выхода атома металла анода, $T_h^0 = T_s$.

Если температура поверхности анода превышает температуру, при которой давление ионизированного пара становится больше внешнего давления $\left(p_m^0 \equiv n_e^0 kT_e^0 + \sum\limits_{Z\geq 0} n_{mZ}^0 kT_h^0 - \Delta p \geq p\right)$, начинается расширение (разлет) пара, оттесняющего внешний газ. В результате прианодная плазма становится однокомпонентной, т. е. содержит только частицы испаренного металла. Следует отметить, что в качестве граничной температуры поверхности, выше которой начинается разлет пара в среду атмосферного давления, при отсутствии ионизации выступает температура кипения металла T_B (давление насыщенного пара равно атмосферному). Влияние электронного давления на эту граничную температуру исследовано в работе [22]. Из полученных результатов следует, что температура поверхности анода, выше которой давление ионизированного пара начинает превышать атмосферное и диффузионный режим испарения сменяется конвективным, с увеличением T_e^0 становится существенно меньше T_B.

Состав прианодной плазмы при конвективном режиме испарения анода можно рассчитать с помощью уравнений (7)–(9), положив $n_{g0}^0 = n_{g1}^0 = 0$ и дополнив эту систему уравнений соотношениями, определяющими концентрацию и температуру тяжелых частиц расширяющегося пара вблизи поверхности анода. Для нахождения значений $\sum\limits_{Z\geq 0} n_{mZ}^0$ и T_h^0 в этом случае можно приближенно использовать выражения, полученные в работе [28]:

$$\frac{\sum\limits_{Z\geq 0} n_{mZ}^0}{n_s} = \left\{\left(\gamma_m^2 + \frac{1}{2}\right)\exp(\gamma_m^2)\left[1 - \Phi(\gamma_m)\right] - \frac{\gamma_m}{\sqrt{\pi}}\right\} \times \sqrt{\frac{T_s}{T_h^0}} + \frac{1}{2}\left\{1 - \gamma_m\sqrt{\pi}\exp(\gamma_m^2)\left[1 - \Phi(\gamma_m)\right]\right\}\frac{T_s}{T_h^0};$$

$$\frac{T_h^0}{T_s} = 1 + \frac{\gamma_m^2\pi}{32}\left(1 - \sqrt{1 + \frac{64}{\gamma_m^2\pi}}\right). \quad (11)$$

Здесь $n_s = p_s / kT_s$ — концентрация насыщенного пара, соответствующая данной температуре по-

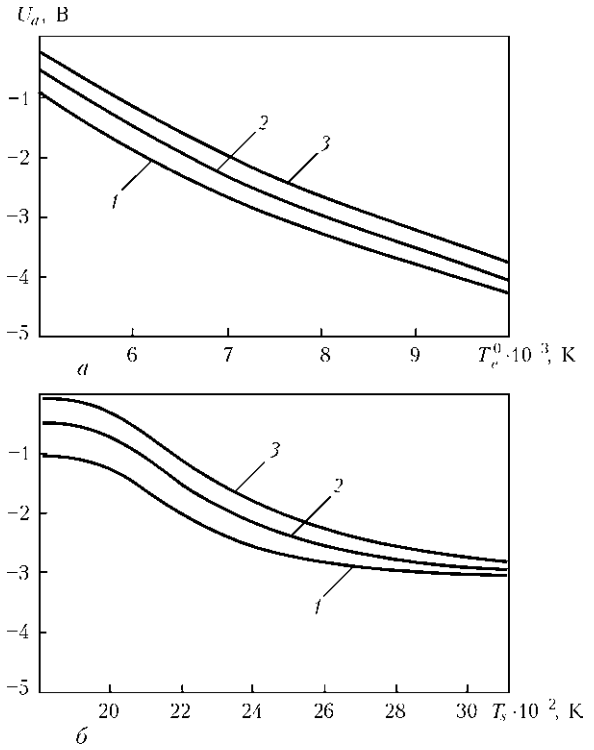


Рис. 3. Зависимость анодного падения потенциала U_a от температуры электронов в прианодном слое плазмы (*а*) и температуры его поверхности (*б*) для стального анода при сварке в аргоне: *а* — *1* — j_a = 200; *2* — 500; *3* — 1000 А/см^2 при T_s = = 2472 К; *б* — *1–3* — см. рис. 3, *а*, но при $T_e^0 = 7 \cdot 10^3$ К

верхности анода; $\gamma_m = w^0 \left(\dfrac{M_m}{2kT_h^0} \right)^{1/2}$ — безразмерная скорость пара; $\Phi(\gamma_m)$ — интеграл вероятности.

Отметим, что скорость w^0 является внешним параметром и определяется условиями расширения пара в газодинамической области (столбе дуги). Для численной оценки значения w^0 в случае дозвукового течения плазмы можно использовать приближенное выражение [28]

$$w^0 = s^0 \left(\frac{p_m^0}{p^0} - 1 \right) \Big/ \gamma^0 \sqrt{1 + \frac{\gamma^0 + 1}{2\gamma^0} \left(\frac{p_m^0}{p^0} - 1 \right)}, \qquad (12)$$

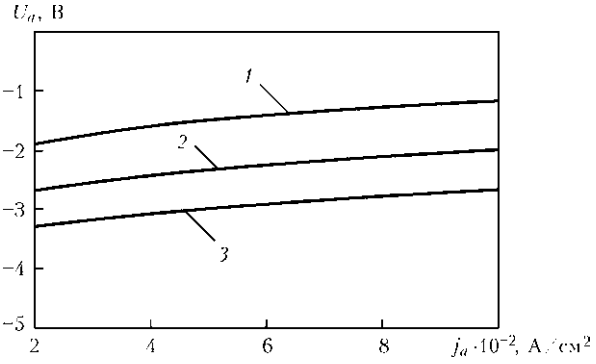


Рис. 4. Зависимость анодного падения потенциала U_a от плотности тока на аноде j_a для стального анода при сварке в аргоне (T_s = 2472 К): *1* — $T_e^0 = 6 \cdot 10^3$; *2* — $7 \cdot 10^3$; *3* — $8 \cdot 10^3$ К

где s^0 — местная скорость звука; γ^0 — показатель адиабаты для защитного или плазмообразующего газа при нормальных условиях.

Рассчитанные таким образом значения анодного падения потенциала в условиях, характерных для сварки стали неплавящимся электродом в аргоне, приведены на рис. 3. Как следует из представленных расчетных данных, анодное падение в рассматриваемой системе является отрицательным, увеличиваясь по абсолютной величине вместе с ростом электронной температуры плазмы вблизи анода, а также температуры его поверхности (рис. 3) и несколько уменьшаясь с увеличением анодной плотности тока (рис. 4). Значение U_a при рассматриваемых условиях находится в диапазоне –1….– 4 В.

Рассмотрим теперь процессы энергопереноса в анодной области сварочной дуги. Тепловой поток Q_a из прианодной плазмы на поверхность анода имеет вид

$$Q_a = Q_e + Q_i, \qquad (13)$$

где Q_e, Q_i — потоки потенциальной и кинетической энергии, переносимой соответственно электронами и ионами.

Выражение для Q_e запишем в виде [24]

$$Q_e = j_e \left(\frac{5kT_e^0}{2e} + \varphi_m \right), \qquad (14)$$

где φ_m — работа выхода электронов для данного металла.

С учетом начальной энергии ионов на внешней границе слоя пространственного заряда, а также их дополнительного ускорения в этом слое для Q_i можно записать

$$Q_i = \sum_{\alpha = m,\, g;\, Z \geq 0} j_{\alpha Z} \left(\overline{\varphi} + \frac{M_\alpha \overline{V}_i^{\,2}}{2e} + \frac{1}{Z} \sum_{Z'=1}^{Z} U_{\alpha Z'} - \varphi_m \right), \qquad (15)$$

где $\overline{\varphi} \equiv \varphi(\overline{x}) = \varphi^0 - \dfrac{1}{2} \dfrac{kT_e^0}{e}$ — потенциал плазмы на границе слоя пространственного заряда

$$(\overline{\varphi} = \varphi^0 - \frac{T_e^0 (w^0)^2 \sum\limits_{Z \geq 1} M_m n_{mZ}^0}{8e \sum\limits_{Z \geq 1} (ZT_e^0 + T_h^0) n_{mZ}^0} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \sum\limits_{Z \geq 1} k(ZT_e^0 + T_h^0) n_{mZ}^0}{(w^0)^2 \sum\limits_{Z \geq 1} M_m n_{mZ}^0}} \right\}^2$$ в случае конвективного режима испарения).

Выражение (13) можно представить в виде

$$Q_a = j_a V_a, \tag{16}$$

где V_a — вольтов эквивалент тепла, выделяемого на аноде, который в отличие от анодного падения U_a всегда принимает положительное значение. С учетом (1), (14) и (15) находим

$$V_a = \varphi_m + \frac{j_e}{j_a}\frac{5kT_e^0}{2e} + \sum_{\alpha = m, g;\, Z \geq 0} \frac{j_{\alpha Z}}{j_a}\left(\overline{\varphi} + \frac{M_\alpha \overline{V}_i^2}{2e} + \frac{1}{Z}\sum_{Z'=1}^{Z} U_{\alpha, Z'}\right). \tag{17}$$

В случае конвективного режима испарения металла анода в энергобалансе его поверхности необходимо учитывать энергию Q_v, уносимую с поверхности расплава потоком металлического пара

$$Q_v = \sum_{Z \geq 0} n_{mZ}^0 v^0 \lambda_v. \tag{18}$$

Что касается давления на поверхность расплавленного металла анода (сварочной ванны), то в режиме диффузного испарения оно равно давлению плазмы, определяемому из решения газодинамических уравнений для столба дуги, тогда как при конвективном режиме испарения это давление с учетом реактивной составляющей может быть вычислено с помощью выражения [29]

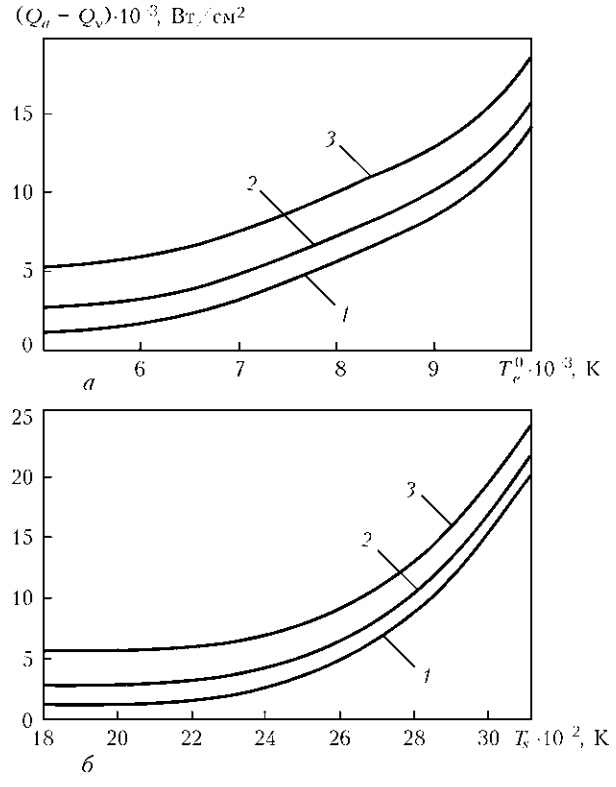


Рис. 5. Зависимость теплового потока на поверхность стального анода от температуры электронов в прианодном слое плазмы T_e^0 (*а*) и температуры поверхности анода T_s (*б*) при сварке в аргоне: *1–3* — см. на рис. 3

$$p_s = p_m^0\left(1 + \frac{5}{3}\mathrm{M}^2\right), \tag{19}$$

где $\mathrm{M} \equiv w^0/s^0$ — значение числа Маха на границе анодной области со столбом дуги.

На рис. 5, 6 представлены результаты расчетов теплового потока в анод с учетом потерь энергии на испарение при условиях, характерных для сварки стали неплавящимся электродом в аргоне. Как следует из приведенных расчетных кривых, значения Q_a возрастают с увеличением температуры электронов в прианодном слое плазмы, плотности тока на аноде и температуры его поверхности. В наибольшей степени эта тенденция проявляется в зависимости $Q_a - Q_v(T_s)$ (рис. 5).

Модель столба дуги. При описании процессов тепло-, массо- и электропереноса в газодинамической области плазмы (в столбе сварочной дуги), содержащей наряду с частицами защитного или плазмообразующего газа атомы и ионы испаренного металла анода, используем модель двухтемпературной ионизационно равновесной плазмы. Соответствующая система уравнений, записанная, например, в цилиндрической системе координат (см. рис. 1), имеет следующий вид [2]:

уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = 0, \tag{20}$$

где ρ — массовая плотность плазмы; v, u — соответственно радиальная и аксиальная компоненты скорости плазмы;

уравнения движения

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial r} + u\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} - j_z B_\varphi + \frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\eta\frac{\partial v}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] - 2\eta\frac{v}{r^2} - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial r}\left\{\eta\left[\frac{1}{r}\frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}\right]\right\}; \tag{21}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + v\frac{\partial u}{\partial r} + u\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\varphi + 2\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\eta\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}\left\{\eta\left[\frac{1}{r}\frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}\right]\right\}, \tag{22}$$

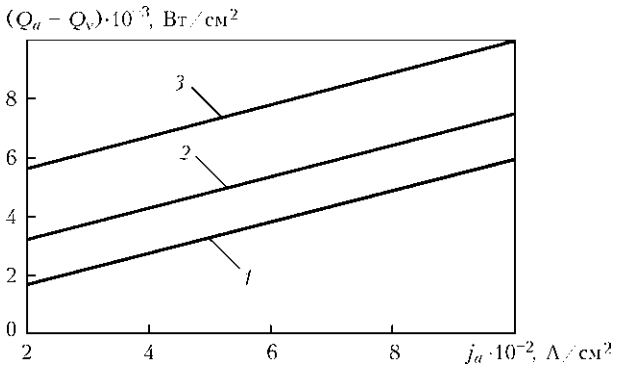


Рис. 6. Зависимость теплового потока на поверхность стального анода от плотности тока в нем j_a при сварке в аргоне, T_s = 2472 К: *1–3* — см. на рис. 3

где j_z, j_r — соответственно аксиальная и радиальная компоненты плотности тока в плазме; B_φ — азимутальная компонента вектора магнитной индукции; η — коэффициент динамической вязкости плазмы;

уравнения энергии

$$n_e C_{pe}\left(\frac{\partial T_e}{\partial t}+v\frac{\partial T_e}{\partial r}+u\frac{\partial T_e}{\partial z}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\chi_e\frac{\partial T_e}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\chi_e\frac{\partial T_e}{\partial z}\right)+$$

$$+\frac{k}{e}\left\{j_r\frac{\partial[(5/2-\delta)T_e]}{\partial r}+j_z\frac{\partial[(5/2-\delta)T_e]}{\partial z}\right\}+$$

$$+\frac{j_r^2+j_z^2}{\sigma}-\psi-\beta(T_e-T_h); \qquad (23)$$

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T_h}{\partial t}+v\frac{\partial T_h}{\partial r}+u\frac{\partial T_h}{\partial z}\right)=$$

$$=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\chi\frac{\partial T_h}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\chi\frac{\partial T_h}{\partial z}\right)+\beta(T_e+T_h), \qquad (24)$$

где C_{pe} — удельная теплоемкость электронного газа с учетом энергии ионизации; χ_e — коэффициент электронной теплопроводности; δ — постоянная термодиффузии электронов; σ — удельная электропроводность плазмы; ψ — потери энергии на излучение (приближение оптически тонкой плазмы); β — коэффициент теплообмена электронов с тяжелыми частицами; C_p — удельная теплоемкость тяжелой компоненты плазмы (атомов и ионов); χ — коэффициент теплопроводности тяжелой компоненты;

уравнения электромагнитного поля

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\sigma\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=0; \qquad (25)$$

$$B_\varphi(r,z)=\frac{\mu^0}{r}\int_0^r j_z(\xi,z)\xi d\xi, \qquad (26)$$

где μ^0 — универсальная магнитная постоянная;

$$j_r=-\sigma\frac{\partial\varphi}{\partial r};\ j_z=-\sigma\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \qquad (27)$$

Для замыкания системы уравнений (20)–(27) необходимо определить зависимость теплофизических характеристик ρ, C_{pe}, C_p, коэффициентов переноса η, χ_e, χ, δ, σ, коэффициента теплообмена β и потерь на излучение ψ от температуры, давления и состава дуговой плазмы. Состав многокомпонентной плазмы столба дуги с испаряющимся анодом можно найти с помощью уравнений (7)–(9), которые необходимо дополнить уравнением конвективной диффузии металлического пара в газодинамической области

$$\rho\left(\frac{\partial C_m}{\partial t}+v\frac{\partial C_m}{\partial r}+u\frac{\partial C_m}{\partial z}\right)=$$

$$=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\rho D_{m0}\frac{\partial C_m}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho D_{m0}\frac{\partial C_m}{\partial z}\right)+$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\rho\left[\bar{D}_{m1}\frac{\partial C_{m1}}{\partial r}+\bar{D}_{m2}\frac{\partial C_{m2}}{\partial r}\right]\right)+ \qquad (28)$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\left[\bar{D}_{m1}\frac{\partial C_{m1}}{\partial z}+\bar{D}_{m2}\frac{\partial C_{m2}}{\partial z}\right]\right).$$

Здесь $C_m=\frac{M_m\sum_{Z\ge 0} n_{mZ}}{\rho}$ — относительная массовая концентрация металлического пара в плазме столба дуги; $C_{m1}=\frac{M_m n_{m1}}{\rho}$, $C_{m2}=\frac{M_m n_{m2}}{\rho}$ — относительная массовая концентрации ионов металла; $\bar{D}_{m1}=D_{m1}-D_{m0}$, $\bar{D}_{m2}=D_{m2}-D_{m0}$, где D_{m0}, D_{m1}, D_{m2} — коэффициенты диффузии атомов, одно- и двухзарядных ионов металла в многокомпонентной плазме. Решение этого уравнения требует определения зависимости коэффициентов диффузии D_{m0}, D_{m1}, D_m от температуры, давления и состава плазмы. Следует отметить, что уравнение (28) в отличие от уравнения диффузии, использованного в работе [11], учитывает диффузию ионов металлического пара.

Для решения системы дифференциальных уравнений (20)–(25), (28) необходимо задать соответствующие начальные и граничные условия. Поскольку физические поля в дуговом разряде устанавливаются достаточно быстро, начальное распределение скорости и температуры принципиального значения не имеют. Для скорости можно задавать нулевые значения, а температура электронов в области токового канала должна обеспечивать характерную для дугового разряда проводимость плазмы. На границах ($r = 0$, $r = R_1$, $z = 0$, $z = L_1$) расчетной области (см. рис. 1) могут быть выбраны стандартные граничные условия, подробно описанные, например, в [2, 9, 17]. Остается задать условия на границе анодной и газодинамической областей плазмы.

Пусть Γ — граница анодной области со столбом дуги (ввиду малой толщины анодной области в качестве Γ можно рассматривать поверхность анода $z = L_1$). Тогда граничные условия для уравнений (20)–(22) на этой границе можно задать следующим образом:

$$v_t|_\Gamma=0;\ v_n|_\Gamma=\begin{cases}0 & \text{(диффузионный режим испарения)},\\ w^0 & \text{(конвективный режим испарения)}.\end{cases} \qquad (29)$$

Здесь v_t, v_n — тангенциальная и нормальная к поверхности анода компоненты скорости плазмы, а для вычисления распределения вдоль поверхности анода значений w^0 можно использовать приближенную формулу (12). Отметим, что более точным является нахождение значений w^0 из уравнений (11) и условия

$$n_e^0 k T_e^0 + \sum_{Z \geq 0} n_{mZ}^0 k\, T_h^0 - \Delta p = p^0,$$

где p^0 — распределение давления плазмы вблизи анода вдоль его поверхности, которое определяется в результате решения газодинамической задачи.

Обозначим через $\vec{n}$ вектор нормали к Г (в направлении столба дуги). Тогда соответствующие граничные условия для уравнений (23), (24) можно записать в виде

$$\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial n}|_\Gamma + \chi \frac{\partial T_h}{\partial n}|_\Gamma + j_a \frac{k}{e}\left(\frac{5}{2} - \delta\right) T_e|_\Gamma =$$

$$= \begin{cases} \varphi^0 j_a + Q_a & \text{(диффузионный режим испарения)}, \\ \varphi^0 j_a + Q_a + \varepsilon_v & \text{(конвективный режим испарения)}; \end{cases} \quad (30)$$

$$T_h|_\Gamma = \begin{cases} T_s & \text{(диффузионный режим испарения)}, \\ T_h^0 & \text{(конвективный режим испарения)}, \end{cases} \quad (31)$$

где ε_v — потери энергии на нагрев и ионизацию металлического пара, поступающего в столб дуги с поверхности анода; T_s — известное распределение температуры на поверхности анода, а распределение значений T_h^0 при известных распределениях T_s и w^0 вычисляем с помощью второго уравнения (11).

Поскольку проводимость металла анода, как правило, существенно выше удельной электропроводности плазмы, его поверхность с достаточной степенью точности можно считать эквипотенциальной, положив, например, $\varphi_a = 0$. Тогда условие на границе столба дуги с анодной областью для уравнения (25) можно задать в следующем виде:

$$\varphi|_\Gamma = \varphi^0, \quad (32)$$

где распределение вдоль анодной поверхности значений φ^0 вычисляем с помощью (6).

Наконец, граничные условия для уравнения (28) запишем в виде

$$C_m|_\Gamma = \begin{cases} \dfrac{M_m p_s}{\rho^0 k T_s} & \text{(диффузионный режим испарения)}, \\ 1 & \text{(конвективный режим испарения)}, \end{cases} \quad (33)$$

где p_s — распределение давления насыщенного пара, определяемое при известном распределении T_s по формуле (10); ρ^0 — распределение массовой плотности многокомпонентной плазмы столба дуги вдоль границы с анодной областью.

Этим исчерпывается описание самосогласованной математической модели физических процессов, протекающих в многокомпонентной плазме анодной области и столба электрической дуги с испаряющимся анодом, применительно к условиям сварки неплавящимся электродом и плазменной сварки в инертных газах.

Таким образом, адекватное описание физических процессов в столбе сварочной дуги и ее анодной области, позволяющее получать достоверные расчетные данные об условиях горения дуги, возможно лишь на основе самосогласованной математической модели, которая в полной мере учитывает взаимосвязь всех физических явлений, сопутствующих горению дуги. Важной структурной составляющей этой модели, ответственной за взаимодействие тепловых и электрических процессов в столбе дуги и на аноде (свариваемом изделии), является модель анодной области дуги. Непременной составляющей самосогласованной модели являются также модели свойств многокомпонентной плазмы сварочной дуги (ионизационного состава, термодинамических, транспортных и оптических свойств), которые определяются в зависимости от химического состава защитного газа, содержания испаренного металла анода, температуры плазмы и давления окружающей среды. Входными параметрами самосогласованной модели дуги должны оставаться лишь набор технологических параметров (сварочный ток, состав защитного газа, длина дуги и пр.), другие же распределенные и интегральные характеристики дуги должны определяться в результате вычислительного эксперимента на основе указанной модели.

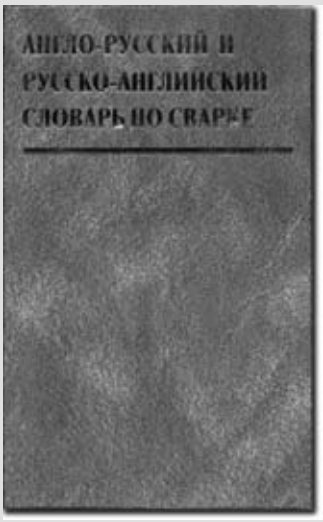
1. *Hsu K. C., Etemadi K., Pfender E.* Study of the free-burning high-intensity argon arc // J. of Appl. Phys. — 1983. — **54**, № 3. — P. 1293–1301.
2. *Hsu K. C., Pfender E.* Two-temperature modeling of the free-burning high-intensity arc // Ibid. — 1983. — **54**, № 8. — P. 4359–4366.
3. *Низкотемпературная* плазма / В. С. Энгельшт, В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков и др. В 7 т. Т.1: Теория столба электрической дуги. — Новосибирск: Наука, 1990. — 376 с.
4. *Prediction* of anode temperatures of free burning arcs / P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1995. — **28**. — P. 1369–1376.
5. *Jenista J., Heberlein J. V. R., Pfender E.* Numerical model of the anode region of high-current electric arcs // IEEE Trans. on Plasma Sci. — 1997. — **25**, № 5. — P. 883–890.
6. *Lowke J. J., Morrow R., Haidar J.* A simplified unified theory of arcs and their electrodes // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1997. — **30**. — P. 2033–2042.
7. *Haidar J.* Non-equilibrium modeling of transferred arcs // Ibid. — 1999. — **32**. — P. 263–272.
8. *Sansonnets L., Haidar J., Lowke J. J.* Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion // Ibid. — 2000. — **33**. — P. 148–157.

9. *Fan H. G., Kovacevic R.* A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool // Ibid. — 2004. — **37**. — P. 2531–2544.
10. *Computational* simulation of arc melting process with complex interactions / H. Nishiyama, T. Sawada, H. Takana et al. // ISIJ International. — 2006. — **46**, № 5. — P. 705–711.
11. *Hu J., Tsai H. L.* Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt. I: The arc // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. — 2007. — **50**. — P. 833–846.
12. *Masquere M., Freton P., Gonzalez J. J.* Theoretical study in two dimensions of the energy transfer between an electric arc and an anode material // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — **40**. — P. 432–446.
13. *Li He-Ping, Benilov M. S.* Effect of a near-cathode sheath on heat transfer in high-pressure arc plasmas // Ibid. — P. 2010–2017.
14. *Metal* vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding / M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro et al. // Welding in the World. — 2008. — **52**, № 11/12. — P. 82–88.
15. *Benilov M. S.* Understanding and modelling plasma-electrode interaction in high-pressure arc discharges: a review // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — **41**. — P. 30.
16. *Мойжес Б. Я., Немчинский В. А.* К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде // Журн. теорет. физики. — 1972. — **42**, № 5. — С. 1001–1009.
17. *Мойжес Б. Я., Немчинский В. А.* К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде. II // Там же. — 1973. — **43**, № 11. — С. 2309–2317.
18. *Приэлектродные* процессы в дуговых разрядах / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др. — Новосибирск: Наука, 1982. — 157 с.
19. *Investigation* of cathode spot behaviour of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker et al. // Proc. of the 12th Intern. conf. on gas discharges and their applications, Germany, Greifswald, 1997. — Vol. 1. — P. 62–65.
20. *Немчинский В. А., Перетц Л. Н.* Прианодный слой сильноточной дуги высокого давления // Журн. теорет. физ. — 1977. — **47**, № 9. — P. 1868–1875.
21. *Dinulescu H. A., Pfender E.* Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs // J. of Appl. Phys. — 1980. — **51**, № 6. — P. 3149–3157.
22. *Кривцун И. В.* Модель испарения металла при дуговой, лазерной и лазерно-дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 3. — С. 3–10.
23. *Анодные* процессы в сильноточном дуговом разряде / Г. А. Дюжев, В. А. Немчинский, С. М. Школьник и др. // Химия плазмы. — 1983. — № 10. — С. 169–209.
24. *Sanders N. A., Pfender E.* Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs // J. of Appl. Phys. — 1984. — **55**, № 3. — P. 714–722.
25. *Зондовые* измерения в низкотемпературной плотной плазме при высоких степенях ионизации / Ф. Г. Бакшт, Г. А. Дюжев, Н. К. Митрофанов и др. // Журн. теорет. физ. — 1973. — **43**, № 12. — С. 2574–2583.
26. *Чен Ф.* Электрические зонды // Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. — М.: Мир, 1967. — С. 94–164.
27. *Griem H. R.* High-density correction in plasma spectroscopy // Phys. Rev. — 1962. — **128**. — P. 997–1001.
28. *Knight Ch. J.* Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure // AIAA J. — 1979. — **17**, № 5. — P. 519–523.
29. *Воздействие* лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.

The main difference of the self-consistent mathematical model describing atmospheric-pressure electric arcs from the known ones is allowance for the multi-component composition of the arc plasma, which is caused by evaporation of the anode metal and convective diffusion of metal vapours in the arc column. The model can be used for numerical analysis of thermal, gas-dynamic and electromagnetic characteristics of the arc plasma in inert-gas tungsten-electrode and plasma welding, as well as for modelling of the thermal and dynamic effects of the arc on the weld pool surface.

Поступила в редакцию 25.01.2010

НОВОЕ ИЗДАНИЕ!



В России в «Издательском центре «Технология машиностроения» и издательстве «Интермет Инжиниринг» вышел из печати, подготовленный НАН Украины двуязычный «Англо-русский/Русско-английский словарь по сварке (основные термины)». Объем 384 с. Формат 60×90 1/16.

В словаре представлены наиболее употребляемые современные термины по сварке и родственным технологиям на английском (русском) языке и их русские (английские) соответствия. В словаре представлены новые нормативные термины МИС, европейских и национальных стандартов по сварке.

Словарь содержит более 12000 терминов, включающих терминологию основных видов сварки, резки, пайки, контроля качества сварных соединений, сварных конструкций, сварочных материалов и оборудования. В словарь включен раздел наиболее употребляемых сокращений в области сварки, принятых в современной сварочной терминологии.

По вопросам приобретения словаря обращаться по адресу:
«Интермет Инжиниринг»
127006, Москва, Старопименовский пер., д.8, стр. 1-1А

УДК 621.791.052:536.453:620.169.1

КИНЕТИКА РОСТА КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Л. И. МАРКАШОВА**, д-р техн. наук,
Е. Н. БЕРДНИКОВА, **В. М. ШЕКЕРА**, кандидаты техн. наук, **Е. М. ОНОПРИЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе диаграммы статической коррозионной трещиностойкости описана взаимосвязь между скоростью роста коррозионных трещин и коэффициентом интенсивности напряжений. С помощью аналитической растровой электронной микроскопии подтверждена основная рабочая гипотеза относительно дискретности роста трещин.

Ключевые слова: трубные стали, коррозионные трещины, диаграмма статической коррозионной трещиностойкости, акустическая эмиссия, электронная микроскопия, зона водородного охрупчивания

Коррозионные трещины в подземных магистральных газо- и нефтепроводах являются наиболее опасными дефектами, обнаружить которые с помощью современных средств внутритрубной диагностики достаточно трудно. В этой связи изучение упомянутых дефектов с позиции их инициирования и развития представляет несомненно большой интерес, особенно у специалистов, занимающихся ремонтом трубопроводов без вывода их из эксплуатации, т. е. под давлением, когда ранжирование проявленных дефектов по степени срочности их удаления является ответственной составляющей графика ремонта.

В общем случае развитие коррозионных трещин в трубных сталях при относительно статических нагрузках описывается диаграммой статической коррозионной трещиностойкости (ДСКТ) данного материала при соответствующих коррозионно-температурных условиях [1]. На рис. 1 показана схема такой диаграммы, связывающей скорость роста v коррозионной трещины нормального отрыва с коэффициентом интенсивности напряжений K_I, определяемым напряженным состоянием, размерами трещины и геометрией образца. В общем случае на ДСКТ различают

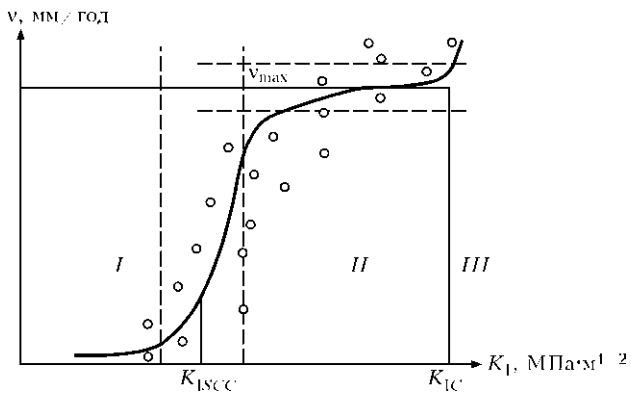


Рис. 1. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости (*I–III*, а также остальные обозначения см. в тексте)

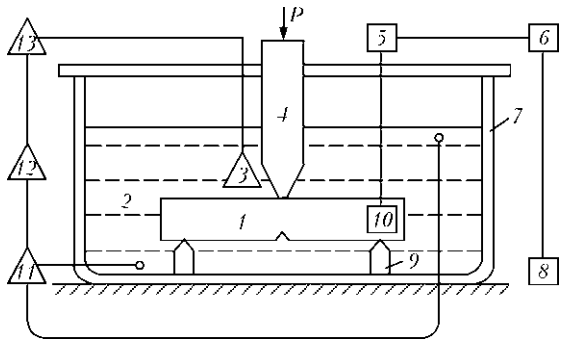


Рис. 2. Схема испытаний образцов на опытной установке, созданной в ИЭС им. Е. О. Патона: *1* — образец; *2* — коррозионная среда; *3* — датчик температуры среды; *4* — индектор; *5* — усилитель; *6* — источник акустической эмиссии; *7* — ванна; *8* — регистратор; *9* — опора; *10* — пьезоэлектрический датчик; *11* — помпа циркуляции среды; *12* — нагреватель среды; *13* — регулятор температуры

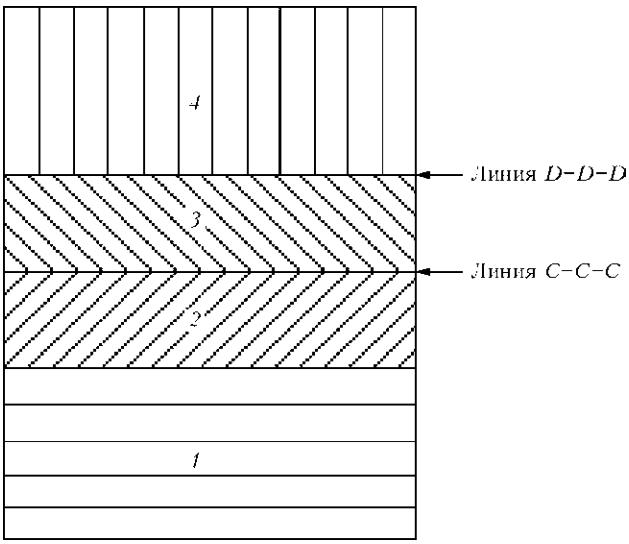


Рис. 3. Схема расположения характерных областей на поверхности излома образца (*1–4* — см. в тексте)

© В. И. Махненко, Л. И. Маркашова, Е. Н. Бердникова, В. М. Шекера, Е. М. Оноприенко, 2010

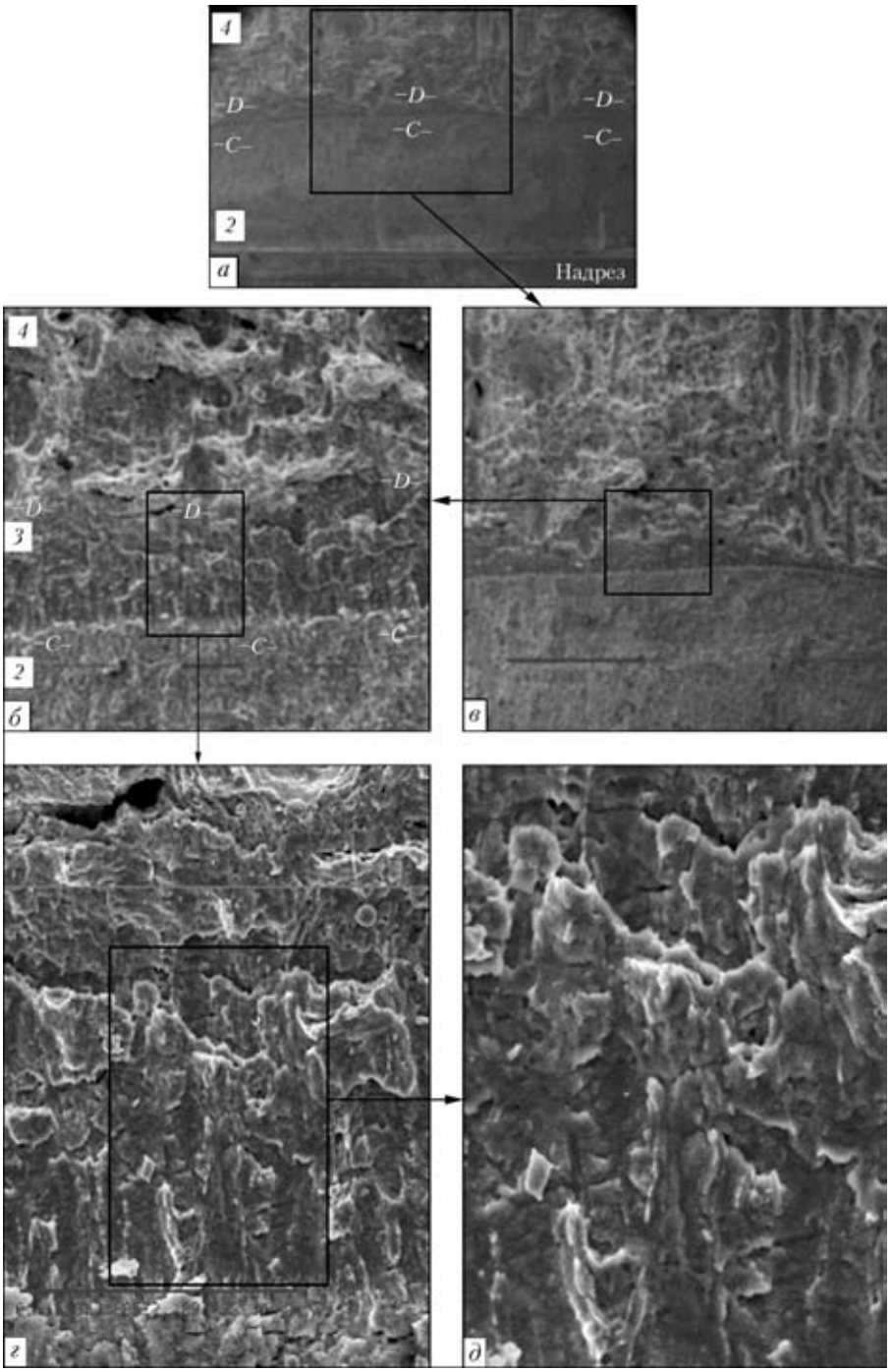


Рис. 4. Фрагменты фрактографического исследования области роста коррозионной трещины *3* на участке вблизи области роста усталостной трещины *2*: *а*, ×28; *б*, ×221; *в*, ×55; *г*, ×885; *д*, ×1770

три характерные зоны (рис. 1): *I* — $0 < K_I < K_{ISCC}$, где скорость роста трещины относительно невелика и основным механизмом является анодное растворение материала образца в вершине трещины; *II* — $K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$ (K_{IC} — критическое значение K_I при данных температурных условиях), где скорость роста трещины весьма значительная и преобладает механизм водородного охрупчивания материала в вершине трещины; *III* — $K_I > K_{IC}$, где спонтанный рост трещины соответствует хрупкому разрешению. С позиций ранжирования обнаруженной коррозионной трещины либо начала ее образования большое значение имеет зона *II*, определяющая ресурс безопасного ожидания в очереди на ремонт.

В ИЭС им. Е. О. Патона для получения данных о поведении трубных сталей в водных растворах различных грунтов используется описанная в работах [2, 3] методика, позволяющая достаточно оперативно получать информацию о параметрах ДСКТ в зоне *II*, где рост трещины происходит отдельными прыжками, наличие которых контролируется с помощью датчика акустической эмиссии.

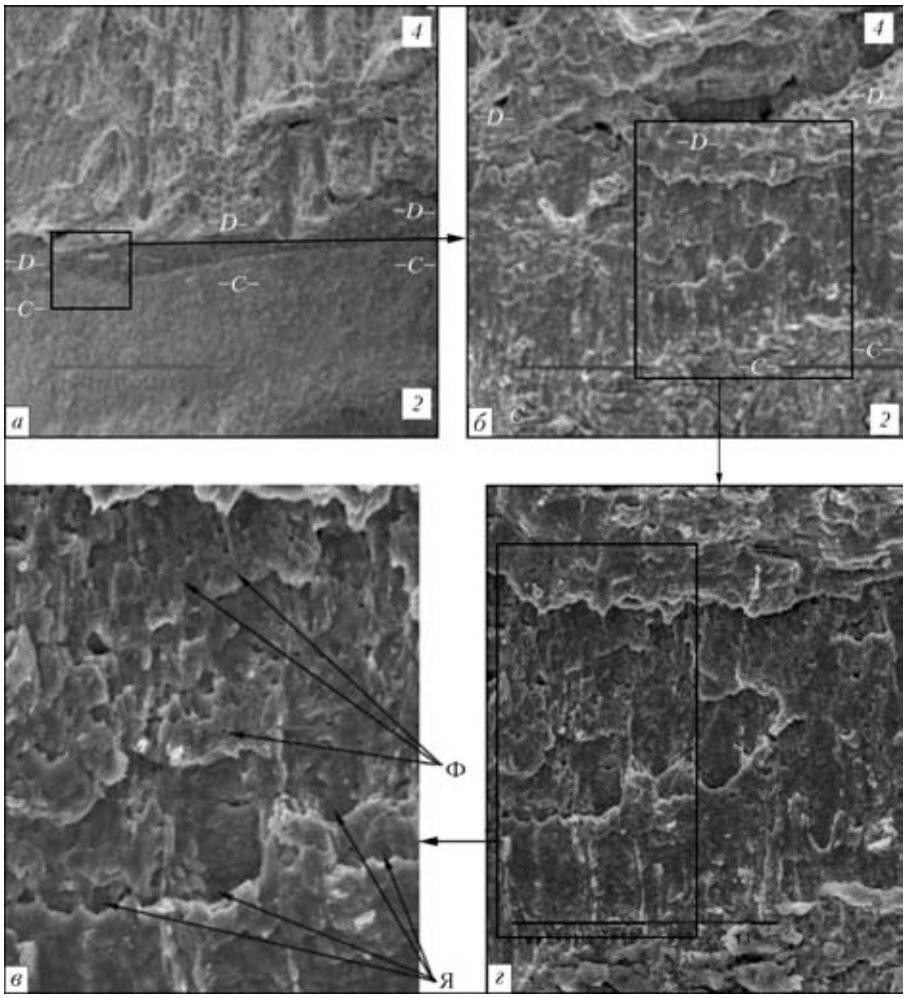


Рис. 5. Фрагменты фрактографического исследования области роста коррозионной трещины вблизи области долома *4*: *а*, ×555; *б*, ×442; *в*, ×1770; *г*, ×885; Ф — фасетки квазихрупкого разрушения; Я — плоские ямки в зоне вытяжки

Целью настоящей работы являлось средствами аналитической растровой электронной микроскопии подтвердить рабочую гипотезу о росте трещины отдельными прыжками, часть из которых регистрируется как сигнал акустической эмиссии на экране и в памяти компьютера. При этом в силу избирательности процесса наводораживания объемов металла вдоль фронта трещины за счет локальной диссоциации водного раствора в этой зоне прыжки роста трещины вдоль ее фронта имеют локальный характер: перемещаются достаточно хаотично — пятнами вдоль фронта, из которых образуются слои, определяющие среднюю скорость продвижения фронта трещины.

Ниже приведены результаты исследования поверхности излома образцов сечением 10×10 мм с надрезом Шарпи и предварительно выращенной трещиной. Испытание проводили по схеме трехточечного изгиба (рис. 2) в среде водной вытяжки песка, взятого в различных районах. Время испытания для образца № 1 составляло 740 ч, для образца № 2 — 336 ч. Образцы были изготовлены из трубной стали 17Г1С. Для получения K_I = 25 МПа·м$^{1/2}$ была выбрана соответствующая нагрузка.

Изломы исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ-515 фирмы «Philips», оснащенного энергодисперсионными спектрометрами системы «Link». Растровые изображения структуры поверхности излома дают возможность получить микроизображение с большой глубиной поля зрения и видеть более четко детали структуры. Перед проведением исследования поверхностей излома их подвергали тщательной очистке от коррозионных отложений с помощью ультразвука. На поверхности излома каждого из исследуемых образцов имели место четыре характерные области (рис. 3): *1* — область надреза; *2* — область предварительно выращенной усталостной трещины; *3* — область изгибных деформаций (т. е. роста коррозионной трещины), разделяющая хорошо выраженную область *2* трещины, и область долома *4*. Нас интересует область, разделяющая области *2* и *4*. В образце № 1 она расположена между точками *D–D–D* и *C–C–C* (рис. 4, 5). Ширина ее составляет 150…250 мкм, что достаточно хорошо согласуется с измерениями под объективом инструментального микроскопа УИМ-21 на боковых поверхностях об-

разца перед разломом. В зоне коррозионного разрушения видна система фасеток квазихрупкого разрушения, которые образуют слои, упоминаемые выше (рис. 4, 5). Подобная картина имела место и в образце № 2. Однако в связи более коротким временем испытаний (336 ч) уменьшилась протяженность области коррозионного разрушения до 70 мкм, при этом также сократилось количество условных слоев коррозионного роста трещины.

Таким образом, морфология излома испытуемых образцов показывает приемлемость того, что в зоне водородного охрупчивания коррозионная трещина растет прыжками, но не одновременно по всему фронту, а отдельными пятнами, перемещающимися достаточно хаотично вдоль фронта, тем не менее, образующими слои роста.

1. *Механіка* руйнування та міцності матеріалів: Довід. посібник / Під заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка. В 7 т. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / За ред. І. М. Дмитраха. — Київ: Видавничий дім «Академперіодика», 2005. — 376 с.
2. *Механіка* руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник / За ред. проф. З. Т. Назарчука. В 6 т. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1132 с.
3. *Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М.* Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–35.

The relationship between the rate of growth of corrosion cracks and stress intensity factor was described on the basis of the static corrosion crack resistance diagram. The main working hypothesis that the crack growth is of a discrete character was proved by means of analytical scanning electron microscopy.

Поступила в редакцию 08.12.2009

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

4–8 октября 2010 г. Ялта, санаторий «Курпаты»

Организаторы конференции:

- Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»
- Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики
- Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- Днепропетровский национальный университет
- НПП «Машиностроение»

Тематика конференции:

- Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД)
- Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов
- Техническая диагностика и мониторинг состояния производственных объектов
- Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений
- Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса
- НК и ТД в нефтегазовой отрасле и энергетике
- Контроль и диагностика строительных конструкций
- Вибрационные методы диагностики
- Вопросы обучения, аттестации и сертификации специалистов, подразделений НК и ТД
- Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД
- Метрологическое обеспечение средств НК
- Состояние и развитие НК и ТД в Украине
- Заседание Правления УО НКТД

Дополнительную информацию можно получить по тел./факсу: (+38044) 573-30-40 (с 8.00 до 14.00)
моб. тел.: 067-708-93-95

УДК 621.791.927.55

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

А. И. СОМ, канд. техн. наук («Плазма-Мастер Лтд.», г. Киев),
А. Т. ЗЕЛЬНИЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Методом вычислительного эксперимента исследованы тепловые процессы, протекающие в стенке толстостенной трубы при центробежной плазменной порошковой наплавке. Рассчитаны температурные поля в каждой точке изделия в зависимости от режима наплавки. Разработан измерительный стенд и предложена методика определения коэффициента теплоотдачи и эффективной тепловой мощности.

Ключевые слова: центробежная плазменная порошковая наплавка, втулки буровых насосов, кольцевая ванна, плазмотрон, тепловые процессы, численное моделирование, метод калориметрирования

Центробежная плазменная порошковая наплавка (ЦППН) — эффективный технологический процесс нанесения износостойких, коррозионностойких и антифрикционных покрытий на поверхности различных деталей [1, 2], в том числе на внутреннюю поверхность цилиндрических деталей [3]. ЦППН (рис. 1, 2) проводят путем расплавления слоя присадочного порошка плазменной дугой прямого действия при быстром вращении детали (500…1200 об/мин). При этом образуется жидкая кольцевая ванна, которая движется вместе с плазмотроном вдоль оси детали. Наличие кольцевой ванны является обязательным условием образования металлической связи между наплавляемым металлом и подложкой. При этом температура на внутренней поверхности детали в месте нахождения ванны должна быть не ниже температуры плавления присадочного порошка. Перегрев ее нежелателен, поскольку это приводит к растворению основного металла и как следствие перемешиванию его с наплавляемым.

Обеспечение оптимальных условий наплавки зависит от параметров режима, прежде всего тока дуги и скорости движения плазмотрона. Большую роль также играют диаметр цилиндрической детали, толщина ее стенки и теплофизические свойства основного металла. В связи с тем, что визуальный контроль за процессами нагрева, плавления и затвердевания присадочного металла затруднен, выбор оптимальных параметров режима является очень трудоемким и затратным. Для приготовления макрошлифов требуется наплавлять, а затем разрезать несколько образцов втулок.

В настоящей работе для поиска оптимальных режимов ЦППН использован метод вычислительного эксперимента, с помощью которого исследованы тепловые процессы, протекающие в стенке толстостенной трубы. Необходимые для проведения вычислительного эксперимента коэффициенты теплоотдачи и эффективной тепловой мощности определяли с помощью предложенного расчетно-экспериментального метода и специально сконструированного измерительного стенда.

Тепловые процессы, протекающие при ЦППН толстостенных труб (рис. 3), описываются дифференциальным уравнением теплопроводности

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$
$$R_{в}<r<R_{н},\ 0<z<H,$$

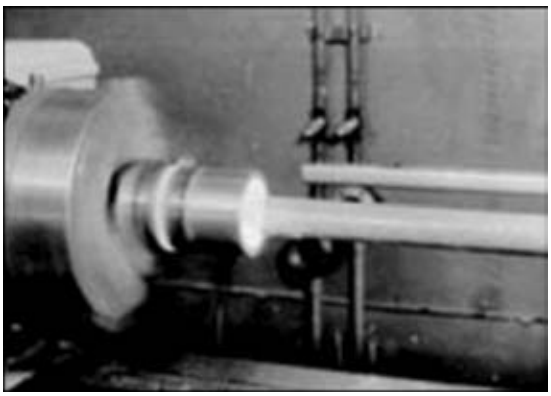


Рис. 1. Фрагмент установки для выполнения ЦППН

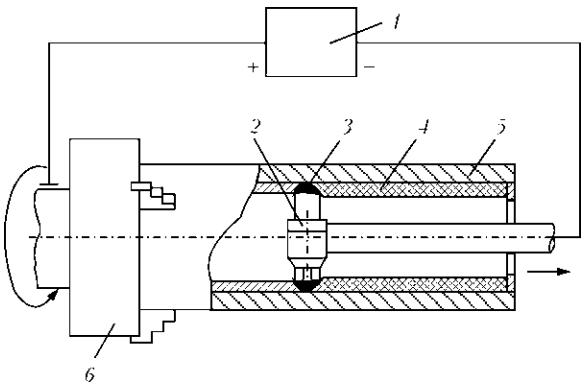


Рис. 2. Схема процесса ЦППН на внутреннюю поверхность детали [1]: *1* — источник питания; *2* — плазмотрон; *3* — кольцевая сварочная ванна; *4* — присадочный порошок; *5* — деталь; *6* — патрон

© А. И. Сом, А. Т. Зельниченко, 2010

где c, ρ, λ — соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала; T — температура; r, z — радиальная и аксиальная координаты; t — время; $R_в$, $R_н$ — внутренний и наружный радиус трубы; H — длина трубы.

Предположим, что источник нагрева, перемещающийся в аксиальном направлении по внутренней поверхности быстро вращающейся трубы, распределен по нормальному закону

$$q(z, t) = q_0 \exp\,[-k(z - \xi(t)^2)], \qquad (2)$$

где q_0 — максимальная плотность теплового потока; k — коэффициент сосредоточенности; $\xi(t)$ — текущая координата источника:

$$\xi(t) = \begin{cases} t_0, & t < t_в; \\ t_0 + vt, & t > t_в, \end{cases}$$

где $t_в$ — продолжительность действия дуги в начальной точке с координатой z_0; v — скорость перемещения источника.

Полная мощность источника нагрева Q связана величиной q_0 следующим соотношением:

$$q_0 = \frac{Q\sqrt{k/\pi}}{2\pi R_в}. \qquad (3)$$

На наружной и торцевых поверхностях трубы происходят процессы теплоотдачи и радиационного обмена с внешней средой, температура которой $T_с$:

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R_н} = \alpha_2(T - T_с) + \varepsilon\delta(T^4 - T_с^4) \qquad (4)$$

или

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R_н} = \alpha'_2(T - T_с), \qquad (5)$$

где

$$\alpha'_2 = \alpha_2 + \varepsilon\sigma(T - T_с)(T^4 - T_с^4). \qquad (6)$$

Аналогично

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{z=0} = \alpha'_3(T - T_с), \qquad (7)$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{z=H} = \alpha'_1(T - T_с), \qquad (8)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; ε — коэффициент черноты; δ — постоянная Стефана–Больцмана.

На внутренней поверхности трубы, кроме указанных выше процессов, происходит передача энергии источника нагрева. Часть этой энергии расходуется на нагрев и плавление присадочного

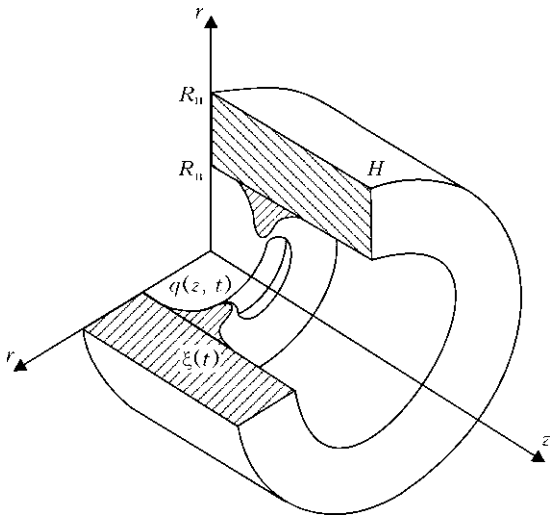


Рис. 3. Схема нагрева втулки, принятая для расчета

порошка. Моделирование процесса нагрева порошка при плазменной порошковой наплавке проведено в работе [4]. В соответствии с работой [5] слой порошка можно представить в виде сосредоточенной теплоемкости. В этом случае граничное условие на внутренней поверхности трубы имеет следующий вид:

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R_в} = q(z, t) + \alpha'_4(T - T'_с) + C_п\frac{\partial T}{\partial t}\Big|_{r=R_в}, \qquad (9)$$

где $C_п$ — теплоемкость наплавляемого слоя порошка, равная ρcS; S — толщина слоя порошка.

Уравнение (1) с граничными условиями (4), (5), (7), (8) решали* методом конечных разностей (при этом учитывали зависимость теплоемкости и температуропроводности материала втулки от температуры). Интегрирование двухмерного уравнения теплопроводности сводилось к решению двух одномерных задач в соответствии с локально-одномерной схемой А. А. Самарского [6] и методикой учета сосредоточенной теплоемкости, предложенной в работе [5].

На основе разработанных моделей и вычислительных алгоритмов создано программное обеспечение, предусматривающее диалоговый ввод исходных данных и графическое представление результатов в виде изотерм и термических циклов в заданных точках. Необходимые для практических расчетов значения коэффициента теплоотдачи α и эффективной тепловой мощности q определяли экспериментально.

Как известно, коэффициент теплоотдачи зависит от формы и размеров поверхности, отдающей тепло, ее положения в пространстве, свойств окружающей среды и других факторов. Поэтому эксперименты по его определению проводили в условиях, максимально приближенных к реальным.

* В численном интегрировании принимал участие А. В. Романенко.

Суть методики измерений заключалась в следующем. Цилиндр из стали 20 диаметром 80 мм и длиной 300 мм нагревали в печи до температуры 900 °С, устанавливали в центрах токарного станка, сообщали ему вращение со скоростью 800 об/мин и с помощью оптического пирометра записывали кривые охлаждения цилиндрической поверхности (для исключения теплоотдачи по торцам цилиндра были установлены теплоизолирующие прокладки). Процесс охлаждения цилиндра также моделировали на компьютере. Для этого решали уравнение (1) с граничными условиями

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} - \lambda\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_н} = \alpha(T - T_c) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4).$$

Была сделана серия расчетов с различными значениями α, результаты которых сравнивали с экспериментальными данными. Для дальнейших расчетов тепловых процессов было выбрано значение α = 50 Вт/(м^2·К), при котором расчетная кривая наиболее близко совпадала с экспериментальной.

Как видно из рис. 4, небольшое расхождение экспериментальной и расчетной кривых охлаждения исследуемого цилиндра в области температур 500…700 °С связано с протеканием фазовых превращений в стали, которые в модели (1)–(9) не учитываются.

Энергетические характеристики плазменной дуги применительно к сварке, резке и наплавке изучены достаточно хорошо [7–10]. Однако результаты этих работ нельзя использовать для оценки эффективной тепловой мощности дуги при центробежной наплавке, так как нагрев изделия в данном случае имеет существенные особенности: дуга горит в замкнутом пространстве и перемещается относительно нагреваемой поверхности со скоростью 3…5 м/с, т. е. на 2…3 порядка больше, чем при других способах плазменной обработки. Следует также учитывать, что эффективный КПД дуги существенно зависит от конструкции плазмотрона и режима его работы.

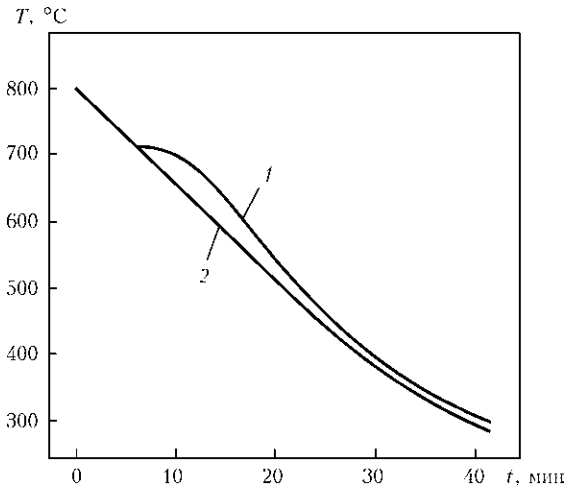


Рис. 4. Экспериментальная (*1*) и расчетная (*2*) кривые охлаждения цилиндра диаметром 80 мм при вращении со скоростью 800 об/мин (α = 50 Вт/(м^2·К))

Эффективную тепловую мощность дуги определяли путем калориметрирования, используя в качестве калориметрического тела толстостенный медный стакан массой 7900 г с внутренним диаметром 80 мм и длиной цилиндрического участка 100 мм. Стакан имел припаянный к днищу хвостовик из нержавеющей стали для крепления его в патроне установки, а также кожух с теплоизоляцией из базальтового волокна. В кожух вмонтирован разъем для подключения внешней измерительной системы к двум хромель-копелевым термопарам, зачеканенным в стакан. Сущность методики определения эффективной тепловой мощности дуги сводилась к измерению количества тепла, которое приобретало калориметрическое тело за единицу времени горения дуги:

$$q_э = \frac{Q_т}{t_{вр}} = \frac{C_м m\Delta T}{t_{вр}},$$

где $C_м$ — удельная теплоемкость меди; m — масса калориметрического тела; ΔT — приращение температуры; $t_{вр}$ — время вращения дуги.

Температуру тела регистрировали с помощью трехточечного потенциометра КСП-4 кл. 0,5 со шкалой 0…100 °С. Время горения дуги задавали с помощью электронного реле времени и фиксировали цифровым миллисекундомером Ф.291, сигнал к которому поступал от датчика тока. Одновременно сигнал о зажигании дуги поступал и к потенциометру. Ток и напряжение дуги регистрировали с помощью приборов магнитоэлектрической системы кл. 0,2. Эксперименты проводили на установке УД251 (рис. 5). В опытах использовали плазмотрон с вольфрамовым электродом. Диаметр сопла плазмотрона 5 мм, длина

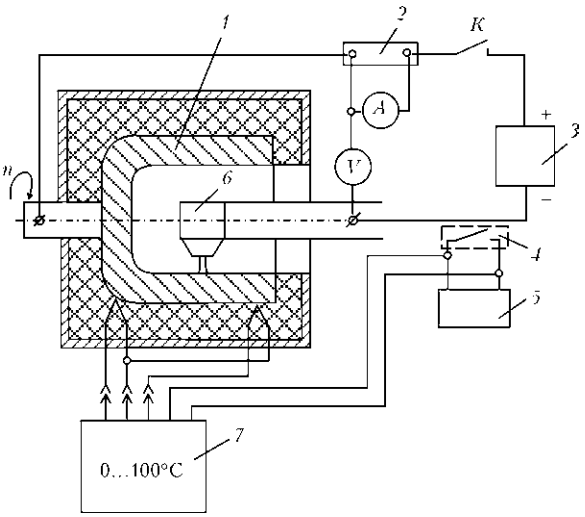


Рис. 5. Схема установки УД251 для определения эффективной тепловой мощности дуги: *1* — калориметр; *2* — шунт; *3* — сварочный выпрямитель; *4* — датчик тока; *5* — миллисекундомер; *6* — плазмотрон; *7* — потенциометр

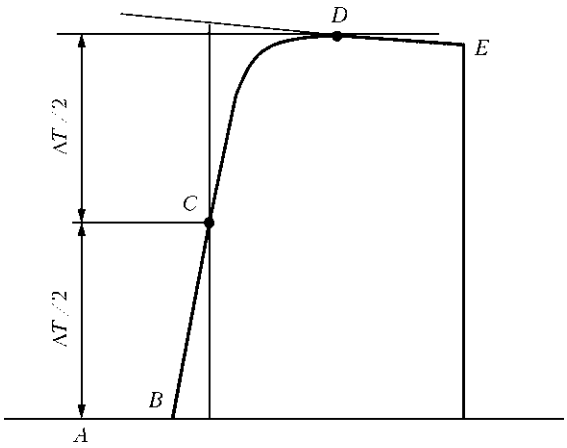


Рис. 6. Полный цикл изменения температуры калориметра: *AB* — начальный период; *BCD* — основной; *DE* — конечный

сопла 5 мм, углубление электрода в сопло 5 мм, плазмообразующий газ — аргон.

Параметры дуги варьировали в пределах: ток дуги 300…700 А, длина дуги 5…15 мм, расход плазмообразующего газа 4…20 л/мин, скорость вращения калориметра 50…1250 об/мин. Изменяя один параметр, другие поддерживали постоянными, близкими к оптимальным.

Последовательность эксперимента была следующей. Плазмотрон вводили в полость калориметрического тела, присоединяли потенциометр и записывали начальный ход калориметра. Затем потенциометр отсоединяли, оставляя включенной протяжку диаграммной ленты для фиксирования момента зажигания дуги, включали вращение калориметра и возбуждали дугу. Через 6…8 с выключали дугу, останавливали калориметр, быстро выводили из него плазмотрон и закрывали крышкой. Одновременно подключали потенциометр и записывали основной и конечный периоды температурного хода калориметра. Пример записи полного цикла изменения температуры калориметра приведен на рис. 6. Перед проведением следующего эксперимента калориметр охлаждали до комнатной температуры струей воздуха.

Потери тепла калориметра в окружающую среду из-за несовершенства теплоизоляции учитывали с помощью поправки на теплообмен, которую определяли графически в каждом эксперименте по методике, описанной в работе [10]. Действительное значение температуры с учетом этой поправки находили экстраполяцией прямыми начального и конечного температурного хода до момента главного периода, когда изменение температуры системы составит половину наблюдаемого изменения (точка *C*). Каждый эксперимент пов-

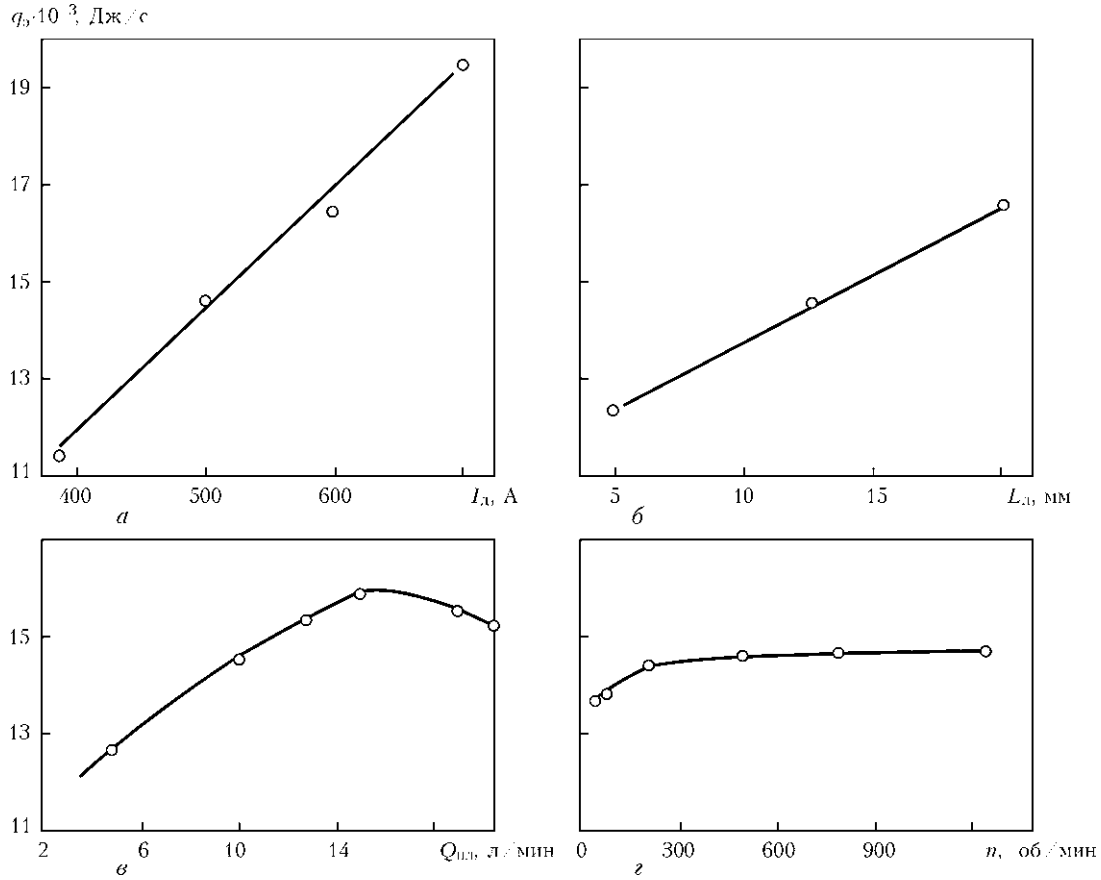


Рис. 7. Зависимость эффективной тепловой мощности плазменной дуги от тока (*а*), длины дуги (*б*), расхода плазмообразующего газа (*в*) и скорости вращения дуги (*г*) при $Q_{пл}$ = 10 л/мин (*а*, *б*, *г*); $L_д$ = 10 мм (*а*, *в*, *г*); n = 800 об/мин (*а*–*в*); $I_д$ = 500 А (*б*–*г*)

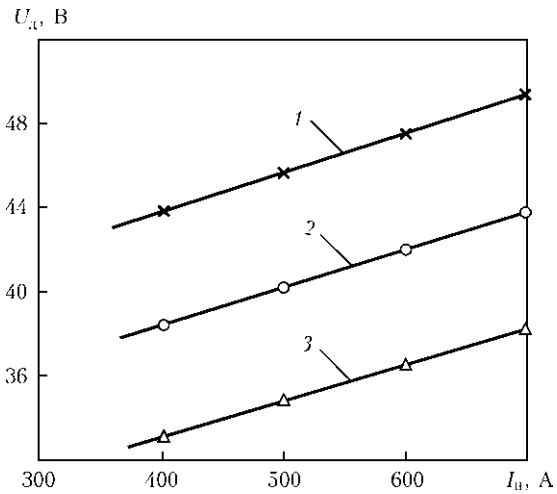


Рис. 8. Зависимость напряжения на дуге от тока наплавки ($Q_{пл}$ = 10 л/мин; n = 800 об/мин) при различной длине дуги: *1* — $L_д$ = 15; *2* — 10; *3* — 5 мм

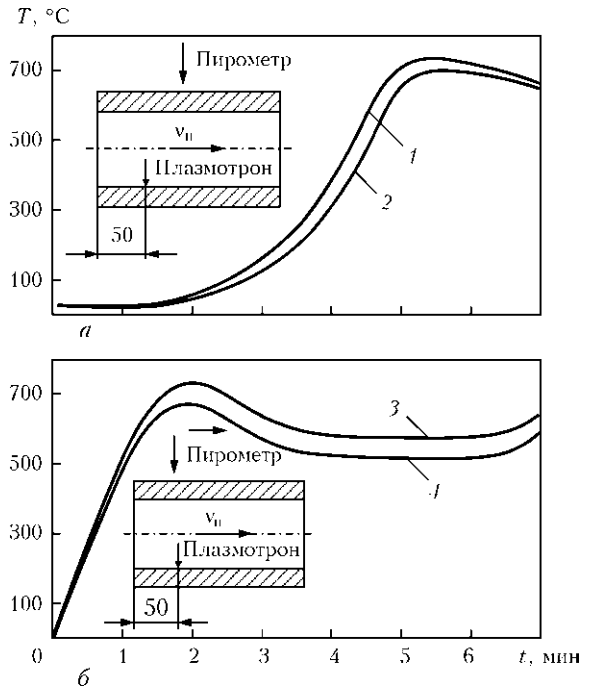


Рис. 9. Изменение температуры наружной поверхности втулки в процессе наплавки в среднем сечении (*а*) и в сечениях, совпадающих с осью дуги (*б*): *1*, *3* — расчетные кривые; *2*, *4* — экспериментальные

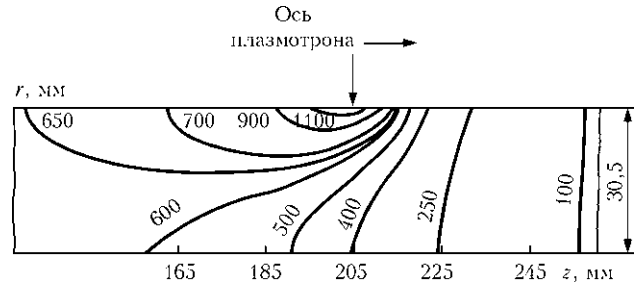


Рис. 10. Тепловое поле (°С) в стенке втулки бурового насоса УНБТ-950 спустя 8 мин после начала наплавки

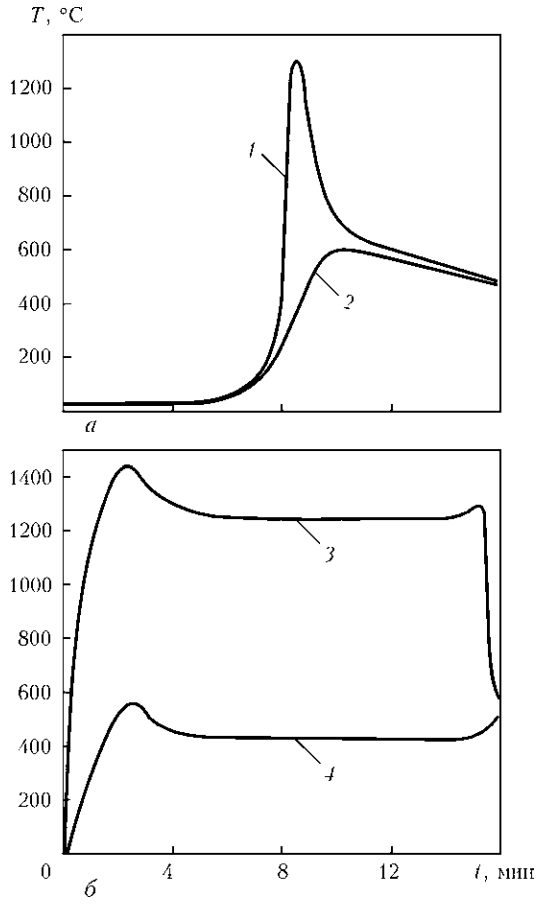


Рис. 11. Изменение температуры на внутренней (*1*, *3*) и внешней (*2*, *4*) поверхностях стенки втулки в среднем сечении (*а*) и в сечениях, совпадающих с осью дуги (*б*)

торяли 3…4 раза. Некоторые результаты исследования представлены на рис. 7, 8.

Для проверки адекватности расчетной модели экспериментально исследовали нагрев наружной поверхности стальной втулки в процессе наплавки (внутренний диаметр втулки 105 мм, наружный 135 мм, длина 250 мм). В качестве присадочного материала использовали порошок марки ПГ-СР4 (ГОСТ 21448–75) грануляции 80…200 мкм. Режим наплавки: ток дуги 500 А, скорость осевого перемещения плазмотрона 35,5 мм/мин, расход плазмообразующего газа (аргона) 10 л/мин, скорость вращения детали 800 об/мин, толщина наплавляемого слоя 2 мм. Наплавку начинали на расстоянии 50 мм от левого конца втулки. Основными критериями выбора параметров режима наплавки были хорошее формирование наплавляемого слоя и минимальное проплавление основного металла (< 3 %).

Запись температуры проводили при неподвижном пирометре, направленном на середину втулки (рис. 9, *а*), и при его синхронном с дугой перемещении вдоль втулки (рис. 9, *б*). В последнем случае оптическая ось пирометра и ось плазмотрона совпадали. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных кривых составляет не более 7 %.

Рис. 12. Макрошлиф поперечного сечения втулки

Разработанная математическая модель позволяет рассчитать температуру в любой точке изделия в зависимости от режима наплавки, что существенно облегчает выбор оптимальных параметров режима. Например, задав температуру внутренней поверхности стенки втулки, можно методом последовательных приближений подобрать эффективную тепловую мощность дуги, скорость осевого перемещения плазмотрона и другие параметры режима, обеспечивающие эту температуру (на персональном компьютере эта задача решается за 10…15 мин). Программное обеспечение позволяет проследить на мониторе компьютера тепловое состояние изделия в любой момент наплавки, что очень важно для нестационарного процесса (начало и конец наплавки, наплавка втулок с переменной толщиной стенки и т. п.).

На рис. 10 в качестве примера показано тепловое поле втулки бурового насоса УНБТ-950 спустя 8 мин после начала наплавки. Размеры втулки: внутренний диаметр 154 мм, наружный 215 мм, длина 450 мм. Режим наплавки: ток дуги 25600 А; скорость осевого перемещения плазмотронов 30 мм/мин; расход плазмообразующего газа в каждом плазмотроне 10 л/мин; длина дуг 10 мм; толщина наплавляемого слоя 2,5 мм; скорость вращения детали 800 об/мин. Начало наплавки на расстоянии 50 мм от левого торца втулки. Наплавляемый материал — сплав на основе железа. На рис. 11 для этой же втулки показано изменение температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки на протяжении всего цикла наплавки. Анализ приведенных кривых показывает, что данный режим наплавки близок к оптимальному. Температура на внутренней стенке втулки при установившемся процессе составляет 1240 °С, что на 100…150 °С выше температуры плавления присадочного порошка, и следовательно, сплавление наносимого слоя с основным металлом должно быть обеспечено. В то же время она ниже температуры плавления основного металла, благодаря чему разбавление наплавленного металла должно быть минимальным. На рис. 12 представлен макрошлиф поперечного сечения втулки, который подтверждает сделанный вывод.

Выводы

1. Разработанная математическая модель нагрева изделия при ЦППН достаточно точно описывает тепловые процессы. Проведенная серия вычислительных экспериментов позволила оптимизировать параметры наплавки.

2. Расчетно-экспериментальная методика определения коэффициента теплоотдачи с поверхности вращающейся втулки позволила определить его значение, которое составляет 50 Вт/(м^2·К).

3. Разработан измерительный стенд и предложена методика определения эффективной тепловой мощности при ЦППН. Полученные количественные данные успешно использованы в технических расчетах.

1. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
2. *Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А*. Плазменно-порошковая наплавка в арматуростроении. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 64 с.
3. *Гладкий П. В., Сом А. И., Переплетчиков Е. Ф.* Центробежная плазменная наплавка // Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1984. — С. 31–34.
4. *Гладкий П. В., Павленко А. В., Зельниченко А. Т.* Математическое моделирование нагрева порошка в дуге при плазменной наплавке // Автомат. сварка. — 1989. — № 11. — С. 17–21.
5. *Зельниченко А. Т.* Разностная схема сквозного счета для уравнения теплопроводности с сосредоточенной теплоемкостью // Вычисл. и прикладная математика. — 1984. — Вып. 53. — С. 57–65.
6. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
7. *Вайнбойм Д. И., Ратманова Ж. В.* Энергетические характеристики дуги, горящей в аргоне, с различной степенью сжатия // Свароч. пр-во. — 1974. — № 5. — С. 1–3.
8. *Кулагин И. Д., Николаев А. В.* Обработка материалов дуговой плазменной струей. — М.: Ин-т металлургии им. А. А. Байкова, 1960. — 31 с.
9. *Стихин В. А., Пацкевич И. Р.* Определение тепловых характеристик сжатой дуги // Свароч. пр-во. — 1967. — № 9. — С. 26–27.
10. *Попов М. М.* Термометрия и калориметрия. — М.: Моск. ун-т, 1954. — 942 с.
11. *Николич А. С.* Поршневые буровые насосы. — М.: Недра, 1973. — 224 с.
12. *Юзвенко Ю. А., Гавриш В. А., Марьенко В. О.* Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 23–27.

In this work the optimum modes of CPPH were determined by computational experiment method. It was applied to study the thermal processes running in a thick-wall pipe. The heat transfer and effective heat power coefficients required for conducting the computational experiment, were determined using the proposed experiment-calculated method and specially designed measuring stand.

Поступила в редакцию 11.02.2010

УДК 669.539.376

ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ ПО МЕХАНИЗМУ ПОЛЗУЧЕСТИ

В. В. ДМИТРИК, д-р техн. наук, **С. Н. БАРТАШ**, инж. (Укр. инж.-педагог. акад., г. Харьков)

Рассмотрены особенности повреждаемости длительно эксплуатируемых сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей по механизму ползучести. Предложено представлять процесс повреждаемости металла сварных соединений трехстадийным. Он существенно зависит от деградации металла, которая контролируется физико-химическими процессами, происходящими в металле сварных соединений.

Ключевые слова: дуговая сварка, теплоустойчивые перлитные стали, паропроводы, сварные соединения, коррозионная среда, ползучесть, повреждаемость, физико-химические процессы

Сварные паропроводы высокого давления, изготовляемые из теплоустойчивых перлитных сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, работают длительное время в условиях ползучести и малоцикловой усталости в коррозионной среде. Основными составляющими разрушаемости сварных соединений являются трещины ползучести, усталостные и усталостно-коррозионные трещины, механизмы образования которых существенно отличаются [1–4]. Одним из видов разрушений также является и коррозионная повреждаемость, роль которой при длительной наработке сварных соединений возрастает. На наш взгляд, для общей оценки деградации металла вклад приведенных составляющих в повреждаемость сварных соединений следует рассматривать отдельно.

Целью настоящей работы является уточнение особенностей повреждаемости длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей по механизму ползучести.

В процессе наработки в металле сварных соединений накапливается пластическая деформация, уровень которой локально может составлять от 0,5 до 8 % [2]. Трещины ползучести образуются с наружной стороны длительно работающих сварных соединений, а последующее развитие трещин происходит вглубь металла (рис. 1). Такие трещины преимущественно образуются по участку сплавления или участку неполной перекристаллизации металла ЗТВ [1, 2, 5, 6], однако их образование в сварных соединениях паропроводов с ресурсом эксплуатации свыше 200000 ч, отмечается и по наплавленному металлу. Скорость развития трещин существенно зависит от структурной, химической и механической неоднородности сварных соединений [2, 6–8], трещины имеют преимущественно хрупкий межзеренный характер (рис. 2). Наличие структурной неоднородности обусловливает различную интенсивность физико-химических процессов, протекающих в металле длительно эксплуатируемых (> 200000 ч) сварных соединений, к которым относят объемную диффузию атомов хрома, марганца, кремния и фосфора в тонкую приграничную зону зерен α-фазы [9]; зернограничную диффузию; перемещение дислокаций путем переползания и скольжения; полигонизацию зерен α-фазы; карбидные реакции $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$; образование, перемещение и слияние микронесплошностей. Наибольшая интенсивность таких процессов характерна

Рис. 1. Макрошлиф (×1,5) сварного соединения стали 12Х1МФ с трещиной ползучести в металле шва (паропровод свежего пара, ресурс 190000 ч)

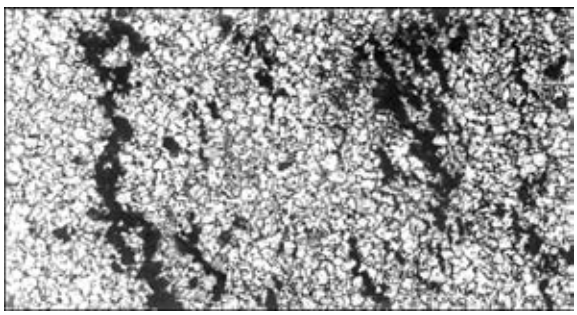


Рис. 2. Микроструктура (×100) металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения из стали 12Х1МФ паропровода острого пара (третья стадия повреждаемости, ресурс 210000 ч)

© В. В. Дмитрик, С. Н. Барташ, 2010

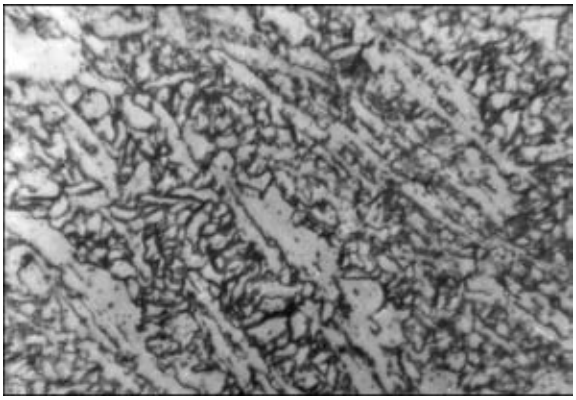


Рис. 3. Микроструктура (×600) металла шва сплава типа 09ХМФ с удлиненными зернами α-фазы (основной металл сталь 15Х1М1Ф)

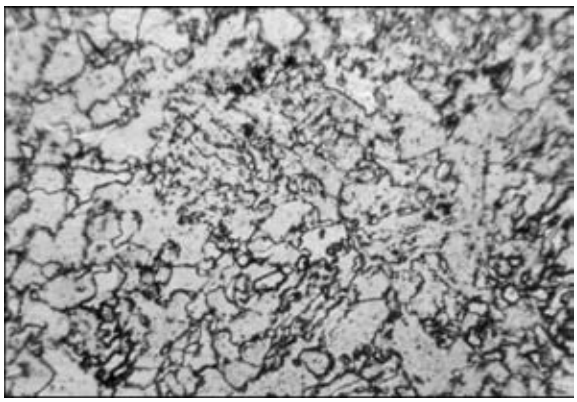


Рис. 4. Микроструктура (×300) участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварных соединений из стали 12Х1МФ паропроводов острого пара (ресурс 275637 ч)

для структур, классифицируемых как браковочные или близкие им. На наш взгляд, перечень браковочных структур следует расширить. К ним следует отнести структуры, состоящие из зерен α-фазы (рис. 3) с $l/n > 2$, где l — длина зерен; n — ширина зерен от 15 мкм и более. Такие структуры образуются при сварке на повышенных режимах, например, при механизированной сварке соединений толщиной 60 мм в среде CO_2 + Ar на токе 400 А. В условиях анизотропии и кубической сингонии зерен α-фазы, а также различного уровня активации степень интенсивности зернограничной и объемной диффузии будет существенно отличаться. Наличие удлиненной формы зерен соответственно вследствие увеличенной интенсивности зернограничной диффузии (в меньшей мере объемной), способствует ускоренному образованию сегрегаций атомов хрома, молибдена, фосфора и марганца по их границам [7, 10]. При наличии таких сегрегаций существенно (в 2…3 раза) увеличивается скорость твердофазных реакций $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ по границам зерен α-фазы по сравнению с реакциями между аналогичными выделениями, расположенными по телу зерен.

На участке сплавления металла ЗТВ с металлом шва, претерпевающим сварочный нагрев в области температур T_L–T_S, могут локально формироваться в зависимости от условий нагрева укрупненные равноосные либо укрупненные по длине зерна α-фазы [6] или видманштеттов феррит. Ширина участка сплавления составляет около 0,1…0,2 мм, а деформация металла (применительно к наработке 200000 ч) может составлять 2…3 %. Для сравнения деформация основного металла (не претерпевающего сварочный нагрев) в аналогичных условиях составляет соответственно 0,5…0,7 %, что отвечает требованиям нормативной документации.

Форма и размеры участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ, ширина которого составляет примерно 1,2…1,7 мм, зависят от сварочного нагрева и имеют отличия по толщине сварных соединений. Новые продукты распада аустенита здесь могут быть в виде перлита, сорбита, троостита или бейнита и явно отличаться от структуры основного металла [5, 6, 9, 11, 12]. Деформация металла участка может составлять 3…5 %, а значение разупрочнения по сравнению с основным металлом от 5 до 20 %, что близко к данным работы [2]. Однако разупрочнения при наличии новых продуктов распада аустенита в виде бейнита или троостита могут и не наблюдаться [6]. Характерной особенностью структуры данного участка является разнозернистость (рис. 4) и увеличенные структурная и химическая неоднородность. В металле участка более интенсивно по сравнению с другими участками проходят физико-химические процессы. Их интенсивность существенно зависит от вида новых продуктов распада аустенита. С наибольшей интенсивностью процессы проходят в тех структурах, где новые продукты распада аустенита представляют перлит, с наименьшей, где бейнит. Подтверждением является заметно увеличенная коагуляция выделений $M_{23}C_6$ по границам зерен α-фазы и образование из таких выделений цепочек, имеющих элементы сплошности (рис. 5).

Допустимая деформация металла сварных соединений ($\varepsilon < 1$ %) характеризуется формированием субструктуры зерен α-фазы [3, 8] и обеспечивается переползанием и скольжением дислокаций. Вклад переползания и скольжения дислокаций в процесс полигонизации на различных стадиях его реализации имеет отличительные особенности, что связано с диффузионным перемещением атомов хрома, молибдена, кремния и марганца. Эффективно тормозят перемещающиеся дислокации стабильные выделения VC, равномерно распределенные по телу зерен α-фазы и по их границам. Целесообразно также, чтобы расстояние между VC, продольные размеры которых близки к 0,7…2,0 нм, находилось в пределах 80…110 нм.

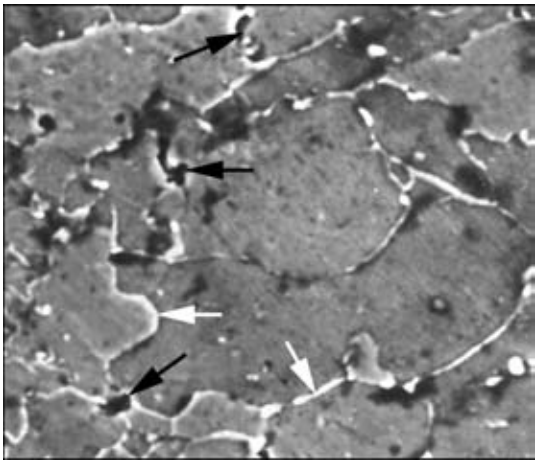


Рис. 5. Микроструктура (×2500) участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ с выделениями $M_{23}C_6$ по границам зерен α-фазы (светлые стрелки) и порами (темные) (образец тот же, что и на рис. 4)

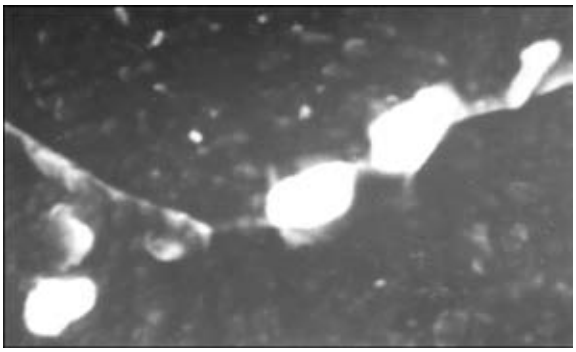


Рис. 6. Микроструктура (×7500) участка ЗТВ с выделениями $M_{23}C_6$ после коалесценции

Торможение подвижности дислокаций в зернах α-фазы также происходит с помощью сил трения (сил Пайерлса) путем взаимодействия атомов хрома, молибдена, ванадия, марганца и кремния с дислокациями, образования в α-фазе локальных скоплений легирующих элементов (типа зон Гинье–Престона) и атмосфер примесных атомов вокруг дислокаций, а также барьерным эффектом зерен и субзерен.

Повреждаемость длительно эксплуатируемых сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей, проходящую по механизму ползучести, удобно классифицировать как трехстадийную.

Первая стадия повреждаемости характеризуется увеличением локальной сегрегации хрома, молибдена, кремния, фосфора и марганца по границам зерен α-фазы, карбидными реакциями $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$, коагуляцией выделений первой группы, в том числе путем коалесценции (рис. 6), а также концентрацией таких выделений по границам зерен α-фазы (рис. 5). Установлено, что коагулируют и образуют цепочки преимущественно выделения $M_{23}C_6$ [10]. Их количество среди карбидов, образующих цепочки, составляет

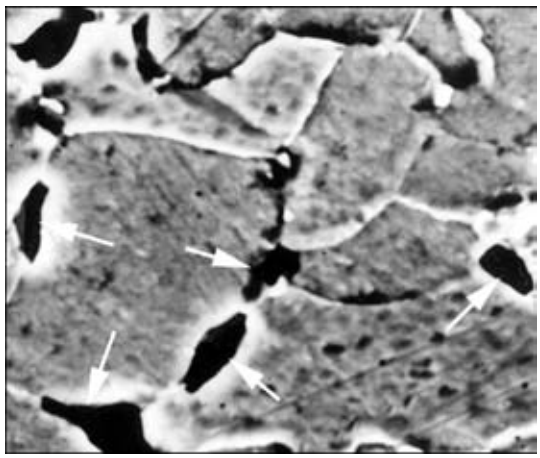


Рис. 7. Микроструктура (×5000) участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварного соединения паропровода острого пара (стрелки — микропоры по границам зерен α-фазы)

около 70 %, соответственно выделений M_7C_3 выявлено около 15 %, $M_{23}C$ — 10 %, $M_6C \leq 5$ %.

На второй (инкубационной) стадии повреждаемости происходит процесс слияния микронесплошностей и образование микропор ползучести размером около 0,01…0,9 мкм. Эффективное выявление таких микропор возможно лишь с помощью электронной микроскопии.

Третья стадия повреждаемости (наработка менее 250000 ч) характеризуется образованием слившихся и отдельных микропор размером 1…4 мкм, а также образованием микро- и макротрещин ползучести (см. рис. 1). По направлению магистральной макротрещины располагаются микротрещины и слившиеся крупные микропоры, имеющие разветвленную форму (рис. 7). Увеличенная степень деформации металла по направлению развития макротрещины способствует ускоренному ее развитию. Повреждаемость на третьей стадии в основном имеет межзеренный хрупкий характер и хорошо выявляется путем использования оптической микроскопии.

Целесообразным является своевременное выявление именно этой стадии повреждаемости и проведение ремонта с использованием прошедших апробацию технологий [2].

В действующих сварных соединениях паропроводов наблюдаются трещины или поры, которые при их дальнейшей наработке не претерпевают развития, хотя их количество может быть критическим [4, 8, 9]. Торможение здесь можно объяснить наличием примыкающей к направлению развития трещин и пор структуры, имеющей заметно уменьшенную деградацию. Однако при наличии критического уровня повреждаемости сварных соединений во избежании внезапного их разрушения такие сварные соединения подлежат ремонту или замене.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что повреждаемость сварных соединений по механизму ползучести существенно зависит от интенсивности физико-химических процессов, протекающих в их металле при длительной эксплуатации (наработка >200000 ч).

2. Повреждаемость, происходящую по механизму ползучести в длительно эксплуатируемых сварных соединениях из теплоустойчивых перлитных сталей, следует рассматривать как трехстадийную.

1. *Механіка* руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник / Під заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка. В 7 т. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування. — Київ: Видавничий дім «Академперіодика», 2005. — 376 с.
2. *Хромченко Ф. А.* Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 351 с.
3. *Дмитрик В. В., Коныk А. И.* К концепции зарождения пор в сварных соединениях при низкотмпературной ползучести // Автомат. сварка. — 2005. — № 7. — С. 28–31.
4. *Оценка* остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов ТЕС / В. В. Дмитрик, А. К. Царюк, А. А. Бугаец, Е. Д. Гринченко // Там же. — 2006. — № 2. — С. 7–11.
5. *Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В.* Долговечность металла в условиях ползучести. — М.: Металлургия, 1988. — 222 с.
6. *Дмитрик В. В.* Моделирование структуры сварных соединений теплоустойчивых перлитных сталей // Автомат. сварка. — 2000. — № 4. — С. 27–30.
7. *Царюк А. К.* Особенности влияния фосфора на размер неметаллических включений и свойства швов соединений теплоустойчивой стали // Там же. — 1999. — № 4. — С. 26–30.
8. *Березина Т. Е., Бугай Н. В., Трунин И. И.* Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техніка, 1991. — 118 с.
9. *Утевский Л. М., Гликман Е. Э., Карк Г. С.* Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. — М.: Металлургия, 1987. — 220 с.
10. *Дмитрик В. В., Баумер В. Н.* Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений при длительной эксплуатации // Металлофизика, новейшие технологии. — 2007. — **29**, № 7. — С. 937–948.
11. *Дмитрик В. В., Царюк А. К., Коныk А. И.* Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений паропроводов в условиях ползучести // Автомат. сварка. — 2008. — № 3. — С. 39–43.
12. *Березина Т. Е.* Структурный метод определения остаточного ресурса деталей длительно работающих паропроводов // Теплоэнергетика. — 1986. — № 3. — С. 53–56.

Considered are the features of damageability of long-term operating welded joints from heat-resistant pearlitic steels by the creep mechanism. It is shown that damageability of welded joints is a three-stage process, and essentially depends on metal degradation, which is controlled by physico-chemical processes occurring in welded joint metal.

Поступила в редакцию 01.10.2009

11–17 июля 2010 **г. Стамбул, Турция**

63-й ЕЖЕГОДНЫЙ КОНГРЕСС И КОНФЕРЕНЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ

Представитель организационного комитета ms.K.Kahraman,
E-mail: kkahraman@gedik.com.tr;
тел.: +90 216-378-79-41
www.iiw2010.com

УДК 621.791.72

УСТРАНЕНИЕ ПОДРЕЗОВ ПРИ ЭЛС СО СКВОЗНЫМ И НЕСКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

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

Рассмотрены некоторые особенности формирования кратера и сварочной ванны при электронно-лучевой сварке титанового сплава ВТ20 толщиной 17 мм со сквозным и несквозным проплавлением в различных пространственных положениях. Приведены схемы сварки и режимы, обеспечивающие бездефектное формирование лицевого и обратного валиков шва.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановые сплавы, электронный пучок, схема сварки, сварочная ванна, дефекты, кратер, лицевой и обратный валики шва

Принцип бездефектности ответственных конструкций в авиационной и космической промышленности подразумевает также получение качественных сварных соединений, формируемых при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) без подрезов по обеим сторонам шва. Упомянутые дефекты не допустимы, поскольку приводят к резкому снижению работоспособности сварных соединений. Проблема устранения подрезов на лицевом и обратном валике шва особенно актуальна при сварке титановых сплавов.

Известно, что подрезы на лицевом и обратном валиках шва устраняют путем специальной подготовки свариваемых стыков с технологическим утолщением 2…3 мм, которое после сварки удаляют механическим способом [1].

В настоящей работе с целью исключения подрезов изучено формирование швов при ЭЛС со сквозным и несквозным проплавлением жаропрочного псевдоα-сплава титана ВТ20 толщиной δ = 17 мм в различных пространственных положениях. Выбор сплава ВТ20 в качестве объекта исследований обусловлен тем, что он широко применяется при производстве сварных конструкций.

Химический состав сплава ВТ20 согласно ГОСТ 23755–79 включает, мас. %: 5,5…7,5 Al; 0,5…2,0 Mo; 0,8…1,8 V; 1,5…2,5 Zr. Регламентируемые примеси имеют следующее содержание, мас. %: 0,18 [O_2]; 0,05 [N_2]; 0,015 [H_2].

Проплавление и сварку встык пластин сплава ВТ20 размером 17×100×330 мм осуществляли на установке КЛ-138 с компьютерным управлением конструкции ИЭС им. Е. О. Патона с энергетическим комплексом на базе ЭЛА-60/60 и электронно-лучевой пушкой (ЭЛП), которая перемещается внутри вакуумной камеры по линейным координатам *x*, *y*, *z*. Собранные встык пластины фиксировали короткими прихватками с обеих сторон аргонодуговой сваркой, а затем их устанавливали в сварочно-сборочное приспособление. Выбраны следующие пространственные схемы сварки (рис. 1):

1 — нижнее положение (вертикальный электронный пучок), при котором направление силы тяжести расплавленного металла в кратере и электронного пучка совпадают; ЭЛП перемещается по координате *y–y*;

2 — вертикальное положение (горизонтальный электронный пучок), при котором направление силы тяжести перпендикулярно оси электронного пучка; ЭЛП перемещается по координате *y–y*;

3 — вертикальное положение (горизонтальный электронный пучок), при котором направление силы тяжести перпендикулярно оси электронного пучка и совпадает с направлением переноса расплавленного металла в кратере; ЭЛП перемещается снизу вверх по координате *z–z*;

4 — вертикальное положение (горизонтальный электронный пучок), при котором направление силы тяжести перпендикулярно оси электронного пучка и против направления переноса расплавленного металла в кратере; ЭЛП перемещается сверху вниз по координате *z–z*.

Фокусировка электронного пучка на поверхности свариваемых пластин, совмещение элект-

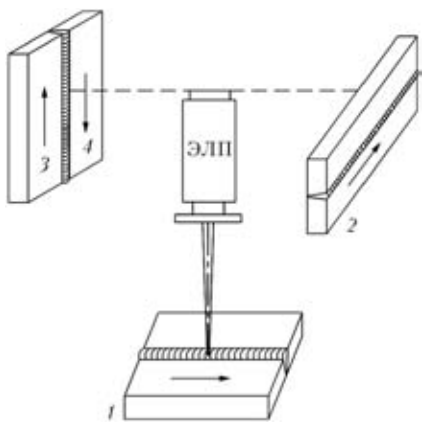


Рис. 1. Схема сварки в нижнем (*1*), горизонтальном (*2*) и вертикальном (*3*, *4*) положениях: *1–4* — см. в тексте

© Л. А. Кравчук, 2010

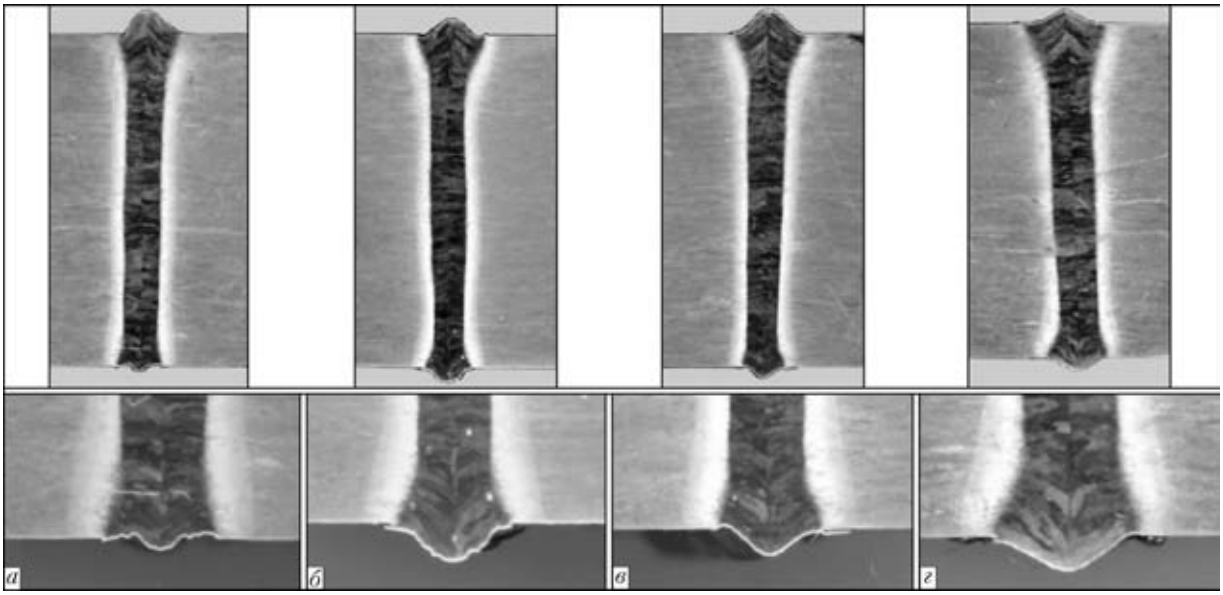


Рис. 2. Макроструктуры (×3,7) сварных соединений сплава ВТ20 (δ = 17 мм) (*вверху*) и формирование обратного валика шва (×15) (*внизу*): *а* — сварка в нижнем положении; *б* — горизонтальным пучком, ЭЛП перемещается по горизонту; *в* — то же снизу вверх; *г* — то же сверху вниз

ронного пучка со стыком, визуализация процесса ЭЛС при выполнении чистки околошовной зоны маломощным остросфокусированным электронным пучком и короткими прихватками осуществляли автоматически по программе с помощью системы «Растр-6» во вторично-эмиссионном изображении [2], которая обеспечивала точность совмещения не хуже 0,1 мм и увеличение объекта наблюдения в 5 раз. Контроль фокусировки по четкости изображения на мониторе системы «Растр-6» проверяли визуально по яркости свечения круговой развертки электронного пучка диаметром $d_{круг}$ = 5 мм с током пучка $I_п$ = 10 мА на медной пластине. Расхождение сравниваемых значений тока фокусировки при рабочем расстоянии от среза пушки до пластины $l_{раб}$ = 200 мм составило ±1 мА на уровне $I_ф$ = 550 мА, что вполне приемлемо для практического применения.

Выбор скорости сварки сплава ВТ20 толщиной 17 мм со сквозным проплавлением за один проход и формированием лицевого и обратного валиков шва является отправной точкой исследований. Нами установлено, что при скорости сварки $v_{св}$ = 100 м/ч (27,8 мм/с) обратный валик формируется без подрезов, на лицевом валике подрезы минимальные. По мере увеличения скорости сварки расширяется область оптимальных значений токов электронного пучка и фокусировки, а геометрия проплавления от клиновидной приближается к цилиндрической.

Для получения швов с параллельными стенками и создания условий по выходу газов нашли применение различные технологические развертки электронного пучка — по окружности, эллипсу, продольная, поперечная, по дуге и др. [3, 4]. Из всех типов разверток нами применена поперечная, в которой локальные колебания электронного пучка происходят по пилообразному закону. При амплитуде поперечных колебаний пучка A = 0,6 мм и частоте колебаний по пилообразному закону F = 500 Гц получен лицевой валик шва, выполненного на сплаве ВТ20, с минимальными подрезами.

При ЭЛС остросфокусированным электронным пучком без разделки кромок максимально достижимая глубина проплавления при толщине образцов до 40 мм практически одинакова и не зависит от силы тяжести $F_{тяж}$ расплавленного металла шва и ориентации стыка в пространстве [5]. При стыковых соединениях со сквозным проплавлением титана за один проход для бездефектного формирования обратного валика шва значение тока электронного пучка устанавливается в диапазоне $I_п = (1{,}75…2{,}0)I_0$, где I_0 — ток пучка, при котором появляются первые признаки сквозного проплавления [6].

На основании изложенных выше предпосылок отработан режим ЭЛС для всех четырех пространственных положений, который затем не изменялся: ускоряющее напряжение $U_{уск}$ = 60 кВ; $I_п$ = 350 мА; $v_{св}$ = 30 мм/с; $I_ф$ = 553 мА; $l_{раб}$ = = 200 мм; A = 0,6 мм; F = 500 Гц.

Проведенный металлографический анализ сварных соединений сплава ВТ20 со сквозным проплавлением позволил выявить некоторые особенности. Как видно, на поперечных макрошлифах, формирование обратного валика шва при ЭЛС вертикальным электронным пучком в нижнем положении сопровождается образованием подрезов и занижений до 0,3 мм (см. рис. 2, *а*), которые в связи с нехваткой металла косметическим заглаживанием не удаляются; лицевой ва-

лик шва формируется с превышением над поверхностью пластины до 2,5 мм и выравнивается путем повторного косметического прохода.

При ЭЛС горизонтальным электронным пучком с перемещением ЭЛП по горизонту (координата *y*–*y*) обратный валик шва формируется без подрезов (см. рис. 2, *б*), а на лицевом валике по обеим сторонам шва образуются подрезы глубиной до 0,15 мм, которые заглаживаются при повторном косметическом проходе.

При ЭЛС горизонтальным электронным пучком с перемещением ЭЛП по координате *z*–*z* снизу вверх (см. рис. 2, *в*) и сверху вниз (см. рис. 2, *г*) лицевой и обратный валики шва формируются без подрезов; при необходимости они заглаживаются повторным косметическим проходом.

Таким образом, исходя из требований к формированию бездефектных сварных соединений титанового сплава ВТ20 толщиной 17 мм со сквозным проплавлением для промышленного производства можно рекомендовать схемы сварки горизонтальным электронным пучком при перемещении ЭЛП снизу вверх, сверху вниз и по горизонту (координата *y*–*y*) без механической обработки обратного валика шва, ограничиваясь только косметическим проходом.

Визуальное наблюдение процесса формирования кратера и сварочной ванны при ЭЛС горизонтальным электронным пучком в случаях, когда сила тяжести $F_{тяж}$ расплавленного металла и перенос расплава в зону кристаллизации совпадают (ЭЛП перемещается снизу вверх) или направлены против друг друга (ЭЛП перемещается сверху вниз), позволило выявить отличия. Как показано на рис. 3, длина сварочной ванны $L_в$ при движении ЭЛП снизу вверх намного превышает длину сварочной ванны $L_н$ при движении ЭЛП сверху вниз, т. е. $L_в >> L_н$. Это значит, что продолжительность существования сварочной ванны в сравниваемых схемах аналогичная и определяется в первом приближении из соотношения $t_{св} = L/v_{св}$, где L — длина сварочной ванны.

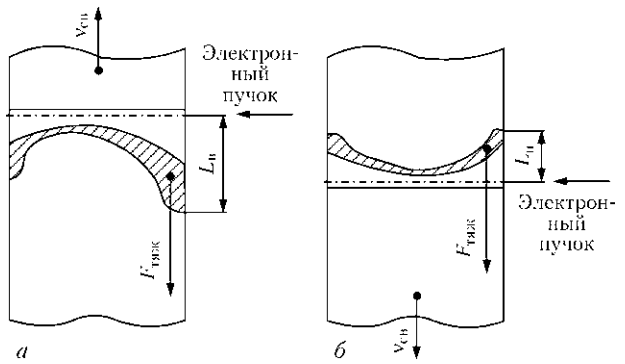


Рис. 3. Схема формирования кратера и сварочной ванны в случае ЭЛС горизонтальным пучком при перемещении ЭЛП снизу вверх (*а*) и сверху вниз (*б*)

Для более детального исследования процесса ЭЛС и подтверждения правомерности соотношения $L_в >> L_н$ проведено видеонаблюдение с помощью системы «Растр-6» и специальной компьютерной программы, позволяющей запоминать процесс формирования кратера и сварочной ванны во времени. При перемещении ЭЛП снизу вверх схлопывания кратера не происходит, а жидкий металл сварочной ванны регулярно переносится в зону кристаллизации (рис. 4, *а*). При перемещении ЭЛП сверху вниз формируется квазистационарная сварочная ванна, а жидкий металл удерживается от выливания силами поверхностного натяжения и давлением паров в канале проплавления (рис. 4, *б*). Из приведенных видеоматериалов по формированию кратера и сварочной ванны видно, что соотношение $L_в >> L_н$ выполняется, при этом различие в длине сварочной ванны может быть в несколько раз.

Направление силы тяжести расплавленного металла и перенос металла в зону кристаллизации также существенно влияют на формирование усиления шва (лицевой валик) и образование подрезов при ЭЛС титановых сплавов горизонтальным пучком с несквозным проплавлением. Серия сварок по стыку и проплавления по сплошному металлу на титановом сплаве ВТ20 (δ = 17 мм) показала, что

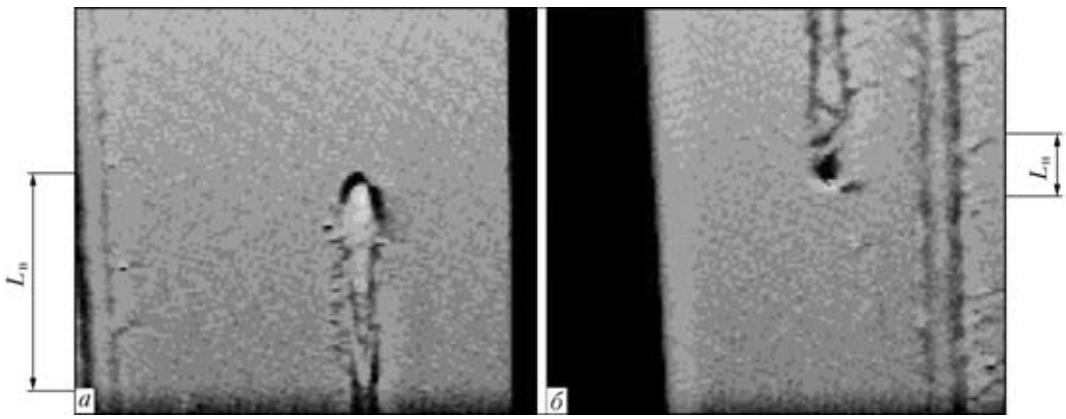


Рис. 4. Видеоизображение кратера и сварочной ванны при ЭЛС горизонтальным пучком сплава ВТ20 (δ = 17 мм): *а*, *б* — см. на рис. 3

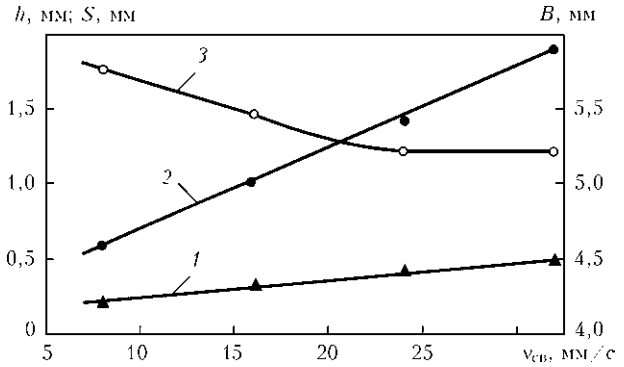


Рис. 5. Зависимость глубины подреза $S = f(v_{св})$ (*1*), усиления лицевого валика $h = f(v_{св})$ (*2*) и ширины шва $B = f(v_{св})$ (*3*) от скорости сварки

при ЭЛС горизонтальным пучком по схеме снизу вверх с изменением скорости сварки в диапазоне $v_{св}$ = 8…32 мм/с и сохранением постоянства погонной энергии электронного пучка q/v высота лицевого валика шва и глубина подрезов по обеим сторонам шва увеличиваются по линейному закону; с повышением скорости сварки ширина лицевого валика уменьшается нелинейно и стабилизируется при $v_{св}$ = 24 мм/с (рис. 5).

В случае ЭЛС горизонтальным пучком с несквозным проплавлением сплава ВТ20 (δ = 17 мм) по схеме сверху вниз с изменением скорости сварки ($v_{св}$ = 8…32 мм/с) и сохранением постоянства погонной энергии q/v лицевой валик формируется регулярно и равномерно по всей длине шва с небольшим усилением и без подрезов (рис. 6).

Таким образом, при ЭЛС титанового сплава ВТ20 горизонтальным пучком с несквозным проплавлением формирование сварных соединений без подрезов на лицевом валике шва достигается только при использовании схемы сверху вниз. Этот технологический прием рекомендуется применять в промышленном производстве в случаях, когда механическая обработка лицевого валика шва не допустимы.

Следует отметить, что все сваренные образцы и макеты изделий из сплава ВТ20 (δ = 17 мм) со сквозным проплавлением на приведенном выше режиме ЭЛС прошли рентгеновский контроль. Дефектов в виде пустот, пор, подрезов и несплавлений не обнаружено. Бездефектное формирование сварных соединений титанового сплава ВТ20 (δ = 17 мм), полученных ЭЛС со сквозным проплавлением, достигается при схеме сварки горизонтальным электронным пучком с перемещением ЭЛП снизу вверх, сверху вниз и по горизонту. Таким образом, рекомендованные схемы сварки и разработанные режимы ЭЛС титанового

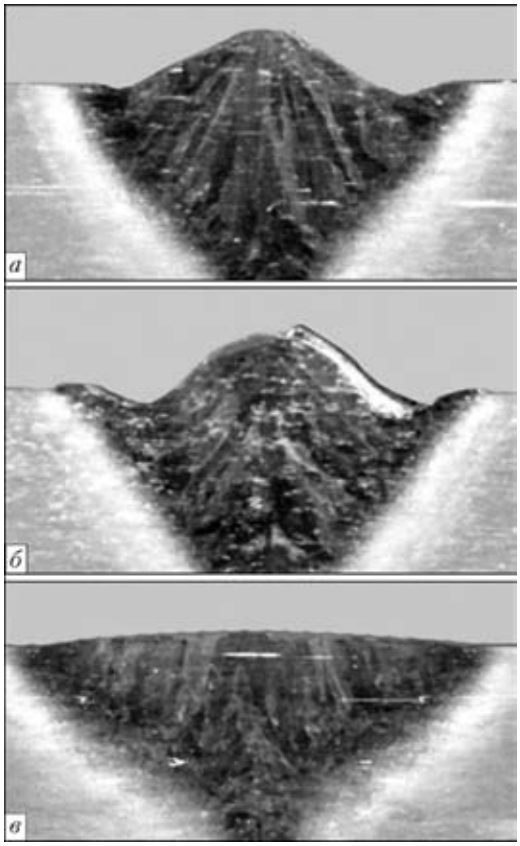


Рис. 6. Макроструктуры (×8) сварных соединений сплава ВТ20 с несквозным проплавлением и лицевым валиком шва: *а*, *б* — ЭЛС горизонтальным пучком по схеме снизу вверх соответственно при $v_{св}$ = 8 и 32 мм/с; *в* — сверху вниз, $v_{св}$ = = 8 мм/с

сплава ВТ20 позволяют исключить механическую обработку лицевого и обратного валиков шва.

1. *Stocker G.* Erfahrungen beim Elektronenstrahlschweissen dickwandiger Bauteile aus der Titanlegierung Ti–6Al–4V geglueht // Schweissen und Schneiden. — 1974. — **26**, № 9. — S. 91–93.
2. *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.
3. *Wiesner P., Ehrhard H.* Elektronenstrahlschweissen mit strahlpendeln // Zis Mitteilungen. — 1983. — **25**, № 1. — S. 17–28.
4. *Friedel K. P., Arata Y.* Preliminary evaluation of root defects elimination methods in partial penetration EB welding // Proc. Intern. conf. welding research 1980's, Oct. 27–29, 1980, Osaka, Session F. — Osaka, 1980. — P. 7–12.
5. *Особенности* электронно-лучевой сварки в различных пространственных положениях / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. Е. Локшин, К. С. Акопьянц // Автомат. сварка. — 1972. — № 6. — С. 1–4.
6. *Нудельман Я. Б., Задерий Б. А.* Формирование швов при электронно-лучевой сварке сплавов титана толщиной до 25 мм // Там же. — 1988. — № 5. — С. 29–30.

Some peculiarities of formation of crater and weld pool in through and incomplete penetration electron beam welding of 17 mm thick titanium alloy VT20 in different spatial positions are considered. Welding schemes and parameters providing the defect-free formation of the face and reverse weld beads are given.

Поступила в редакцию 16.12.2009

УДК 621.791.927.55

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

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

Приведены результаты экспериментов по определению влияния технологических параметров процесса плазменной наплавки композиционных сплавов с использованием присадочного материала в виде порошковой ленты, состоящей из металлической оболочки и сердечника, на формирование и износостойкость наплавленного металла. Сердечник ленты включал твердосплавные зерна на основе плавленых карбидов вольфрама (релита).

Ключевые слова: плазменная наплавка, присадочный материал, износостойкость, композиционный сплав, армирующие частицы, ленточный релит

Процесс плазменной наплавки композиционных сплавов [1, 2] с использованием в качестве присадочного материала порошковой ленты, состоящей из металлической оболочки и сердечника из зерен плавленых карбидов вольфрама и мелкодисперсной шихты легирующих и раскисляющих компонентов (ленточного релита), должен обеспечивать получение износостойкого слоя с оптимальными геометрическими параметрами при высоком качестве формирования и высокой износостойкости (рис. 1).

Известно, что износостойкость композиционного сплава определяется концентрацией и износостойкостью армирующих частиц (плавленых карбидов вольфрама) в наплавленном металле и способностью его матрицы удерживать эти частицы. В общем случае указанные свойства износостойкого слоя зависят от технологии наплавки и степени растворения армирующей частицы в процессе наплавки. Растворение зерен карбидов вольфрама приводит к уменьшению концентрации износостойкой фазы и увеличению насыщения матрицы вольфрамом и углеродом, что увеличивает вероятность ее охрупчивания и снижает износостойкость сплава в целом [3].

В данной статье приведены результаты исследований влияния основных технологических параметров процесса плазменной наплавки на качество формирования, структуру и износостойкость наплавленного композиционного металла.

Основные технологические показатели процесса плазменной наплавки изменялись в следующих пределах:

ток дуги прямого действия $I_д$, А	180…340
скорость наплавки $v_н$, м/ч	4…20
скорость подачи присадочного материала $v_п$, м/ч	10…50

Наплавку осуществляли на образцы из низкоуглеродистой стали размером 150×70×20 мм. В качестве исходного режима приняли следующий: $I_д$ = 220 А, U = 34 В, $v_н$ = 8 м/ч, $v_п$ = 20 м/ч, расход плазмообразующего газа 2 л/мин, расход защитного газа 6 л/мин, амплитуда колебаний плазменной горелки 25 мм, частота колебаний плазменной горелки 35 мин$^{-1}$. В качестве присадочного материала использовали ленточный релит АН-ЛЗП-9-8 [4].

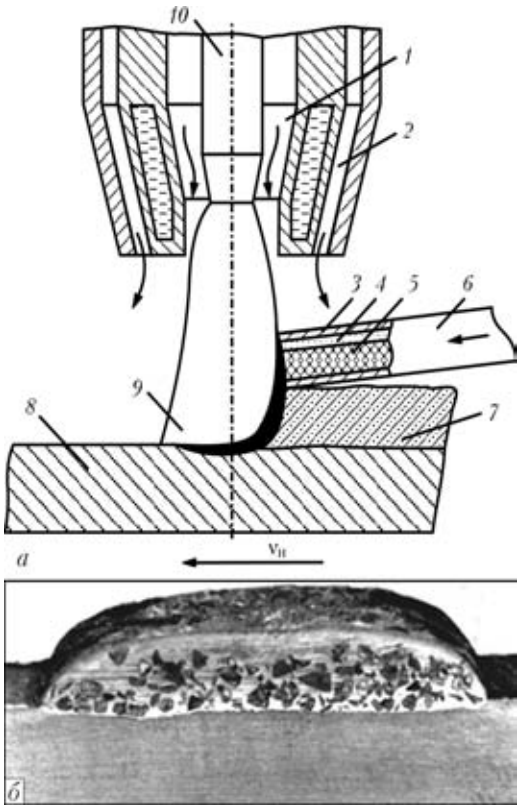


Рис. 1. Схема плазменной наплавки композиционных сплавов с использованием в качестве присадочного материала ленточного релита (*а*) (*1*, *2* — соответственно плазмообразующий и защитный газ; *3* — оболочка; *4* — мелкодисперсная шихта; *5* — армирующие частицы; *6* — присадочный материал; *7* — наплавленный слой; *8* — образец; *9* — столб плазменной дуги; *10* — электрод) и макрошлиф наплавленного валика (*б*)

© А. И. Белый, 2010

Оценку влияния параметров процесса наплавки на свойства наплавленного металла выполняли при нескольких значениях каждого параметра, сохраняя остальные параметры режима постоянными.

Качество наплавленного металла оценивали по методике испытаний композиционных сплавов на износостойкость по закрепленному абразиву (путь трения 30 м, скорость скольжения 0,5 м/с) при одном значении контактного давления, равном 1,055 МПа [3]. Испытывали по три образца наплавленного металла, полученных при фиксированных режимах процесса наплавки, а в качестве показателя принимали среднее арифметическое значение износа контролируемых образцов.

Экспериментально установлено (рис. 2), что наибольшее влияние на износ *И* композиционного металла оказывает сила тока плазменной дуги, с повышением которой увеличивается время существования сварочной ванны и ее объем.

С увеличением продолжительности существования сварочной ванны возрастает время контакта жидкой матричной фазы сплава и армирующих частиц, в результате возрастает степень их растворения, снижается концентрация износостойкой фазы и в итоге уменьшается износостойкость композиционного сплава в целом.

Скорость наплавки в исследуемом диапазоне режимов не оказывает заметного влияния на показатели износостойкости. Однако при дальнейшем ее увеличении происходит ухудшение формирования наплавленного валика, что приводит к несплавлениям, исчезновению общей сварочной ванны, снижению степени проплавления основного металла и невозможности ведения процесса.

При минимальных значениях скорости подачи присадочного материала обеспечивается получение наплавленного металла с низкими эксплуатационными показателями. При этом при фиксированном значении тока наплавки образуется сварочная ванна большого объема, что приводит к растворению армирующих частиц и снижению износостойкости сплава.

При повышении скорости подачи присадочного материала увеличивается объем поступления в плазменную дугу присадочного металла, подлежащего расплавлению, на что необходимо большее количество тепла.

В результате уменьшается растворение армирующих частиц, улучшается формирование наплавленного валика, возрастает его износостойкость. Превышение оптимальной скорости подачи присадочного материала ведет к снижению эффективности плавления поступающего присадочного материала и основного металла, что приводит к прекращению процесса наплавки (см. рис. 2, участок показан штриховой линией).

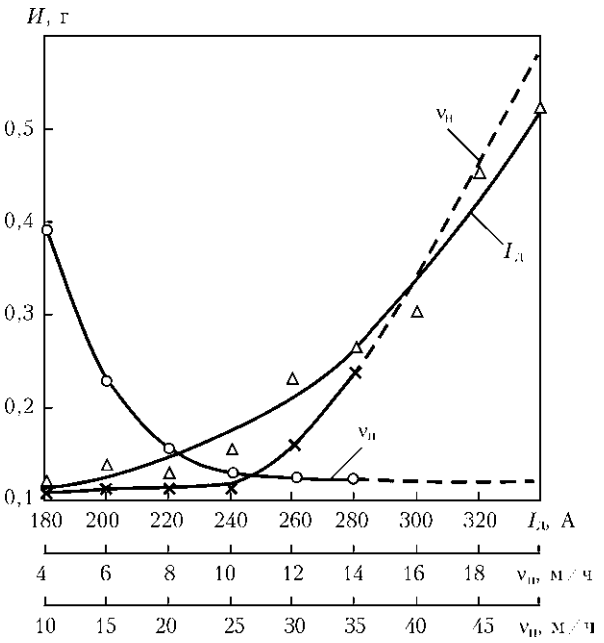


Рис. 2. Влияние основных технологических параметров процесса плазменной наплавки на износ композиционного металла

Таким образом, для каждого типоразмера присадочного материала (ширины и толщины ленточного релита) существует оптимальная область основных технологических показателей процесса наплавки (силы тока, скорости наплавки и скорости подачи присадочного материала), взаимосвязанных между собой и оказывающих решающее значение на формирование и геометрические параметры наплавленных валиков.

Между скоростью наплавки, скоростью подачи присадочного материала и силой тока плазменной дуги существует тесная зависимость (рис. 3). Повышение скорости наплавки обычно сопровождается увеличением скорости подачи присадочного материала для сохранения постоянных раз-

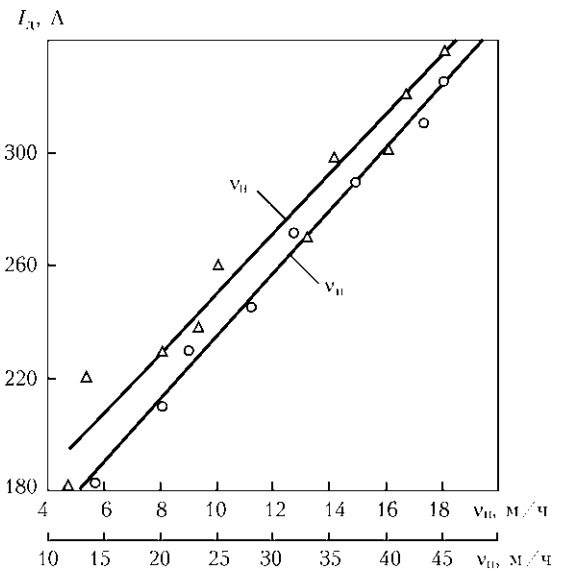


Рис. 3. Зависимость скорости наплавки и скорости подачи присадочного материала от силы тока плазменной наплавки

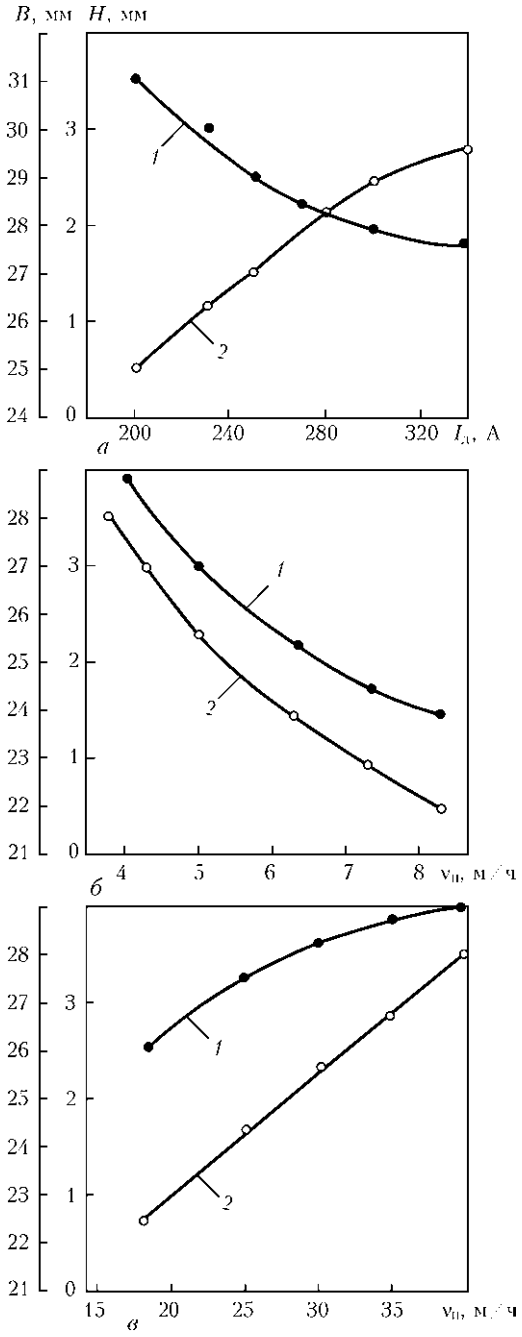


Рис. 4. Влияние тока плазменной дуги (*а*), скорости наплавки (*б*) и скорости подачи присадочного материала (*в*) на высоту *H* (*1*) и ширину *B* (*2*) наплавленного валика

меров наплавленного валика. При этом приходится увеличивать ток плазменной дуги, чтобы обеспечить плавление большего количества присадочного материала.

Таким образом, выбор оптимальных режимов плазменной наплавки сводится к определению силы тока, скорости наплавки и скорости подачи присадочного материала. Значения остальных параметров процесса (расход плазмообразующего и защитного газа, напряжение дуги и пр.) незначительно влияют на формирование износостойкого сплава и поддерживаются в указанных выше пределах.

Влияние основных технологических параметров процесса плазменной наплавки на размеры и форму наплавленных валиков показано на рис. 4.

Как показывает опыт, толщина слоя наплавленных валиков не должна превышать 4…5 мм, иначе наблюдается резкое снижение качества наплавки, выражающееся в значительном растворении армирующих частиц. Минимальная толщина наплавленного металла, которую удалось получить при использовании ленточного релита с армирующими зернами размером 0,40…063 мм, составляет около 0,7 мм, однако ведение такого процесса наплавки представляет собой значительную трудность, основная роль при этом отводится качеству присадочного материала.

Таким образом, определены основные технологические показатели процесса плазменной наплавки ленточным релитом и их влияние на качество композиционного наплавленного металла. Установлено, что наибольшее влияние на износостойкость композиционного сплава оказывает сила тока плазменной дуги.

1. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
2. *А. с. 1622097.* Способ плазменной наплавки композиционных сплавов / А. И. Белый. — Опубл. 22.09.1990.
3. *Белый А. И.* Материалы и технология наплавки композиционным сплавом элементов бурильной колонны: Дис. … канд. техн. наук. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2006. — 170 с.
4. *ТУ ИЭС 677–88.* Релит ленточный АН-ЛЗП.

The paper presents the results of experiments on determination of the influence of technological parameters of the process of plasma cladding of composite alloys using filler material in the form of flux-cored strip consisting of a metal sheath and core, on formation and wear-resistance of deposited metal. Strip core included hard-alloy grains based on fused tungsten carbide.

Поступила в редакцию 25.12.2009

УДК 621.791.4.01

ПРЕССОВАЯ СВАРКА МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО СОРТАМЕНТА

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **В. С. КАЧИНСКИЙ**, канд. техн. наук, **В. Ю. ИГНАТЕНКО**, **Е. И. ГОНЧАРЕНКО**, **М. П. КОВАЛЬ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны особенности прессовой сварки деталей автомобильного сортамента, включающих компактные полые детали рулевой тяги, амортизатора и реактивной штанги. Представлены результаты металлографических исследований и оценки механических испытаний, свидетельствующих о высоком качестве сварных соединений.

Ключевые слова: прессовая сварка, магнитоуправляемая дуга, автомобильные детали, формирование соединения, технология сварки

На автомобильных заводах большое распространение получают высокопроизводительные и энергосберегающие процессы сварки, обеспечивающие хорошее качество изготавливаемых деталей, а также позволяющие достичь более высокую производительность труда.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология и оборудование (сварочные установки МД102 и МД105) для прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД), которые широко используются в автомобильной промышленности Украины. С 1994 г. на ЗАО «Краснодонский завод «Автоагрегат» изготавливают пневматические пружины и амортизаторы (рис. 1), сваренные ПСМД [1–3]. За это время было выполнено более 4 млн сварных соединений.

На основании имеющегося многолетнего опыта ПСМД следует отметить следующие основные преимущества этой технологии: высокая производительность в условиях массового производства; небольшое время сварки по сравнению с другими процессами; минимальный расход материала деталей на нагрев и осадку; герметичность сварных соединений; отсутствие сварочных материалов и защитного газа; высокие прочностные свойства сварного соединения на уровне показателей основного металла.

В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология ПСМД нового поколения деталей автомобильной промышленности. Целью исследований была разработка относительно недорогого, высокопроизводительного процесса ПСМД применительно к производству автомобильных деталей в условиях массового производства.

Исследована свариваемость компактных полых автомобильных деталей рулевой тяги диаметром 22×2,2 мм, амортизатора диаметром 40×2,2 мм и реактивной штанги диаметром 34×6 мм. Основными требованиями, предъявляемыми к работе, является обеспечение высокопроизводительного процесса сварки для применения в массовом автомобильном производстве с гарантированными механическими свойствами сварного соединения на уровне показателей основного металла деталей.

Работу выполняли на сварочных установках МД101 и МД1 (рис. 2), технические характеристики которых представлены в табл. 1 (производительность сварки 60 стыков/ч), а химический состав деталей — в табл. 2.

Таблица 1. Технические характеристики машин для сварки труб

Установка	Диаметр труб, мм	Толщина стенки, мм	Усилие осадки, кН	Потребляемая мощность, кВ·А	Масса, кг
МД101	10...51	1...4	40	30	230
МД1	18...61	1...6	60	45	190

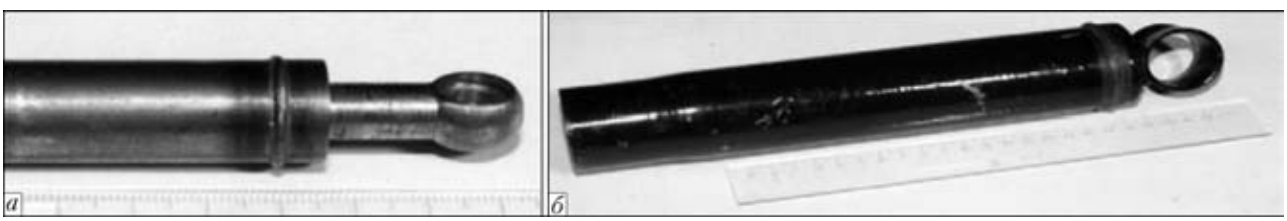


Рис. 1. Деталь пневматической пружины диаметром 19×1,7 мм (*а*) и амортизатора диаметром 53×1,8 мм (*б*)

© С. И. Кучук-Яценко, В. С. Качинский, В. Ю. Игнатенко, Е. И. Гончаренко, М. П. Коваль, 2010

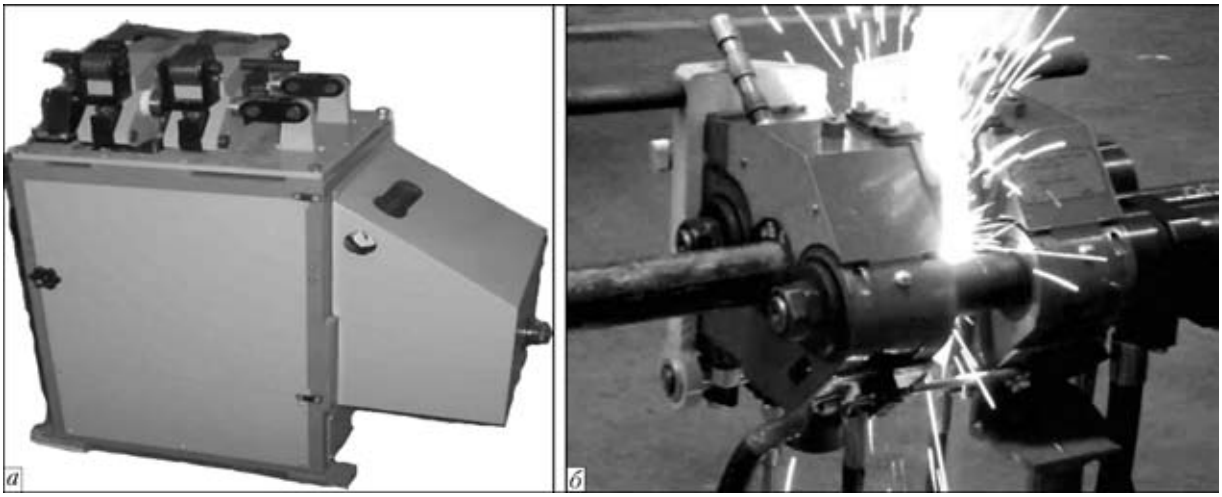


Рис. 2. Установка МД101 (*а*) и рабочий момент установки МД101 (*б*)

Таблица 2. Химический состав автомобильных деталей, мас. %

Деталь	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Рулевая тяга диаметром 22×2,2 мм:								
труба	0,194	0,174	1,01	0,004	0,015	0,05	0,04	≤0,02
деталь левой тяги	0,175	0,107	0,91	0,004	0,012	0,17	0,07	0.12
деталь правой тяги	0,170	0,080	0,90	0,004	0,011	0,17	0,07	0,22
Амортизатор диаметром 40×2,2 мм:								
труба	0,146	0,152	1,23	0,004	0,012	0,05	0,04	≤0,02
втулка	0,136	0,162	0,56	0,018	0,011	0,07	0,08	0,08
Реактивная штанга диаметром 34×6,2 мм:								
труба	0,18	0,22	0,55	0,010	0,015	0,02	0,01	—
головка	0,32	0,20	0,55	0,008	0,006	0,05	0,05	W = 0,1

Таблица 3. Основные технологические параметры сварки деталей

Деталь	Диаметр, мм	Время сварки, с	Усилие осадки, кН	Укорочение детали, мм	Потребляемая мощность, кВт
Рулевая тяга	22×2,2	3,7	21	2,1...2,3	6,1
Амортизатор	40×2,2	4,8	31	3,7...3,9	6,7
Реактивная штанга	34×6,2	13,2	40	7...7,5	7,2

Основные технологические параметры сварки деталей рулевой тяги, амортизатора и реактивной штанги представлены в табл. 3.

Проведены механические испытания сварных соединений по методикам, принятым на автомобильных заводах. Они предусматривают натурные испытания на разрыв, а также на локальный изгиб сегментов кольцевых соединений.

Металлографические исследования сварных соединений деталей рулевой тяги и амортизатора проводили на приборе М400 фирмы «LECO» с нагрузкой 1 Н и шагом 100 мкм. Для выявления микроструктуры сварного соединения использовали химическое травление 4 % спиртовым раствором азотной кислоты.

Рулевые тяги. Деталь рулевой тяги представляет собой трубу длиной 300 мм, с обеих сторон которой приваривают полые детали тяги с резьбой длиной 60 мм. В результате исследований разработана опытная технология прессовой сварки трубы с полыми тягами. На рис. 3 показано сварное соединение, выполненное ПСМД.

Сварные соединения были испытаны на разрыв и изгиб. Усилие разрыва составило 12900 кг, разрушение произошло по основному металлу трубы на расстоянии 140 мм от стыка, что свидетельствует о высокой механической прочности соединения. Испытания на изгиб свидетельствуют о высоких пластических свойствах соединения.

Из сварных соединений детали рулевой тяги были изготовлены макрошлифы (рис. 4). Ширина ЗТВ составила 2,2…2,4 мм. Сварное соединение

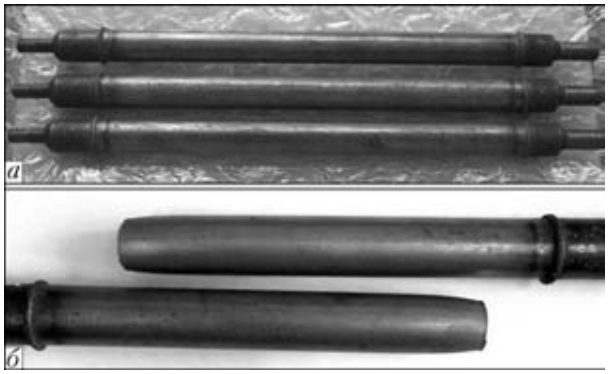


Рис. 3. Автомобильная деталь рулевой тяги диаметром 22×2,2 мм после сварки (*а*) и после испытаний на разрыв (*б*)

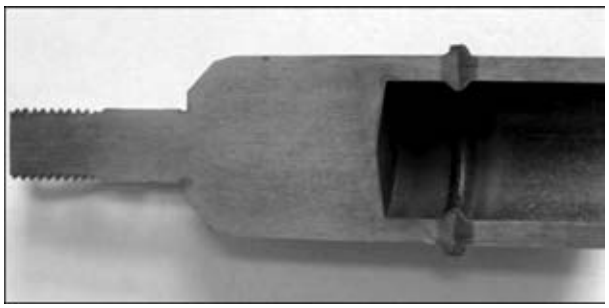


Рис. 4. Макрошлиф (×1) сварного соединения левой рулевой тяги

не требует выполнения дополнительных операций после окончания процесса сварки и удаления грата. Метод ПСМД при необходимости позволяет получать высоту усиления шва до 0,5 мм.

Измерение распределения твердости металла в зоне сварного соединения рулевой тяги проводили в направлении из трубы в деталь тяги (рис. 5). Проведенные металлографические исследования сварного соединения детали рулевой тяги показали следующие результаты.

Ферритная обезуглероженная полоса на линии сварного соединения отсутствует (рис. 6). Твердость металла на линии соединения *HV* 2640…2970 МПа. В зоне соединения дефектов не обнаружено.

Структура участка перегрева металла ЗТВ трубы представляет собой смесь перлита, бейнита (*HV* 3060…3110 МПа) и небольшое количество

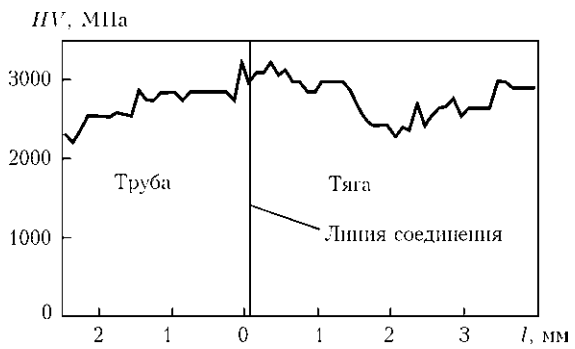


Рис. 5. Распределение твердости металла в зоне сварного соединения рулевой тяги

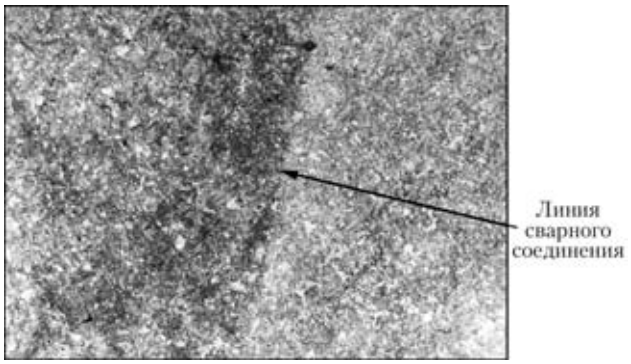


Рис. 6. Микроструктура (×250) сварного соединения «деталь–труба» (рулевая тяга)

феррита (*HV* 2540…2610 МПа) (рис. 6). Ширина участка перегрева составляет 550…600 мкм. Далее структура измельчается, уменьшается количество бейнита, увеличивается количество перлитной составляющей. Общая ширина ЗТВ составляет 2200 мм.

Структура основного металла трубы мелкозернистая (балл 9-10 по ГОСТ 5639–82), ферритная и перлитная (*HV* 2020 и 2120…2370 МПа соответственно) с явно выраженной текстурой проката.

Структура участка перегрева металла ЗТВ детали тяги бейнитно-ферритная (*HV* 2710…3210 МПа), ширина участка перегрева 700 мкм. Структура основного металла детали тяги бейнитно-ферритная с твердостью *HV* 2790…3090 МПа.

Амортизаторы. Деталь представляет собой трубу длиной 300 мм, внутренняя поверхность которой покрыта хромом толщиной 0,02 мм, к трубе с одной стороны приваривают полый хвостовик с резьбой длиной 60 мм. На рис. 7 показано сварное соединение, выполненное ПСМД.

Механические испытания на растяжение и изгиб показали, что прочность соединения находится на уровне показателей основного металла детали хвостовика. Сила растяжения до разрыва составила 122 кН. Испытания на изгиб показали высокие пластические свойства сварного соединения.

Механические испытания сварных соединений реактивной штанги и амортизатора на растяжение

Рис. 7. Сварное соединение автомобильной детали амортизатора

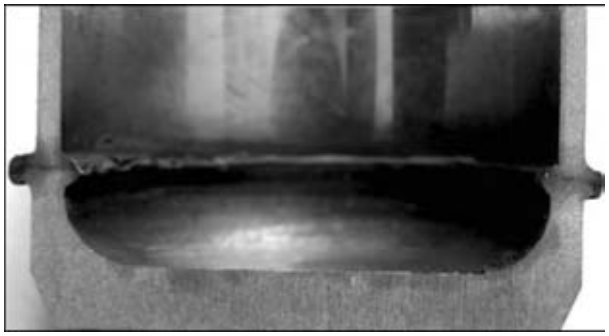


Рис. 8. Макрошлиф (×1,5) сварного соединения детали амортизатора

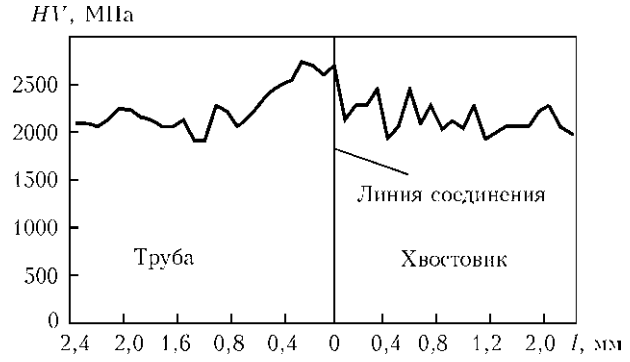


Рис. 9. Распределение твердости металла в зоне сварного соединения детали амортизатора

и изгиб свидетельствуют о равнопрочности и высокой пластичности соединений, соответствующих показателям основного металла деталей. Испытания на изгиб являются жесткими для такого типа соединений. Проведенные натурные механические испытания на изгиб и разрыв деталей рулевой тяги и амортизатора показали, что пластические свойства сварного соединения находятся на уровне свойств основного металла.

В результате выполненных исследований разработана опытная технология ПСМД детали амортизатора.

Из сварного соединения амортизатора изготовили макрошлиф (рис. 8). Ширина ЗТВ составила 2,2…2,4 мм. Сварное соединение не требует выполнения дополнительных механических операций после окончания процесса сварки.

Металлографические исследования сварного соединения деталей амортизатора диаметром 40×2,2 мм показали следующие результаты. Измерение распределения твердости металла в зоне сварного соединения проводили в направлении из трубы в деталь (рис. 9). Ферритная обезуглероженная полоска на линии сварного соединения трубы и хвостовика отсутствует (рис. 10). Твердость металла на линии соединения *HV* 2700…2850 МПа. В зоне соединения дефекты не выявлены.

Структура участка перегрева металла ЗТВ трубы состоит из перлита (*HV* 2570…2650 МПа), бейнита (*HV* 3030…3210 МПа) и небольшого количества феррита. Ширина участка перегрева 500 мкм.

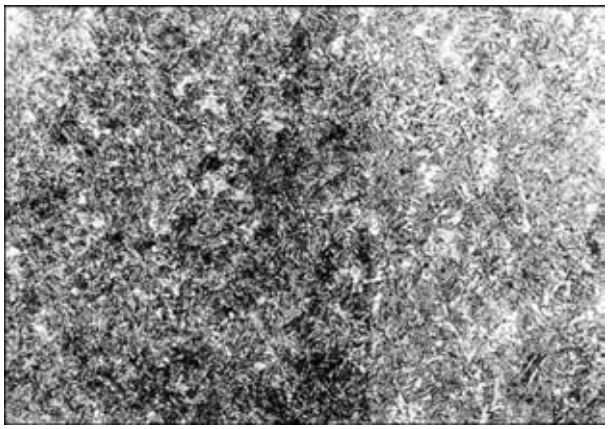


Рис. 10. Микроструктура (×320) сварного соединения «труба–деталь» (амортизатор)

Основной металл трубы имеет ферритно-перлитную структуру с выраженной текстурой проката *HV* 2210…2320 МПа.

Структура участка перегрева металла ЗТВ детали хвостовика представляет собой смесь феррита с *HV* 2190…2210 МПа и перлита с *HV* 2340…2390 МПа. В структуре наблюдается феррит различных морфологических форм. Ширина участка перегрева составляет 500 мкм, протяженность ЗТВ 1200 мкм.

Структура основного металла детали хвостовика ферритно-перлитная (*HV* 1990…2210 МПа) со значительным преобладанием ферритной составляющей.

В результате исследований определено, что в сварных соединениях деталей рулевой тяги и амортизатора отсутствуют структуры, значительно изменяющие свойства металла по отношению к основному металлу. В сварных соединениях преобладает бейнитно-ферритная структура. Особенностью структуры сварных соединений является отсутствие участка крупного зерна.

Реактивная штанга. Реактивная штанга состоит из трубы и двух головок. Материал трубы — сталь 20, головок — сталь 30. Со сваренными деталями реактивной штанги были выполнены испытания на усталость на специальном стенде в симметричном цикле растяжения–сжатия. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний деталей реактивной штанги в симметричном цикле растяжения–сжатия

№ образца	Нагрузка, кН	Удельная нагрузка, МПа	Количество циклов до разрушения	Место разрушения
1	±70	133,0	914000	По телу головки
2	±60	114,0	2480100	»
3	±50	95,0	3027500	»
4	±45	85,5	10^7	Без разрушения

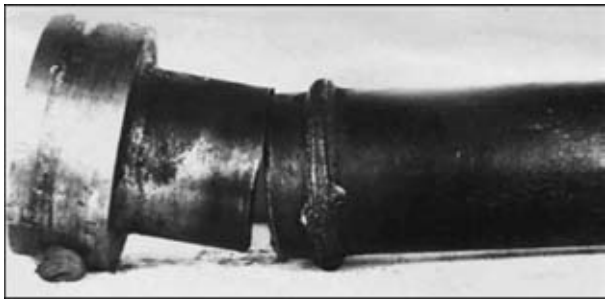


Рис. 11. Деталь реактивной штанги после циклических испытаний

Разрушение детали реактивной штанги после испытаний на растяжение–сжатие наблюдалось по основному металлу наконечника (рис. 11). Испытания сварных соединений в симметричном цикле растяжения–сжатия проводили на соединениях с гратом. Наличие грата, дающего концентрацию напряжений, не снизило показателей циклических испытаний. Это обусловлено тем, что в месте повышенной концентрации напряжений на границе усиления шва наблюдается мелкозернистая структура с высокими вязкими свойствами.

В результате выполненных исследований разработана опытная технология прессовой сварки детали реактивной штанги диаметром 34×6,2 мм грузовых автомобилей.

Таким образом, проведенные натурные механические испытания на разрыв сварных деталей рулевой тяги и амортизатора, выполненных ПСМД, свидетельствуют о высоких механической прочности, пластичности и сопротивляемости усталостным разрушениям сварного соединения, соответствующих уровню показателей для основного металла.

Разработана опытная технология ПСМД автомобильных деталей рулевой тяги диаметром 22×2,2 мм, реактивной штанги диаметром 34×6 мм и амортизатора диаметром 40×2,2 мм. Технология может быть использована при массовом производстве, где требуется высокая производительность труда.

1. *Пат. 94128094 (3/4663) Україна.* Машина для пресового зварювання з нагріванням дугою, керованою магнітним полем / С. І. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. С. Качинський та ін. — Опубл. 20.12.94.
2. *Качинский В. С., Игнатенко В. Ю., Головченко С. И.* Прессовая сварка с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, трубчатых деталей (оборудование и технология) // Автомат. сварка. — 1997. — № 7. — С. 39–41.
3. *Kachinskiy V., Ignatenko V., Koval M.* Magnetically-impelled arc butt welding of hollow and solid parts // Intern. conf. «Exploiting solid state joining» (Cambrige, 13–14 Sept. 1999). — Cambrige, 1999. — P. 30–46.

Features of pressure welding of parts of automotive product range including compact hollow parts of steering rod, shock absorber and torque arm, are described. Results of metallographic examination and evaluation of mechanical tests are presented, which are indicative of the high quality of welded joints.

Поступила в редакцию 03.02.2010

XIV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК

28.09–01.10.2010 г. Санкт-Петербург ЛЕНЭКСПО

Разделы выставки

✓ ПРОМЭКСПО
✓ ТЕХНОЭКСПО
✓ Машиностроение. Станки. Металлообработка
✓ Инструмент и техоснастка
✓ Субконтрактинг
✓ АВТОМАШ
✓ Радиоэлектроника и приборостроение
✓ Информационные технологии
✓ Мехатроника и робототехника
✓ Конгрессная часть форума 2010

ОАО ЛЕНЭКСПО
тел.: (7812) 325-67-78, 325-67-79
promexpo@lenexpo.ru

УДК 621.791.72:621.375.826

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

П. КАХ[1], **А. САЛМИНЕН**[1,2], **Дж. МАРТИКАИНЕН**[1]
([1] Лаб. технологии сварки и обработки лазером, Технол. ун-т, г. Лаппеенранта, Финляндия),
([2] Центр маш. технологий «Турку Лтд.», г. Турку, Финляндия)

Проанализированы особенности применения различных способов гибридной сварки с учетом используемых параметров процесса, типов свариваемого металла и его толщины. Рассмотрены экономические аспекты применения гибридной сварки, особенности контроля качества.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварка МИГ/МАГ, гибридная сварка, лазерная сварка + сварка ТИГ, лазерная + плазменная сварка, лазерная + тандем-сварка, лазерная сварка + дуговая сварка металлическим покрытым электродом

Изучение процесса гибридной лазерно-дуговой сварки началось в 1978 г. с выхода в свет первой статьи о сварке ТИГ в сочетании с лазерной сваркой [1]. Сегодня лазеры, используемые в гибридной лазерно-дуговой сварке, включают лазеры старшего поколения (CO_2-лазер, Nd:YAG-лазер, диодный), а также новые типы (дисковый и волоконный). CO_2-лазер был первым и наиболее часто используемым при гибридной сварке [2–6]. Nd:YAG-лазеры успешно применяют при гибридной сварке для соединения алюминия, материалов с высокой отражательной способностью и стали, благодаря его короткой длине световой волны гарантируется больший уровень ее поглощения [7]. Одним из преимуществ Nd:YAG-лазера является применение оптоволокна для перемещения пучка.

Гибридная сварка объединяет энергию двух различных источников энергии в одной зоне проплавления. Как правило, сфокусированный лазерный пучок направлен в зону соединения перпендикулярно поверхности пластины, а горелка наклонена под определенным углом к точке взаимодействия лазерного пучка и материала. При этом лазерный пучок с высокой плотностью энергии и электрическая дуга с высоким энергетическим КПД взаимодействуют одновременно в одной области процесса (плазма и сварочная ванна), помогая друг другу (рис. 1). При гибридной сварке количество переменных параметров увеличивается вследствие объединения различных процессов, имеющих свои параметры [5–9]. Существует множество гибридных способов сварки, отличающихся лазерным источником (CO_2-лазер, Nd:YAG-лазер, диодный, волоконный или дисковый) и способами дуговой сварки (МИГ/МАГ, ТИГ, плазменная сварка, тандем-сварка, дуговая сварка металлическим покрытым электродом). При этом можно также использовать специальные головки, в которых лазерный пучок окружен электрической или плазменной дугой [9, 10].

В процессах гибридной сварки потенциал, как правило, определяют с помощью выбора соответствующей настройки оборудования и базовых параметров, режимов, адаптированных к требованиям материала, его структуре и условиям изготовления. Если граничные условия процесса выбраны правильно, то гибридная сварка является стабильной, эффективной и гибкой технологией.

Исследования выявили, что при совмещении различных способов сварки достигается синергетический эффект, при этом недостатки отдельных способов сварки компенсируются. Например, типичный узкий шов лазерной сварки в некоторых случаях способствует появлению металлургических проблем и проблем при сборке, а повышенное количество подводимого тепла при дуговой сварке увеличивает деформацию изделия, что приводит к последующим затратам на повторную обработку. К преимуществам относят возможность заполнения зазора при увеличенном зазоре в стыке вследствие неточной подготовки кромок и допусков по фиксации; повышение проплавления и скорости сварки, что удерживает на минимальном уровне подводимое тепло и тепловую деформацию; повышение равномерности формирования наплавленного валика; расширение сферы применения адаптированных к требованиям материалов конструкций и условиям изготовления; снижение инвестиционных расходов в связи с экономией лазерной энергии. Отмечено также улучшение металлургических свойств при использовании присадочного материала и уменьшение пористости благодаря ускоренному выделению газа из сварочной ванны увеличенного размера, особенно в швах с частичным проплавлением [2, 3, 10–12]. При гибридной сварке дуга находится в стабильном состоянии, поскольку ка-

© П. Ках, А. Салминен, Дж. Мартикаинен, 2010

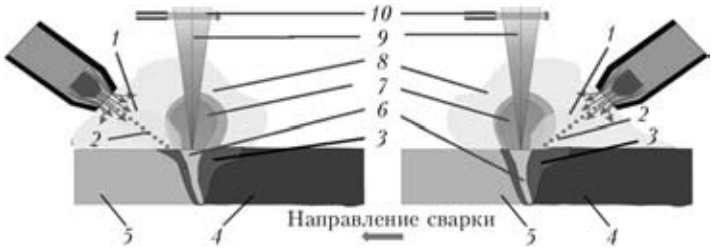


Рис. 1. Схема процесса гибридной сварки с устройствами ведения лазера и дуги: *1* — дуга; *2* — присадочный материал; *3* — сварочная ванна; *4* — металл шва; *5* — обрабатываемое изделие; *6* — парогазовый канал; *7* — испарение металла; *8* — газовая защита; *9* — лазерный пучок; *10* — поперечная струя

тодное пятно дуги расположено в области теплового воздействия благодаря лазерному излучению в парогазовом канале. Следовательно, результаты, полученные с помощью высокоскоростной камеры, показали, что генерируемая лазером плазма оказывает решающее воздействие на стабильность дуги [13, 14].

Гибридную сварку в основном применяют в случае, если толщина пластины позволяет выполнять однопроходную сварку. При этом ограничивающим фактором является мощность лазерного излучения. При использовании высокомощных лазеров можно сваривать пластины толщиной до 30 мм за один проход. Однако с помощью лазеров средней мощности также возможно соединение стальных листов большой толщины, при этом необходим фиксированный зазор между свариваемыми пластинами и применение многопроходной сварки. Как и при лазерной сварке с присадочной проволокой, при гибридной сварке возможно использование лазеров средней мощности для больших сечений. И хотя лазер не обязательно должен быть очень мощным (что означает сокращение инвестиционных расходов), возможно получение качественных соединений. Кроме подготовки кромок без скоса при выполнении стыкового шва, можно также использовать V- и Y-образную подготовку кромок, которая часто может быть обеспечена непосредственно при вырезке заготовки без дальнейшей механической обработки.

Сфера применения гибридной лазерно-дуговой сварки включает многие отрасли промышленности (например, судостроительную, автомобильную, производство контейнеров) [9–11, 15, 16]. Благодаря значительным преимуществам гибридная сварка является достаточно надежным способом соединения различных материалов.

Как показано в работе [17], расстояние между положением лазерного пучка и дугой, называемое «расстоянием процесса», является важным параметром гибридной лазерно-дуговой сварки. Если оно слишком большое, плазмы дуги и лазера находятся отдельно друг от друга, что приводит к нестабильности дуги, поскольку в этом случае плазма лазера и нагретый материал не направлены на ее генерирование и поддержку [18]. Если же «расстояние процесса» составляет 5 мм или более, указанные процессы действуют независимо [18, 19]. Это зависит от скорости сварки, мощности дуги и лазера, а также используемого материала.

Лазерная сварка + сварка МИГ/МАГ. Основные особенности этого способа сварки (рис. 1) практически одинаковы как для CO_2-лазера, так и для твердотельных лазеров. Лазерный и дуговой способы сварки имеют одну рабочую зону процесса и сварочную ванну. Процесс сварки можно контролировать таким образом, чтобы составляющая МИГ/МАГ обеспечивала соответствующее количество расплавленного присадочного материала для заполнения зазора и разделки кромок, в то время как лазер будет формировать парогазовый канал в пределах сварочной ванны, чтобы обеспечить желаемую глубину проплавления, которая достигается благодаря высокой скорости сварки. В результате при сочетании лазерного пучка и дуги МИГ/МАГ формируется сварочная ванна большего размера, чем при лазерной сварке [10].

Структуру и механические свойства металла шва можно улучшить путем изменения его химического состава в результате использования соответствующего присадочного материала. Химические элементы, входящие в состав проволоки, должны равномерно распределяться в металле шва для получения однородной структуры. Однако достичь этого в узких швах с глубоким проплавлением нелегко. Еще одной причиной необходимости использования присадочного материала является повышенная склонность к горячему растрескиванию сложных сплавов. Считается, что наиболее перспективным способом гибридной лазерно-дуговой сварки является тот, при котором используют дополнительные присадочные материалы, т. е. сочетающий гибридную лазерную сварку и сварку МИГ/МАГ [3–10]. С помощью этого способа можно заполнить зазоры 0,6 мм (при мощности лазера 2,7 кВт [20]) и 1 мм (при мощности лазера 2,0 [18] и 5,7 кВт [15]).

Как и при других способах сварки, возможности гибридной лазерной сварки + сварки МИГ/МАГ в основном определяются путем соответствующей настройки системы и выбора основных параметров процесса. В этом случае параметры процессов лазерной сварки и сварки МИГ/МАГ можно варьировать в достаточно широком диапазоне с целью получения необходимых рабочих характеристик процесса сварки, таких, как глубина сварки и за-

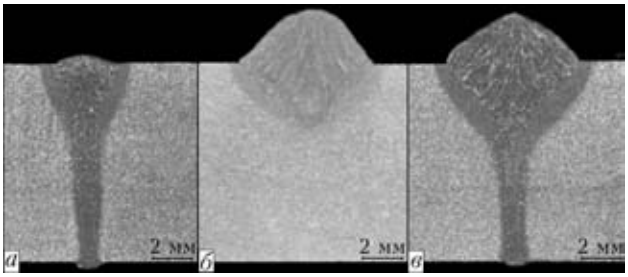


Рис. 2. Макрошлифы проплавлений, выполненных лазерной сваркой (*а*), сваркой МАГ (*б*) и гибридной лазерной сваркой + сваркой МАГ (*в*) [21]

полнение зазора, форма шва и металлургические свойства [5].

Сравнение уровня проплавления шва при лазерной сварке, сварке МИГ/МАГ и гибридной сварке (рис. 2) показывает, что лазерный шов характеризуется вогнутостью валика, тогда как шов МИГ/МАГ имеет максимальное усиление валика, а гибридный отличается предельным усилением и большой шириной при такой же глубине проплавления и скорости, как у лазерной сварки.

Глубина проплавления в основном определяется мощностью лазерного пучка и его фокусировкой, а ширина шва — напряжением. Если воздушный зазор отсутствует, то максимальную скорость сварки, позволяющую получить полное проплавление, можно достичь при гибридной сварке CO_2-лазером, а при сварке МИГ/МАГ и сварке CO_2-лазером она ниже. Это объясняется наличием излишнего металла на верхней части изделия, который требует проплавления, а также отклонением фокальной точки от установленного положения. Скорость сварки возрастает с увеличением ширины воздушного зазора. Можно увеличить воздушные зазоры до максимальной ширины (до 1,5 мм), но при этом процесс сварки нестабилен и сопровождается брызгами. Швы, выполненные гибридной сваркой, отличаются, как правило, более низкой прочностью по сравнению со швами, выполненными лазерной сваркой [22].

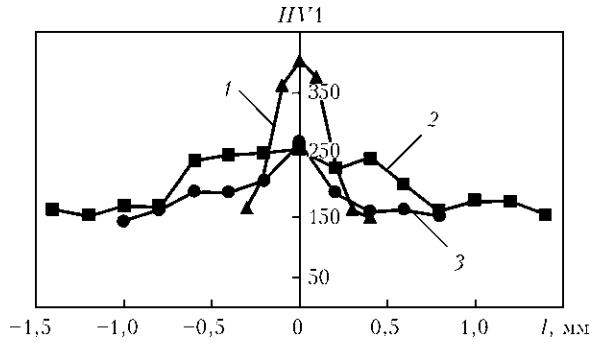


Рис. 3. Твердость *HV* 1 металла шва, выполненного на сплаве CMn250 толщиной 2,13 мм гибридной сваркой (лазерная сварка + сварка МИГ) без зазора на максимальной скорости (мощность CO_2-лазера 2250 Вт; сварки МИГ — 79 кВт) [25]: *1* — скорость лазерной сварки 4,4 м/мин; *2* — сварки МИГ 2,2 м/мин; *3* — гибридной сварки 4,5 м/мин; *l* — расстояние от центра шва

По результатам эксперимента, который проводили с целью исследования стабильности гибридной сварки CO_2-лазер + сварка МИГ/МАГ, путем анализа влияния некоторых параметров процесса сварки можно заключить, что оптимальное расстояние в гибридном процессе (расстояние между осью луча и осью плавящегося электрода) зависит от режима переноса металла при дуговой сварке в защитном газе и является очень важным фактором для стабильности и повторяемости процесса. Во многих работах указывается на необходимость выбора параметров дуги, обеспечивающих импульсную/струйную дугу, а не короткую/капельную [10, 23]. Излучение Nd:YAG-лазера благодаря меньшему взаимодействию с плазмой дуги позволяет приблизиться к дуге больше, чем излучение CO_2-лазера. Чтобы достичь максимального проплавления фокальная точка во многих случаях должна находиться ниже поверхности обрабатываемого изделия [10]. При этом желательно, чтобы отклонение дуги было наименьшим. Угол отклонения от 15 до 30° к оси лазера позволяет выполнить работу на приемлемом техническом уровне.

Авторы работы [24] исследовали параметры процесса гибридной лазерной сварки + сварки МАГ с использованием CO_2-лазера (HSLA-590) мощностью 2,4 кВт. Они определили, что гибридный наплавленный валик, формируемый под воздействием дуги, не такой ровный, как наплавленный валик, формируемый под воздействием лазера. Исходя из его внешнего вида можно заключить, что лучшее формирование валика достигается при лазерном процессе. Определено также, что металл шва, выполненного гибридной сваркой, имеет более высокую вязкость, чем металл шва, выполненного лазерной сваркой даже на более высокой скорости.

Была измерена твердость металла стыковых швов, выполненных гибридной лазерной сваркой + сваркой МИГ с нулевым зазором на максимальной скорости. Дефекты в швах отстутствовали. На рис. 3 видно, что максимальные значения твердости составляют *HV* 1 400, 258 и 268 соответственно для лазерной сварки, сварки МИГ и гибридной, что в 2,50, 1,70 и 1,75 раза больше твердости основного металла. Несмотря на большее значение твердости металла гибридного шва по сравнению с металлом шва МИГ, его твердость, как правило, на *HV* 1 20…50 ниже, чем металла шва, выполненного сваркой МИГ. Это сопровождается сокращением на 40 % площади зоны термического влияния (ЗТВ) от 8,6 до 5,2 мм^2. Эти данные получены путем обработки цифрового изображения. В структуре металла ЗТВ при гибридной лазерной сварке + сварке МИГ бейнит отсутствует, но формируется игольчатый феррит, чем объясняется значительное уменьшение твердости [25].

На рис. 4 показано влияние ширины зазора на максимальную скорость стыковой сварки. При лазерной сварке происходит уменьшение скорости сварки при ширине зазора более 0,1 мм. При сварке МИГ изменение ширины зазора на скорость сварки влияния не оказывает. При гибридной сварке с увеличением ширины зазора скорость сварки уменьшается незначительно. Так, при зазоре шириной 0,6 мм скорость сварки уменьшается всего на 22 % (от 4,5 до 3,5 м/мин) [25].

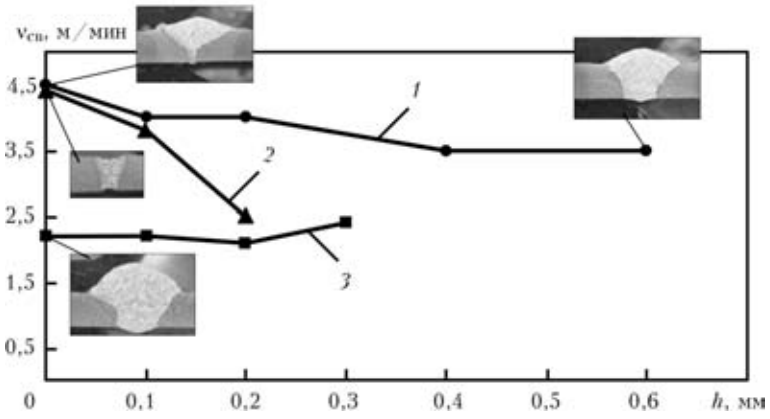


Рис. 4. Влияние ширины h зазора на максимальную скорость $v_{св}$ гибридной сварки (*1*) (мощность CO_2-лазера 2250 Вт), лазерной сваркой (*2*) и сваркой МИГ (*3*) (мощность 9 кВт) (сплав CMn250 толщиной 2,13 мм) [25]

Приведены результаты исследований соединений различных конфигураций и материалов разной толщины, полученных гибридной лазерной сваркой. На рис. 5 показаны допуски на отклонение при гибридной лазерной сварке трубной стали толщиной 10 мм с V-образной обработкой кромки с углом 10° и притуплением кромки 1 мм (CO_2-лазер мощностью 10,5 кВт, импульсная дуга МИГ, присадочная проволока (G3Si1) диаметром 1,2 мм, скорость подачи проволоки 5,2 м/мин, использовалась защитная смесь газов аргон+гелий). Установлено, что гибридная сварка по сравнению с лазерной имеет достоинства в части требований к сварке.

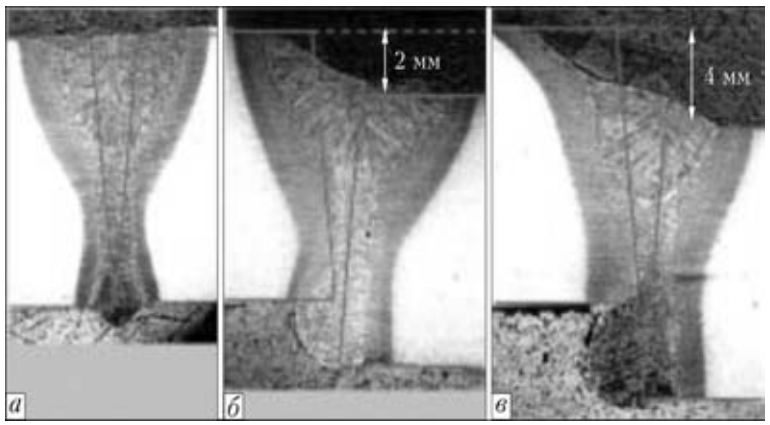


Рис. 5. Макрошлифы соединений трубной стали X25 толщиной 10 мм [15], выполненных гибридной сваркой со скоростью 1,0 (*а*) и 0,8 м/мин (*б*, *в*)

При гибридной сварке также получен хороший переход от усиления шва к основному металлу (рис. 6). При этом использовали Nd:YAG-лазер мощностью 3 кВт с применением оптоволокон диаметром 0,6 мм или CO_2-лазер мощностью 6 кВт. Выполненные на очень высоких скоростях швы не имели трещин и пор и отличались достаточной прочностью.

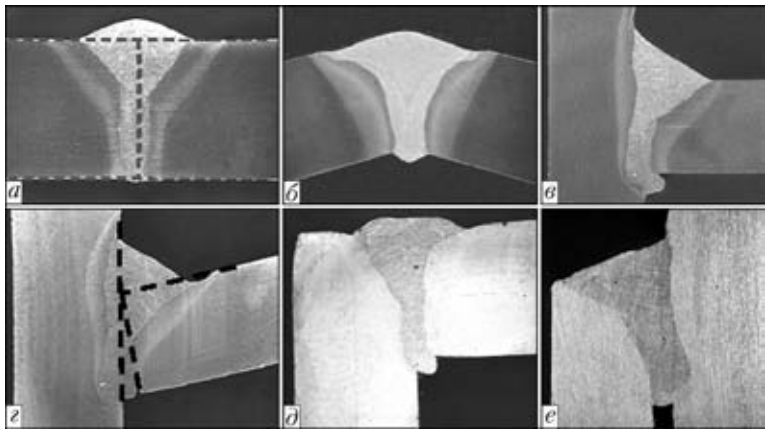


Рис. 6. Макрошлифы соединений различных конфигураций крупносортной стали толщиной 6…8 мм (*а–д*) и тонколистовой стали толщиной 2 мм (*е*), выполненных гибридной сваркой [26]

Недавно в Фраунгоферовском институте лазерных технологий [3] проведено исследование, направленное на расширение технического уровня гибридной сварки (лазерная сварка + сварка МАГ) высокопрочных конструкционных сталей. Большая часть швов выполнена с помощью встроенного сопла для гибридной сварки, изготовленного там же. Полученные результаты показали, что мощность лазерного излучения и скорость сварки должны быть приспособлены под толщину пластины и ширину зазора при получении стыковых соединений в нижнем и боковом положениях. В том же эксперименте определено, что можно сваривать сталь толщиной 25 мм (рис. 7) без образования горячих трещин. Если они возникают, то только при наличии нескольких небольших пор. При этом V- и Y-образная подготовка кромок с углом 4…8°, соответствующая скорость сварки и правильно подобранное количество тепла на единицу длины являются очень важными факторами.

Различия между CO_2-лазером и Nd:YAG-лазером, используемым при гибридной сварке, состоят в длине волны. CO_2-лазер является более экономичным и имеет большую скорость сварки, чем Nd:YAG-лазер с более высокой мощностью.

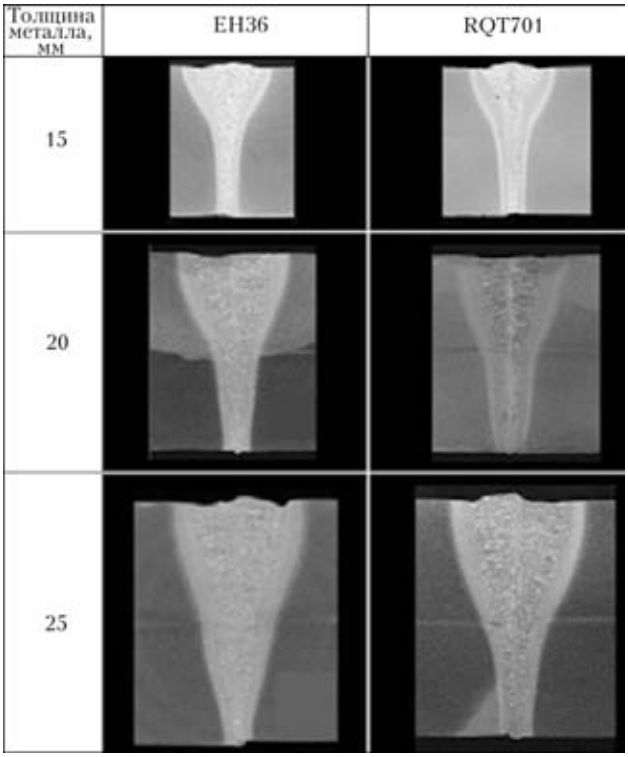


Рис. 7. Макрошлифы поперечных сечений образцов оптимизированных гибридных швов для механических и технологических испытаний [3]

Однако у CO_2-лазера система подачи пучка сложнее, чем у Nd:YAG-лазера, отличающегося более короткой длиной волны и подачей пучка через оптоволокно, что обеспечивает его лучшую поглощаемость, особенно при сварке алюминия. Тем не менее CO_2-лазер и Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой имеют значительные недостатки, например, относительно низкий КПД штепсельной вилки (менее 10 %). Это означает, что системы не только требуют большой энергии для работы, им также необходимо охлаждающее оборудование [13, 16, 17, 27].

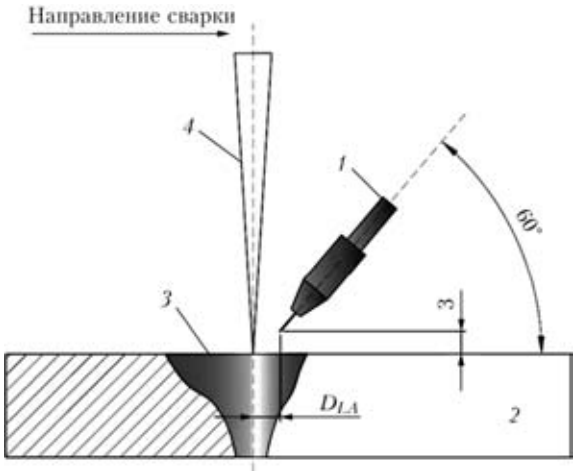


Рис. 8. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки (CO_2-лазер + сварка ТИГ) [29]: *1* — горелка ТИГ; *2* — обрабатываемое изделие; *3* — сварочная ванна; *4* — лазерный пучок

Выбор защитного газа является важным фактором для гибридной сварки. Для Nd:YAG-лазера выбор технологического газа определяется требованиями стабильности дуги и качеством защиты валика; при сварке МИГ/МАГ необходимо также учитывать отрыв капли и перенос металла без разбрызгивания. Аргон является основной составляющей используемой смеси газов. Незначительное добавление кислорода способствует отрыву капли и сокращению разбрызгивания. Смесь с гелием способствует большему напряжению дуги и увеличению мощности, которая приводит к увеличению ширины валика, но дестабилизирует дугу. Несмотря на это при использовании CO_2-лазера часто применяется смесь с гелием для исключения плазменной защиты. Присутствие лазерного пучка обеспечивает приемлемую стабильность дуги даже при значительном содержании гелия [27].

Компании «Volkswagen» и «Audi» убедились в преимуществах использования гибридной лазерной сварки + сварки МИГ в автомобильной промышленности. В судостроении этот способ сварки постепенно начинают применять для соединения изделий с толщиной стенки 15 мм [6, 9, 15, 28].

Лазерная сварка + сварка ТИГ. При совместном действии дуги ТИГ и лазерного пучка устанавливается такое тепловое условие, при котором улучшается абсорбция лазерной энергии: в нагретой области лучше происходит прохождение лазерной энергии в основной материал [5]. Такое сочетание образует вдоль прохода шва обычную перемещающуюся жидкую ванну. Типичная схема гибридной лазерно-дуговой сварки представлена на рис. 8.

В работе [1] представлены результаты эксперимента с применением CO_2-лазера и сварки ТИГ. Установлено, что сочетание сварки ТИГ с лазерной имеет существенные преимущества: основание дуги остается стабильным в горячем пятне, которое генерируется лазером, в связи с чем дуга и при малом токе может быть стабильной даже при высокой скорости сварки; при комбинированном процессе основание дуги сужается, что помогает избежать образования подрезов, что, как правило, связано с высокой скоростью дуговой сварки, особенно при сварке алюминиевых сплавов. Поглощаемость металла шва возрастает с повышением температуры при длине волны лазерного пучка 10600 нм [1, 15, 30]. В работе [6] сообщается, что при гибридной сварке CO_2-лазер + сварка ТИГ очень зависят от вида защитного газа и используемой методики защиты.

В работе [31] исследовали сварное соединение из сплава магния и стали, полученное различными способами сварки. Выявлено, что благодаря высокой энергоемкости и быстрому механизму перемешивания в сварочной ванне существует воз-

можность соединять сплав магния и сталь с помощью гибридной лазерной сварки + сварки ТИГ, что практически невозможно осуществить традиционными способами сварки плавлением (мощность лазера 400 Вт, скорость сварки 15 мм/с, ток сварки ТИГ 80 А, «расстояние процесса» 1 мм, положение фокуса лазера 1 мм, диаметр вольфрамового электрода 3,2 мм, угол между электродом, обрабатываемым изделием и направлением сварки 50°, расход аргона 0,5 л/с, частота лазерного импульса 39 Гц).

Одним из недостатков лазерной сварки является наличие пор, которые возникают из-за высокой мощности и глубокого проплавления, особенно при частичном проплавлении. Важная задача при сварке алюминия — исключить появление пор или уменьшить их количество в металле шва. Этому препятствует пористость, которая образуется в результате испарения таких легирующих элементов, как магний. При несоответствующих параметрах сварки также могут возникать трещины [6, 14]. Образование пор в металле шва зависит от тока при сварке ТИГ и состава защитного газа при гибридной лазерной сварке + + сварка ТИГ.

Способ гибридной сварки лазерная сварка + сварка ТИГ оказался перспективным для получения стыкового соединения сверхтонких (0,4…0,8 мм) листов аустенитной стали. Наличие сварочной ванны, генерируемой лазером, стабилизирует дугу ТИГ, что позволяет достичь скорость сварки до 15 м/мин с лазерным слежением. Сочетание лазера и дуги ТИГ способствует выполнению швов шириной, достаточной для нивелирования небольших дефектов среза кромки или несовпадения между двумя соединяемыми листами. С целью исключения тепловой деформации и излишнего оплавления необходимо минимизировать ток сварки ТИГ и использовать дополнительный защитный газ [32].

Ученые отмечают, что проплавление при гибридной лазерной сварке зависит не от тока дуги, а от мощности лазерного излучения при гибридной сварке CO_2-лазер + сварка МАГ и гибридной сварке Nd:YAG лазер + сварка ТИГ [26, 33]. Как видно из рис. 9, *а*, во всех гибридных швах проплавление гибридных швов было глубже чем, у лазерных швов, если значение тока ТИГ было постоянным. При различных значениях тока ТИГ и постоянной мощности лазера, проплавление остается таким же, но ширина шва увеличивается с повышением мощности сварки ТИГ (рис. 9, *б*) [12].

Лазерно-плазменная сварка. При гибридной лазерно-плазменной сварке обрабатываемых изделий лазерный пучок и плазменная струя соединяются в области, расположенной близко к обрабатываемому изделию (рис. 10) [34]. Во время работы плазменная горелка находится под углом приблизительно 45° к лазерному пучку. Струя плазмы, вызванная свободной микроволной, генерируется в высокочастотном микроволновом источнике и направляется в полый волновод. Технологический газ вводится в микроволновую прозрачную трубку через впускное отверстие, а плазма генерируется путем зажигания технологического газа без применения электрода [34–36]. Зажигание основной дуги происходит посредством низкоамперной вспомогательной дуги, сформировавшейся между концом электрода и соплом. После зажигания вспомогательная дуга вырабатывает достаточное количество тепла для ионизации воздушного зазора между соплом и обрабатываемым изделием. Преимуществом вольфрамового электрода является то, что он размещен за соплом, которое обеспечивает характерное

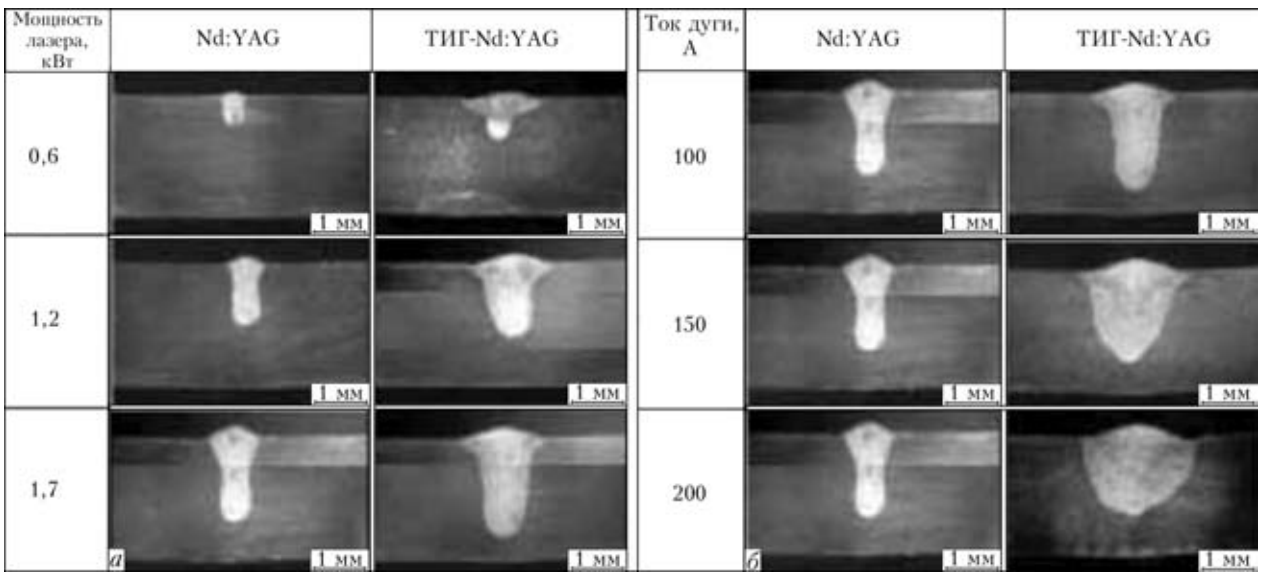


Рис. 9. Макрошлифы поперечных сечений швов, выполненных на нержавеющей стали типа 304 толщиной 5 мм сваркой Nd:YAG-лазером и гибридной сваркой лазером + сварка ТИГ при различных мощности лазера (*а*) и токе дуги (*б*) [12]

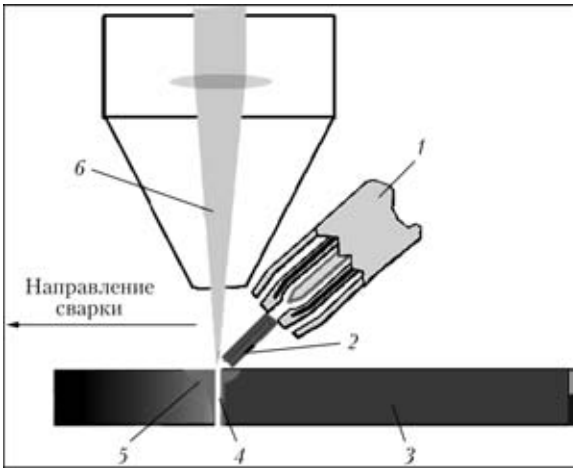


Рис. 10. Схема расположения системы сварка плазменной дугой, дополненной лазером: *1* — плазменная горелка; *2* — плазменная дуга; *3* — обрабатываемое изделие; *4* — парогазовый канал; *5* — сварочная ванна; *6* — лазерный пучок

струйное воздействие плазмообразующего газа. Стабильное функционирование дуги поддерживается без ухудшения характеристик электрода в течение достаточно продолжительного времени, поскольку конец электрода не подвергается воздействию загрязняющих веществ [35].

При гибридной лазерно-плазменной сварке с целью повышения скорости охлаждения после сварки как инструмент термообработки вводится источник дугового нагрева. Таким образом можно уменьшить содержание хрупких микроструктур, склонных к разрушению при эксплуатации. При использовании гибридной лазерно-плазменной дуговой сварки в качестве основного процесса и термообработки можно значительно сократить время изготовления изделия [35].

Этот процесс имеет существенные преимущества, если его использовать при лазерно-плазменной сварке, включающей жесткую высокотемпературную колоннообразную дугу с хорошими свойствами ориентирования, которая обеспечивает больший допуск по сравнению с лазерной сваркой для несоответствующих и сравнительно неудовлетворительных условий сборки. Более того, при относительно небольшом увеличении капиталовложений этот процесс имеет экономические преимущества и перспективу для широкого применения лазера в промышленности. В настоящее время существует всего несколько гибридных лазерно-плазменных систем, которые служат для выполнения промышленных задач, но эта ситуации в будущем, скорее всего, изменится благодаря пригодности процесса для промышленного применения. Для широкого использования гибридных лазерно-плазменных систем необходимо всестороннее научное понимание этого процесса и сфер его применения [34].

Предыдущие испытания плазменно-дугового способа сварки дополнены CO_2-лазером мощностью 400 Вт и на токе 50 А [34]. В ходе эксперимента протестировано большое количество различных материалов (низкоуглеродистая сталь, нержавеющая сталь, титан и алюминий) толщиной от 0,6 до 2 мм. Выявлено, что комбинированный процесс может предотвратить образование «горок» при высокоскоростной сварке тонких листов. При плазменной лазерно-дуговой сварке имеют место более высокие допуски несоответствия пучок–зазор (от 0,15 до 0,50 мм) при $v_{св}$ = 2 м/мин и токе 50 А.

В работе [37] сообщается, что лазерно-дуговой способ сварки со вспомогательным лазером исключает горячее растрескивание в зоне сплавления алюминиевых сплавов 6061 и 6111, если использовать дугу с постоянной мощностью вместо импульсной. Зоны сплавления как у нержавеющей стали, так и алюминия оказались более широкими, чем при выполнении лазерных швов. Определено, что швы, полученные лазерно-плазменной сваркой, были не такими отполированными, как при импульсной Nd:YAG-лазерной сварке. Способ гибридной лазерно-плазменной сварки показал себя весьма стабильным. Этот эффект наблюдался при лазерно-дуговой сварке металлическим электродом в защитном газе.

Лазерная тандем-сварка + сварка МИГ. Способ сварки лазерная тандем + сварка МИГ является сочетанием лазерного пучка и дуговых процессов только с одной зоной расплава. Схема процесса гибридной лазерной тандем сварки + + сварки МИГ представлена на рис. 11 [9]. Лазерный пучок, установленный под углом приблизительно 90° по отношению к обрабатываемому изделию, используется для заварки корня. Обе другие следящие дуги имеют смещенный угол наклона и применяются для увеличения заполнения корня шва и его толщины. В процессе сварки используют три различные выходные мощности, которые можно устанавливать в зависимости от желаемого результата. Посредством соответствующей выходной мощности для тандем-сварки можно выбрать геометрию соединения, желаемое заполнение соединений и скорость. Путем изменения скорости сварки, диаметра фокальной точки и мощности лазерного излучения при подготовке скоса кромки можно также изменять глубину шва. Более того, для получения желаемых металлургических характеристик [10] используют два присадочных материала с различными химическими составами.

При правильном выборе параметров процесса можно целенаправленно воздействать на геометрию шва и структурные составляющие его металла. Способы дуговой сварки увеличивают заварку зазора путем добавления присадочного металла, что также определяет ширину шва, а следовательно, упрощает подготовку шва. Эффектив-

ность сварки значительно увеличивается в результате взаимодействия процессов.

Как определено в работах [9, 38], преимуществом комбинированных процессов является то, что при расплавлении присадочного металла давление дуги не влияет на обрабатываемое изделие. При гибридной сварке лазерная тандем-сварка + + сварка МИГ есть возможность отдельно контролировать мощность лазерного излучения дуги, а также ее длину, что, как утверждается в [10, 37], улучшает отрыв капли, увеличивает стабильность дуги и способствует незначительному разбрызгиванию. Более того, вместе с этим способом сварки можно использовать гибридную лазерную сварку МИГ/МАГ одной дугой. Процесс гибридной лазерной тандем-сварки + сварки МИГ/МАГ исследован в работе [38] при соединении труб из конструкционной стали с толщиной стенки 8 мм и внутренним диаметром 500 мм, что соответствует стандарту EN 10149-2. Установлено, что при Y-образной подготовке кромок можно получать швы с полным проплавлением.

Лазерно-дуговая сварка под флюсом. При гибридной лазерной сварке + сварке МИГ/МАГ необходимо выполнять условия в отношении предупреждения порообразования в корне швов, если сваривается металл толщиной более чем 12 мм. Опасность образования пор связана с недостаточной способностью к дегазации металла глубоких и узких лазерных швов. Чтобы предотвратить это сварочную ванну необходимо удерживать на протяжении длительного времени [39]. Это послужило поводом для проведения экспериментов по оценке возможности удержания сварочной ванны более продолжительное время при использовании гибридной лазерной дуговой сварки под флюсом и созданию более благоприятных условий для дегазации. Здесь оба процесса сварки действуют вместе в одной рабочей зоне [28] на близком расстоянии (13…15 мм).

Объединение двух сварочных процессов — сварки лазерным пучком и дуговой сварки под флюсом в одной рабочей зоне оказалось проблемой, поскольку флюс попадал в парогазовый канал лазерного пучка, а лазерное излучение поглощалось флюсом, а не металлом. Было создано устройство, которое препятствует такому «выпадению» флюса. Ключевым звеном в нем является разделительная пластина (разработана RWTH, Аахенский университет), которая устанавливается между лазерным пучком и устройством подачи флюса (рис. 12).

При проведении исследований замечено наличие пространственного расстояния между двумя процессами и разделение шва на две области — сваренную лазером и дуговой сваркой под флюсом. Расстояние должно быть выбрано достаточно коротким для обеспечения выпадение минимального количества флюса и настолько большим, чтобы шлак в начале процесса не зажимал свариваемый лист. При этом очень важен угол наклона разделительной пластины. Если он слишком большой, то разделительная пластина может быть захвачена лазерным пучком, а если слишком мал, то дуга может гореть между разделительной пластиной и присадочной проволокой. В этих областях отсутствует перемешивание металла шва. Именно предварительный нагрев за счет лазерного пучка, приводит к синергетическому эффекту, который увеличивает скорость процесса дуговой сварки под флюсом [21, 40].

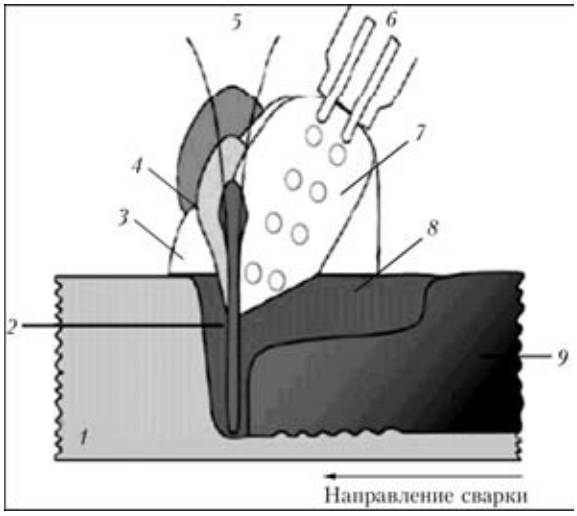


Рис. 11. Схема лазерной тандем-сварки [9]: *1* — обрабатываемое изделие; *2* — парогазовый канал; *3* — облако защитного газа; *4* — индуцированная лазером плазма; *5* — лазерный пучок; *6* — электрод; *7* — дуга; *8* — наплавленный валик; *9* — сварочная ванна

Таким образом, гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом является наиболее целесообразной среди способов гибридной лазерно-дуговой сварки. Промышленность проявляет значительный интерес к этому способу сварки, имеющему практическое применение благодаря использованию менее дорогостоящих и гибких источников лазерного излучения. Использование в этом процессе твердотельных лазеров дает возможность для дальнейшего развития этого способа сварки и расширения области его применения. Одним из его преимуществ является уменьшение риска плазменной защиты, поскольку легче объединить более короткую длину волны твердотельного лазера в материале, подлежащем обработке. При более короткой длине волны также может быть улучшена гибкость оборудования, поскольку можно обойтись без сложного наведения лазерного пучка через зеркальную оптику, а направлять его через оптоволокно в обрабатывающую оптическую систему [28].

Для достижения лучшей дегазации и получения шва с минимальным количеством пор или без них можно расширять или стабилизировать

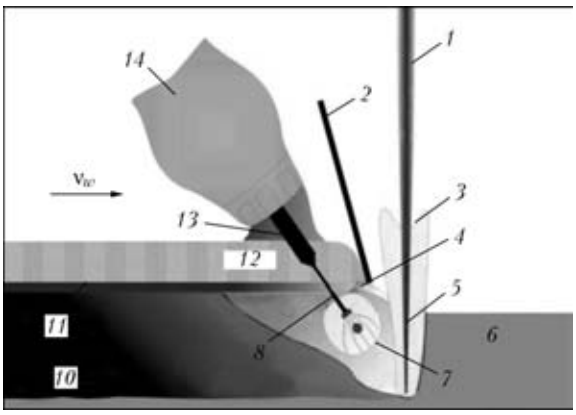


Рис. 12. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом [28]: *1* — лазерный пучок; *2* — разделительная пластина; *3* — плазмоиспарение металла; *4* — жидкий шлак; *5* — парогазовый канал; *6* — основной металл; *7* — раковина в дуговом шве; *8* — электродная проволока для дуговой сварки под флюсом; *9* — расплавленная ванна; *10* — металл шва; *11* — твердый шлак; *12* — флюс; *13* — мундштук; *14* — бункер для флюса

парогазовый канал. Одним из путей этого могло бы стать применение сварки и контроля с помощью адаптированной оптической колебательной системы.

Введение защитного газа и/или технологического газа является еще одним параметром процесса сварки. При использовании эффективного твердотельного лазера, например волоконного, можно было бы исключить применение защитного газа, а использовать сжатую воздушную струю во избежание необходимости очистки шва, что сделает данный способ сварки более экономичным [28].

При процессе гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом достигается лучшая дегазация за счет покрытия расплавленного металла шлаком, хорошего заполнения шва и более высоких возможностей этого способа сварки по сравнению с лазерной сваркой для соединения толстых пластин с использованием проволоки различных диаметров. Большие надежды связаны с применением комбинаций проволока + флюс и новых лазерных технологий [28].

Таким образом, исходя из результатов исследования различных способов гибридной лазерно-дуговой сварки можно заключить, что указанный способ сварки находит широкое промышленное применение благодаря экономическим и техническим преимуществам технологии.

Внедрение этой передовой технологии может изменить способы сооружения конструкций, а также принятые производственные парадигмы. Производители утверждают, что вследствие ее применения они получают большие выгоды, чем их конкуренты.

Гибридная сварка требует соответствующих настройки системы и подбора основных параметров. Если эти граничные условия выбраны правильно, то эта технология оказывается стабильной, эффективной и гибкой, а если они установлены не надлежащим образом, то в швах будут образовываться дефекты.

Производительность этого способа сварки можно улучшить путем увеличения скорости сварки, которая для листового материала может составлять до 40 % с традиционной лазерной сваркой.

При использовании гибридной сварки инвестиционные расходы на источник лазерного излучения значительно уменьшаются, а затраты на электроэнергию становятся намного выше.

При гибридной МИГ/МАГ сварке высокопрочной конструкционной стали толщиной до 20 мм с зазором до 1 мм в нижнем положении возможно достижение проплавления по всей глубине как без разделки кромок, так и при V- и Y-образной разделке.

Гибридная сварка найдет промышленное применение и для соединений большой толщины с изменяющимся зазором в кромках. При этом желательно разработать технологические условия, позволяющие обеспечить стабильное качество швов.

1. *Steen W. M., Eboo M.* Arc augmented laser welding // Metal Construction. — 1978. — **21**(7). — P. 332–335.
2. *Bagger C., Olsen F. O.* Review of laser hybrid welding // J. Laser Applications. — 2005. — **17**(1). — P. 2–14.
3. *Progress* in laser-MAG hybrid welding of high strength steels up to 30 mm thickness / D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe // Proc. on Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2007. — P. 300–307.
4. *Fellman A., Jernstrom P., Kujanpaa V.* CO_2-GMA hybrid welding of carbon steel — the effect of shielding gas composition // Proc. of Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Oct. 13–16, 2003. — P. 56–65.
5. *Dilthey U., Wiesschemann U.* Prospectives offered by combining and coupling laser beam and arc welding // Welding Intern. — 2002. — **16**(9). — P. 711–719.
6. *Graf T., Staufer H.* Laser-hybrid welding drivers VW improvements // Welding J. — 2003. — № 17. — P. 42–48.
7. *Shibata K., Sakamoto H., Iwasa T.* Laser-MIG hybrid welding of aluminium alloys // Welding in the World. — 2006. — **50**(1/2). — P. 27–34.
8. *Jokinen T., Karhu M., Kujanpaa V.* Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:YAG-Laser with filler wire and hybrid process // J. Laser Applications. — 2003. — № 15. — P. 220–224.
9. *Staufer H.* Laser hybrid welding in the automotive industry // Welding J. — 2007. — Oct., **86**(10). — P. 36–40.
10. *Innovative* hybrid welding process in an industrial application / S. Kaierle, K. Bongard, M. Dahmen, R. Poprawe // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Dearborn, USA, 2000. — **89**. — C. 91–98.
11. *Defalco J.* Practical applications for hybrid laser welding // Welding J. — 2007. — Oct., **86**(10). — P. 47–51.
12. *Naito Y., Mizutani M., Katayama S.* Observation of keyhole behavior and melt flows during laser-arc hybrid welding // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Florida, USA, LMP Section A, 2003. — P. 159–167.
13. *Effects* of interaction between the arc and laser plume on metal transfer in Pulsed GMA/CO_2 laser hybrid welding / T. Sugino, S. Tsukamoto, G. Arakane, T. Nakamura. — S.l., [2006]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-903–2006).

14. *Hu B., Den Ouden G.* Laser induced stabilisation of the welding arc // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2005. — **10**(1). — P. 76–81.
15. *Investigations* and applications of laser-arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components / D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Florida, USA, Section A, 2003. — P. 1–10.
16. *Mahrle A., Beyer E.* Hybrid laser beam welding-classification, characteristics and applications // J. Laser Application. — 2006. — № 18. — P. 169–180.
17. *Kah P., Salminen A., Martikainen J.* The effect of the relative location of laser beam and arc in different hybrid welding processes // Proc. of Intern. confern. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2009.
18. *Kutsuna M., Chen L.* Interaction of both plasma in CO_2 laser-MAG hybrid welding of carbon steel. — S. l., [2002]. — 10 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1708–2002).
19. *Abe N., Hayashi M.* Trends in laser arc combination welding methods // Welding Intern. — 2002. — **16**(2). — P. 94–98.
20. *Closing* the weld gap with laser/MIG hybrid welding process / C. Bagger, B. D. Wiwe, N. A. Paulin, F. O. Olsen // Conf. on laser materials proc. in the nordic countries, 9th NOLAMP Trondheim, Norway, 2003. — P. 113–124.
21. *Olschok S., Reisgen U., Dilthey U.* Robot application for laser-GMA hybrid welding in shipbuilding // Proc. 26th Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2007. — P. 308–315.
22. *Shinn B. W., Farson D. F., Denney P. E.* Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding // Sci. Techn. Weld. Joining. — 2005. — № 10. — P. 475–481.
23. *Schubert E., Wedel B., Kohler G.* Influence of the parameters on the welding results of laser-GMA welding // Proc. of Intern. conf. of applications of Lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Phoenix, Section A, 2002.
24. *Lui Z., Kutsuna M., Xu G.* Properties of CO_2 laser-GMA hybrid welded high strength steel joints. — S. l., [2006]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-907–2006).
25. *Bagger C., Olsen F.* Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding // Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LMP, Jacksonville, Florida, USA, Section A, 2003. — P. 11–20.
26. *Nilsson H., Kaplan A.* Influence of butt- and T-joint preparation in laser arc hybrid welding. — S.l., [2002]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1732–2002).
27. *Fellman A., Salminen A.* A study of phenomenon of CO_2-laser welding with filler wire and MAG hybrid welding // Proc. of the 24th Intern. conf. on applications of lasers and electro-optics, ICALEO, Miami, USA, 2005. — P. 117–126.
28. *Reisgen U., Olschok S.* Laser-submerged arc hybrid welding // The Paton Welding J. — 2009. — № 4. — P. 38–42.
29. *Laser-TIG* hybrid welding of ultra-fine grained steel / M. Gao, X. Zeng, Q. Hu, J. Yan // J. of Materials Proc. Techn. — 2009. — № 209. — P. 785–791.
30. *Pore* formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B-mechanism and remedy materials / L. Liming, S. Gang, G. Liang, W. Jifeng // Sci. and Eng. A. — 2005. — № 390. — P. 76–80.
31. *Liu L. M., Zhao X.* Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser GTA hybrid welding // Materials Characterization. — 2008. — № 59. — P. 1279–1284.
32. *Laser-TIG* hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheets / J. L. Arias, P. Romero, A. Vandewynckele, J. Vazquez // Proc. of the 24th Intern. conf. on applications of lasers and electro-optics, ICALEO, Miami, USA, 2005. — P. 104–107.
33. *Hybrid* welding of thick section C/Mn steel and aluminum / S. E. Nielsen, M. M. Andersen, J. K. Kristensen, T. A. Jensen. — S. l., [2002]. — (Intern. Isnt. of Welding; Doc. XII-1731).
34. *Walduck R. P., Biffin J.* Plasma arc augmented laser welding // Welding and Metal Fabrication. — 1994. — № 4. — P. 172–176.
35. *Wibowo M. K.* A study of hybrid laser-plasma arc welding // NIMR cluster 8 rep. (Joining technologies).
36. *Devermann T., Biffin J., Blundell N.* Plasma augmented laser welding and its applications // Sci. and Tech. of Welding and Joining. — 2002. — **7**(1). — P. 1–10.
37. *Fuerschbach W. P.* Laser assisted plasma arc welding // Proc. of Intern. conf. application of laser and electro-optics, ICALEO, section D, 1999. — P. 102–108.
38. *Staufer H.* High productivity by using laser-GMAW and laser tandem-hybrid processes for thick plates // Proc. of the IIW Intern. conf., Praque, Czech Republic, 2005. — P. 66–68.
39. *Dilthey U., Olschok S.* Untersuchungen zur nutzung der synergieeffekte bein Hochleistungs-laser hybridschweissen von dickwandigen Rohrkorpern aus C–Mn Stahlen // Abschlusssβericht des AiF-Forschungsvorhabens 13.407N. — Aachen, 2004.
40. *Combination* of laser beam and submerged arc processes for the longitudinal welding of large welded pipes / J. C. Coiffier, J. P. Jansen, G. Peru et al. // Proc. of Intern. symp. on high strength steels, Trondheim, Norway, 1997.

Peculiarities of application of different hybrid welding methods are analysed allowing for the process parameters used, types and thecknesses of the metal welded. Economic aspects of utilisation of hybrid welding and characteristic features of quality control are considered.

Поступила в редакцию 03.02.2010

УДК 621.791.3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ БУРОВЫХ ДОЛОТ ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССЕЯННОГО МЕТАНА В ШАХТНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук, **Б. В. СТЕФАНИВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние температуры пайки на работоспособность алмазно-твердосплавных резцов. Показано, что при сочетании предложенных припоев и разработанной технологии пайки удалось значительно увеличить длину и скорость проходки скважин, что подтверждено результатами промышленных испытаний.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, алмазный слой, алмазно-твердосплавный резец, породоразрушающий инструмент, долото, метан, пайка, припой

Основным инструментом для эффективного бурения недр земли при добыче углеводородов является долото для вращательного бурения, которое классифицируется как долото с фиксированными резцами, или шарошечное, предназначенное для различных пород и широкого спектра условий [1]. Долота с фиксированными резцами имеют лопасти, составляющие с корпусом одно целое и вращаются одновременно с ним. Шарошечные долота имеют металлические шарошки, которые независимо вращаются во время вращения долота в забое.

Буровые долота составляют только 1…5 % общей стоимости скважины, но от них напрямую зависит стоимость проходки единицы длины скважины, поскольку время, необходимое для ее бурения, определяется скоростью бурения и продолжительностью работы долота до износа. Долота с фиксированными резцами стоят дороже, но бурят быстрее и служат дольше, чем шарошечные в некоторых твердых и абразивных породах. Они могут оснащаться резцами с природными и синтетическими алмазами. Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами более устойчивы к ударной нагрузке, чем природные алмазы, и очень эффективны в твердых, умеренно абразивных породах. Эффективность применения этих алмазов ограничивается толщиной алмазной пластины, которая определяется диффузией кобальта от подложки из твердого сплава в алмазный слой, а также напряжениями, создаваемыми при тепловом расширении карбида вольфрама и при его усадке. Высокие остаточные напряжения и несмоченные зерна алмазов в результате неполного проникновения кобальта во время синтеза поликристаллических алмазов могут вызвать расслоение, отслоение и образование трещин в алмазных пластинах, что сокращает срок службы резца и долота в целом [1].

В странах СНГ основными материалами для изготовления инструмента служат металлокерамические твердые сплавы типа ВК-6, ВК-8, ВК-15, ВК-20 и др., а также сверхтвердые материалы, которые представлены природными и синтетическими алмазами. Теоретические и технологические основы получения таких материалов созданы в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины [2, 3].

Целью настоящей работы является выбор припоев, разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов (АТР) и технологии изготовления буровых долот. АТР (рис. 1) получают путем пайки алмазно-твердосплавных пластин (АТП) с твердосплавными державками (ТД) — сплавами на основе карбида вольфрама, где в качестве связки используют кобальт (от 2 до 25 мас. % в зависимости от марки сплава). Использованные в экспериментах АТП представляли собой цилиндры из твердого сплава диаметром 13,5 мм и высотой 3,5 мм, на которых расположен слой синтетических поликристаллических алмазов толщиной 0,7…0,8 мм. Алмазы, используемые в виде кристаллов с максимальным размером 20…60 мкм, отличаются стабильностью формы, высокой твердостью, износостойкостью, низким коэффициентом термического расширения.

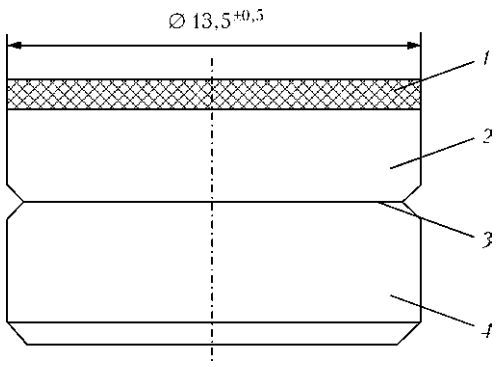


Рис. 1. Схема АТР: *1* — алмазный слой; *2* — твердосплавная подложка; *3* — паяный шов; *4* — ТД

© В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, Б. В. Стефанив, 2010

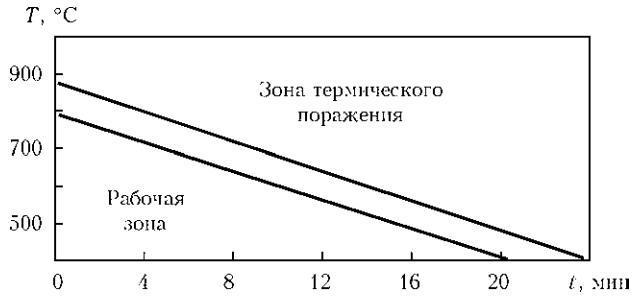


Рис. 2. Зависимость предельной температуры нагрева АТП от времени нагрева

Алмаз является метастабильной модификацией углерода и при нагреве АТП до критической температуры (670…700 °С) [3, 4] вследствие диффузионного взаимодействия между алмазными частицами и кобальтом физико-механические свойства алмазного слоя резко деградируют (рис. 2). Происходит каталитическая графитизация поликристаллических синтетических алмазов, образование трещин, вызванных различием коэффициентов теплового расширения алмаза и кобальта, и, как следствие, разрушение алмазного слоя.

Температура графитизации каждой марки синтетических поликристаллических алмазов зависит от многих факторов, в том числе степени чистоты (количества примесей металлов-катализаторов), среды нагрева и времени выдержки при повышенной температуре. Поэтому при изготовлении АТР путем пайки традиционных АТП (с поликристаллическими синтетическими алмазами) с твердыми сплавами необходимо учитывать указанные особенности синтетических алмазов. Температура плавления припоя не должна превышать 650…700 °С, он должен характеризоваться хорошей жидкотекучестью и смачиваемостью по отношению к паяемым материалам. Так как имеется существенная разница в коэффициентах термического расширения основного материала и применяемых металлических припоев, последние должны характеризоваться высокой пластичностью для релаксации возникающих на межфазной границе напряжений. Кроме того, учитывая нагрузки, действующие на АТР во время эксплуатации, прочность паяного шва на срез должна быть не ниже 300 МПа и износ АТР в оговоренных ниже условиях испытаний не более 0,2 мм.

Такие противоречивые требования сложно было выполнять при существующей еще с советских времен технологии изготовления АТР и имеющейся базе припоев. Так, широкое применение для соединения твердых сплавов получили медно-цинковые припои, легированные различными элементами, которые улучшают их физико-механические и технологические характеристики. Они хорошо растекаются по твердым сплавам и сталям и широко используются при получении соединений из этих материалов, но при пайке АТП их применение приводит к деградации синтетических алмазов из-за высокой температуры процесса.

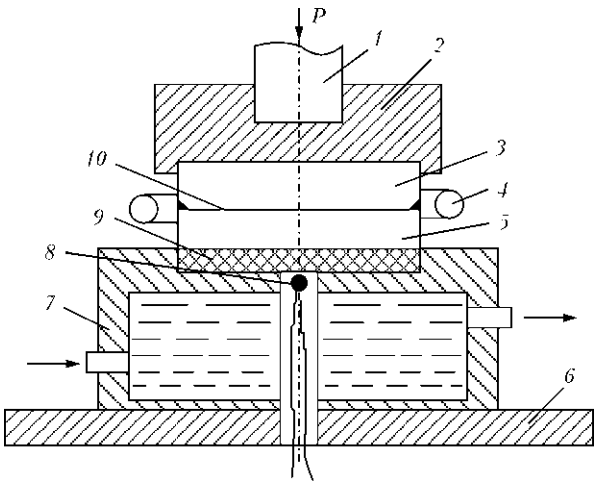


Рис. 3. Схема приспособления для пайки АТР: *1* — прижим; *2* — суппорт; *3* — ТД; *4* — индуктор; *5* — АТП; *6* — основа; *7* — холодильник; *8* — термопара; *9* — алмазный слой; *10* — паяный шов

Для пайки АТП с твердыми сплавами более перспективны медно-серебряные припои, характеризующиеся невысокой температурой плавления, достаточной пластичностью, хорошей жидкотекучестью. Базовым служит эвтектический сплав системы Cu–Ag с температурой плавления 779 °С [5]. Введение таких металлов, как цинк, кадмий, олово, позволяет снизить температуру плавления припоя, что положительно сказывается на их технологических свойствах. Так, площадь растекания припоев в значительной степени зависит от их состава (таблица).

Следует отметить, что при соединении АТП с ТД фактически осуществляется пайка двух твердых сплавов, поскольку алмазное покрытие расположено на наружной поверхности АТП. Поэтому на первом этапе для определения прочности паяных соединений на срез паяли две пластины твердого сплава ВК-8, которые имитировали АТР,

Площадь растекания припоев по подложке из твердого сплава

Базовая система (марка припоя)	Продолжительность нагрева, с	Интервал плавления припоя, °С	Площадь растекания припоя, мм^2
Ag–Cu–Zn–Cd (ПСр-40)	24	590...610	89,87
Ag–Cu–Zn (ПСр-45)	27	665...730	67,63
Ag–Cu–Zn–Sn (BAg-7)	26	618...651	46,33
Ag–Cu–Zn–Ni–Mn (BAg-22)	23	680...699	121,40
Cu–Zn–Mn–Sn–Ni (ПМ-50)	25	780...870	119,18
Cu–Mn–Fe–Ni (ПМ-72)	40	810...890	50,19

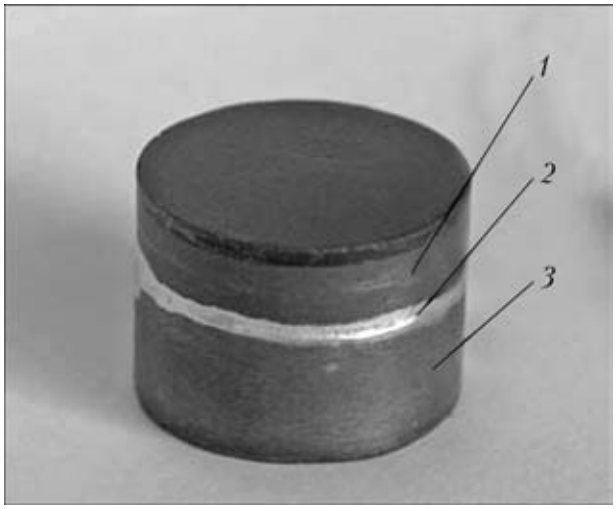


Рис. 4. Паяный АТР для бурового инструмента: *1* — АТП; *2* — паяный шов; *3* — ТД

что существенно упрощало и удешевляло проведение исследований.

Результаты механических испытаний показали, что припои системы медь–серебро, легированные другими элементами (цинком, марганцем, никелем и др.), обеспечивают достаточную прочность на срез (около 300 МПа). Однако для выбора оптимального состава припоя при изготовлении АТР прочность на срез паяных соединений является обязательным параметром, но недостаточным.

Для получения достоверной информации необходимо проводить комплексные испытания паяных соединений, которые позволяют оценить прочность и износостойкость. Износостойкость является основным параметром, наиболее реально отражающим условия эксплуатации буровых долот, оснащенных алмазными резцами. Уровень износостойкости зависит от температуры нагрева алмазного слоя и времени пребывания при этой температуре, поэтому пайку АТР для изучения износостойкости проводили в специальном приспособлении (рис. 3), в котором алмазный слой контактировал с охлаждаемой поверхностью (для сравнения отдельные резцы паяли без охлаждения). Параметры нагрева с помощью генератора ВЧИ4-10У4 следующие: $I_{\text{сетки}}$ = 0,1 А, $I_{\text{анода}}$ = = 0,6...0,7 А. Полученные резцы (рис. 4) испытывали на стенде, который имитирует реальные условия эксплуатации; другими словами, осуществляли строжку той горной породы (например, кварцевый песчаник), для которой предназначен данный резец.

Параметры испытаний были следующими: скорость продольной подачи 0,55 м/с; глубина реза 0,5 мм; поперечная подача 28 мм/проход, охлаждение отсутствовало, продукты разрушения горной породы не удалялись из зоны строгания (воду не использовали). Значение износа после строжки замеряли на задней грани АТР с помощью оптического микроскопа. Проведенные испытания позволили выбрать припои, которые обеспечивали необходимый уровень износостойкости, не превышающий 0,2 мм. Полученные результаты использовали при разработке технологии пайки АТР с лопастью. Это наиболее ответственная технологическая операция с точки зрения сохранения свойств алмазного слоя. В традиционной технологии пайка резцов проводится последовательно, т. е. предыдущий резец подвергается вторичному нагреву при пайке последующего. Более того, индукционный нагрев иногда сочетается с газопламенным (поверхностным), что создает опасность непосредственного контакта алмазного слоя с пламенем горелки.

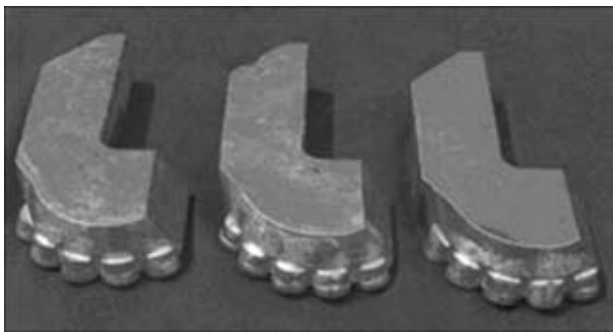


Рис. 5. Лопасти буровых долот с впаянными АТР

В процессе проведения настоящей работы разработана специальная конструкция индуктора, которая позволяет получать равномерное температурное поле в области пайки резцов. На основании этого стало возможным осуществлять одновременную пайку всех резцов при использовании только высокочастотного нагрева. При использовании такой технологии алмазный слой находится при высокой температуре минимальное время и сохраняет необходимые при эксплуатации свойства. Следует отметить, что оптимальные составы припоев хорошо смачивают низколегированную сталь лопасти и материал подложки резцов и обеспечивают надежное крепление последних в лопасти (рис. 5).

Соединение лопастей с корпусом проводили полуавтоматической сваркой плавящимся электродом под защитой аргона. Были отработаны режимы сварки, количество и порядок наложения швов, временные паузы на остывание швов и др. Особое внимание уделено сварке верхней части долота, где сварочная дуга близко подходила к алмазному слою.

С использованием разработанной технологии и припоев изготовили партию долот, предназначенных для бурения горных пород средней твердости (рис. 6), которая успешно прошла промышленные испытания и внедрение в технологический процесс добычи рассеянного метана на шахте им. А. Ф. Засядько.

Рис. 6. Буровое долото, оснащенное АТР

В процессе проведения промышленных испытаний установлено, что применение оптимальных составов припоев и разработанной технологии с использованием отечественных АТП позволило увеличить значение проходки со 100…120 до 400…450 м. При использовании АТР зарубежного производства без изменения конструкции долота и стабилизатора проходка несколько увеличилась, однако возможности этих резцов в значительной степени не были реализованы. И только при сочетании усовершенствованной конструкции долота и стабилизатора, разработанных припоев и технологии пайки удалось достичь значения проходки более 1000 м (без ремонта). После устранения случайных повреждений, вызванных, например, включениями более твердых пород, значение проходки возрастало до 1500…1700 м и более.

1. *On the* cutting edge / A. Besson, B. Burr, S. Dillard et al. // Oilfield Review. — 2000. — Autumn. — P. 36–57.
2. *Новиков И. В.* Развитие синтеза сверхтвердых материалов // Актуальные проблемы современного материаловедения: В 2 т. Т. 2. — Киев: ИД «Академпериодика», 2008. — С. 42.
3. *Инструменты* из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. — М.: Машиностроение, 2005. — 555 с.
4. *Артюхов В. П., Прусс О. П.* Исследование процессов пайки алмазнотвердосплавных резцов // Сверхтвердые материалы. — 1997. — № 2. — С. 38–43.
5. *Диаграммы* состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т.1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1996. — 991 с.

The effect of the brazing temperature on performance of diamond — hard-alloy cutters was investigated. It was shown that the length and rate of well drilling were substantially increased owing to a combination of the proposed brazing filler metals and developed brazing technology, which was proved by the industrial test results.

Поступила в редакцию 19.02.2010

21–23 июня 2010 **г. Нижний Новгород**

Тематика выставки:

Оборудование и оснастка для контактной сварки, оборудование для специализированных способов сварки, машины и оборудование для дуговой сварки и резки, источники питания, приспособления и инструменты, оборудование для плазменной обработки металлов, машины и оборудование для газовой сварки, вспомогательный инструмент, оборудование, приспособления и инструменты для сварки в среде защитного газа, оборудование для подготовки поверхности, автоматические системы управления для сварочных процессов, роботы и роботехнические комплексы, измерение, контроль, испытания, обработка данных, средства защиты сварщиков и охрана окружающей среды, научное и информационное обеспечение.

Всероссийское ЗАО «Нижегородская ярмарка»
тел.: (831) 277-54-96; факс: 277-55-86, 277-54-89; E-mail: kaa@yarmarka.ru

УДК 621.791.753

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

П. Ю. СИДОРЕНКО, инж., **Р. Н. РЫЖОВ**, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Приведена оценка влияния электромагнитных воздействий, создаваемых аксиальными импульсными магнитными полями на параметры переноса электродного металла при дуговой сварке плавящимся электродом.

Ключевые слова: дуговая сварка, импульсные электромагнитные воздействия, управление переносом, аксиальные управляющие магнитные поля

При дуговой сварке управление переносом электродного металла является важной задачей, решение которой позволяет снижать потери металла на разбрызгивание, улучшать формирование швов.

Одним из наиболее эффективных способов управления переносом является использование электромагнитных воздействий (ЭМВ). При реализации на основе аксиальных низкочастотных магнитных полей их успешно применяли при сварке плавящимся электродом под флюсом [1, 2]. Однако использование данных воздействий при сварке в защитных газах не получило распространения из-за повышенного разбрызгивания, обусловленного действием на капли центробежных сил, которые возникают при их вращении на торце электрода.

ЭМВ на основе импульсных аксиальных управляющих магнитных полей (УМП) успешно применяли для дозированного переноса припоя при дуговой пайке [3] и повышения сопротивляемости швов горячим трещинам при ТИГ сварке [4]. Анализ показал, что опыт применения данных ЭМВ при дуговой сварке плавящимся электродом на данный момент отсутствует. В отличие от широко применяемых ЭМВ на основе низкочастотных аксиальных магнитных полей исследуемые ЭМВ основаны на создании силового воздействия на капли расплавленного металла, которое возникает при взаимодействии магнитного поля с индуцируемыми в их объемах вихревыми токами.

Исследования проводили при дуговой сварке низкоуглеродистой стали плавящимся электродом в защитных газах (Ar, 82 % Ar + 18 % CO_2 и CO_2) и при сварке самозащитной порошковой проволокой марки ППТ-9. В качестве сварочного источника питания использовали ВДУ-504. Размеры капель электродного металла, отделившихся с торца электрода, фиксировали с помощью цифровой камеры. Параметры режима сварки приведены в таблице. После компьютерной обработки изображений области дуги определяли размеры капель и рассчитывали дисперсию (отклонение размеров капель от их среднего значения, характерного для данной частоты переноса).

Установлено, что при сварке в обычных условиях размер капель, отделившихся от торца электрода, может изменяться в 2 раза. Использование данных ЭВМ приводит к уменьшению дисперсии распределения размеров капель при сварке в аргоне на 92, в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 на 85 и в CO_2 на 74 % (рис. 1).

Наибольшее значение дисперсии наблюдали при сварке порошковой проволокой, что объясняется неравномерным плавлением шихты и оболочки, имеющих разные физико-химические свойства и специфику энергетического баланса на вылете электрода [5]. В результате действия отмеченных факторов процесс массопереноса электродного металла является нестабильным.

Проведена оценка влияния импульсных ЭМВ на потери электродного металла на разбрызгивание. Уровень разбрызгивания оценивали по стандартной методике. Известно [6], что сварка в CO_2 характеризуется повышенными потерями электродного металла на разбрызгивание, что связано с систематическими замыканиями дугового промежутка, которые сопровождаются взрывами перемычек. При этом разбрызгивание металла возможно как с электрода, так и из ванны [7]. Аналогичные результаты были получены и в процессе экспериментальных исследований (рис. 2).

Параметры режима сварки низкоуглеродистой стали плавящимся электродом в защитных газах и при сварке самозащитной порошковой проволокой

Марка проволоки	Защитный газ	$I_{св}$, А	$U_д$, В
Св-08Г2С, ∅ 1,2 мм	Ar	100	24
	82 % Ar + 18 % CO_2		
	CO_2	110	22
ППТ-9, ∅ 2,5 мм	—	200 175	34 26

© П. Ю. Сидоренко, Р. Н. Рыжов, 2010

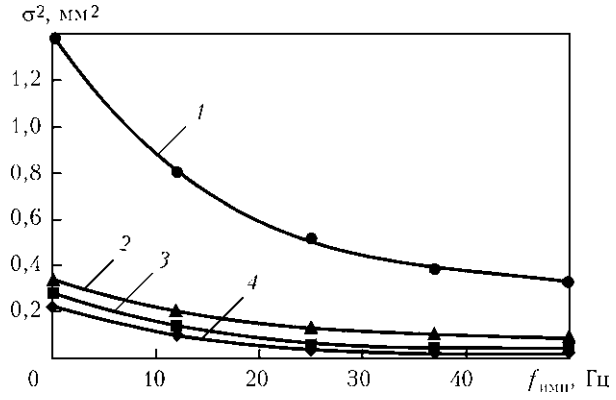


Рис. 1. Зависимость дисперсии распределения размеров капель электродного металла от частоты аксиальных импульсных УМП при сварке порошковой проволокой ППТ-9 (*1*), сваркой в CO_2 (*2*), в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 (*3*) и в Ar (*4*)

Применение импульсных ЭМВ позволяет уменьшить потери электродного металла при сварке в аргоне на 38; в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 на 43, в CO_2 на 32 %. Данный эффект объясняется уменьшением количества коротких замыканий вследствие уменьшения размера капель. К тому же при использовании данных импульсных воздействий существует возможность управлять их перемещением в ванну.

При сварке порошковой проволокой исследования проводили на двух режимах, отличающихся напряжением на дуге (см. таблицу). Эксперименты показали, что при увеличении напряжения на дуге уровень разбрызгивания значительно уменьшается. Это, как и в предыдущем случае, связано с уменьшением вероятности появления коротких замыканий.

Увеличение частоты исследуемых ЭМВ сопровождалось уменьшением размеров переносимых капель на 30 % и экспоненциальным уменьшением коэффициента потерь металла электродной проволоки на разбрызгивание (рис. 2). Сварка на пониженном напряжении характеризуется нестабильностью процесса переноса электродного металла и большой дисперсией распределения их размеров. Вероятно, с этим связаны повышенные потери на разбрызгивание (до 12,5 %, рис. 2).

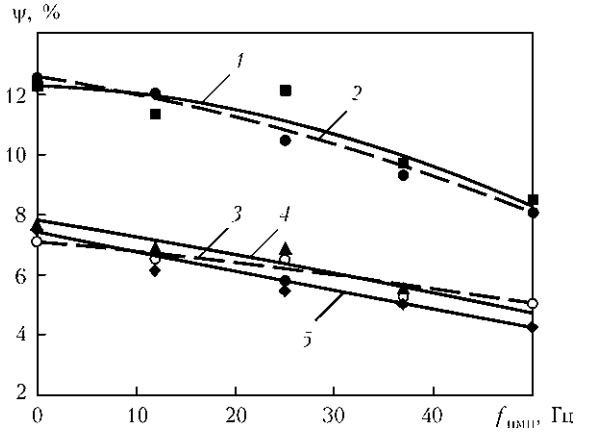


Рис. 2. Изменение коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание при сварке с импульсными ЭМВ: *1, 4, 5* — сварка соответственно в CO_2, в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 и в Ar; *2, 3* — сварка порошковой проволокой ППТ-9 соответственно при $U_д$ = 26 и 34 В

Таким образом, применение ЭМВ на основе аксиальных импульсных магнитных полей позволяет увеличить частоту переноса капель и соответственно уменьшить их размеры. При этом эффективность данных ЭМВ повышается с увеличением частоты импульсов УМП. В результате существует возможность снижения потерь металла электродной проволоки на разбрызгивание.

1. *Завьялов В. Е., Звороно Я. П., Петраков А. Б.* Использование продольного магнитного поля при наплавке под флюсом // Свароч. пр-во. — 1990. — № 2. — С. 3–6.
2. *Зернов А. В.* Применение продольных магнитных полей при автоматической сварке под флюсом корневого шва поворотных стыков трубопроводов // Там же. — 1972. — № 3. — С. 26–27.
3. *Тарасов М. М., Капустин С. С.* Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла // Автомат. сварка. — 1982. — № 8. — С. 10–12.
4. *Рыжов Р. М.* Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов // Там же. — 2007. — № 2. — С. 56–58.
5. *Походня И. К., Суптель А. М.* Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 358 с.
6. *Хейфиц А. Л.* Сравнительная оценка некоторых способов снижения разбрызгивания при сварке в среде CO_2 // Автомат. сварка. — 1986. — № 3. — С. 58–60.
7. *Потапьевский А. Г.* Виды разбрызгивания металла при сварке в углекислом газе // Там же. — 1974. — № 5. — С. 10–12.

Electromagnetic effects induced by axial pulsed magnetic fields on parameters of electrode metal transfer in metal-arc welding were evaluated

Поступила в редакцию 17.02.2010

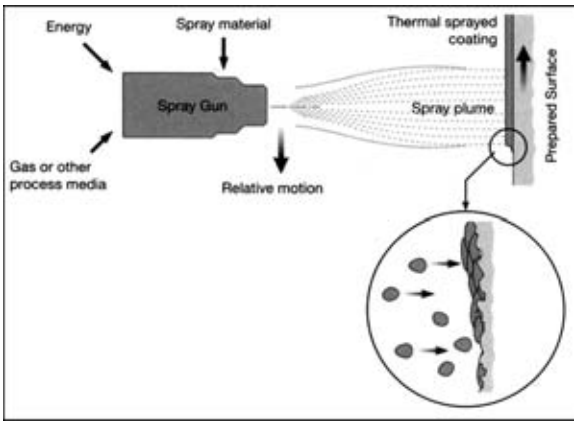
ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING JOURNAL», 2010, № 7/8

ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ. Fred Van Rodijnen, July

Способ термического напыления, запатентованный Шоопом почти сто лет назад, нашел применение во всех областях промышленности, обеспечивая не только сокращение потерь материалов в результате износа, окисления, коррозии и других нежелательных процессов деградации их свойств, связанных с эксплуатацией, но и увеличение их срока службы при изготовлении изделий из более дешевого сырья. В отличие от способов сварки, для которых характерно плавление основного металла, при термическом напылении основной материал не нагревается выше температуры термических превращений. Толщина покрытия варьируется от 25 мкм до 25 мм. Термическое напыление обычно используют для восстановления изношенных поверхностей изделий нанесением более износостойких металлов, сплавов и оксидов, чем основной материал.

Суть процесса термического напыления (рисунок) состоит в плавлении напыляемого материала при его нагреве электрической дугой или теплом окислительных реакций с последующим нанесением его на основной материал, где происходит затвердевание жидких частиц с формированием сплошного слоя.

Примером практического применения процесса плазменного напыления в автомобильной промышленности является нанесение тонкого (порядка 150…200 мкм толщиной) покрытия на поверхности отверстий в блоке цилиндров, что позволяет заменить отливку блоков из чугуна алюминиевым сплавом или исключить запрессовку вкладышей цилиндров, изготавливаемых из композитных материалов. Возможность управления степенью пористости покрытия, нанесенного способом плазменного напыления, способствует существенному сокращению удельного расхода топлива в результате снижения потерь на трение при заполнении микропор смазочными веществами. Напыление внутренних поверхностей цилиндров позволяет продлить пробег двигателей в пределах 400 тыс. км до первого ремонта и пригодно как для бензиновых, так и для дизельных двигателей транспортных средств, спортивных машин, поршневых авиадвигателей и дизелей повышенной мощности. Другим примером эффективного применения термического нанесения покрытий является плазменное напыление сплава манганата лантанстронция на хромовое покрытие промежуточных ячеек твердотельных топливных элементов в атмосфере воздуха с использованием пистолета ТриплексПро-200 фирмы «Зульцер Метко». К преимуществам этой технологии относится высокая скорость нанесения покрытий, возможность получения плотных покрытий толщиной около 50 мкм с высокой степенью воспроизводимости качества, стабильность параметров процесса в течение 200 ч непрерывной работы, сокращение до минимума количества инородных включений в составе покрытия, обычно эмитируемых из материалов электродов и сопла плазменного пис- толета.



Процессы хромирования гальваническим методом, обычно применяемые для повышения износо- и коррозионной стойкости изделий, целесообразно заменять методами газопламенного напыления, которые более соответствуют постоянно растущим требованиям по защите окружающей среды. Высокоскоростное нанесение карбидов кобальта и хрома позволяет заменить гальваническое покрытие хромом по всем параметрам, кроме зеркального блеска, что вынуждает проводить последующее шлифование и притирку напыленного слоя.

Газопламенное или электродуговое напыление на стальные конструкции цинка или алюминия толщиной 100…300 мкм в качестве анодного покрытия позволяет продлить срок службы, например, трубопроводов до 25…30 лет и более.

Процессы термического напыления не заменимы при изготовлении и ремонте направляющих валков сталепрокатных станов, нанесении покрытий на уплотнительные кольца поршней в двигателях и компрессорах, головки клапанов, наплавке баббитовых вкладышей подшипниковых узлов, изготовлении и ремонте аппаратуры теплоэлектростанций, обеспечивая повышение эрозионной и коррозионной стойкости металла.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В КОТЛОСТРОЕНИИ

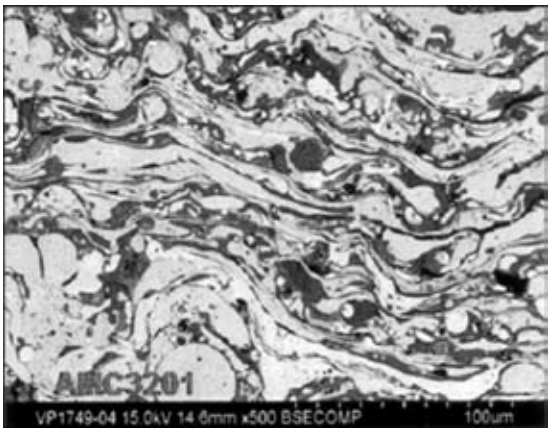
Juan Carlos Nana. — July

При эксплуатации электростанций особенно высока стоимость ремонта в случае непредвиденных выходов из строя поверхностей теплообменников, выполняемых из сплавов на основе железа, наиболее чувствительных к высокотемпературному окислению и сульфитации.

Термическое нанесение покрытий является наиболее экономически оправданным вариантом повышения работоспособности паровых котлов и сведения к минимуму случайных аварий оборудования. Разработка электродов требуемого состава позволила наносить покрытия с характеристиками, не уступающими покрытиям, полученным при использовании более сложных в технологическом отношении способов высокоскоростного газопламенного или плазменного напыления.

Проведенные в EPRI (Electric Power Research Institute) в 1994–1999 гг. всесторонние испытания материалов, применяемых в котлостроении, включая испытания защитных слоев методами наплавки, диффузионным и термическим напылением с целью выявления наиболее экономически эффективных и надежных методов нанесения покрытий, обеспечивающих минимальный износ металла топочных экранов паровых котлов, показывают, что по степени износа вариант термического напыления покрытий не уступает дуговой наплавке.

В одной из рекомендаций EPRI (доклад 1014805) указывается, что для достижения приемлемого срока службы узлов котельного оборудования необходимо использовать металлы или сплавы, которые создают оксидные слои, защищающие основной металл от высокотемпературной и химически агрессивной среды.



Примером реализации этой рекомендации является сплав AMC 3201, нанесенный методом дугового напыления, который при температуре 800°C образует последовательное чередование слоев окалины, обогащенной хромом (рисунок). При воздействии серосодержащих продуктов топочных газов в напыленном слое происходит образование сульфидов хрома, которые запечатывают поры, предохраняя основной металл от дальнейшего воздействия агрессивной среды. Более равномерное расположение оксидных слоев по толщине покрытия облегчает релаксацию механических напряжений, снижает остаточные напряжения, которые предотвращают возможность отслаивания покрытия от основного металла из-за разницы коэффициентов термического расширения.

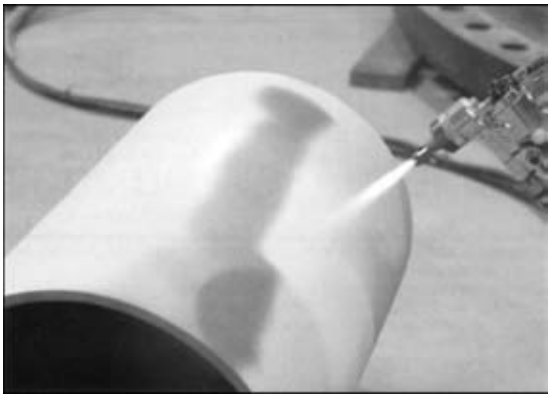
ТЕРМИЧЕСКИ НАПЫЛЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИЙ ОТ КОРРОЗИИ

Dave Wixson. — July

Как известно, с целью коррозионной защиты сталей во всех отраслях промышленности в большинстве случаев в качестве барьерного покрытия или катодной защиты используют алюминий, цинк или сплав 85/15 (цинк–алюминий), который разрушается, защищая сталь, до тех пор пока не растворится до последнего атома. Во многих случаях нанесение покрытий проводят методом термического напыления с нагревом электрической дугой, горящей между двух расходуемых проволок или пламенем газовой горелки при сжигании пропана или ацетилена в среде кислорода (рисунок).

В связи с тем, что термически нанесенный слой связан с основой механическим типом соединения, подготовка поверхности к процессу напыления (дробеструйная обработка, нарезка канавок) является достаточно ответственным этапом, который необходимо проводить в соответствии со стандартами (SSPC-SP), регламентирующими процесс подготовки в зависимости от условий и срока эксплуатации изделия.

За один проход обычно напыляют площадь около 1 м^2 с перекрытием соседней площадки на 40 %, при этом толщина покрытия не превышает 75 мкм. При необходимости нанесения покрытия толщиной 400 мкм (например, для случая эксплуатации металла в морской воде в течение 10…20 лет) проводят несколько проходов напыления, пересекающихся



под прямым углом, сохраняя расстояние между распылительным пистолетом и напыляемой поверхностью около 25 см.

Качество напыленного покрытия оценивается по результатам испытаний на растяжение, изгиб и срез в соответствии с рекомендациями Американского общества специалистов по испытаниям и материалам (ASTM).

НАНОПОРОШКИ ПОВЫШАЮТ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

C. Melnik et al. — July

Как известно, материалы, получаемые методами горячего спекания (консолидации) порошков нанокристаллического размера, например, методом изостатического прессования (HIP — hot isostatic pressing) или плазменно-дуговым спека-

нием (SPS — spark plasma sintering), обладают повышенной прочностью и твердостью по сравнению с материалами, полученными спеканием порошков обычного размера (порядка десятка микрон). Например, твердость алюминиевого нанопорошка, полученного в криомельнице, превосходит твердость исходного порошка микронных размеров в три раза, а прочность на срез — в два раза. Твердость образцов, изготовленных методом плазменно-дугового спекания нанопорошков WC–12Co, в полтора раза выше твердости образцов из порошков самого тонкого помола микронного размера.

Степень повышения физических свойств консолидированных материалов при снижении размеров спекаемого порошка оценивается в соответствии с уравнением Холла–Петча (Hall-Petch relationship):

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$
$$H = H_0 + k'd^{-1/2},$$

где σ_y, H — предел текучести и твердость материала; d — размер зерна; k, k' — коэффициенты, характеризующие физико-химические свойства материала.

На основании механизма повышения физических свойств материалов, получаемых методом спекания, можно прогнозировать перспективы повышения качества термических покрытий, получаемых с помощью нанопорошков. Например, при термическом напылении нанопорошков состава WC–17Co износостойкость покрытия возрастает на 30 %, а твердость — на 20…25 % по сравнению с аналогичными параметрами покрытия, полученного при напылении порошка WC–10Co–4Cr обычного (микронного) размера.

Очевидно, что соотношения Холла–Петча, устанавливающие зависимость физических свойств консолидированных материалов от размеров порошка, могут быть применимы и в процессах термического напыления при использовании нанопорошков.

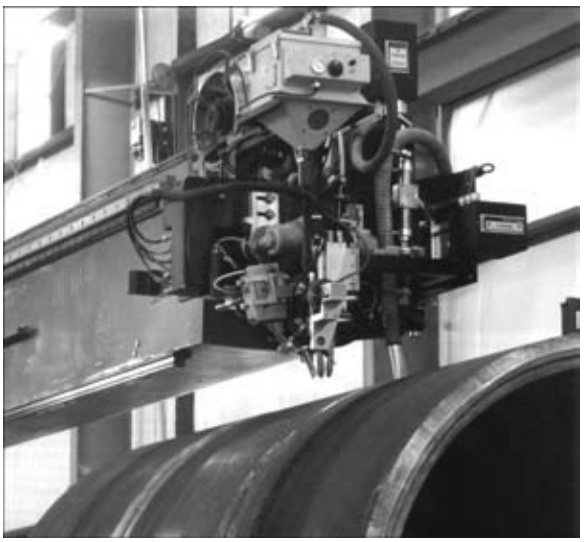
СВАРКА УЗЛОВ ВЕТРОУСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДУЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
August

Перспективы развития ветроэнергетики, которой прочат большое будущее, во многом определяются традиционными технологиями изготовления металлоконструкций, в частности, совершенствованием способов сварки и сварочного оборудования.

Например, башни ветроустановок, достигающие в высоту до 90 м, изготавливают сваркой отдельных цилиндрических обечаек диаметром 2,4…4,5 м длиной до 3 м на стационарных сварочных установках при вращении обечайки.

Установка для дуговой сварки под флюсом, разработанная AMET, Inc. (www.ametinc.com), состоит из сварочной головки, расположенной на направляющем рельсе с возможностью ее дополнительного перемещения на небольшое расстояние по трем осям для коррекции своего положения во время сварки внутренних и наружных кольцевых, а также продольных швов (рисунок).

Отличительной особенностью установки является точность позиционирования сварочной головки на уровне 25 мкм, благодаря чему исключается как появление брака в сварных соединениях, так и трудоемкая операция по его ликвидации, экономится время и материальные средства. Установка способна выдерживать динамические нагрузки, превышающие 20000 Н, и обеспечивает плавное перемещение



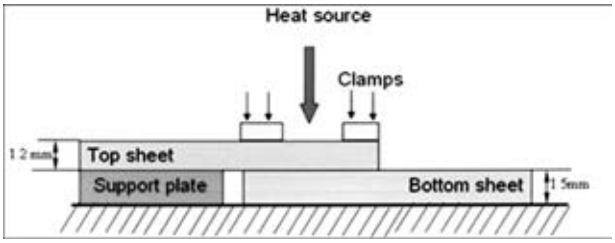
сварочной головки со скоростью 1,5 м/мин с возможностью перемещения с ускорением до 3 м/с^2.

СВАРКА ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ DP980.
S. L. Yang, R. Kovacevic. — August

Исследована возможность получения бездефектных соединений внахлестку оцинкованной двухфазной стали DP980 с использованием гибридного способа сварки при одновременном вводе в сварочную ванну энергии лазерного луча и энергии электрической дуги.

Проблема сварки внахлестку оцинкованной стали, широко применяемой в автомобиле- и судостроении, а также в других отраслях промышленности, заключается в образовании в зоне контакта свариваемых листов высокого давления паров цинка, которые приводят к разбрызгиванию металла расплавленной ванны, пористости соединения, налипанию брызг и другим дефектам.

За последние несколько десятилетий предложено несколько способов, среди которых наиболее простым является механическое удаление цинкового покрытия с поверхностей соединяемых металлов, что и было заложено в основу рекомендации, разработанной Американским обществом специалистов по сварке. Известны предложения формировать в свариваемых листах специальные щели, применять новые типы нахлесточного соединения для выхода паров цинка, использовать в зоне контакта прослойку меди или алюминия, наносить

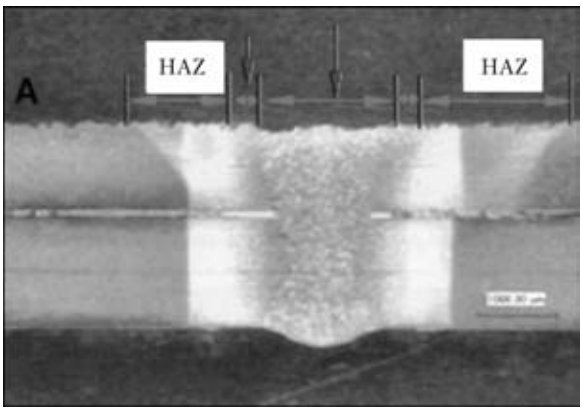


в зоне контакта никелевое покрытие, использовать пульсацию лазерного луча, сдваивание лазерных лучей, увеличение длины сварочной ванны и многие другие варианты, включающие гибридные способы сварки с предварительной прорезкой лазерным лучом щелей в верхнем листе для выхода паров цинка, однако ни один из рассмотренных вариантов не устранял пористость сварного шва и разбрызгивание металла.

К основным недостаткам лазерной сварки стали или алюминия относятся существенные потери энергии из-за отражения лазерного луча от свариваемых поверхностей.

Однако в комбинированном способе сварки оцинкованной стали при использовании дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW) в качестве вспомогательного источника тепловой энергии и энергии лазера, вводимой в зону сварки с помощью оптоволоконной системы, частицы оксидов металлов, образующиеся в процессе предварительного дугового нагрева, существенно повышают поглощение энергии лазерного луча в зоне свариваемого металла.

Отличительной особенностью нового гибридного способа сварки является формирование под действием лазерного луча в свариваемом металле сквозных отверстий, через которые пары цинка удаляются из плоскости контакта двух свариваемых листов.



Для выявления зависимости механических свойств сварных соединений от параметров сварки проведены исследования прочности металла на растяжение и срез, распределения микротвердости металла по сечению сварного шва, исследования микроструктуры металла сварного шва методами электронной и рентгеновской микроскопии, проведен микроструктурный анализ распределения элементов по сечению сварного шва и съемка процесса сварки цифровой видеокамерой.

Внешний вид сварного шва и микрошлифов, свидетельствуют о преимуществах предложенного комбинированного способа по сравнению с известными способами сварки оцинкованных листов.

Материал подготовил
канд. техн. наук В. М. Кислицын

УДК 621.791:061.2/.4

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ (по материалам конференций в области неразрушающего контроля)

В настоящее время около 70 % мирового потребления металлопроката идет на производство сварных изделий, конструкций и сооружений. Для современного сварочного производства, наряду с обновлением технологий, характерен высокий уровень механизации и автоматизации с использованием информационных технологий и компьютерных систем управления, диагностики и контроля.

Учитывая, что в XXI в. все более настойчиво на первый план выходит проблема безопасности, качеству сварных соединений по праву отводится первостепенное значение. Поэтому вполне закономерно, что методы неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений приобретают все большее значение.

Доклад В. А. Троицкого «Альтернативные решения традиционным методом в неразрушающем контроле сварных соединений» был посвящен нетрадиционным методам НК сварных соединений: томографии, инфракрасной термографии, цифровой радиографии, низкочастотному ультразвуковому контролю с применением ЭМА-преобразователей, магнитооптической визуализации магнитных полей дефектов и пр.

Заслуживает внимания новый метод контроля механических свойств и структуры металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов, предложенный В. М. Ажажей и сотрудниками в их докладе «Разработка и внедрение технологий для комплексного диагностического контроля

Целью настоящего сообщения является ознакомление широкого круга специалистов-сварщиков с возможностями основных методов НК — как своеобразный итог научно-технического развития контроля и диагностики в 2009 г. на основе докладов, представленных на трех конференциях специалистов в этой области.

Главным событием 2009 г. в мире НК стала *6-я Национальная научно-техническая конференция и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»* (июнь, 2009 г., Киев).

В основополагающем докладе Б. Е. Патона и др. «Разработки в области неразрушающего контроля сварных соединений» представлены достижения четырех отделов ИЭС им. Е. О. Патона в области НК сварных соединений, которые успешно внедряются на предприятиях Украины и России.

основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС». При этом с поверхности металла контролируемого объекта с помощью специально разработанного оборудования срезается слой металла, не влияющий на работоспособность изделия, что требует высоких технологий вырезки темплета. Затем образцы подвергают полному циклу традиционных испытаний для получения информации по механическим свойствам, структурно-фазовым изменениям в металле и оценке остаточного ресурса. В то же время эта методика контроля является неразрушающей для оборудования и трубопроводов. Кроме того, в этой работе применяли магнитно-коэрцитиметрический контроль металла для определения на объекте наиболее опасных участков и узлов, характеризующихся зонами концентраций напряжений, так как

магнитные свойства металлов коррелируют с напряженно-деформированным состоянием изделия.

В докладе Г. Г. Луценко и др. «Обзор средств НК для проведения инспекции в трубной промышленности» приведены средства НК сварных соединений и металла в трубной промышленности, а также характеристики ультразвуковых сканеров, разработанных в ЗАО «УкрНИИНК».

Методу магнитооптического контроля (МОК), основанному на визуализации магнитограмм, возникшему в результате развития средств регистрации рельефа магнитного поля на поверхности изделий в зонах приповерхностных дефектов и повышенных напряжений, посвящен доклад Ю. С. Агалиди с сотрудниками «Магнитооптическая дефектоскопия изделий и соединений из ферромагнитных сталей». Этот метод существенно расширил возможности оценки качества приповерхностных слоев изделий и соединений из ферромагнитных сталей и увеличил достоверность контроля. Результаты МОК показывают уверенную визуализацию не только геометрической конфигурации трещин, но и областей концентрации внутренних напряжений в точке роста трещины, где пока нет разрыва металла, т. е. в потенциально наиболее опасно напряженных участках.

О технологии обеспечения безопасной эксплуатации сварных крупногабаритных объектов на основе акустической эмиссии (АЭ) было сообщено в докладе А. Я. Недосеки и др. «Технология обеспечения безопасной эксплуатации конструкций на основе акустической эмиссии». В основу технологии положено моделирование АЭ как результата накопления мелких рассеянных повреждений — пор в металле шва.

Опыту разработки автоматизированных установок для ультразвукового контроля сварных соединений труб большого диаметра на Выксунском металлургическом заводе посвящен доклад В. Л. Найды и др. «Автоматизированный ультразвуковой контроль труб и железнодорожных колес при их массовом производстве. Современное состояние и перспективы развития».

Для специалистов по сварке алюминия может быть интересен опыт по обеспечению НК замыкающих сварных швов. Для решения этой задачи А. А. Погорелым и др. в докладе «Опыт совместного применения ультразвукового и вихретокового метода неразрушающего контроля замыкающих сварных швов» было предложено совместно использовать методы ультразвукового и вихретокового контроля, которые обеспечивают НК сварного шва при одностороннем доступе к поверхности.

Известно, что при контактной сварке трубопроводов наиболее возможны два вида дефектов: непровары и оксидные пленки, а также неметаллические включения. В. П. Радько и др. в докладе «Особенности обнаружения дефектов типа окисных плен при ультразвуковом контроле соединений, выполненных контактной стыковой сваркой» предложен метод ультразвукового контроля (УЗК), но не по традиционной технологии, а с применением раздельно совмещенных преобразователей «хордового» типа, в которых акустическая ось лежит в плоскости, проходящей через стенку трубы перпендикулярно вертикальной оси шва. Такая схема акустического контроля позволяет прозвучивать все сечения шва прямым лучом, а направление акустического луча обеспечивает условия, при которых помехи от валика усиления шва практически отсутствуют.

В октябре 2009 г. в Ялте состоялась очередная *17-я Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»*. Большим вступительным докладом конференцию открыл Л. М. Лобанов, рассказавший о работах по НКТД в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин».

Для решения проблемы качества точечной сварки неразрушающими методами контроля сотрудники МГТУ им. Н. Э. Баумана Г. А. Бигуа и др. в докладе «Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой» предложили в первую очередь ультразвуковой контроль (УЗК) как наиболее перспективный с точки зрения оценки качества литого сварного ядра. Для УЗК точечной сварки применяется два метода: эхо- и реверберационный. Эхометод основан на регистрации эхосигналов от дефектов или от противоположной стороны объекта контроля (дна) и позволяет определять толщину литого ядра контактной сварки в направлении прозвучивания. А вот микроструктуру материала и литого ядра можно определить реверберационным методом, так как он основан на анализе времени объемной реверберации (процесса постепенного затухания звука в некотором объеме объекта контроля). А в зоне точечной сварки образуется крупнозернистая структура литого ядра, которая увеличивает затухание ультразвука и как следствие уменьшает количество убывающих донных импульсов, наблюдаемых на экране дефектоскопа. Однако серьезный дефект контактной сварки типа «склейки» не может быть обнаружен УЗК. Такую проблему можно решить с помощью метода акустической эмиссии (АЭ) по отсутствию регистрации сигналов АЭ, возникающих за счет акустического эффекта кристаллизации. Поэтому, анализируя этот параметр АЭ процесса во время контактной сварки, можно следить за размерами литой зоны свариваемых деталей.

Известно, что в процессе длительной эксплуатации парогенераторов в конструкциях возникают зоны концентрации напряжений, в которых процесс коррозии, усталости и ползучести развивается на-

иболее интенсивно. Проблема измерений напряженно-деформированного состояния сварного шва № 111 (приварка коллектора к патрубку парогенератора) методами НК рассмотрена в докладе Л. С. Ожига и др. «Диагностический контроль сварных соединений № 111 парогенераторов ПГВ-1000». В результате проведенных исследований установлено, что на практике хорошо зарекомендовали себя методы магнитного контроля — метод коэрцитиметрии и метод магнитной памяти. По мнению авторов, только комплексный подход к проблеме диагностики и контроля (использование различных методов) позволяет получить полный объем знаний о реальном состоянии металла оборудования и трубопроводов АЭС после длительной эксплуатации и при этом не только констатировать наличие существующих, но и предсказывать участки, где могут образовываться и развиваться несплошности.

Внимательное отношение специалистов-сварщиков к должному уровню НК качества сварных соединений и наплавок металлических конструкций пытались привлечь В. А. Цечаль и др. в своем докладе «О разработке нового стандарта ДСТУ-НБ А.3.1-111:2008 «Настанова з візуального та вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавок металевих конструкцій» к проблеме стандартов в области визуального и измерительного контроля сварных соединений. Поскольку визуальный и измерительный контроль сварных соединений широко распространен и является одним из важнейших методов НК, с которого начинается любая проверка качества сварных швов и обследование металлических конструкций, то появление государственного стандарта ДСТУ-НБ А.3.1-11:2008 стало закономерным и необходимым событием. Этот стандарт устанавливает основные положения визуального контроля, требования к персоналу, осуществляющему контроль, а также требования к средствам его проведения в процессе производства (изготовление, монтаж, реконструкции и т.д.) и эксплуатации (техническое диагностирование, обследование, осмотр, ремонт и т.д.) металлических конструкций различного назначения, которые содержат сварные соединения и наплавки.

Ряд интересных докладов был представлен на *14-й Международной научно-технической конференции «Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий»* в феврале 2009 г. в пос. Славское Львовской обл.

Как правильно настроить чувствительность контроля, по каким параметрам оценивать обнаруженные несплошности, какие из них фиксировать в протоколе, а какие нет, нужно ли измерять протяженность, определять форму, количество и расстояние между дефектами. И самое главное, где найти пороговые значения максимально допустимых дефектов для продукции конкретного вида. Эти вопросы интересны и для специалистов-сварщиков на этапе сдачи готовой продукции. А. Л. Шекеро и А. Алексиевым в докладе «Обзор европейских стандартов с нормами оценки качества по результатам ультразвукового контроля» рассмотрены и проанализированы основные положения европейских стандартов, в частности, EN 1712:1997 «Неразрушающий контроль сварных швов. Ультразвуковой контроль сварных соединений. Уровни приемки», который касается выбора основных методических параметров и критериев оценки качества сварных соединений.

С докладами конференции можно ознакомиться в отделе № 4 ИЭС им. Е. О. Патона, тел. 287-26-66; 271-22-49.

Ю. Н. Посыпайко, Т. В. Королева, инженеры

УДК 621.791:061.2/4

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НАУКА И ТЕХНИКА — ФРОНТУ»

21–23 апреля 2010 г. в Москве в Политехническом музее прошла Международная научно-техническая конференция «Наука и техника — фронту», посвященная 65-летию Победы в Великой Отечественной войне (ВОВ). Ее организаторами выступили Министерство культуры РФ, Российский комитет Международного Совета музеев, Ассоциация научно-технических музеев, а поддержку оказали Международный гуманитарный фонд «Знание» им. акад. К. Ф. Фролова, Комитет общественных связей г. Москвы.

В конференции приняли участие свыше 70 представителей крупных предприятий, отраслевых институтов и университетов, Министерства культуры, сотрудники музеев и архивов.

Открыл конференцию председатель оргкомитета, д-р техн. наук, генеральный директор Политехнического музея Г. Г. Григорян. В своем выступлении он отметил, что поколениям людей, проживавшим и проживающим на нынешней территории СНГ, пришлось пережить за последние почти 100 лет три титанических по своим масштабам потрясения, затронувшие судьбы около 500 млн людей. Это Первая и Вторая мировые войны, а также распад СССР. Пока эти события еще не стали историей, они вы-

зывают боль, сострадание, иногда разъединяют нас по оценке событий, по тому, что пришлось пережить. В этой связи важно глубоко научно осмыслить прошедшие события. Это особенно важно, поскольку нынешнее поколение в значительной мере оторвано от истории. А ведь национальная история — главное, что позволяет воспитывать самосознание у подрастающего поколения.

Данная конференция позволяет привлечь внимание к одному из многомерных измерений ВОВ, а именно к научно-технологическому обеспечению войны. Оно в свою очередь включает также такие аспекты, как высочайший мобилизационный мотив советского народа и его реализацию (перемещение научно-технического персонала и материальной базы в беспрецедентных масштабах, налаживание производства в неприспособленных условиях), что может расцениваться как фантастический подвиг народа и государства; эффективная расстановка ведущих сил на поприще обеспечения фронта (здесь особенно важно рассмотрение вклада ученых академических институтов в создание новых видов оружия); создание необходимых условий для внедрения в жизнь инновационных решений (например, за 2–3 года увеличилась в 3–4 раза производительность труда при производстве танков Т-34); величайший подвиг тружеников тыла, объединивших ученых, производственников, детей-подростков и даже представителей репрессивного контингента.

Этим объясняется важность рассмотрения научно-технического фактора Победы. Следующим шагом, посвященным этой теме, явится выставка «Ратный подвиг науки», открытие которой состоится 12 мая 2010 г. в Политехническом музее (http/polomus.ru).

На пленарном заседании конференции выступили канд. техн. наук, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. отдела научных исследований Политехнического музея Б. И. Козлов с докладом «Роль академии наук в создании научно-технической базы Победы»; д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Института электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев) В. Н. Липодаев с докладом академика НАН Украины и РАН, директора ИЭС Б. Е. Патона «Танковые армады со сварным швом»; зав. научно-методическим отделом Музейного комплекса ОАО «НПК «Уралвагонзавод» О. А. Серебрякова (г. Нижний Тагил) с докладом директора корпорации О. В. Саенко «Истоки Победы: научно-технический комплекс Наркомата танковой промышленности»; действительный член РАЕН Б. С. Лобанов с докладом «Работа ВНИИ-108 в годы Великой Отечественной войны»; академик РАН, главный научный сотрудник ОАО «Авиационный комплекс им. С. В. Ильюшина» Г. В. Новожилов (г. Москва) с докла-

дом «На крыльях илов к Победе»; ведущий инженер ФГУП «Исследовательский центр им. М. В. Келдыша» А. А. Синицын (г. Москва) с докладом «Легендарная Катюша»; канд. техн. наук Генеральный директор ОАО «НПО Гелиймаш» В. Н. Удут (г. Москва) с докладом «Петр Леонидович Капица и 1-й Московский автогенный завод в годы ВОВ»; д-р физ.-мат. наук, заместитель директора Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, директор НИЦ дистанционного зондирования атмосферы Г. Г. Щукин (г. С.-Петербург) с докладом «Метеорология в годы ВОВ»; д-р техн. наук, профессор Летно-исследовательского института им. М. М. Громова А. Д. Миронов (г. Москва) с докладом «Летно-исследовательский институт им. М. М. Громова в годы ВОВ»; д-р техн. наук, профессор, директор Центра истории авиационных двигателей им. акад. Н. Д. Кузнецова Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева В. А. Зрелов (г. Самара) с докладом «Роль промышленных предприятий и научных организаций Куйбышевского авиационного комплекса в Победе над врагом в Великой Отечественной войне»; д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Санкт-Петербургского филиала Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН Б. И. Иванов с докладом «Технические науки в Академии наук в годы войны».

Все пленарные доклады вызвали живой интерес и были выслушаны с большим вниманием.

22 апреля конференция была продолжена параллельной работой двух секций «Научно-технические разработки в годы войны» (14 докладов) и «Деятельность научных центров и промышленных предприятий» (13 докладов).

23 апреля работал круглый стол на тему «Роль научно-технических музеев в сохранении и популяризации истории Великой Отечественной войны (17 выступлений).

В заключение следует отметить хорошую организацию работы конференции, а также поблагодарить ее организаторов за предоставленную возможность ознакомиться с поступлениями новых экспонатов в Политехнический музей за последние пять лет.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791:061.2/4

ТОРЖЕСТВЕННЫЙ МИТИНГ ПО СЛУЧАЮ ЮБИЛЕЯ ПОБЕДЫ В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ

7 мая 2010 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины у легендарного танка Т-34 состоялся торжественный митинг, посвященный 65-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне. Среди собравшихся — участники ВОВ, кадровые научные сотрудники института, руководители и ведущие специалисты, представители молодого поколения.

Митинг открыл и искренне поздравил ветеранов с юбилеем директор института академик Б. Е. Патон. Он отметил значительный вклад в Победу того

немногочисленного, но сплоченного коллектива ИЭС, который в годы войны героически трудился на Урале и отдавал все силы для скорейшего освобождения от фашистского ига.

Затем перед участниками митинга выступили академик НАН Украины И. К. Походня, генерал-майор в отставке, а ныне сотрудник Президиума НАНУ И. М. Кокойко, старейший сотрудник, бывший флюсовар института А. И. Фомин, д-р ист. наук А. К. Корниенко.

В выступлениях отмечалось, что в ИЭС, который был эвакуирован в г. Нижний Тагил, уже в начале 1942 г. были установлены причины возникновения трещин в соединениях броневых сталей, разработаны технологии бездефектной сварки и автоматы для изготовления сложных пространственных конструкций бронекорпусов танков. Удалось достигнуть стабильно высокого качества соединений при скорости сварки, в 8 раз превосходящей скорость, достигнутую лучшими сварщиками-ручниками. Операторами на автоматах могли работать и работали подростки. Только на заводе в Нижнем Тагиле было высвобождено 250 сварщиков. В 1942–1943 гг. было разработано и реализовано 20 проектов установок для сварки танковых корпусов и 8 для сварки авиабомб и боеприпасов, спроектированы поточные линии. Научные сотрудники института выезжали на заводы, работали непосредственно в цехах, обучали сварщиков. В таких трудных условиях коллективу института из трех десятков человек при официальной работе по 12 часов без выходных удалось преодолеть еще множество организационных и технологических проблем. Были разработаны флюсы из местного сырья, в том числе и из доменных шлаков. Впервые в мире было открыто явление саморегулирования дуговых процессов с плавящимся электродом, на основе которого сконструированы упрощенные автоматические сварочные головки с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. К концу 1943 г. работа проводилась на 52 заводах оборонной промышленности, освоивших сварку под флюсом.

За годы войны автоматами сварено 4 млн м шва, сэкономлено 5 млн кВт/ч электроэнергии, трудоемкость изготовления корпуса танка снизилась в 5 раз. К концу войны заводы страны выпускали до 30 тыс. тяжелых и средних танков и самоходных орудий ежегодно. Всего за годы войны в Советском Союзе было выпущено 102857 танков и САУ.

Очень важно, чтобы подрастающее поколение отчетливо представляло себе тот большой вклад Украины, который был внесен в Победу и последующее восстановление послевоенного мира.

Редакция журнала «Автоматическая сварка»

О. Г. КАСАТКИНУ — 75

Исполнилось 75 лет известному ученому в области сварочного материаловедения доктору технических наук, ведущему научному сотруднику Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ Олегу Георгиевичу Касаткину. В 1966 г. О. Г. Касаткин был принят по конкурсу в ИЭС им. Е. О. Патона, где прошел путь от младшего научного сотрудника отдела математических методов исследований физико-химических процессов при сварке до заведующего лабораторией «Статистические методы моделирования и оптимизации сварочных процессов» (с 1982 г.). Основное направление научной деятельности Олега Георгиевича в этот период — свариваемость высокопрочных сталей, изучение зависимостей состав–структура–свойства сварных соединений, разработка соответствующих математических моделей. В 1990 г. он защитил докторскую диссертацию на тему «Математическое исследование зависимостей состав — свойства сварных соединений и создание расчетно-экспериментальной системы для оптимизации основных технологических факторов сварки низколегированных конструкционных сталей». В последнее время О. Г. Касаткин занимается вопросами, связанными с проблемами атомной энергетики Украины. В 2004 г. он принимал активное участие в разработке и реализации программы контроля свойств металла корпуса ядерного реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 3 Ровенской АЭС по образцам-свидетелям. В настоящее время работает по проблеме обоснования возможности продления ресурса энергоблоков АЭС за проектный срок.

О. Г. Касаткин — автор более 230 опубликованных работ, в том числе двух монографий, подготовил доктора наук в области сварки высокотемпературного оборудования ТЭС. Он является ученым секретарем научно-координационного и экспертного совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин при Президиуме НАН Украины, входит в состав редколлегии академического журнала «Металознавство та обробка металів».

Сердечно поздравляем Олега Георгиевича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, творческих успехов и благополучия.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка»

ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США
	*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.					

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с **200 г. по 200 г. включительно**

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 550$

Третья страница обложки (200×290мм) — 500$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570$

Полноцветная (200×290мм) — 340$

Полноцветная (200×142мм) — 170$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300$

Полноцветная (165×120мм) — 170$

Полноцветная (82×120мм) — 80$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы (страница А4, 170×240мм) — 170$
- При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

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

Все файлы в формате IBM PC

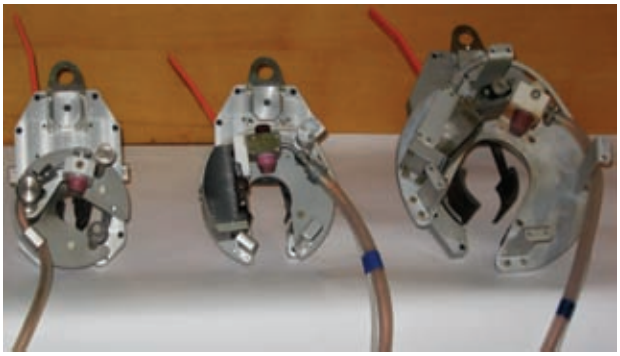
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 06.05.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,67. Уч.-изд. л. 10,22. Цена договорная.
Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

© Автоматическая сварка, 2010

АВТОМАТЫ АДЦ 625, АДЦ 626 и АДЦ 627 ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Разработанные в НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона сварочные комплексы АДЦ 627 У3.1, АДЦ 625 У3.1 и АДЦ 626 У3.1 предназначены для автоматической орбитальной сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертных газов (преимущественно аргона) неповоротных стыков трубопроводов диаметром от 8 до 76 мм с толщиной стенки до 4 мм из сталей перлитного, аустенитного классов и высоколегированных сплавов в условиях монтажа и ремонта объектов энергетики, в том числе АЭС, ТЭС, а также других отраслей промышленности.



КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМАТОВ

Параметр	АДЦ 627	АДЦ 625	АДЦ 626
Диаметр свариваемых труб, мм	8...24	18...42	45...76
Наименьшее межтрубное расстояние, мм	60	65	80
Пределы регулирования скорости сварки, м/ч	1...20		
Диаметр вольфрамового электрода (марок ВЛ, ВИ или ВТ), мм	1,6	2,0	3,0
Наибольшее радиальное перемещение горелки, мм	15	16	20
Наибольшее перемещение горелки поперек стыка, мм	±1,0	±5,0	
Охлаждение горелки	Газовое		
Пределы регулирования сварочного тока, А	8...250		
Пределы регулирования напряжения дуги, В	9...18		
Точность поддержания сварочного тока, %, не более	±2		
Точность поддержания напряжения дуги, В, не более	±0,20	±0,15	
Наибольшая скорость перемещения горелки относительно механизма АРНД, мм/с	—	10,0	
Расположение электропривода вращения планшайбы	Параллельно оси трубы		
Масса головки сварочной, кг, не более	3,0	3,5	4,9
Потребляемая электрическая мощность, кВ·А, не более	6,0		

В состав каждого из сварочных комплексов входят:

- многофункциональный источник питания для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (сварки TIG);
- блок контроллера (система управления);
- пульт управления выносной;
- одна из сварочных головок (АДЦ 627, АДЦ 625 или АДЦ 626);
- коллектор;
- комплект соединительных кабелей, проводов и шлангов.

Источник питания повышенной надежности обеспечивает:

- формирование необходимых для процесса сварки TIG крутопадающих («штыковых») внешних вольт-амперных характеристик и аналогичные сварочным инверторам высокие динамические свойства;
- предустанов значений сварочного тока и временных параметров составляющих цикла сварки по сварочному току и подаче инертного газа (длительностей интервалов времени «газ до сварки», «плавное нарастание сварочного тока», «прогрев», «плавный спад сварочного тока», «газ после сварки»);
- бесконтактное возбуждение сварочной дуги высоковольтным пробоем дугового промежутка;
- стабилизацию заданных значений сварочного тока и временных параметров цикла сварки при воздействии внешних возмущений (колебаний напряжения питающей сети, изменения длины дугового промежутка и т. п.);
- реализацию режимов автоматической шагоимпульсной сварки и сварки модулированным током, а также циклов сварки в режимах 2Т, 4Т и в специальном режиме 4Т-I;
- возможность дистанционного управления.

* Статья на правах рекламы.

Блок контроллера (система управления):

✧ вырабатывает сигналы управления включением, выключением и длительностью функционирования составных частей и механизмов сварочного комплекта в режимах НАЛАДКА и СВАРКА согласно запрограммированным алгоритмам осуществления сварки TIG неповоротных стыков трубопроводов;

✧ обеспечивает регулирование и поддержание в процессе сварки стабильного значения предварительно установленной скорости вращения планшайбы головки сварочной (скорости сварки);

✧ осуществляет управление функционированием автоматического регулятора напряжения дуги сварочных головок, обеспечивающего поддержание в процессе сварки стабильной длины дугового промежутка за счет автоматической компенсации ее отклонений от заданного значения путем коррекции положения электрода головки сварочной относительно свариваемого изделия в соответствии с отклонениями напряжения сварочной дуги.

Пульт управления выносной содержит органы управления, сигнализации и индикации, обеспечивающие выбор или задание:

✧ рода работы сварочного комплекса (наладка/сварка);

✧ вида режима управления (автоматическое/ручное);

✧ вида режима сварки (непрерывный/импульсный);

✧ направления вращения планшайбы головки сварочной (вперед/назад);

✧ направления для режима наладка радиального перемещения электрода головки сварочной (электрод вверх/вниз);

✧ предварительного контроля расхода инертного газа (контроль газа);

✧ включения/выключения цикла сварки (пуск/стоп);

✧ значения напряжения дуги $U_{св}$;

✧ значения скорости сварки $v_{св}$;

✧ подрегулировки в процессе сварки значений сварочного тока $\Delta I_{св}$;

✧ цифровую индикацию задаваемых и текущих значений сварочного тока $I_{св}$, напряжения дуги (Uсв), скорости сварки $v_{св}$ и расхода инертного газа (ГАЗ).

Каждая сварочная головка включает:

✧ корпус облегченной конструкции;

✧ механизм зажатия сварочной головки на трубе;

✧ вращающуюся вокруг оси трубы планшайбу;

✧ механизм вращения планшайбы;

✧ сварочную горелку;

✧ исполнительный механизм вертикального перемещения горелки сварочной системы автоматического регулирования напряжения дуги в сварочных головках АДЦ 625 и АДЦ 626 и системы механического копирования в горелке сварочной АДЦ 627.

Конструкция головок сварочных обеспечивает:

✧ быструю установку и закрепление головки на свариваемом трубопроводе и ее снятие одним сварщиком-оператором;

✧ надежное закрепление корпуса головки на трубопроводе, что исключает ее смещение вследствие толчков или вибрации;

✧ точность установки головки на трубопроводе (непараллельность оси сварочной горелки по отношению к оси трубопровода не превышает 3^{o});

✧ реверс направления вращения планшайбы (по команде системы управления сварочного комплекса);

✧ быструю замену изношенного вольфрамового электрода сварочной горелки;

✧ ламинарное истечение инертного газа и надежную защиту зоны сварки;

✧ возможность поперечного корректирования положения электрода сварочной горелки относительно стыка трубопровода.

Подключение любой из сварочных головок к источнику питания, блоку контроллера, пульту управления и системе газоснабжения осуществляется с помощью коллектора.

Отличительной особенностью данных сварочных комплексов является их способность обеспечивать качественный процесс автоматической орбитальной сварки TIG неповоротных стыков трубопроводов при длине сварочного контура до 60 м.

Все сварочные комплексы изготавливаются под заказ. Срок выполнения заказа — до 16 недель. Возможна поставка с различными вариантами комплектации, например, с двумя или тремя сварочными головками (по выбору заказчика).

За более подробной информацией можете обратиться в НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона, ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина. Контактные телефоны +38 (044) 287-10-66, +38 (044) 289-16-43.

Fronius

ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

TRANS STEEL 3500/5000

Компания «Фрониус» выпустила новые инверторные цифровые системы **Trans Steel 3500/5000** для MIG/ MAG и MMA сварки стальных конструкций с лучшими сварочными характеристиками Steel Transfer Technology. Системы исполнены на максимальные токи 350 и 500 А. Новая разработка инженеров компании позволяет выполнять процесс сварки стали в суровых и экстремальных условиях, с идеальным качеством и 100%-й эффективностью системы.

Впервые система **Trans Steel** была продемонстрирована на выставке «Сварка + резка» в Эссене (Германия) в сентябре 2009 г. В Украине ее презентация была проведена ООО «Фрониус Украина» 29 октября 2009 г. на семинаре «Полная готовность к отличной сварке», на котором присутствовали представители 44 ведущих предприятий страны. Более массовое знакомство с системами произошло на выставке «VIII Промышленный форум» в Киеве в ноябре 2009 г.

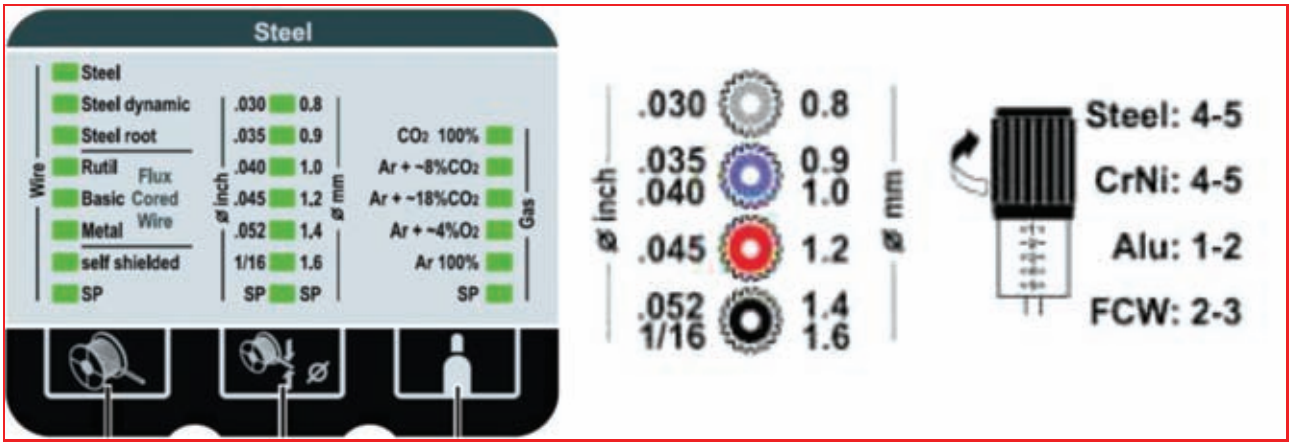
Системы предназначены для сварки сталей в машино-, вагоно-, судостроении, производстве аппаратуры для химической и пищевой промышленности. Кроме того, их можно использовать в тяжелых условиях на строительных площадках при монтажных и ремонтных работах. Системы обеспечивают возможность сварки с использованием алюминиевой и нержавеющей проволоки, а также порошковой проволоки. Благодаря новому дизайну систем все элементы подключения и функциональные клавиши защищены от повреждений.

Одним из преимуществ системы **Trans Steel** является новый механизм подачи проволоки **VR 5000**, на котором находится абсолютно все управление процессом сварки. Это дает возможность корректировать параметры сварки непосредственно с места работы. Новый механизм подачи проволоки характеризуется облегченным исполнением (12,5 кг), улучшенным и надежным дизайном, имеет наклонную панель управления (оптимальный обзор с любого положения), новый разъем подключения горелки **FSC** (без внешних элементов управления), усовершенствованный 4-роликовый механизм подачи, функцию автоматической заправки проволоки **Comfort Wire**, смотровое окно для контроля количества проволоки, две панели управления **Manual** (ручная настройка) и **Synergic** (настройка с программой «синергетик»).

Механизм подачи проволоки может находиться как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях и переноситься за рукоятку или тянуться за шлангпакет горелки.

Системы комплектуются совершенно новой сварочной горелкой с двухкомпонентным материалом рукоятки (пластик с резиновыми вставками), что обеспечивает прочность, надежность и удобство ее использования.

* Статья на правах рекламы.



Для простоты в использовании была создана цветовая маркировка роликов под разные диаметры проволоки (например, ролики с красной маркировкой соответствуют проволоке диаметром 1,2 и так далее). Под крышкой механизма подачи расположен собственно 4-роликовый механизм подачи проволоки, панель настройки специальных режимов сварки, выбор защитного газа и диаметра проволоки, вспомогательные таблицы для регулировки степени прижима проволоки из разных материалов и расшифровка цветовой маркировки роликов.

Особенностью и преимуществом систем **Trans Steel** являются технологическое ноу-хау в области сварки стали — специальные программы: **Steel**, **Steel Root**, **Steel Dynamic**, которые позволяют легко настроить аппарат для выполнения любых задач и без затруднений выполнить сварку.

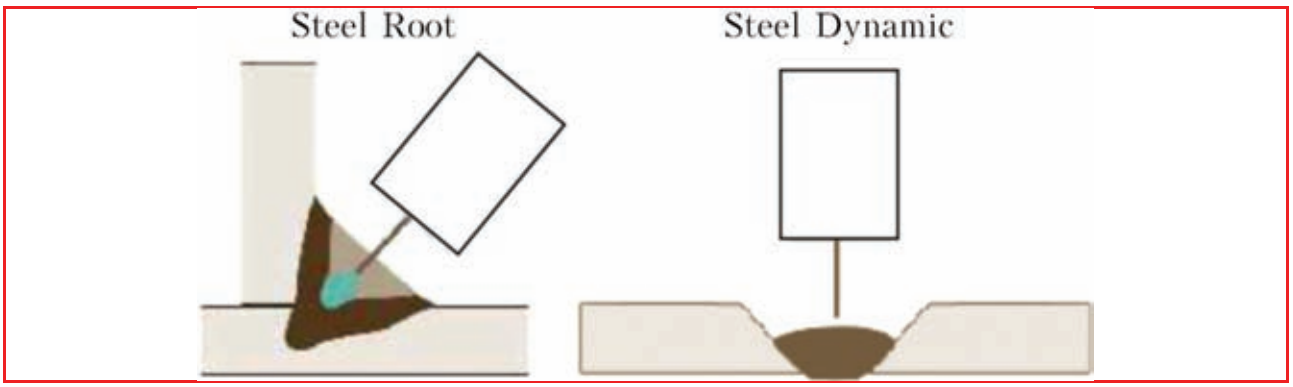
Краткое описание программ:

Steel — стандартная сварка стали с технологией Steel Transfer Technology

Steel Root — сварка корневого шва с короткой, мягкой и стабильной дугой с капельным переносом металла

Steel Dynamic — сварка динамической, жесткой и сосредоточенной дугой со струйным переносом металла — для глубокого проплавлення.

Примеры использования программ:



Системы TransSteel в первую очередь экономят труд человека и повышают качество работ. Как и прежде, профессия сварщика имеет важное значение для промышленности страны. Благодаря отличному оборудованию компании «Fronius» эта профессия может стать настоящей страстью!

Р. А.Кулиш, инженер по сварке

Fronius

ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

ООО «Фрониус Украина» 07455, Киевская обл.,
Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24
Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com; www.fronius.ua

ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины»

Производство материалов для дуговой сварки, наплавки и резки:

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМЛ-1У, ТМЛ-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100, Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НпХ25П4Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавленые — по ГОСТ 9087-81, а также АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина, г. Киев-112, ул. О. Телиги, 2
Тел.: (044) 456-64-95, 456-63-69
Факс: (044) 456-64-95, 456-63-08

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины

предприятие «Триада-Сварка» г. Запорожье

- Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- Пуско-наладочные работы
- Широкий выбор сварочного оборудования

ABICOR BINZEL, Fronius, SELMA

тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623, (061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки, напыления и металлизации

Электроды наплавочные, специального назначения, для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и лигатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1, г. Днепропетровск, 49051, Украина
Тел. (380562) 35-50-25
Тел./факс (38056) 37-41-912
E-mail sp@speissplav.dp.ua

НАВКО-ТЕХ

Automatic machines and robots for arc welding

Автоматические установки и роботы для дуговой сварки и наплавки

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА

Украина, Киев
Тел.: +38 044 456-40-20
Факс: +38 044 456-83-53

http://www.navko-teh.kiev.ua E-mail: info@navko-teh.kiev.ua

ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки:

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.

95000 , г. Симферополь, Украина,
ул. Генерала Васильева, 32А
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55
Факс: +38 (0652) 58-30-53
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН 348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.

ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ДОНМЕТ

Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

Все для газовой резки и сварки.
Електросварка.

100% гарантия от производителя

GYS ДОНМЕТ

ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ

КИЕВ • ДОНЕЦК
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

ЗАПОРОЖЬЕ
Тел./факс (061) 224-11-56

ЛУГАНСК • ОДЕССА
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65

Plasma Master

Научно-производственная фирма
ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.

Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмотроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев
ул. Кржижановского, 3
тел./факс: +38 044 537-31-44
office@plasma-master.com.ua
www.plasma-master.com.ua

ОАО "ЗОНТ"

ТМ АВТОГЕНМАШ

ПРОИЗВОДСТВО:
МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";
МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";
МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";
МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";
МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;
ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";
НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА
ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.

КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И МОДЕРНИЗАЦИЯ
МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.

ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА <<АВТОГЕНМАШ>>)
65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.
Т. + 38 (048) 717-00-50, 715-69-40,
Ф. +38 (048) 715-69-50
E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
WWW.ZONT.COM.UA
WWW.AUTOGENMASH.COM

Днепрометиз
Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО "Днепрометиз" - крупнейшее предприятие Украины в своей отрасли, входит в международную группу производителей "Северсталь-метиз"

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда", 20

ПРОВОЛОКА:
сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С
Вр-1 для армирования ЖБК
общего назначения без покрытия
термообработанная черная
оцинкованная
колючая

СЕТКИ:
плетеные
сварные
рифленые

ЭЛЕКТРОДЫ:
МР-3
АНО-4
АНО-6
АНО-21
УОНИ

ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ

www.dneprometiz.com.ua

Специальные Научные Разработки
Научно-производственная фирма
СНР

ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

Магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М

- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений

✔ без зачистки
✔ через защитное покрытие до 6 мм
✔ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06
| www.snr-ndt.com | e-mail: mail@snr-ndt.com
в Москве – ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-91, mail@mdiag.ru

Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки порошковые для сварки и наплавки, проволоки сплошные, электроды, флюс, наплавочные установки

Welding Alloys Group

HYUNDAI WELDING

НПФ ЭЛНА

ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине

ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua