



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)
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, 200 8277
Факс: (38044) 528 3484, 200 8277
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

Кучук-Яценко С. И., Кирьян В. И., Казымов Б. И., Хоменко В. И.
Оценка деформируемости соединений трубных сталей, выполняе-
мых автоматической контактной стыковой сваркой непрерывным
оплавлением 3

Андреев В. В., Ефременко Е. М., Москович Г. Н. Имитационное
моделирование электрических схем как этап разработки специали-
зированных источников питания с управляемой формой перемен-
ного тока 9

Дядин В. П., Юрко Л. Я. Экспериментальная оценка температурного
сдвига δ_{1c} -кривой и хрупковязкого перехода конструкционных сталей
и сварных соединений по результатам стандартных испытаний 13

Моравецкий С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке
(Обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость
шлаковой корки 22

Могила П., Главати И., Томчик П. Причины вторичного упрочнения
в Cr-Mo-V шве при длительном тепловом воздействии 27

*Тюрин Ю. Н., Кусков Ю. М., Маркашова Л. И., Черняк Я. П., Берд-
никова Е. Н., Попко В. И., Кушнарёва О. С., Алексеенко Т. А.*
Влияние низкочастотных резонансных колебаний на структуру и
трещиностойкость наплавленного высокохромистого чугуна 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Кайтель С., Нойберт Я. Гибридная лазерно-дуговая сварка для
соединения труб 36

Шлепаков В. Н., Котельчук А. С. Опыт производства и применения
бесшовной порошковой проволоки для электродуговой сварки 42

Кулик В. М., Савицкий М. М., Елагин В. П., Демченко Э. Л.
Возможности применения высокопрочных низколегированных
трубных сталей для изготовления сосудов высокого давления 49

Гулаков С. В., Бурлака В. В. Автоматизированный привод
управления траекторией перемещения электрода для установок
дуговой наплавки 55

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Левченко О. Г., Савицкий В. В., Лукьяненко А. О. Информационно-
расчетная система гигиенических характеристик сварочных
электродов 59

Диссертации на соискание ученой степени 61

ХРОНИКА

Троицкому В. А. — 75 63

К 100-летию М. Н. Сидоренко 64

ИНФОРМАЦИЯ 65

Контактная стыковая сварка стержневой арматуры при
реконструкции НСК «Олимпийский» (г. Киев) 67

Аннотации работ по инновационным проектам НАН Украины 12, 21, 26, 48

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)
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, 200 82 77
Fax: (38044) 528 04 86, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina
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

- Kuchuk-Yatsenko S. I., Kiryan V. I., Kazymov B. I., Khomenko V. I.* Evaluation of deformability of pipe steel joints made by automatic continuous flash-butt welding 3
- Andreev V. V., Efremenko E. M., Moskovich G. N.* Simulation modeling of electric diagrams as a stage of design of specialized power sources with a controllable shape of alternating current 9
- Dyadin V. P., Yurko L. Ya.* Experimental evaluation of temperature shifting of δ_{1C} -curve and brittle-tough transition of welded joints of structural steels from results of standard tests 13
- Moravetsky S. I.* Separability of slag crust in arc welding (Review). P.2. Nature of effect of main factors on slag crust removal 22
- Mohila P., Hlavaty I., Tomcik P.* Cause of secondary hardening in Cr–Mo–V weld during long-term heat exposure 27
- Tyurin Yu. N., Kuskov Yu. M., Markashova L. I., Chernyak Ya. P., Berdnikova E. N., Popko V. I., Kushnareva O. S., Alekseenko T. A.* Effect of low-frequency resonance oscillations on structure and crack resistance of deposited high-chromium cast iron 31

INDUSTRIAL

- Keitel S., Neubert J.* Hybrid laser-arc welding for pipe joining 36
- Shlepakov V. N., Kotelchuk A. S.* Experience of production and application of seamless flux-cored wire for electric arc welding 42
- Kulik V. M., Savitsky M. M., Elagin V. P., Demchenko E. L.* Feasibility of application of high-strength low-alloy steels for manufacture of high-pressure vessels 49
- Gulakov S. V., Burlaka V. V.* Automated drive for control of electrode movement trajectory for arc surfacing equipment 55

BRIEF INFORMATION

- Levchenko O. G., Savitsky V. V., Lukyanenko A. O.* Information-calculation system of hygienic characteristics of welding electrodes 59
- Thesis for scientific degree 61

NEWS

- Troitsky V. A. is 75 63
- Towards the 100th anniversary of M. N. Sidorenko 64

INFORMATION

- Flash-butt welding of rod reinforcement in reconstruction of NSC «Olimpiysky» (Kiev) 67
- Abstracts of works on innovation projects of the NAS of Ukraine 12, 21, 26, 48



ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ НЕПРЕРЫВНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**,
Б. И. КАЗЫМОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. ХОМЕНКО, канд. техн. наук (ЗАО «Псковэлектросвар», РФ)

Проанализированы особенности образования при контактной стыковой сварке оплавлением высококачественных сварных соединений труб. Рассмотрены факторы, влияющие на результаты ударных испытаний стандартных образцов. Проведены исследования вязких свойств металла в зоне сварки с применением различных методов ударных испытаний. Показано, что металл сварного соединения, выполненного на оптимальном режиме, в состоянии после сварки отличается достаточно высоким сопротивлением ударным нагрузкам. Определены условия выполнения контактной стыковой сварки оплавлением и контроля соединений, гарантирующие высокую эксплуатационную надежность трубопроводов.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, трубопроводы, качество соединений, методы ударных испытаний, зона соединения, ударная вязкость, эксплуатационная надежность

При сооружении трубопроводных систем одной из важных задач является обеспечение их эксплуатационной надежности. Она решается путем регламентации целого ряда технических и технологических требований, относящихся как к выполнению сварки, так и к свойствам монтажных (кольцевых) стыков. Механические свойства последних отражают значения прочности и пластичности и должны соответствовать требованиям нормативных документов [1, 2]. Кроме того, для предупреждения разрушений при эксплуатации стыков от наиболее характерных дефектов, свойственных применяемому способу сварки, регламентируются требования и к значению ударной вязкости металла соединения, отражающей энергию, затрачиваемую на разрушение стандартного образца.

В последние десятилетия доминирующим стал метод ударных испытаний образцов с острым механическим надрезом (KCV) глубиной $h = 2$ мм с радиусом у дна $r = 0,25$ мм, что было обусловлено высокой вероятностью образования в сварных швах острых концентраторов напряжений, включая трещиноподобные. Сегодня такая методика испытаний и установленные значения ударной вязкости распространяются на все сварные соединения, независимо от способа их получения. Так, в соответствии с требованиями [1] среднее значение ударной вязкости металла сварных соединений труб категории прочности

X52...X70 при температуре испытаний -20 °C должно быть не менее 34,4, а минимальное — 29,4 Дж/см². Эти значения KCV определены с учетом неизбежных и допускаемых дефектов для соединений, выполняемых электродуговыми способами сварки. Среди них наружные трещиноподобные дефекты (одно- и двусторонние непровары — несплавления) глубиной до 1 мм и длиной до 30 мм, вогнутость корня шва (утяжины глубиной до 2 мм и длиной до 1/6 периметра сварного стыка), а также внутренние непровары как межслойные, так и по контуру кромок. Кроме того, при электродуговой сварке велика вероятность появления различного рода трещин, которые в сварных соединениях не допускаются, однако их выявляемость промышленными методами неразрушающего контроля в ряде случаев вызывает определенные трудности.

Перенос методики испытаний и приведенных выше нормативных требований KCV на сварные соединения, выполняемые другими способами сварки, далеко не всегда оправдан. В случае отсутствия в шве отмеченных выше дефектов обеспечение для всех зон соединения значений KCV на уровне 34,4 Дж/см² следует признать нецелесообразным, поскольку такие требования усложняют строительство трубопроводов и ведут к перерасходу материальных средств. Прогрессивным в этом отношении является стандарт API-1104 [2]. В нем не нормируются показатели ударной вязкости, они предъявляются заказчиком в виде специальных требований, которые устанавливаются с учетом конкретных условий строительства и эксплуатации трубопровода. Такой подход направ-



лен на совместное решение двух главных задач: снижение вероятности выхода из строя трубопроводов в процессе эксплуатации с присущими используемому процессу сварки наиболее вероятными дефектами в кольцевых стыках и минимизация затрат на строительство.

Многолетняя практика эксплуатации сварных трубопроводов различных диаметров, в том числе мощных газо- и нефтепроводов диаметром 1420 мм, показывает высокую надежность кольцевых швов, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением (КСО). Механические свойства этих соединений отвечают всем требованиям нормативных документов, в соответствии с которыми производят крупномасштабное строительство магистральных и промышленных трубопроводов, за исключением отдельных случаев, когда предъявляются особые требования к значению ударной вязкости (в основном при сварке трубопроводов большого диаметра, работающих при отрицательных температурах).

По сравнению с электродуговой сваркой плавлением КСО имеет принципиальные отличия в формировании соединений, которые нуждаются во всестороннем анализе, и учете при обосновании метода оценки соответствия назначению сварных стыков труб, выполненных КСО.

КСО является одним из способов сварки давлением, при котором в зоне соединения (сварном шве) нет расплавленного металла, что исключает

все предпосылки образования таких опасных дефектов, как трещины. При выполнении сварки на оптимальном режиме в зоне соединения (ЗС) отсутствуют и другие дефекты, которые могли бы отрицательно повлиять на их работоспособность. Такой режим сварки определяется путем статистической обработки данных механических испытаний, получаемых в процессе исследования свариваемости каждого типоразмера труб, при условии, что в соединениях полностью отсутствуют недопустимые дефекты сварки. При этом механические свойства должны соответствовать требованиям нормативных документов, предъявляемых к сварным соединениям труб. Оценка качества сварки проводится путем принудительного разрушения сварных стыков по ЗС [3]. Из допустимых дефектов при КСО могут быть только локальные скопления неметаллических включений на отдельных участках ЗС с максимальной площадью 20...30 мм² [4, 5], но поскольку они не влияют на статическую прочность соединений [6], их не следует считать дефектами. С учетом структурного состояния такие неметаллические включения следует отнести к одному из видов структурной неоднородности, наличие которой допускается в металле труб. В некоторых работах такие участки ЗС называют «матовыми пятнами» [7, 8]. Выполнение заданных параметров оптимального режима сварки при КСО обеспечивается компьютеризированной системой управления и контроля без вмешательства сварщика-оператора. Это является определяющим в обеспечении высокой эксплуатационной надежности более 70 тыс. км различных трубопроводов, в том числе более 10 тыс. км трубопроводов диаметром 1420 мм, сваренных КСО [9, 10], которые безаварийно работают свыше 30 лет в различных природных условиях, включая заполярные районы Западной Сибири (рис. 1). Среднее значение ударной вязкости этих соединений, определяемое при испытаниях стандартных образцов с острым механическим надрезом, вершина которого располагается по центру ЗС, составляет 30...40 Дж/см² при интервале рассеяния значений KCV в пределах 14,3...56,3 Дж/см² (температура испытаний 20 °С). Такие значения ударной вязкости металла ЗС в значительной мере обусловлены механической неоднородностью, которая образуется в результате различной степени упрочнения металла в зоне сварки. В соответствии с градиентом температуры в зоне сварки труб (в обе стороны от ЗС) изменяется значение пластической деформации на завершающем этапе сварки — осадке. В результате металл соединения в его поперечном сечении существенно отличается по твердости, а следовательно, и механическим свойствам ($\sigma_{0,2}$, σ_B). Наименьшее значение твердости имеет ЗС. Твердость близлежащих к ней участков зоны свар-

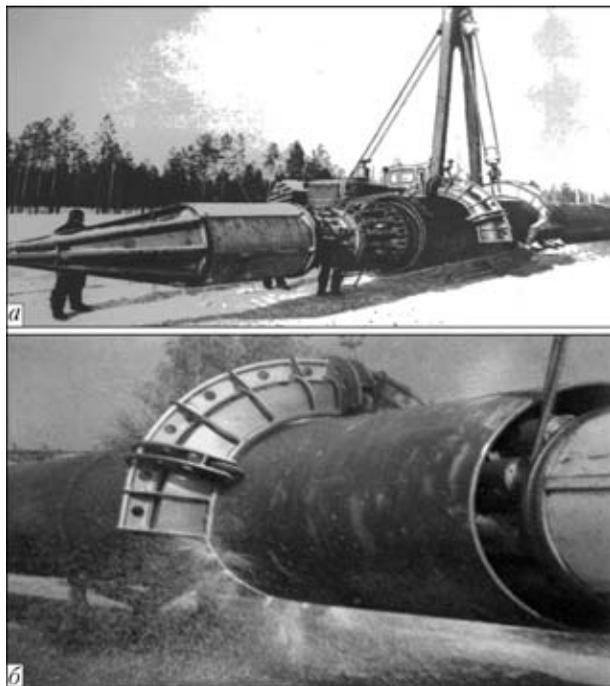


Рис. 1. Сварочный комплекс «Север-1» на трассе строительства трубопровода диаметром 1420 мм в Западной Сибири: а — положение сварочной машины в трубопроводе перед подачей очередной привариваемой трубы; б — выполнение сварки



ки выше, чем у металла труб. При сварке труб современного производства из низкоуглеродистых малолегированных сталей ширина участка с ЗС в зависимости от режима сварки может быть в пределах 0,5...5 мм. Разница в твердости, а следовательно, прочности, этого участка по сравнению с близлежащими участками зоны термомеханического упрочнения (ЗТМУ) может достигать 30 %, а при сварке труб из углеродистых сталей может быть выше. Протяженность отдельных участков зоны сварки зависит от исходных свойств металла, обусловленных технологией его изготовления, и режима сварки.

Как показали испытания стандартных образцов на статическое растяжение и изгиб, а также крупномасштабных образцов и сегментов труб, механическая неоднородность не отражается в целом отрицательно на прочности и пластичности сварных соединений [6, 11]. В этом случае узкий участок ЗС с пониженными механическими свойствами пластически деформируется за счет контактного упрочнения совместно с близлежащими участками ЗТМУ. В отличие от этого при определении ударной вязкости по стандартной методике (*KCV*) за счет высоких значений концентрации ($\alpha_{\sigma} = 3,45$) и градиента напряжений развитие пластических деформаций в процессе разрушения локализуется в пределах узкого участка металла ЗС, расположенного между участками ЗТМУ с повышенными прочностными свойствами. В результате в связи с малым объемом металла, участвующего в процессе пластического деформирования при ударе, энергозатраты на разрушение образца существенно снижаются по сравнению с однородным материалом [4, 5]. Об этом свидетельствует показанная на рис. 2, *а* поверхность излома такого образца без заметных боковых утяжек и низком значении ударной вязкости.

В то же время характер разрушения ударных образцов соединений КСО без искусственного механического концентратора в ЗС, но с характерными для КСО допустимыми дефектами принципиально отличается от описанного выше.

Изломы образцов с такими дефектами, расположенными у их поверхности, имели вид трапеции за счет значительных утяжек боковых граней (рис. 2, *б*), что существенно увеличивало затраты энергии на разрушение, которая согласно работе [5] обозначается символом *KD*. Результаты испытаний ударных образцов стандартного размера (10×10×55 мм) без надрезов со структурной неоднородностью различных размеров в ЗС по параметру *KD* оказались следующими: при 4,4×2,5 мм — 247,2 Дж; 4,0×3,5 мм — 261,6 Дж; 4,7×2,0 мм — 161,2 Дж, где первое значение соответствует линейному размеру дефекта на поверх-

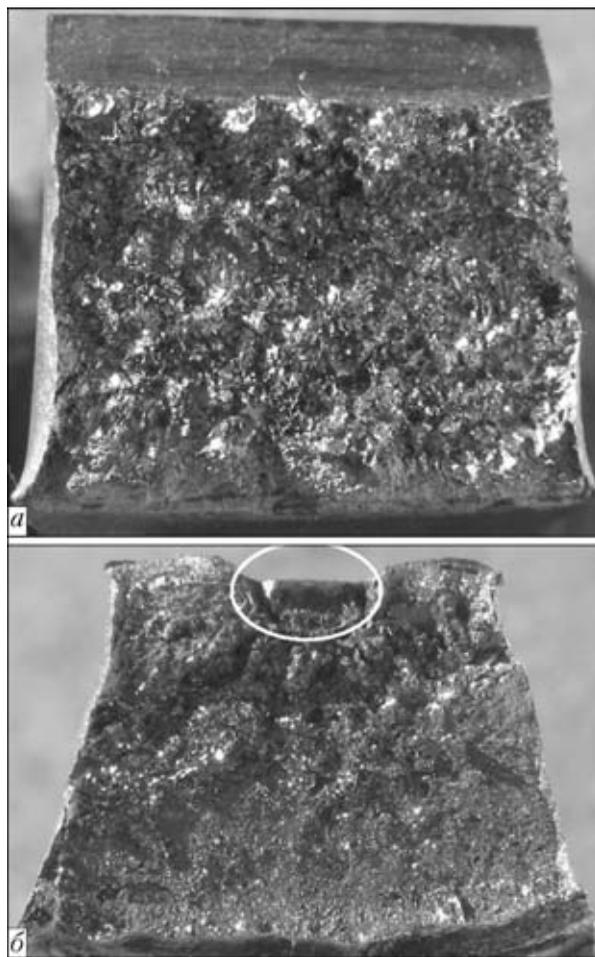


Рис. 2. Поверхности изломов ударных образцов сварных соединений после их испытаний в состоянии после сварки со стандартным механическим надрезом, $KCV = 32 \text{ Дж/см}^2$ (*а*) и без искусственного надреза со структурной неоднородностью (обведено овалом), $KD = 161 \text{ Дж}$ (*б*)

ности ударного образца, а второе — то же, но вглубь образца.

Участки структурной неоднородности в ЗС, лежащие на некотором расстоянии от поверхности образца, практически не сказываются на результатах испытаний при ударном нагружении. Такие образцы не разрушались.

Таким образом, ударные испытания стандартных образцов с острым надрезом по ЗС не воспроизводят картину деформирования и разрушения сварного соединения с допустимыми дефектами, возможными при КСО.

Значения энергии разрушения для образцов с допустимыми дефектами (без искусственного надреза) значительно выше, чем у образцов из качественных соединений со стандартным надрезом в результате вовлечения в пластическое деформирование близлежащих к ЗС участков ЗТМУ, роль которого в процессе разрушения является определяющей. Это свидетельствует о том, что значения ударной вязкости сварных соединений КСО с острым надрезом по ЗС во многом определяются не свойствами металла соединения, а

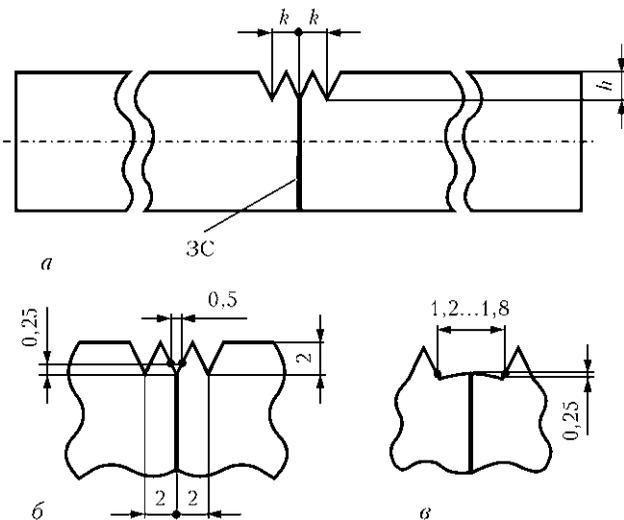


Рис. 3. Схема ударного образца *KCV*: *a* — расположение надрезов; *б* — участок образца с надрезами перед испытанием; *в* — центральный надрез после испытания

создаваемым в нем напряженным состоянием. Таким образом, значения ударной вязкости, получаемые на образцах со стандартным надрезом по ЗС, неадекватно отражают сопротивление разрушению сварного соединения с допустимыми дефектами КСО, следовательно, не могут служить надежным показателем его соответствия назначению.

Исходя из приведенного выше, можно дать однозначно утвердительный ответ на один из главных вопросов: действительно ли полученные значения ударной вязкости *KCV* металла сварных стыков, выполненных КСО, в состоянии после сварки достаточны для обеспечения надежной работоспособности трубопроводов в условиях эксплуатации. Здесь следует также учитывать, что показатели *KCV* коррелируют с характеристиками механики разрушения (K_{1c} , δ_c). Их требуемый уровень для предупреждения разрушений сварных соединений напрямую связывают с типом и размерами наиболее вероятных дефектов, свойственных принятому способу сварки, включая трещиноподобные, максимальные размеры которых обуславливаются разрешающей способностью используемых методов контроля. Следовательно, отсутствие опасных дефектов в металле соединений, выполненных КСО, гарантирует их неразрушимость при более низких показателях ударной вязкости по сравнению со способами сварки, когда в зоне сварки образуется литой металл. Это подтверждается многолетней промышленной эксплуатацией сварных трубопроводов, выполненных КСО.

Принимая во внимание известный факт, что «хрупкость не является свойством конструкционного материала и определяется не только его структурным состоянием, но и существенным влиянием конструктивно-технологических факторов ...» [12],

при оценке ударной вязкости соединений, выполненных КСО, важно создать такое напряженно-деформированное состояние в испытуемом образце, чтобы характер его деформирования и разрушения соответствовал образцам с допустимыми дефектами. При этом главным условием испытания является обеспечение совместного пластического деформирования металла ЗС и ЗТМУ. Такая задача может быть решена путем уменьшения глубины механического надреза вплоть до нуля (образцы без искусственного концентратора напряжения), изменения их количества и места расположения в сварном соединении.

В литературе есть пример локализации пластического деформирования и разрушения в заданном узком объеме испытуемого ударного образца путем нанесения двух дополнительных надрезов в плоскости расположения основного на прилегающих к нему боковых гранях. По форме и размеру дополнительные надрезы аналогичны основному [13].

В работе [14], отмечая практическую бездефектность стыков, выполненных КСО, для оценки их ударной вязкости предложено в стандартных образцах *KCV* снизить концентрацию напряжений за счет уменьшения глубины надреза. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона испытания при температуре 20 и -20 °С соединений, полученных КСО, труб большого диаметра из сталей различного класса прочности, при различных абсолютных значениях глубины надреза h с радиусом $r = 0,25$ мм в образцах стандартного размера, подтвердили перспективность такого подхода. С уменьшением глубины механического надреза до $h = 1$ мм показатели ударной вязкости повышаются более, чем в 2 раза по сравнению с надрезом $h = 2$ мм. Рост показателей происходит в результате увеличения объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию.

Для определения уровня вязких свойств металла сварных соединений, выполненных КСО, необходимо в стандартном образце исключить стеснение ЗС прилегающими к ней большими объемами более прочного металла ЗТМУ. С этой целью на участках ЗТМУ с повышенной твердостью наносили дополнительные, параллельно расположенные надрезу по ЗС «выравнивающие» канавки с геометрическими параметрами стандартного надреза.

На рис. 3, *a* представлена схема изготовления образцов из соединений, выполненных КСО, размером $10 \times 10 \times 55$ мм со стандартным надрезом по ЗС и с двумя дополнительными канавками. Такие канавки наносятся параллельно надрезу по ЗС на расстоянии $k = h$ (где k — расстояние между осями центрального и дополнительных надрезов) по обе стороны от его центра. В таком образце в соответствии с теорией Нейбера [15] взаимно снижается концентрация напряжений по сравнению с

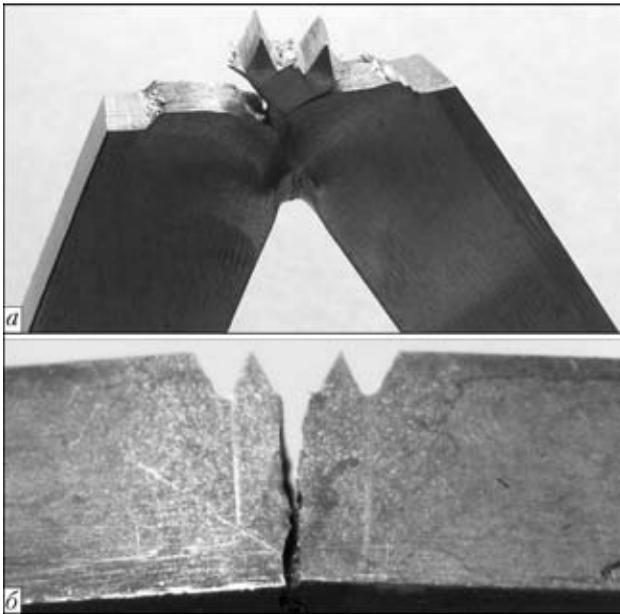


Рис. 4. Типичный характер разрушения образцов *K3V*, вырезанных из соединений, выполненных на оптимальном режиме (качественные соединения) (*a*) и на режимах с нарушением основных параметров (некачественные соединения) (*б*)

одним центральным надрезом и создаются практически равные условия пластического деформирования металла ЗС и ЗТМУ.

По аналогии с принятыми обозначениями энергии удара и ударной вязкости, отражающими тип концентратора *KV*, *KCV*, для предложенного образца с тремя надрезами введем символы *K3V* и *K33V*. На рис. 4, *a* показан типичный характер разрушения при ударных испытаниях образцов с тремя надрезами из качественных соединений КСО, показатели которых удовлетворяют требованиям нормативных документов, а на рис. 4, *б* — некачественных соединений, не удовлетворяющих этим требованиям. Энергии разрушения ударных образцов (с тремя надрезами глубиной 2 мм и радиусом 0,25 мм) сварных соединений трубной стали категории прочности Х70 в состоянии после сварки следующие, Дж:

$$\begin{aligned} &\text{у качественных соединений, выполненных на} \\ &\text{оптимальном режиме, при } T_{\text{исп}} = 20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \\ &= \frac{114,6 \dots 254,3}{177}, \text{ при } T_{\text{исп}} = -20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \\ &= \frac{112,8 \dots 214,4}{130}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{у некачественных соединений, выполненных} \\ &\text{с нарушением режима (в изломах обнаружены не-} \\ &\text{допустимые дефекты), при } T_{\text{исп}} = 20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \\ &= \frac{4,8 \dots 21,0}{11,5}. \end{aligned}$$

При испытаниях качественных соединений, выполненных КСО, установлено, что зона сварки, включая ЗС и ЗТМУ, имеет в целом большую деформативную способность и, как следствие, высокие показатели ударной вязкости.

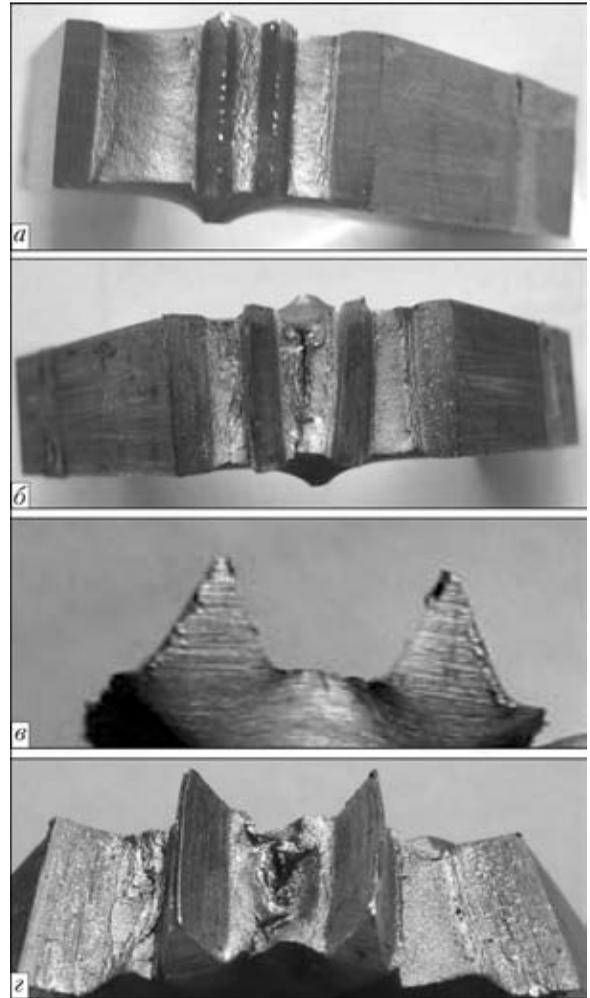


Рис. 5. Характер деформирования зоны центрального надреза образцов *K3V* с микро- (*a*, *в*) и макротрещинами (*б*, *г*): *a*, *б* — вид сверху; *в*, *г* — вид сбоку

При этом ЗС подвергалась значительной пластической деформации в условиях растяжения. Если до испытания расстояние между кромками надреза у его вершины в соответствии с радиусом ее закругления составляло 0,5 мм ($2r = 2 \times 0,25$), то после испытания оно увеличилось в 2,4...3,6 раза (см. рис. 3, *б*, *в*). Эти данные свидетельствуют о значительной пластичности металла ЗС и его достаточно высоком сопротивлении не только зарождению, но и развитию трещин. У некоторых образцов на дне центрального надреза по ЗС появлялись микро- и макротрещины (рис. 5), но дальнейшее развитие они не получили. К окончательному разрушению образца по механизму сдвига привели зародившиеся трещины в вершинах двух боковых надрезов (рис. 4, *a*).

Важно, что предложенный тип испытаний позволяет выявлять, наряду с неразрушающими методами контроля [16, 17], стыки с недопустимыми дефектами в ЗС. Такие образцы разрушаются только по центральному надrezу с низкими значениями энергии разрушения *K3V* (рис. 4, *б*).

При испытаниях образцов стандартного размера с тремя надрезами из качественных соединений ста-



ли класса прочности Х70 (образцы из сварных секторов труб поставки Харьызского завода, с ударной вязкостью металла труб более 300 Дж/см² при 20 °С) в состоянии после сварки имели энергию, затраченную на разрушение (*K_{3V}*), в среднем при температуре 20 °С — 177, при –20 °С — 130 Дж. Стандартные ударные образцы (с одним надрезом) тех же соединений при температуре 20 °С имели в среднем *K_V* около 30 Дж.

Выводы

1. Значения ударной вязкости, получаемые на стандартных образцах с острым надрезом *K_{CV}* по ЗС в состоянии после сварки, не отражают истинное сопротивление разрушению сварных соединений труб, выполненных КСО, с характерными допустимыми дефектами. В данном случае одним из факторов, определяющим уровень *K_{CV}*, являются не сами свойства металла зоны сварки, а его механическая разнородность.

2. Проведенные исследования с применением методики ударных испытаний образцов с тремя параллельными надрезами, изменяющие напряженно-деформированное состояние в зоне сварки, показали, что металл сварного соединения, выполненного КСО, в целом и все его зоны (ЗС и ЗТМУ) в состоянии после сварки имеют достаточно высокое сопротивление ударному нагружению.

3. Результаты исследований объясняют подтверждаемую практикой высокую эксплуатационную надежность сварных трубопроводов. Есть все основания отказаться от требований применения послесварочной термообработки соединений КСО, которую рекомендуют для повышения показателей ударной вязкости.

1. *СП 105-34-96*. Свод правил. Производство сварочных работ и контроль качества сварных соединений. — Введ. 01.10.96.
2. *API STANDARD 1104*. Welding of Pipelines and Related Facilities. — 19 ed., Sept. 1999.
3. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.

Peculiarities of formation of sound flash butt welded joints on pipes are analysed. Factors affecting the results of impact tests of standard specimens are considered. Tough properties of metal in the welding zone have been studied by using different impact test methods. It is shown that metal of the as-welded joint made under optimal parameters has sufficiently high resistance to impact loads. Conditions for performing flash butt welding and inspection of the joints providing high operating reliability of pipelines have been determined.

4. *К методологии* контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Автомат. сварка. — 2006. — № 10. — С. 3–9.
5. *Особенности* испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Там же. — 2008. — № 10. — С. 5–11.
6. *Влияние* дефектов контактной стыковой сварки на прочность соединений при низких температурах / С. И. Кучук-Яценко, Г. В. Жемчужников, Б. И. Казымов и др. // Там же. — 1980. — № 12. — С. 1–3.
7. *Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К.* Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1965. — 140 с.
8. *Образование* матовых пятен в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой / С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов, В. Ф. Загадарчук и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 11. — С. 23–26.
9. *Патон Б. Е., Лебедев В. К., Кучук-Яценко С. И.* Комплекс «Север-1» для контактной стыковой сварки неповоротных стыков труб большого диаметра // Там же. — 1979. — № 11. — С. 41–45.
10. *Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П.* Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Стр-во трубопроводов. — 1989. — № 4. — С. 8–11.
11. *Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К.* Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1978. — 213 с.
12. *Писаренко Г. С., Новиков Н. В.* Об актуальных задачах исследований несущей способности криогенных сосудов давления // Пробл. прочности. — 1970. — № 8. — С. 3–12.
13. *Бакин О. А., Кукин А. Г., Моношков А. Н.* Метод оценки надежности материалов и сварных соединений, работающих в условиях низких температур // Там же. — 1970. — № 8. — С. 70–73.
14. *Рахманов А. С., Зандберг А. С.* Ударная вязкость как критерий оценки хрупкости соединений, выполненных контактной сваркой // Стр-во трубопроводов. — 1985. — № 10. — С. 41–43.
15. *Нейбер Г.* Концентрация напряжений. — М.: Гостехиздат, 1947. — 204 с.
16. *Троцкий В. А., Радько В. П., Ющак П. Т.* Ультразвуковой контроль качества соединений, выполненных контактной стыковой сваркой // Автомат. сварка. — 1981. — № 4. — С. 38–40.
17. *Комплексный* контроль соединений, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. П. Радько, Б. И. Казымов и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 4. — С. 46–50.

Поступила в редакцию 15.07.2010



Международная специализированная выставка СВАРКА. УРАЛ/UralWeldExpo 2011

12–14 апреля 2011 года

Екатеринбург, КОСК «Россия»

Организатор: RTE group Екатеринбург

+7 (343) 310-32-47 (48, 49, 50); valentina@rte-ural.ru

RTE group Москва

+7 (495) 921-44-07; t.ruzavina@rte-expo.ru; www.uralwelldexpo.ru



УДК 621.791.03-52

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ КАК ЭТАП РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С УПРАВЛЯЕМОЙ ФОРМОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В. В. АНДРЕЕВ, Е. М. ЕФРЕМЕНКО, кандидаты техн. наук, **Г. Н. МОСКОВИЧ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показана эффективность имитационного моделирования электрических схем источников питания переменного тока управляемой формы при оценке выходных энергетических характеристик и способов их регулирования.

Ключевые слова: дуговая сварка, источники питания, переменный ток, моделирование, ток управляемой формы

В настоящее время сварочное электрооборудование создается на современной элементной базе, позволяющей получать характеристики источников питания, которые обеспечивают повышение качества сварных соединений при одновременном улучшении экономических показателей. Однако достижение этих целей связано с усложнением аппаратных и функциональных составляющих разрабатываемого оборудования, созданием специальных электронных систем регулирования, проведением сложных математических расчетов по выбору тех или иных элементов электрической схемы и построением дорогостоящих физических моделей.

Менее трудоемко и более эффективно такие задачи можно решать с помощью современных программных пакетов математического и имитационного моделирования [1], которые были использованы нами при разработке электрических схем источников питания переменного тока управляемой формы. Как показано в работе [2], управление формой тока прямой и обратной полярности весьма перспективно, поскольку позволяет осуществить сварку МИГ/МАГ на переменном токе высокопрочных сталей и алюминия с сохранением высоких показателей механических свойств наплавленного металла. Отмечено также меньшее по сравнению со сваркой на постоянном токе выгорание химических элементов.

Ниже приведены некоторые схемы исследованных нами источников переменного тока. В первой схеме, представленной на рис. 1, а, в отличие от существующих разработок последовательно со

вторичной обмоткой трансформатора $T1$ вместо тиристорного моста [3] подключен диодный мост, состоящий из диодов $VD1...VD4$ с индуктивностью $L1$ в его диагонали [4]. В цепь первичной обмотки трансформатора включен регулятор, состоящий из двух встречно-параллельно соединенных тиристоров $VS1, VS2$ и резистора $R1$. Здесь и в последующих схемах нагрузка (дуга) представлена линейным элементом — активным сопротивлением.

Регулирование тока в нагрузке осуществляется по первичной цепи понижающего трансформатора, в которой ток в несколько раз ниже, чем во вторичном контуре. Такой подход значительно расширяет энергетические возможности источника питания и позволяет применять его не только для дуговой сварки, но и для электрошлаковых

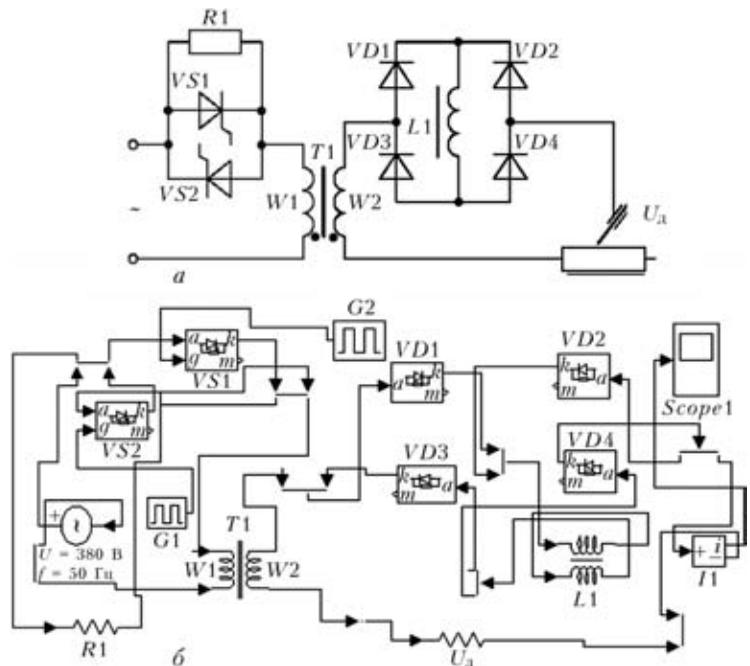


Рис. 1. Электрическая схема источника питания переменного тока управляемой формы (а) и его имитационная модель с регистрирующими приборами $I1$, $Scope1$ и генераторами импульсов (б)

© В. В. Андреев, Е. М. Ефременко, Г. Н. Москович, 2011

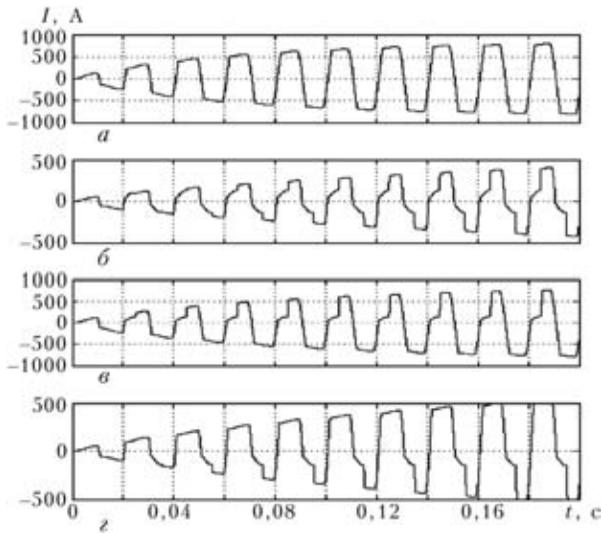


Рис. 2. Осциллограммы тока нагрузки источника питания (см. рис. 1, б), полученные при разных значениях фаз управляющих импульсов тиристорами V_{S1} и V_{S2} : а — 0 и 0,010 с; б — 0,005 и 0,015 с; в — 0,005 и 0,010 с; г — 0 и 0,015 с

технологий при значении тока 10 кА и выше, при этом источник питания имеет высокую надежность и сравнительно небольшую стоимость. В имитационной модели (см. рис. 1, б), созданной в пакете MATLAB, задействованы генераторы импульсов $G1$ и $G2$ для фазового регулирования тиристорами V_{S1} , V_{S2} , измеритель тока $I1$ и осциллограф $Scope1$. Для получения сварочного тока необходимой формы и скорости его нарастания при смене полярности такие параметры, как индуктивность дросселя-накопителя $L1$, сопротивление резистора $R1$, моменты включения тиристоров V_{S1} , V_{S2} , варьировались в процессе моделирования в достаточно широких пределах. Осциллограммы, приведенные на рис. 2, показывают возможность обеспечения непрерывности тока нагрузки и сравнительно высокой скорости перехода его через нуль, а также получения разных форм тока прямой и обратной полярности при работе от источника питания (см. рис. 1, а).

Вторая схема (рис. 3, а) является основной силовой частью источника питания симметричного и асимметричного переменного тока низкой частоты [5]. Предварительные исследования сварки под флюсом, осуществляемой от источника питания с дискретным регулированием частоты тока и независимым регулированием длительности его полупериодов на основе тиристорного регулятора, построенного только на двух мостовых схемах, которые подключаются ко вторичной обмотке силового трансформатора [6], показали, что снижение частоты сварочного тока до 12...16 Гц положительно влияет на структуру наплавленного металла шва. Это свидетельствует о взаимосвязи между частотой сварочного тока, частотой собственных колебаний сварочной ванны и технологическими показателями качества сварки. Однако для электрической схемы такого источника питания характерно наличие пульсаций сварочного тока с частотой 100 Гц при двух и более полупериодах, формирующих этот ток. Для снижения пульсаций тока к выходу двухмостового регулятора $V_{S1}...V_{S4}$ и $V_{S5}...V_{S8}$ подключен третий тиристорный мост $V_{S9}...V_{S12}$, имеющий дроссель-накопитель $L1$ в его диагонали. Регулирование частоты сварочного тока осуществляется так же, как и в схеме из работы [6], а именно, путем создания импульсов положительной и отрицательной полярности определенной длительности и их модуляции.

Следует отметить, что длительность импульсов тока прямой и обратной полярности может регулироваться независимо одна от другой в широком диапазоне, что существенно повышает эффективность режима модуляции.

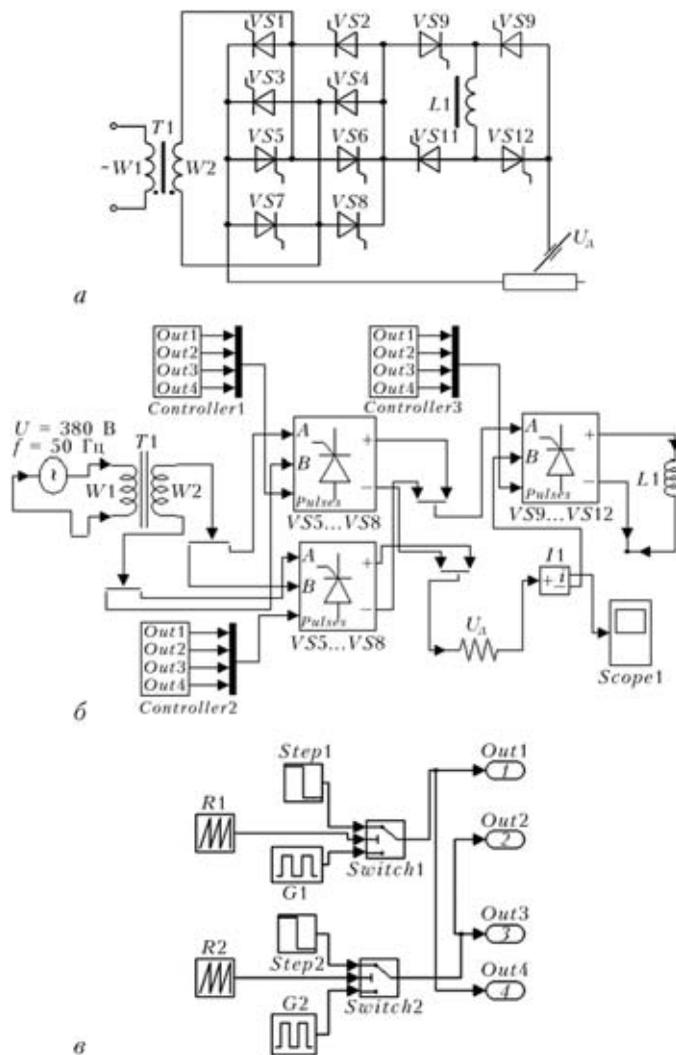


Рис. 3. Электрическая схема источника симметричного и асимметричного переменного тока низкой частоты (а) и имитационные модели данного источника (б) и блока фазового регулирования $Controller$ (в)

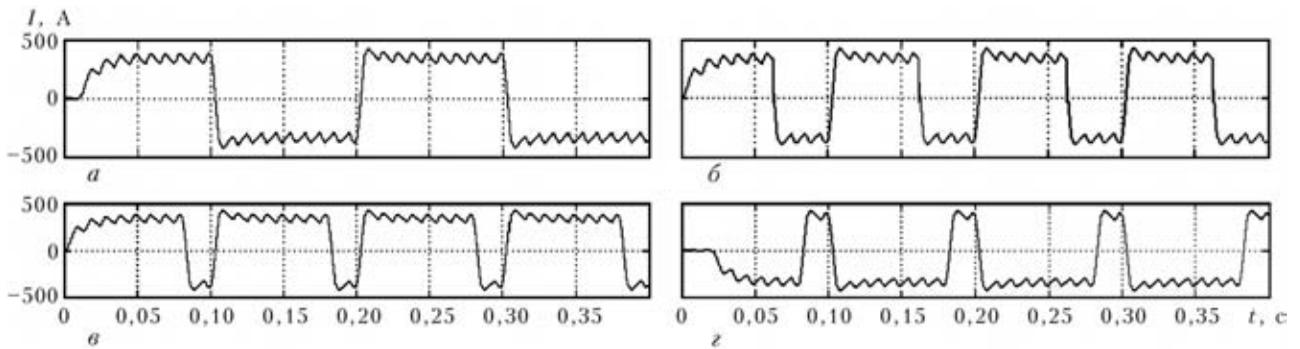


Рис. 4. Осциллограммы симметричного (а) и асимметричного (б-г) переменного тока низкой частоты, полученные при разных значениях длительности импульсов тока нагрузки прямой и обратной полярности: а — 0,1 и 0,1 с; б — 0,08 и 0,02 с; в — 0,06 и 0,04 с; г — 0,02 и 0,08 с

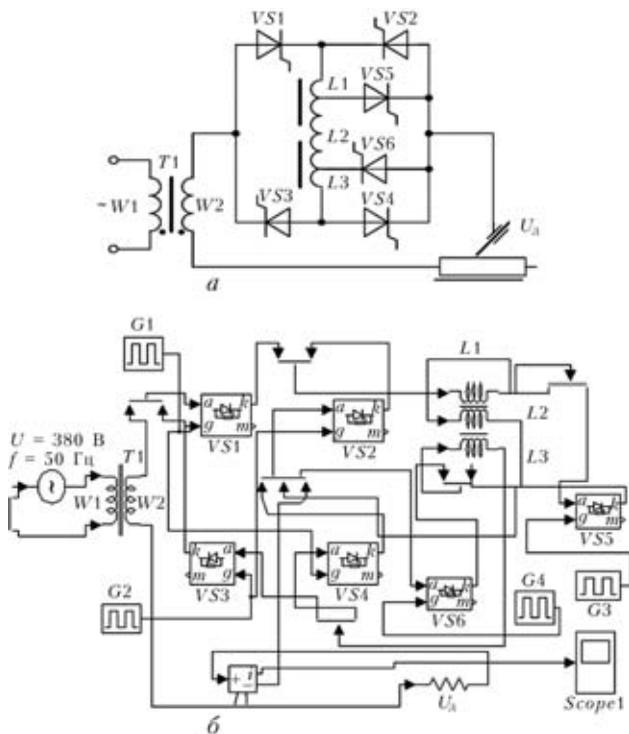


Рис. 5. Электрическая схема источника питания переменного тока управляемой формы (а) и ее имитационная модель с регистрирующими приборами, созданная в среде пакета MATLAB (б)

В имитационной модели данного источника, представленной на рис. 3, б, кроме трех тиристорных выпрямительных мостов $VS1...VS4$, $VS5...VS8$, $VS9...VS12$, как это имеет место в принципиальной электрической схеме, присутствуют три контроллера *Controller 1...3*, которые предназначены для фазового регулирования длительностью импульсов тока прямой и обратной полярности, а также устройство для измерения тока I и осциллограф *Scope1*. Каждый контроллер (см. рис. 3, в) своими выходами *Out1...Out4* соединен с управляющими электродами тиристорных мостов. С помощью данной модели, состоящей из генераторов сигналов различной формы *Step*, *R*, *G* и управляемого переключателя сигналов *Switch*, осущес-

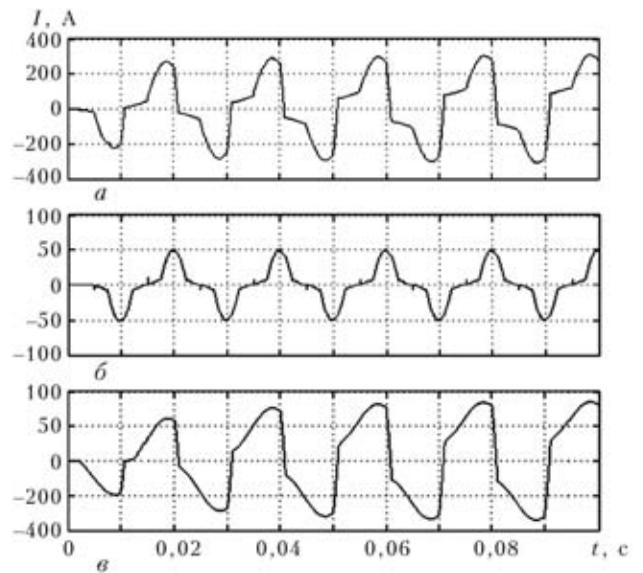


Рис. 6. Осциллограммы тока нагрузки управляемой формы (см. рис. 5, б) при разных значениях времени включения тиристорных мостов $VS1...VS4$, $VS5$ и $VS6$: а — 0...0,01, 0,005 и 0,0015 с; б — 0,005...0,015, 0,0075 и 0,0175 с; в — 0,0025...0,0125, 0,005 и 0,015 с

вляется регулирование длительности импульсов тока прямой и обратной полярности. Осциллограммы тока нагрузки, демонстрирующие работу источника питания в симметричном и асимметричном режимах, приведены на рис. 4.

В следующем примере рассмотрен один из вариантов источника питания переменного тока управляемой формы. Электрическая схема источника [7] и ее модель представлены на рис. 5. В этой схеме наряду с трансформатором $T1$, тиристорным мостом $VS1...VS4$ и дросселем $L1$ в его диагонали дополнительно к входу моста по переменному току и части обмотки дросселя подключены два тиристора $VS5$ и $VS6$, соединенные между собой. Это решение позволило с помощью генераторов импульсов $G1...G4$ управлять значениями и формой основного тока, в том числе и прямоугольной, а также формой импульса, который налагается на основной ток (рис. 6). Такой комбинированный источник питания повышает



быстродействие всей системы при переходных процессах, что особенно важно при сварке под флюсом, когда инерционность источника питания является причиной колебаний параметров режима сварочного процесса.

Таким образом, имитационное моделирование позволяет при разработке сварочных источников питания оценить возможности их различных схем, разные способы регулирования энергетических параметров и перспективу практического применения, исключая физическое моделирование.

1. Дьяконов В. П. MATLAB 6/5 SP1/7/0 Simulink 5/6. Основы применения. Сер. Библиотека профессионала. — М.: СОЛОМОН-Пресс, 2005. — 800 с.

2. Maxl G., Posch G. MAG-Wechselstromshweissen von hochfesten Feinkornbauustählen // Schweiss und Pruftechnik. 2008. — № 3. — S. 35–38.
3. Закс М. И., Каганский Б. А., Печенин А. А. Трансформаторы для электродуговой сварки. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 136 с.
4. Пат. 47333 Украина, В 23 К 9/10, 9/00. Джерело живлення змінного струму керованої форми для дугових і шлакових технологій / В. В. Андреев, О. М. Сфременко, І. І. Заруба. — Опубл. 25.01.2010.
5. Особенности дуговой сварки переменным током низкой частоты / В. В. Андреев, Г. Н. Москович, А. М. Жерносеков, Л. Г. Шитова // Сварщик. — 2008. — № 6. — С. 19–21.
6. А. с. 1542721 СССР, МКІ⁵ В 23 К 9/00, 9/10. Источник питания для дуговой сварки / В. К. Лебедев, В. В. Андреев, Г. Н. Москович. — Опубл. 15.02.90; Бюл. № 6.
7. А. с. 1294523 СССР, МКІ⁴ В 23 К 9/00. Источник питания для дуговой сварки / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, И. И. Заруба и др. — Опубл. 07.03.87; Бюл. № 9.

The paper shows the effectiveness of simulation of electric diagrams for power sources of alternating current of a controllable shape at evaluation of output power characteristics and methods of their regulation.

Поступила в редакцию 21.08.2010

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИМПОРТОЗАМЕНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ TIG-СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ ДИАМЕТРОМ 89... 219 мм ПРИ СООРУЖЕНИИ И РЕМОНТЕ ЭНЕРГБЛОКОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ УКРАИНЫ (Инновационный проект НАН Украины, выполненный в ИЭС им. Е. О. Патона)

При автоматизации процессов орбитальной дуговой сварки (ОДС) важное значение имеет получение надежной информации относительно сигналов тока и напряжения на сварочной дуге. Как известно, автоматы для ОДС работают в условиях высокого уровня электромагнитных полей, который приводит к существенному «зашумлению» сигналов в каналах измерения и управления. Для повышения качества систем управления необходимо использовать разные методы повышения их устойчивости. В рамках данной работы для обработки исходных сигналов датчиков предложено использовать метод вейвлет-преобразования. В этом случае реконструкция измерительных сигналов разрешает существенно улучшить соотношение сигнал/шум и тем самым повысить качество управления процессом ОДС. Вейвлет-преобразование временной последовательности сигналов тока и напряжения заключается в разложении их по базису определенных функций с помощью масштабирования и перенесения.

В отличие от преобразования Фурье вейвлет-преобразование дают двухмерное представление сигнала. При этом его частота и время являются независимыми переменными, т. е. представляется возможность анализа свойств процесса одновременно как во временной, так и в частотной областях. На данное время задача оптимального выбора вейвлета не решена. Поэтому исследователям приходится решать ее путем выбора разных вариантов материнских вейвлетов. При решении задачи выбора были использованы вейвлеты Хаару, Морло и Добеши. Как показало решение модельных задач с использованием пакета MATLAB, наилучшие метрологические показатели обеспечивают вейвлеты Добеши 5-го порядка.

При производстве энергоблоков атомных электростанций широко используются сварные трубчатые элементы. Остаточные напряжения (ОН), возникающие в элементах труб во время сварки, являются одним из важных факторов, определяющих их надежность и работоспособность. При определении ОН в сварных элементах с использованием экспериментальных методов считается, что напряжения на базе их определения являются постоянными, а участок контролируемой поверхности объекта плоским. Экспериментально установлено, что кривизна поверхности, в которой исследуются ОН, влияет на погрешность при их определении. Поэтому для оценки влияния кривизны поверхности на погрешность определения ОН проводился численный эксперимент с использованием метода конечных элементов. Результаты численного эксперимента и их анализ показали, что погрешности методики расчета ОН не превышают 8% в трубе диаметром 89 мм.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СДВИГА δ_{1c} -КРИВОЙ И ХРУПКОВЯЗКОГО ПЕРЕХОДА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАНДАРТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В. П. ДЯДИН, канд. техн. наук, Л. Я. ЮРКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследований характеристик вязкости разрушения по деформационному критерию наиболее широко используемых отечественных низколегированных конструкционных сталей различной толщины. Предложен подход к оценке температуры хрупковязкого перехода в зависимости от толщины исследуемого металлопроката. Выполнена экспериментальная проверка сдвига базовой деформационной δ_{1c} -кривой в зависимости от толщины металлопроката и его стандартных прочностных характеристик.

Ключевые слова: конструкционные стали, сварные соединения, ударная вязкость, образец Шарпи, характеристики трещиностойкости, плоская деформация, толщина металла, температурный сдвиг, хрупковязкий переход

Общепринятые критерии перехода от плоского напряженного состояния к плоской деформации недостаточно изучены и требуют экспериментальных подтверждений. Предложенный в работе [1] подход к возможной оценке температурного сдвига для деформационного критерия δ_{1c} в зависимости от толщины образца также не является исключением и нуждается в экспериментальной проверке.

В работе [1] было предложено нижнюю температурную границу, где можно вносить некоторые изменения при использовании деформационного критерия механики разрушения в зависимости от толщины, ограничить температурой $T_{28 \text{ Дж}}$ при которой работа разрушения ударного образца Шарпи составляет 28 Дж на нижней границе разброса. Данное ограничение представляет определенный интерес, поскольку позволяет сопоставить температурные сдвиги как по силовому, так и по деформационному критериям механики разрушения относительно единой точки, соответствующей $T_{28 \text{ Дж}}$ для стандартного ударного образца Шарпи.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований металла сварных соединений наиболее широко используемых низколегированных конструкционных сталей. Температурный сдвиг расчетной деформационной δ_{1c} -кривой определяли в соответствии с работой [1].

Вязкость разрушения металла шва. Рассмотрим результаты исследования характеристики трещиностойкости δ_c (δ_{1c}) металла шва, выполненного

электродами марки АНО-ТМ (основной металл 09Г2С, толщина $t = 40$ мм).

Сварной шов выполняли за несколько проходов в Х-разделку, после чего полученное сварное соединение разрезали перпендикулярно оси шва на заготовки, из которых изготовили следующие образцы для испытаний:

на трехточечный статический изгиб по ГОСТ 25.506–85 (тип 4) для определения деформационной характеристики δ_c (δ_{1c});

на ударный изгиб (образцы Шарпи) по ГОСТ 9454–78 (тип 9);

на растяжение по ГОСТ 6996–66 (тип 2).

Образцы толщиной 35 мм для оценки характеристики δ_c и на ударный изгиб изготавливали с ориентацией надреза вдоль оси шва перпендикулярно плоскости листа. Раскрытие трещины δ_c определяли по МР-170-85.

Согласно [1, 2] характеристику трещиностойкости δ_{1c} в условиях плоской деформации определяли по результатам стандартных механических испытаний:

$$\delta_{1c} = 0,5Aa_v/\sigma_{0,2}, \quad (1)$$

где a_v — ударная вязкость образцов Шарпи при соответствующих температурах испытания, Дж/см²; A — коэффициент корреляции (для низколегированных и низкоуглеродистых сталей в данном случае $A = 0,1$); $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала, МПа.

Образцы охлаждали жидким азотом в ванне с бензином. Температуру в процессе испытания образцов контролировали термомпарой.

Механические свойства металла шва, выполненного электродами марки АНО-ТМ при $T_{\text{исп}} = +20$ (–60 °С), следующие: $\sigma_B = 569$ (598 МПа); $\sigma_{0,2} = 428$ (455 МПа); $\delta = 30,7$ (30,0 %); $\psi = 67,7$ (67,0 %).

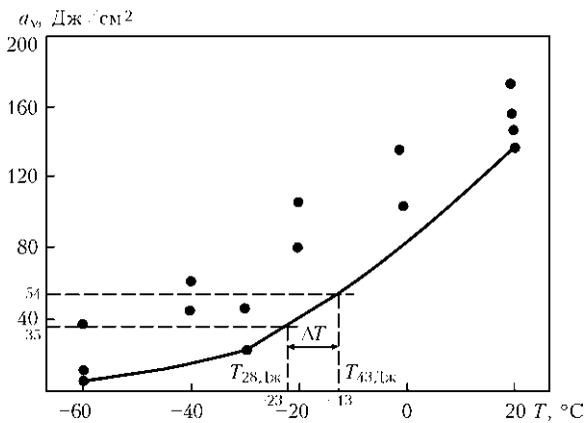


Рис. 1. Температурная зависимость ударной вязкости (минимальные значения) металла шва, выполненного электродами марки АНО-ТМ (ΔT — значение температурного сдвига по формуле (6))

Результаты испытаний металла шва представлены в табл. 1 и на рис. 1–3.

Во всем температурном интервале исследования характеристики вязкости δ_c разрушение образцов носили хрупкий и квазихрупкий характер. Хрупкое разрушение образцов до наступления общей текучести наблюдалось вплоть до -20°C . При температуре -15°C разрушение образца произошло в момент достижения общей текучести материала под надрезом, при этом какого-либо заметного стабильного подрастания трещины не наблюдалось, что хорошо видно на рис. 2.

В процессе определения характеристики δ_c при комнатной температуре и анализе поверхности излома образца отмечено незначительное стабильное подрастание трещины на глубину порядка 0,4...0,6 мм, после чего наступал нестабильный рост трещины по квазихрупкому механизму (рис. 2). Падения нагрузки в процессе стабильного роста трещины на диаграммах нагружения не наблюдалось.

При построении расчетной кривой, показанной на рис. 3, для определения температурного сдвига базовой кривой δ_{1c} воспользуемся минимальными значениями удельной ударной вязкости образцов Шарпи исследуемого сварного соединения. На

Таблица 1. Характеристики трещиностойкости δ_c сварного шва, выполненного электродами АНО-ТМ, при трехточечном изгибе образца толщиной 35 мм

$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\delta_c, \text{мм}$	Возможное стабильное подрастание трещины, мм
-60	0,024	—
-36	0,044	—
-23	0,078	—
-15	0,139	—
+20	0,266	До 0,4
+20	0,323	До 0,6



Рис. 2. Поверхность излома исследуемых образцов на трехточечный изгиб при разных температурах

кривой находим температуру, соответствующую значению 35 Дж/см^2 (в данном случае -23°C) (рис. 1). По линейной экстраполяции определяем предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B сварного соединения, соответствующие данной температуре (441 и 583 МПа соответственно).

Используя зависимость из работы [3] между расчетным значением деформационного упрочнения n^p и прочностными характеристиками материала $\sigma_{0,2}, \sigma_B$

$$n^p = -0,18 + 0,22\sigma_B/\sigma_{0,2}, \quad (2)$$

можно также найти расчетное значение n^p при температуре -23°C ($n^p = 0,11$).

Если известна деформация ϵ_B в точке потери пластической устойчивости материала [4], значение деформационного упрочнения n можно вычислить более точно по формуле

$$n = \epsilon_B / (1 + \epsilon_B). \quad (3)$$

Согласно работам [1, 5] значение характеристики δ_c выражается в виде функции от n, β, α и δ_{1c} :

$$\delta_c = f(\beta(t))\delta_{1c}, \quad (4)$$

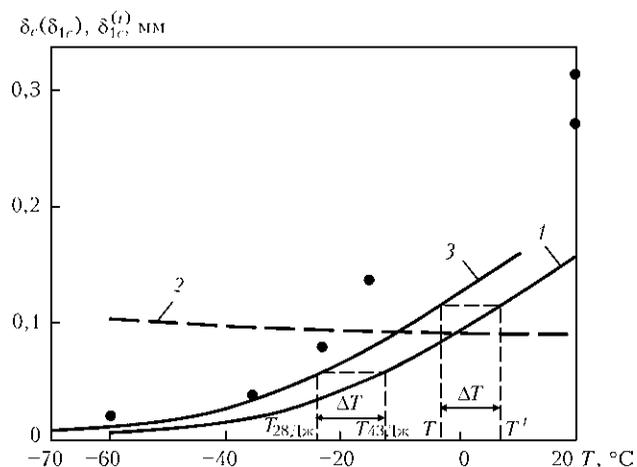


Рис. 3. Температурная зависимость характеристик трещиностойкости металла: 1 — расчетная кривая δ_{1c} , вычисленная по формуле (1); 2 — условие по формуле (9); 3 — расчетная деформационная кривая $\delta_{1c}^{(t)}$ при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ по формуле (7); точки — экспериментальные значения δ_c



где при $t > 10$ мм $f(\beta(t))$ определяется следующим выражением:

$$f(\beta(t)) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \alpha + \alpha^2 + \frac{(1 - 10,24/(t + 5,24))(1 + \alpha)}{2}\right] \times \\ \times \left\{ \frac{(1 - 10,24/(t + 5,24))(1 + \alpha)}{2} - \alpha - 1 \right\}^{\frac{1-n}{2n}} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{(1 - 10,24/(t + 5,24))(1 + \alpha) + 2\alpha}{4} \right\} / (1 - \alpha)^{1/n}. \quad (5)$$

Принимаем для упрощения среднее значение $\alpha = 0,3$ [1, 6], для данного сварного соединения при температуре -23 °С $f(\beta(t)) = 1,55$.

Учитывая, что при удельной работе разрушения образца Шарпи 35 Дж/см² температура составляет всего -23 °С, изменение предела текучести исследуемого сварного соединения незначительно и им можно пренебречь. В этом случае, исходя из работы [1], связь между температурным сдвигом ΔT и базовой деформационной кривой δ_{1c} может быть выражена следующей зависимостью:

$$a_v^{T_{28 \text{ Дж}} + \Delta T} \approx a_v^{T_{28 \text{ Дж}}} f(\beta(t)) = 54 \text{ Дж/см}^2. \quad (6)$$

Соответствующее значение ударной вязкости показано на рис. 1. Из рисунка видно, что значению ударной вязкости образца Шарпи, равному 54 Дж/см², соответствует температура -13 °С. Следовательно, температурный сдвиг ΔT составляет 10 °С.

Используя подход, предложенный в работе [1], можно получить расчетную деформационную кривую $\delta_{1c}^{(t)}$, показанную на рис. 3, путем сдвига базовой зависимости (1) на значение ΔT :

$$\delta_{1c}^{(t)} = 0,54 a_v^{(t)} / \sigma_{0,2}^{(t)}, \quad (7)$$

где $\delta_{1c}^{(t)}$ — скорректированная характеристика вязкости разрушения δ_{1c} при условии развития сквозной трещины в конструктивном элементе толщиной t и температуре T ; $a_v^{(t)}$ — ударная вязкость образца Шарпи, соответствующая скорректированной температуре T^t с учетом толщины: $T^t = T + \Delta T$; $\sigma_{0,2}^{(t)}$ — предел текучести при скорректированной температуре T^t .

Как видно из рис. 3, расчетная кривая $\delta_{1c}^{(t)}$ довольно хорошо описывает экспериментальные значения δ_c .

Следует отметить, что температура испытания ударных образцов при $+20$ °С еще не обеспечивает верхние значения удельной работы разрушения a_v^{max} в вязком состоянии по нижней границе

разброса. Это несколько затрудняет оценку характеристики δ_i (критическое раскрытие трещины в момент инициирования разрушения в вязком состоянии) по результатам ударных испытаний. Вместе с тем при определении характеристики δ_c при комнатной температуре и анализе поверхности излома образца было отмечено незначительное стабильное вязкое подрастание трещины на глубину порядка $0,4 \dots 0,6$ мм, при этом было достигнуто состояние общей текучести материала под надрезом. С учетом данного факта и зависимости из работы [2]

$$\delta_c = \delta_i + \Delta l \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} \frac{n}{(1-n)^2}, \quad (8)$$

где Δl — величина стабильного роста трещины, можно оценить значение δ_i в условиях общей текучести под надрезом.

Из выражений (1), (8) и данных табл. 1 следует, что $\delta_i \approx 0,2$ мм.

Тогда, с учетом зависимости (1) легко найти значение удельной работы разрушения в вязком состоянии по нижней границе разброса ($a_v^{\text{max}} = 170$ Дж/см²).

В то же время при использовании подходов нелинейной механики разрушения для аттестации сварных соединений ряда ответственных конструкций (глубоководные морские стационарные платформы, магистральные трубопроводы и др.) в первую очередь необходимо исключить возможность хрупкого разрушения элементов конструкции с дефектом в области номинально упругих деформаций.

Так, согласно требованиям [7], разработанным совместно с ЦНИИ КМ «Прометей», для металла сварных соединений наиболее ответственных и нагруженных элементов конструкций, значение критического раскрытия трещины δ_c должно удовлетворять условию

$$\delta_c \geq 1,35t \frac{\sigma_{0,2}}{E}, \quad (9)$$

где E — модуль упругости материала, МПа; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала, МПа.

Данный уровень при $\sigma_{0,2} = 360 \dots 450$ МПа близок к требованиям стандарта Канады [6], а также стандартов DNV и API на стали, используемые для подводных и наземных трубопроводов [8].

Приняв $\delta_c = \delta_{1c}^{(t)}$, условие (9) можно представить в следующем виде:

$$\delta_{1c}^{(t)} \geq 1,35t \frac{\sigma_{0,2}}{E}. \quad (10)$$



Таблица 2. Механические свойства сварного соединения ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	n^p по (2)	δ , %	ψ , %
Основной металл	$\frac{407...424}{415}$	$\frac{585...592}{588}$	0,13	$\frac{23,6...24,6}{24,3}$	$\frac{67,9...69,8}{69,1}$
Металл шва	$\frac{416...450}{433}$	$\frac{540...561}{550}$	0,10	$\frac{23,6...24,6}{24,3}$	$\frac{66,0...67,9}{66,9}$

Как видно из рис. 3, полученная точка пересечения кривых 2 и 3 практически совпадает с температурой хрупковязкого перехода, где начинается стабильное подрастание трещины.

Если принять во внимание зависимость (7), то, исходя из выражения (10), требование к ударной вязкости в зависимости от толщины элемента конструкции и предела текучести материала в этом случае можно представить в виде

$$a_v^{(t)} \geq 0,27t \frac{\sigma_{0,2} \sigma_{0,2}^{(t)}}{EA}, \quad (11)$$

где для сохранения размерностей и состыковки формул (7), (10) пределы текучести $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,2}^{(t)}$ и модуль упругости E выражены в мегапаскалях, толщина t — в миллиметрах.

При небольших значениях температурного сдвига ΔT в первом приближении можно допустить $\sigma_{0,2} \approx \sigma_{0,2}^{(t)}$. Тогда выражение (11) имеет вид

$$a_v^{(t)} \geq 0,27t \frac{\sigma_{0,2}^2}{EA}. \quad (11a)$$

Соотношение (11a) между значениями ударной вязкости, толщиной и стандартными прочностными характеристиками существенно отличается от приведенной в работе [8] зависимости

$$a_v, [\text{Дж}/\text{см}^2] \geq 0,125\sigma_{0,2} [\text{МПа}]. \quad (12)$$

Из выражения (11a) видно, что требование к ударной вязкости должно быть прямо пропорционально квадрату предела текучести материала и

Таблица 3. Характеристики трещиностойкости δ_c и ударной вязкости сварного соединения образца толщиной 24 мм при трехточечном изгибе в металле ЗТВ

$T_{исп}$, $^{\circ}\text{C}$	δ_c , мм	δ_c^{max} , мм	$f(\beta(t))$ по (5)	a_v , Дж/см ²
+20	—	—	2,02	122; 120; 130
-25	0,245	—	—	—
-25	—	0,670	—	—
-30	—	—	—	27; 31,32;
-40	0,045	—	—	—
-55	0,100	—	—	—
-60	0,065	—	—	16; 22; 27

толщине конструктивного элемента в отличие от линейной зависимости по формуле (12).

Как пример на рис. 4 представлен трехмерный график необходимого значения ударной вязкости $a_v^{(t)}$ в зависимости от толщины конструктивного элемента и предела текучести исследуемого сварного соединения, выполненного электродами марки АНО-ТМ в области хрупковязкого перехода.

Вязкость разрушения зоны термического влияния сварного соединения. Для минимизации неоднородности сварного соединения и уменьшения ошибки при оценке прочностных свойств в металле ЗТВ механические свойства металла шва выбирали близкими к основному металлу. С этой целью, а также для получения более прямой зоны охрупчивания, параллельной толщине листа, сварное соединение выполняли в К-образную разделку электродами УОНИ-13/55, основной металл — сталь марки 10ХСНД толщиной 25 мм.

Механические свойства металла шва и основного металла приведены в табл. 2.

Результаты исследований по оценке характеристики вязкости разрушения δ_c и значения ударной вязкости a_v в рассмотренном температурном интервале представлены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

Следует отметить, что приведенные результаты исследования характеризуют трещиностой-

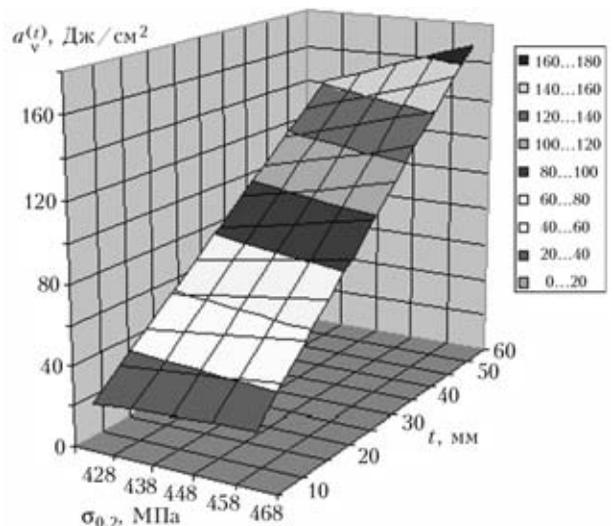


Рис. 4. Значения ударной вязкости по формуле (11a) сварного соединения, выполненного электродами марки АНО-ТМ, в области хрупковязкого перехода в зависимости от толщины конструктивного элемента и его прочностных свойств

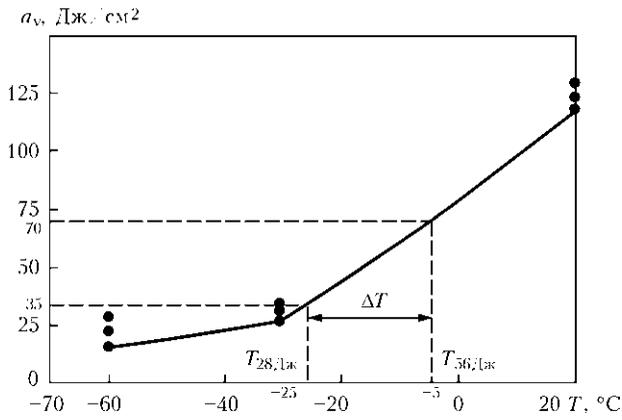


Рис. 5. Температурная зависимость ударной вязкости околошовной зоны: точки — экспериментальные значения; кривая построена по минимальным экспериментальным значениям

кость сварного соединения в металле ЗТВ только на расстоянии 1 мм от линии сплавления.

Как и для сварного шва, исходя из минимальной температурной кривой ударной вязкости, приведенной на рис. 5, находим температуру, соответствующую значению 35 Дж/см² (в данном случае -25 °С).

За предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B ЗТВ принимаем величины, соответствующие средним значениям основного металла и сварного шва: 424 и 569 МПа соответственно.

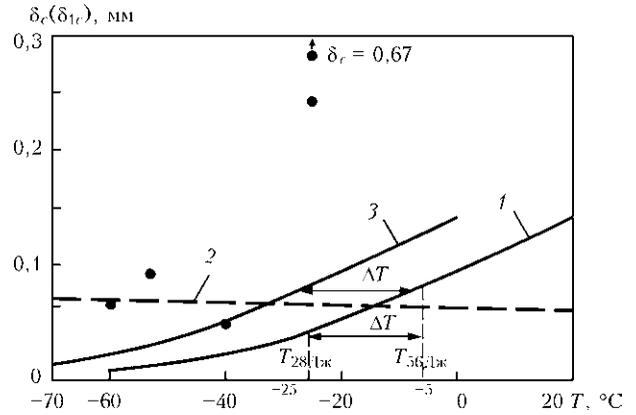


Рис. 6. Температурная зависимость характеристик трещиностойкости: 1 — расчетная кривая δ_{1c} , вычисленная по формуле (1); 2 — условие по формуле (10); 3 — расчетная деформационная кривая $\delta_{1c}^{(t)}$ при $\Delta T = 20$ °С по формуле (7); точки — экспериментальные значения δ_c

Используя формулы (2) и (5), определяем величины n^p и $f(\beta)$ ($n^p = 0,115$; $f(\beta) = 2,02$). Тогда, согласно выражению (6), $a_{v,28}^{T_{28} + \Delta T} \approx 70$ Дж/см².

Как видно из кривой на рис. 5, значению ударной вязкости образца Шарпи, равному 70 Дж/см², соответствует температура -5 °С. Следовательно, температурный сдвиг ΔT составляет 20 °С.

Это, в свою очередь, позволяет сдвинуть расчетную деформационную кривую δ_{1c} , показанную

Таблица 4. Механические свойства и показатель деформационного упрочнения n^p конструкционных сталей

Марка стали	t, мм	T _{исп} , °C	σ_r , МПа	σ_B , МПа	n^p	δ , %	ψ , %
10ХСНД	25	+20	353,4	$\frac{523...530}{526}$	0,147	$\frac{32,7...33,0}{32,6}$	67,9
		-30	422,7	$\frac{627...630}{526}$	0,147	$\frac{33,7...36,6}{35,1}$	73,3
		-60	$\frac{453,5...488,2}{470,8}$	$\frac{633...682}{668}$	0,133	$\frac{28,7...36,6}{31,6}$	$\frac{67,9...71,6}{69,7}$
	37	+20	350,0	$\frac{544...551}{545}$	0,162	32,0	75,0
		-30	$\frac{346,5...381,6}{363,8}$	$\frac{561...566}{564}$	0,161	$\frac{30,0...36,0}{33,6}$	72,0
		-60	380,2	590	0,161	$\frac{32,3...34,0}{33,0}$	$\frac{71,6...73,3}{72,0}$
09Г2С	19	+20	$\frac{294,8...315,6}{306,1}$	$\frac{503...517}{508}$	0,185	$\frac{36,6...38,6}{37,4}$	78,2
		-30	$\frac{329,1...336,1}{332,6}$	$\frac{544...551}{547}$	0,182	38,3	78,2
		-60	$\frac{347,0...353,4}{350,2}$	589	0,190	40,0	75,0
09Г2С-Ш	70	+20	275	450	0,180	39,1	
		-60	332	530	0,171	40,0	
		-70	384	556	0,139	39,0	
14Г2АФ	40	+20	$\frac{400...415}{406}$	$\frac{576...586}{581}$	0,135	$\frac{32,0...33,3}{32,6}$	$\frac{67,2...67,7}{67,5}$
		-60	430	612	0,133	32,0	67,0



Таблица 5. Химический состав исследуемых конструкционных сталей, мас. %

Марка стали	Толщина образца, мм	C	Mn	Si	Ni	Cu	S	P	Cr
10ХСНД	25	0,079	0,73	0,944	0,61	0,40	0,027	0,022	0,74
10ХСНД	37	0,073	0,55	0,844	0,59	0,42	0,023	0,014	0,73
09Г2С	19	0,050	1,13	0,670	0,02	0,05	0,045	0,017	0,10
14Г2АФ	40	0,200	1,67	0,458	0,09	0,35	0,036	0,030	0,17

на рис. 6, на такое же значение. При построении кривой 1 на рис. 6 использовали минимальные экспериментальные значения ударной вязкости образцов Шарпи исследуемой зоны сварного соединения.

Расчетная теоретическая деформационная кривая $\delta_{1c}^{(t)}$, соответствующая температурному сдвигу 20 °С, представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, полученная точка пересечения кривых 2 и 3 также практически совпадает с температурой хрупковязкого перехода, где начинается стабильное подрастание трещины.

Вязкость разрушения низколегированных конструкционных сталей. Рассмотрим результаты исследований характеристик вязкости δ_c (δ_{1c}) в плоскости проката конструкционных сталей марок 09Г2С, 10ХСНД, 14Г2АФ.

Механические свойства и показатель деформационного упрочнения n^p , вычисленный по формуле (2), исследуемых конструкционных сталей в плоскости проката представлены в табл. 4.

Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 5.

Для определения характеристик трещиностойкости и значений ударной вязкости стали 10ХСНД

Таблица 6. Результаты испытаний образцов Шарпи на ударный изгиб (ориентация образцов поперек проката)

Марка стали	t, мм	T _{исп} , °С	a _v , Дж/см ²	a _v ^{max} , Дж/см ²	ΔT, °С
10ХСНД	25	+20	82; 80; 68	82	24
		0	63; 59		
		-30	30; 28; 26		
		-60	21; 18		
10ХСНД	37	+20	210; 192; 181	210	17
		0	175; 150; 131		
		-20	106; 85; 78		
		-40	72; 58; 51		
		-60	52; 47; 35		
09Г2С	19	+20	315; 198; 196	315	20
		-20	155; 87; 75		
		-40	92; 55; 52		
		-60	72; 14; 7		
		-70	22; 16; 15		
09Г2С-Ш	70	+20	>375	>375	1
		0	>375		
		-20	>375		
		-30	>375; 300; 314		
		-40	234; 285; 282		
14Г2АФ	36	-60	212; 207; 229	256	6
		-80	20; 15; 9		
		+20	256; 256		
		0	205; 196; 161		
		-40	150; 97; 92		
		-70	61; 51; 15		

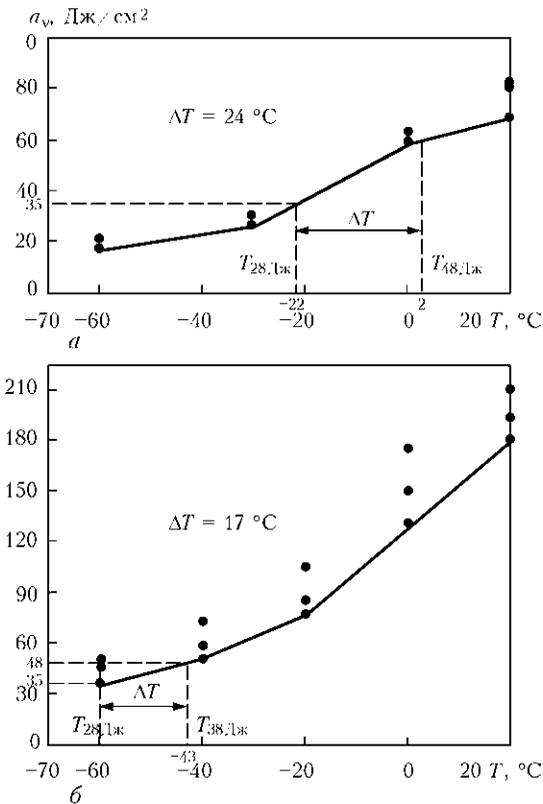


Рис. 7. Температурная зависимость ударной вязкости листового проката стали марки 10XСНД толщиной 25 (а) и 37 мм (б) (обозначения те же, что и на рис. 5)

в плоскости проката (с толщинами листа 40 и 25 мм) изготовили образцы для оценки характеристики δ_c толщиной 37 и 25 мм в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.506–85 (тип 4). Аналогично из конструкционных сталей 09Г2С, 09Г2С-Ш и 14Г2АФ для оценки характеристики δ_c изготовили образцы толщиной 19, 70 и 36 мм соответственно. Образцы Шарпи для данных материалов вырезали из центральной части металлопроката по толщине с ориентацией надреза в том же направлении, что и для оценки характеристик вязкости δ_c .

Таблица 7. Результаты оценки характеристик трещиностойкости δ_c (δ_{1c})

Марка стали	t, мм	f(β) по (5)	T _{28 Дж} , °C	α _v ^{T_{28 Дж}+ΔT} , Дж/см ²	T _{сеп} ^Т , °C	δ _c (δ _{1c}), мм
10XСНД	25	1,73	-22	60	-20	0,365
					-40	0,040
					-53	0,115
					-60	0,038
10XСНД	37	1,36	-60	48	-25	0,227
					-40	0,099
					-60	0,117
09Г2С	19	1,90	-48	66	+20	(0,500)
					+20	(0,480)
					+20	(0,480)
					-37	0,475
					-40	0,515
					-40	0,545
					-51	0,305
					-53	0,190
					-60	0,125
-63	0,480					
09Г2С-Ш	70	1,16	-77	40	-65	0,950
					-73	0,373
					-74	0,133
					-75	0,202
14Г2АФ	36	1,44	-62	50	+20	(0,305)
					-40	0,300
					-53	0,190

Результаты испытаний на ударный изгиб представлены в табл. 6 и на рис. 7, 8.

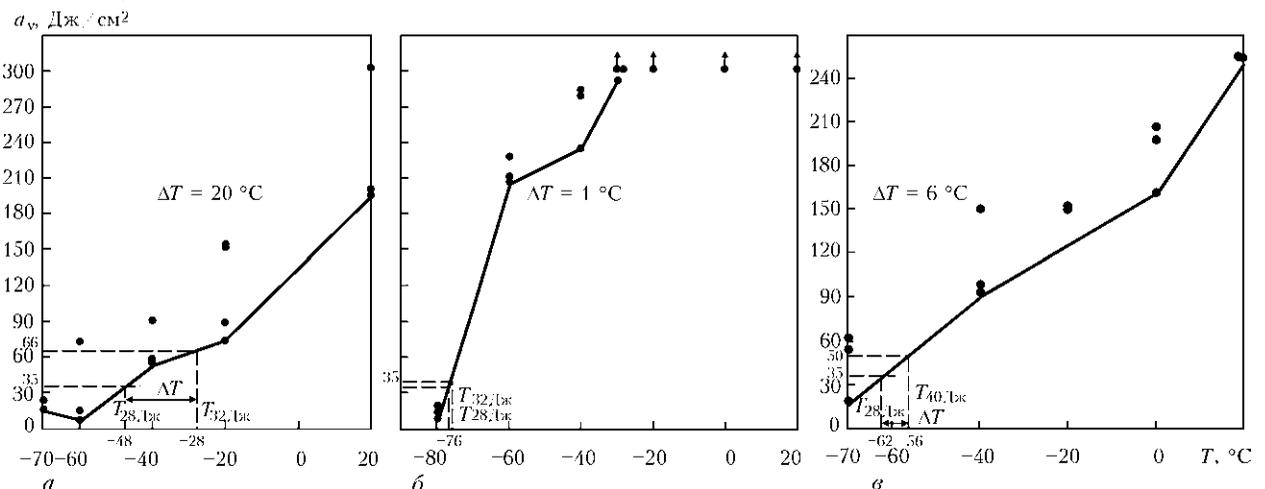


Рис. 8. Температурные зависимости ударной вязкости листового проката стали марки 09Г2С толщиной 19 мм (а), 09Г2С-Ш толщиной 70 мм (б) и 14Г2АФ толщиной 36 мм (в) (обозначения те же, что и на рис. 5)

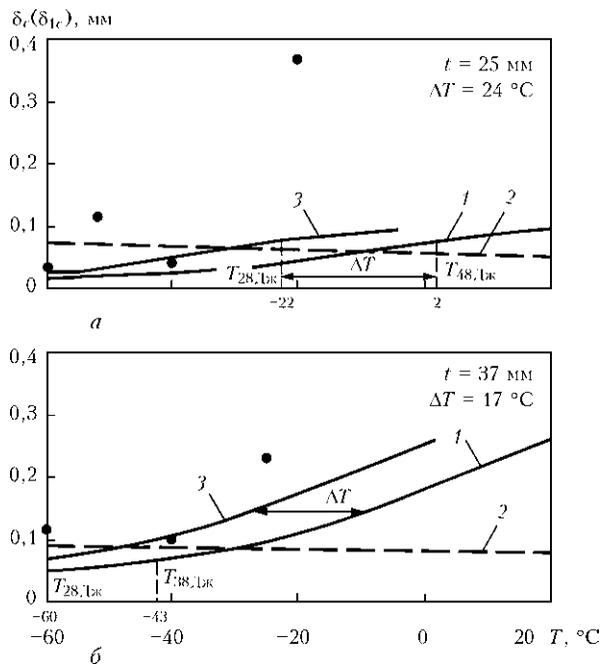


Рис. 9. Температурная зависимость характеристик трещиностойкости проката из стали 10ХСНД: 1 — расчетная кривая δ_{1c} по формуле (1); 2 — условие по формуле (10); 3 — кривая $\delta_{1c}^{(0)}$ по формуле (7)

Как видно из табл. 6 и рис. 7, исследуемый металлопрокат стали марки 10ХСНД толщиной 25 мм характеризуется крайне низкими значениями работы разрушения a_v^{max} и повышенной температурой для удовлетворения требования в 28 Дж.

Значение δ_c определяли при статическом нагружении образцов в условиях поперечного трехточечного изгиба в температурном интервале от -75 до $+20$ °С. Измерение перемещений берегов трещины осуществляли двумя датчиками смещения. Результаты испытаний приведены в табл. 7 и на рис. 9, 10. Необходимо также отметить, что характеристики вязкости δ_c при температурах ниже -20 °С определяли по максимальной нагрузке.

Для определения δ_i при вязком разрушении сталей 09Г2С и 14Г2АФ во время испытаний образцов при комнатной температуре фиксировалось стабильное подрастание трещины Δl , после

чего по результатам испытания нескольких образцов оценивали значение критического раскрытия трещины, соответствующее началу вязкого разрушения [9, 10].

Скорректированная расчетная характеристика вязкости разрушения $\delta_{1c}^{(0)}$ полученная путем температурного сдвига кривой 1 на величину ΔT в соответствии с табл. 7, показана на рис. 9, 10.

Как видно из представленных данных, предлагаемые расчетные значения $\delta_{1c}^{(0)}$ также довольно хорошо описывают экспериментальные значения деформационной характеристики δ_c по нижней границе их разброса в зависимости от толщины исследуемого образца. Это свидетельствует о правильности выбранных характеристик, влияющих на условие перехода от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию зависимости от толщины исследуемого элемента.

Что касается изменения температурного сдвига S по стандарту ASTM E 1921–97, то, несмотря на общую тенденцию к уменьшению значения ΔT при увеличении толщины исследуемых образцов, прямой зависимости между этими двумя характеристиками не наблюдается. Полученные экспериментальные значения ΔT в зависимости от толщины исследуемых образцов на трехточечный изгиб представлены на рис. 11. Как видно из рисунка, регламентируемый температурный сдвиг S по стандарту ASTM E 1921–97 только ограничивает температурную область поиска значений, соответствующих $K_{Jc} = 100$ МПа·м^{0,5}, так как описывает только средние значения экспериментальных данных.

В целом следует отметить, что по результатам экспериментальной проверки при определении температурного сдвига с помощью предложенного подхода в работе [1] следует учитывать деформационные и прочностные характеристики материала. Это дает возможность более обоснованно подходить как к выбору температурного сдвига, так и к определению температурного перехода с учетом толщины конструктивного элемента.

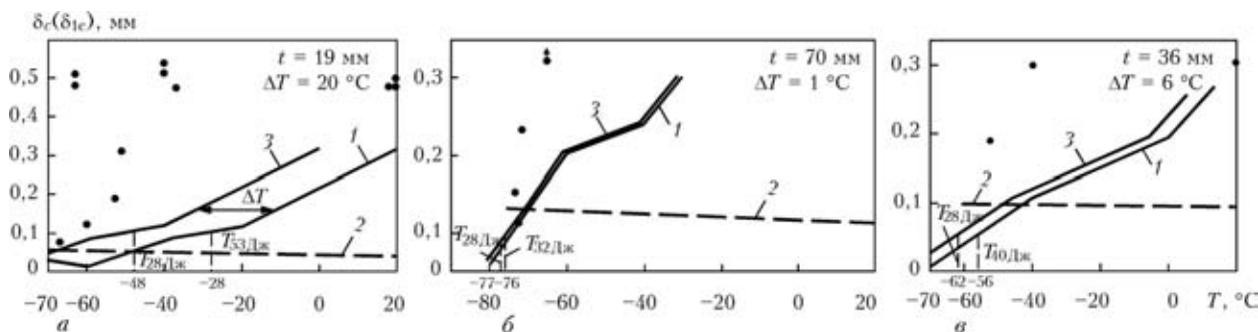


Рис. 10. Температурная зависимость характеристик трещиностойкости проката: а — сталь 09Г2С; б — сталь 09Г2С-Ш; в — сталь 14Г2АФ: 1–3 — то же, что и на рис. 9

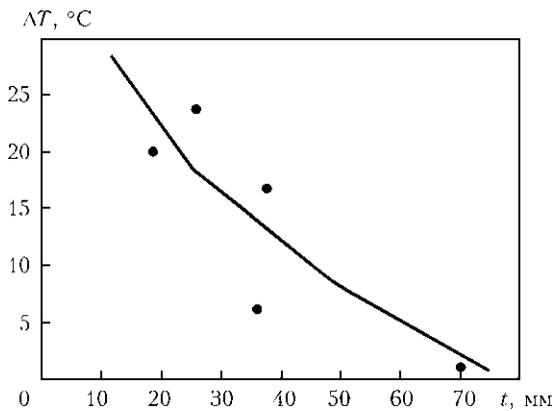


Рис. 11. Зависимость температурного сдвига ΔT от толщины исследуемых образцов на трехточечный изгиб при статическом нагружении: кривая — рекламентируемый температурный сдвиг C по стандарту ASTM E 1921-97; точки — экспериментальные значения ΔT

1. Дядин В. П. Оценка величины температурного сдвига в зависимости от толщины образца по силовому и деформационному критериям механики разрушения // Автомат. сварка. — 2010. — № 4. — С. 19–27.
2. Гиренко В. С., Дядин В. П. Корреляция характеристик трещиностойкости материалов и сварных соединений с

- результатами стандартных механических испытаний // Там же. — 1990. — № 6. — С. 1–4.
3. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Там же. — 2004. — № 4. — С. 24–29.
 4. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
 5. Thickness effects on brittle fracture toughness of weld metal of high tensile strength steel / S. Kawano, M. Tada, H. Yajima, K. Nagai // Trans. Jap. Weld. Soc. — 1987. — 18, № 1. — P. 68–76.
 6. CAN/CSA-S473-92. Canadian standard association. Steel structures. — Pt/III: Of the cod for the design, construction and installation of fixed offshore structures. — 1992.
 7. Правила классификации и постройки ПБУ и МСП / Российский морской регистр судоходства. — С.-Пб.: РМРС, 2006.
 8. Горынин И. В., Ильин А. В. Теоретические и экспериментальные исследования сопротивляемости хрупким разрушениям сварных конструкций для шельфа Арктики // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 24–29.
 9. Вязкость разрушения металла сварных швов с пределом текучести 600...800 МПа, выполненных в защитных газах / В. Ф. Мусияченко, Л. И. Миходуй, В. И. Кирьян и др. // Там же. — 1988. — № 6. — С. 39–44.
 10. Критическое раскрытие трещины при квазихрупком и хрупком разрушении / С. В. Серенсен, В. С. Гиренко, В. И. Кирьян, В. А. Дейнега // Там же. — 1975. — № 2. — С. 1–6.

Investigation results on fracture toughness based on the deformation criterion are given for the most common domestic low-alloy structural steels of different thicknesses. An approach to evaluation of the tough-brittle transition temperature depending on the thickness of the investigated rolled metal is suggested. Shift of the basic deformation δ_{1c} -curve depending on the thickness of the rolled metal and its standard strength characteristics was experimentally verified.

Поступила в редакцию 25.05.2010

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ОТВЕРСТИЙ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

(Инновационный проект НАН Украины, выполненный в ИЭС им. Е. О. Патона)

Разработана технология восстановления поврежденных резьбовых отверстий М20 шеек осей железнодорожных вагонов РУ1-Ш методом взрывного плакирования. Технология характеризуется низкой затратностью (по сравнению со сваркой плавлением), равнопрочностью сварных соединений, отсутствием в них трещин, характерных для технологии восстановления наплавкой, а также отсутствием пор, непроваров, подрезов и шлаковых включений, усадки сокращения и уменьшения диаметра посадочного места шейки оси под роликовый подшипник.

На первом этапе работы объектом исследования были поврежденные резьбовые отверстия М20-6Н фрагментов шеек осей РУ1-Ш длиной 180 мм, на втором — поврежденная резьба на натуральных осях длиной 1450 мм. Покрытие методом взрывного плакирования наносили на предварительно расточенный канал диаметром 20,4 мм цилиндрической трубки из стали 20. Вместе с ГП «Украинский НИИ вагоностроения» разработана оригинальная методика механических испытаний сварных соединений восстановленных резьбовых отверстий. Тесты на сопротивление усталости сварных соединений, проведенные при минимальных и максимальных усилиях нагрузки (49 и 98 т и частоте 50 Гц), показали средние значения долговечности в 122000 циклов, которые всего на 4 % ниже базовых значений долговечности новых осей, составляющих 127000 циклов.

По новой технологии восстановлены поврежденные отверстия на двух натуральных осях РУ1-Ш, переданных на ГП «Укрспецвагон» и включенных в состав исследовательской вагонной тележки, которая проходит маршрутные испытания на станции Панютино–Лозовая на протяжении 2011 г. По завершении испытаний представленная технология планируется к внедрению на вагоноремонтных заводах ГП «Укрзалізниця».



ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКОВОЙ КОРКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ (Обзор)

Ч. 2. ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКОВОЙ КОРКИ*

С. И. МОРАВЕЦКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализировано влияние различных частных факторов на отделимость шлаковой корки при автоматической дуговой сварке. Установлено, что флюс, разрабатываемый для автоматической дуговой сварки соединений большой толщины в узкую разделку, должен обеспечивать формирование шлаковой корки, имеющей как можно более низкую прочность и как можно более высокий коэффициент термического линейного расширения. Приведена краткая характеристика существующих экспериментальных методов оценки отделимости шлаковой корки.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, многопроходная сварка, узкая разделка, легированные стали, шлаковая корка, отделимость, химическое сцепление, фазовый состав шлака, химический состав шлака, окислительный потенциал

Трудность удаления шлаковой корки при сварке толстостенных стыковых соединений легированных сталей в узкую разделку определяется химическим сцеплением шлака с металлом шва и механическим удерживанием корки. Механизм химического сцепления был сформулирован в 1-й части настоящей работы [1].

Механическое удерживание корки на поверхности сварного соединения может иметь место независимо от наличия или отсутствия химического сцепления. В некоторых случаях такие геометрические особенности металлической поверхности, как углубления, могут заполняться жидким шлаком, который при охлаждении застывает, что при удалении корки вызывает ее так называемое механическое заклинивание. Причиной этого могут быть нарушения технологии сварки, которые влекут за собой образование таких дефектов, как несплавления, подрезы, грубая чешуйчатость шва. Однако во многих случаях условия, вызывающие механическое удерживание корки, возникают даже при неуклонном соблюдении технологии сварки из-за разделки кромок. В процессе заполнения кромок свариваемых деталей сближаются (разделка сужается), что обуславливает фиксацию и сжатие шлаковой корки в разделке. Последнее, очевидно, будет иметь место, если сближение кромок превысит значение поперечного сокращения шлаковой корки.

При сварке действует множество частных факторов, которые влияют на полноту реализации обоих механизмов ухудшения отделимости шлаковой корки (как на химическое ее сцепление, так и механическое удерживание). Знание роли и характера влияния указанных факторов на отделимость шлаковой корки весьма важно при разработке флюса для многопроходной сварки в узкую разделку легированных сталей. В связи с этим представляет интерес анализ результатов прикладных исследований влияния наиболее значимых факторов на отделимость шлаковой корки.

Путем изменения параметров режима сварки можно заметно влиять на отделимость шлаковой корки. При сварке низкоуглеродистой стали рост погонной энергии приводит к увеличению времени контактирования размягченного шлака с закристаллизованным металлом шва. При этом толщина оксидной прослойки возрастает, а отделимость шлаковой корки ухудшается. Снижение напряжения на дуге уменьшает количество расплавленного шлака и способствует улучшению отделимости шлаковой корки [2]. Однако технология сварки низколегированных ограниченно свариваемых сталей предполагает изменение параметров режима в достаточно узких пределах, а также наличие сопутствующего подогрева. В связи с этим при сварке данных сталей указанные закономерности не имеют практического значения.

Выявлена корреляция между характером отделимости шлаковой корки, адгезией W и поверхностным натяжением $\sigma_{\text{м-ш}}$ на межфазной поверхности металл-шлак [3]. Экспериментально доказано, что ухудшение отделимости шлаковой корки сопровождается уменьшением межфазного натяжения шлака на границе с металлом, что соответствует повышению способности смачивания

*Начало в журнале «Автоматическая сварка» за 2011 г., № 1.



металла шлаком и интенсификации окислительно-восстановительных процессов на границе металл–шлак [4]. При этом значение адгезии, которое вычисляется по формуле Дюпре, увеличивается

$$W = \sigma_m + \sigma_{ш} - \sigma_{m-ш},$$

где $\sigma_m(\sigma_{ш})$ — поверхностное натяжение металла (шлака) на границе с внешней средой.

Установлено, что при $W > 9 \cdot 10^{-3}$ Н/см отделимость шлаковой корки неудовлетворительная независимо от сочетания шлака и наплавленного металла, при $W < 9 \cdot 10^{-3}$ Н/см она тем лучше, чем меньше значения W .

О влиянии соотношения коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) шлака $\alpha_{ш}$ и металла α_m накоплено немало экспериментальных данных, но выводы, сделанные различными исследователями, противоречивы.

Так, в работах [5, 6] авторы полагают, что наиболее легкое удаление шлаковой корки из разделки обеспечивается при $\alpha_{ш} > \alpha_m$. При $\alpha_{ш} = \alpha_m$ корка не зажата, но следует ожидать некоторого ухудшения ее отделимости. При $\alpha_{ш} < \alpha_m$ удаление корки из разделки тем сложнее, чем больше разность $\alpha_m - \alpha_{ш}$. КТЛР шлаков, как и других оксидных систем, зависит от химического состава и может изменяться в очень широких пределах [5, 6]. Однако существует и противоположное мнение: легкая отделимость шлаковой корки обеспечивается, если $\alpha_{ш} < \alpha_m$. Это утверждение можно найти во многих статьях со ссылкой на работу [7], в которой экспериментальным путем определена отделимость шлаковой корки при использовании электродов ВСП-50 нескольких заводов-производителей при ручной наплавке валиков на стальные пластины. В каждом случае среди прочих параметров измеряли коэффициенты теплового объемного расширения (КТОР) шлаковой корки. При этом выявлено, что у электродов с лучшей отделимостью шлаковой корки значение КТОР шлаков меньше, чем у электродов, имеющих худшую отделимость.

Исходя из упрощенного механизма фиксации шлаковой корки в разделке на основе соотношения $\alpha_{ш}$ и α_m в работе [6] высказывается сомнение относительно полученных результатов [7]. При этом не принимаются во внимание существенные отличия в методике определения отделимости шлаковой корки авторами работы [7]. Однако рассмотрение совместного охлаждения шлаковой корки и пластины с наплавленным валиком все же позволяет считать правильным вывод из работы [7].

Существует также мнение, что с точки зрения отделимости шлаковой корки важны не соотношения вида $\alpha_{ш} \geq \alpha_m$ или $\alpha_{ш} < \alpha_m$, а абсолютная

разность $\alpha_{ш} - \alpha_m$. Отделимость корки при прочих равных условиях тем лучше, чем больше значение $|\alpha_{ш} - \alpha_m|$. На основании гипотезы о локальном закреплении шлака авторы работы [8] усматривают такое влияние КТЛР при наличии химического сцепления шлака с металлом, «укорененного» в границы зерен. Увеличение $|\alpha_{ш} - \alpha_m|$ приводит к росту касательных напряжений на поверхности контакта шлака с металлом при охлаждении, которое способствует разрушению зернограницных связующих «мостиков» между шлаком и металлом.

Довольно основательно изучено полиморфное превращение двукальциевого силиката, реализация которого с положительным результатом апробирована в практике изготовления покрытых электродов [9–11]. Известно, что при охлаждении двукальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$ его высокотемпературная β -модификация, имеющая плотность $3,10 \dots 3,28$ г/см³, превращается в низкотемпературную γ -модификацию плотностью $2,80 \dots 2,97$ г/см³. Превращение не имеет конкретной начальной температуры, в зависимости от условий оно происходит при температуре от 1000 °С до комнатной. Обусловливаемое этим увеличение до 12 % удельного объема шлака и внутренних напряжений в них приводит к самоизмельчению (дикриптации) шлака, что очень благоприятно сказывается на удалении его из разделки.

Исходя из стехиометрического соотношения оксидов в структуре $2CaO \cdot SiO_2$ необходимым условием для возникновения в шлаке этого силиката авторы работ [9, 12] считают соотношение мольных долей $CaO:SiO_2$, близкое к 2, или соотношение массовых долей, близкое к 1,87, или $CaCO_3:SiO_2 = 3,33$. На практике нижний предел соотношения $CaO:SiO_2$, при котором рентгеноструктурным анализом в шлаке обнаруживается $2CaO \cdot SiO_2$ и наблюдается улучшение отделимости шлаковой корки, может составлять до 0,5.

В работе [13] описано полиморфное превращение при $T = 800 \dots 650$ °С в шлаках системы $MgO-SiO_2-BaO-Al_2O_3$, которое сопровождается увеличением удельного объема без дикриптации шлака. В этом случае полиморфное превращение при отделимости шлаковой корки играет отрицательную роль.

Добавка 15 мас. % ZrO_2 к оксидно-фторидной шлаковой системе позволяет значительно улучшить отделимость шлаковой корки при сварке самозащитными порошковыми проволоками [14]. Диоксид циркония, кроме цирконата кальция $CaO \cdot ZrO_2$, образует в шлаке самостоятельную кристаллическую фазу ZrO_2 . При охлаждении происходит ряд полиморфных превращений ZrO_2 с заметным изменением удельного объема новообразованных фаз, что положительно влияет на отделимость шлаковой корки.



Таким образом, полиморфные превращения фаз шлаков, сопровождаемые изменением удельного объема, могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на отделимость шлаковой корки.

Важным фактором отделимости шлаковой корки является ее прочность. Из рассмотренных выше закономерностей вытекает, что ее роль не однозначна, а зависит от вида сварного соединения и наличия химического сцепления шлака с металлом. Низкая механическая прочность шлака способствует более легкому удалению шлаковой корки, зажатой в разделке при наличии и отсутствии химического сцепления, а также с поверхности наплавленного на пластину валика при отсутствии химического сцепления. Высокая механическая прочность шлаковой корки, как считают авторы работы [8], способствует более легкому ее удалению с поверхности наплавленного валика при наличии химического сцепления.

Факторами прочности многофазных систем, частично закристаллизованных или преимущественно кристаллических шлаков, являются соотношения долей кристаллической и аморфной составляющих [2], а также вид и размеры кристаллов. Следует ожидать, что снижению прочности шлаковой корки в первую очередь будут способствовать те явления, которые приводят к появлению в ней структурных напряжений и микродефектов: анизотропия теплового расширения кристаллов, разность КТЛР стеклофазы и сопряженных с ней кристаллов и отдельных кристаллов между собой, склонность кристаллов к полиморфным превращениям с изменением их удельного объема и др. На прочность шлаковой корки заметное влияние оказывает также степень ее компактности [15]. Образовавшаяся в материале сферическая пора является концентратором механического напряжения тем более сильным, чем меньше ее радиус. Подсчитано, что 10%-я пористость уменьшает прочность материала приблизительно вдвое по сравнению со сплошным материалом [16].

Отделимость шлаковой корки является довольно сложным процессом, характер которого обусловлен множеством явлений физико-химической и физико-механической природы. В связи с этим для изучения проблем отделимости шлаковой корки широко применяют общие физические методы исследований. Например, при исследовании шлаков на предмет структурно-размерного соответствия его с металлом шва и его оксидами необходимо в общем случае определить химический состав металла, идентифицировать кристаллические фазы металла, его оксидов и шлаков, определить тип и параметры их кристаллической решетки. Для этих целей применяют методы химического, спектрального, рентгеноструктурного и микрорентгено-спектрального анализа. Фазо-

вый (минералогический) состав шлаков исследуют также методами кристаллооптического анализа и петрографии. Для установления наличия и температуры прохождения в шлаках полиморфных превращений с изменением их удельного объема и определения КТЛР шлаков применяют dilatометрические методы.

Как отмечено выше, прочность шлаковой корки является важным фактором с точки зрения влияния на ее отделимость. Прогнозировать прочность шлаковой корки можно исходя из результатов идентификации фаз шлаков, однако больший интерес представляет ее непосредственная количественная оценка. С этой целью реализуется методика определения прочности шлаковой корки [14].

Методы прямого экспериментального определения отделимости шлаковой корки имеют следующую последовательность: реализация (имитация) исследуемого варианта сварки с участием металлической и шлаковой фаз; процедура удаления шлаковой корки путем силовых действий на нее в форме физического эксперимента с одновременным измерением параметров и результатов этих действий или в форме технологической пробы с констатацией качественных признаков. С помощью этих методов можно определять непосредственно отделимость шлаковой корки как результат аддитивного влияния совокупности факторов, характерных для выбранного технологического варианта сварки.

В силу распространенности в сварочном производстве ручного способа удаления шлаковой корки первые представления о характере отделимости шлаковой корки имели, без сомнения, органолептическое происхождение, и это свойство шлаков представлялось специалистами как качественное. Качественный (балльно-ранговый) метод оценки отделимости шлаковой корки при сварке заключается в том, что исполнитель операции по ее удалению формирует свое мнение об отделимости шлаковой корки исходя из результатов своих непосредственных действий. Определение отделимости на качественном уровне предпочтительно для производства, поскольку оно не требует много времени и специальных средств. Этот метод также используется очень часто в научно-технических работах [1, 2, 6, 12–15, 17].

При решении проблем отделимости шлаковой корки на научно-техническом уровне желательна возможность ее количественного выражения. Один из первых таких методов [18] заключается в том, что с применением исследуемых сварочных материалов выполняется сварка в V-образную канавку на пластине из исследуемого основного металла. После охлаждения образца до комнатной температуры путем трехточечного его изгиба статическим усилием постепенно увеличивают угол между кромками канавки до тех пор, пока шлак



не отделится. Мерой отделимости шлаковой корки авторами работы [18] принят угол γ изгиба пластины, равный увеличению угла между кромками V-образной канавки, при котором шлак отделяется.

Позднее были предложены методы, в которых критерием отделимости шлаковой корки является работа разнообразных динамических нагрузок, передаваемых сварному соединению или шлаковой корке для ее удаления с единицы поверхности металла. Отделимость шлаковой корки в этом случае имеет размерность джоуль на метр квадратный или метр квадратный на джоуль.

Такой метод впервые был предложен И. Н. Ворновицким с сотрудниками [19, 20] и затем получил распространение в практике исследований [9, 21, 22]. Согласно этому методу экспериментальный образец с наплавкой в V-образной канавке и неудаленным шлаком устанавливался на опоры маятникового копра. По тыльной плоскости образца наносили удар подвешенным на маятнике грузом, который двигался под действием силы тяготения. Путем изменения массы и высоты подъема груза дозируют энергию E , которая в результате удара передавалась экспериментальному образцу в целом. Измеряя площадь F металла шва, освободившуюся от шлака в результате ударного воздействия, вычисляли отношение E/F .

В основу метода, изложенного в работе [23], положен принцип удаления корки силой инерции. По этому методу остановка образца, движущегося с некоторой скоростью v , вследствие ударного столкновения с неподвижным упором вызывает удаление шлака массой M с некоторой поверхности точечной наплавки площадью S под действием сил инерции шлака. Деление его кинетической энергии, накопленной перед остановкой, на площадь S дает значение удельной работы отделимости шлаковой корки. Недостатком метода является то, что получение образца не связано с реальной технологией сварки. В связи с этим требуется изучение вопроса о влиянии условий наплавки на отделимость шлаковой корки, поскольку это свойство может зависеть, в частности, от тепловложения, времени существования шлаковой ванны и др. [1].

Общий недостаток методов определения отделимости шлаковой корки [20, 23], а также метода определения прочности шлаковой корки [5] заключается в необходимости установления наименьшего значения энергии силового действия, достаточного для получения запланированного результата эксперимента. Корректное определение наименьшего значения энергии указанными методами возможно только путем многократного повторения эксперимента, при котором энергия силового воздействия постепенно изменяется в то время, как другие факторы остаются неизменными. Это связано с необходимостью получения нес-

кольких номинально одинаковых экспериментальных образцов, что повышает трудо- и материалоемкость исследований.

Следовательно, разработку новых методов количественного определения отделимости шлаковой корки (как и усовершенствование существующих) следует признать актуальной задачей для специалистов в области сварки.

Выводы

1. При сварке легированных сталей возможности улучшения отделимости шлаковой корки за счет варьирования параметров режима сварки ограничены.

2. Для улучшения отделимости шлаковой корки состав сварочного флюса для сварки толстолистовых стыков из легированных сталей следует подбирать таким, чтобы обеспечивать получение шлаковой корки, имеющей как можно более высокий КТЛР и как можно более низкую прочность.

3. Изменение прочности шлаковой корки и улучшение ее отделимости возможно за счет целенаправленного влияния на особенности ее микро- и макроструктуры, в частности, благодаря наличию фаз, склонных к полиморфным превращениям, что приводит к саморассыпанию шлака.

4. Большинство методов прямого экспериментального определения отделимости шлаковой корки имеет повышенную трудо- и материалоемкость, что препятствует их широкому применению. Сохраняется актуальность разработки методов количественного определения отделимости шлаковой корки при сварке. В настоящее время наиболее распространен качественный метод ее оценки по валиковой пробе.

1. Моравецкий С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке. Ч. 1: Механизм химического сцепления шлака с металлом шва // Автомат. сварка. — 2011. — № 1. — С. 32–36.
2. Об отделимости шлаковой корки при автоматической сварке под флюсом / Д. М. Рабкин, Ю. Н. Готальский, Е. С. Куделя, В. В. Подгаецкий // Там же. — 1950. — № 3. — С. 10–27.
3. Якобаивили С. Б. Межфазное натяжение сварочных флюсов и его влияние на отделимость шлаковой корки // Там же. — 1962. — № 9. — С. 37–39.
4. Якобаивили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков. — Киев: Техніка, 1970. — 208 с.
5. Подгаецкий В. В. Механическое удерживание шлака на шве при автоматической сварке // Автомат. сварка. — 1950. — № 6. — С. 30–40.
6. Ворновицкий И. Н., Медведев А. З., Черкасский А. Л. О влиянии коэффициента теплового расширения шлака на его отделимость от металла шва // Свароч. пр-во. — 1973. — № 3. — С. 35–37.
7. Гринберг Н. А., Рогова Е. М. Факторы, влияющие на отделимость шлаковой корки от шва // Там же. — 1960. — № 11. — С. 18–20.
8. К вопросу о влиянии температурного коэффициента линейного расширения на отделимость шлаковой корки / О. С. Волобуев, Н. Н. Потапов, Ю. С. Волобуев, А. В. Еришов // Там же. — 1989. — № 8. — С. 37–39.



9. Походня И. К., Карманов В. И., Упырь В. Н. Отделимость шлаковой корки электродов с основным покрытием // Автомат. сварка. — 1980. — № 11. — С. 33–34.
10. Ворновицкий И. Н., Савельев В. Г., Сидлин З. А. Реализация силикатного распада в сварочных шлаках // Свароч. пр-во. — 1997. — № 5. — С. 11–12.
11. Ворновицкий И. Н., Савельев В. Г. Особенности изготовления электродов с саморассыпающимся шлаком // Там же. — 2001. — № 5. — С. 46–49.
12. Особенности разработки флюса для сварки в узкую разделку / Б. И. Лазарев, М. М. Тимофеев, Н. Н. Потапов, С. А. Курланов // Там же. — 1979. — № 5. — С. 21–23.
13. Development of the narrow gap submerged arc welding process — NSA process / Yukio Hirai, Masaaki Tokuhisa, Itaru Yamashita et al. // Kawasaki Steel Techn. Rep. — 1982. — № 5. — P. 81–93.
14. Мойсов Л. П., Митряшин Л. Л., Бурyleв Б. П. Исследование фазового состава оксидно-фторидных шлаков и их отделимости от металла // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1990. — Вып. 24. — С. 82–85.
15. Wittung L. Some physical and chemical properties of welding slags and their influence on slag detachability // Weld pool chemistry and metallurgy: Intern. conf., London, Apr. 15–17, 1980. — London, 1980. — Vol. 1. — P. 83–92.
16. Павлушкин Н. М. Основы технологии ситаллов. — М.: Стройиздат, 1972. — 360 с.
17. Отделимость шлаковой корки от аустенитного металла шва / И. В. Павлов, А. А. Косенко, В. И. Гуревич, А. Ю. Мышкин // Свароч. пр-во. — 1986. — № 7. — С. 37–38.
18. А. с. 407686 СССР, МКИ¹ В 23 К 29/00. Способ оценки отделимости шлакового покрытия / В. Н. Липодаев, В. А. Бойко, Ю. Н. Каховский, Л. С. Захаров. — Опубл. 10.12.73; Бюл. № 47.
19. А. с. 407685 СССР, МКИ¹ В 23 К 29/00. Способ оценки отделимости шлакового покрытия от поверхности металла сварного шва / И. Н. Ворновицкий, А. З. Медведев, А. Л. Черкасский. — Опубл. 10.12.73; Бюл. № 47.
20. Ворновицкий И. Н., Малашинок В. А., Черкасский А. Л. Методика количественной оценки отделимости шлака // Свароч. пр-во. — 1975. — № 2. — С. 47–48.
21. Шоно С. А., Кассов Д. С., Карпенко В. М. Оценка шлаковых систем порошковой проволоки по отделимости шлаковой корки // Автомат. сварка. — 1976. — № 3. — С. 22–24.
22. Гринь А. Г., Бозуцкий А. А. Методика оценки отделимости шлаковой корки // Там же. — 1996. — № 3. — С. 58–59.
23. Методика количественной оценки отделимости шлаков / С. А. Курланов, Н. Н. Потапов, А. В. Баженов и др. // Свароч. пр-во. — 1986. — № 7. — С. 39–40.

Influence of various separate factors on slag crust separation in automatic arc welding was analyzed. It is established that the flux developed for narrow-gap automatic arc welding of thick metal joints should ensure formation of slag crust with as low as possible strength and as high as possible coefficient of thermal linear expansion. Brief characteristic of the currently available methods of experimental evaluation of slag crust separation is given.

Поступила в редакцию 07.04.2010

QUATTROJET™ — ИННОВАЦИОННАЯ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНАЯ ГОРЕЛКА

ЭСАБ представляет QUATTROJET™ — кислородно-топливную систему резки совершенно нового типа, позволяющую сделать этот процесс еще более экономичным и продолжить путь к полной автоматизации



Снабженная автоматическим контролем пламени новая кислородно-топливная горелка распознает любое потенциальное нарушение процесса резки и автоматически останавливает подачу газа. Таким образом, в отличие от традиционных систем машина для резки не требует постоянного контроля оператора, так как любая утечка топливного газа и кислорода эффективно предотвращается. Устройство контроля пламени реагирует на любые дефекты в обрабатываемом материале и на любые неисправности режущего инструмента.

Эта контрольная система повышает безопасность операторов и рабочих, окружающей среды и машин, улучшая также качество автоматической резки.

Для того чтобы обеспечить правильное расстояние между режущим соплом и заготовкой, в QUATTROJET встроено устройство, определяющее высоту. Таким образом, нет необходимости устанавливать дополнительный датчик отдельно на горелке.

Обычные системы контроля такие, как кольца, очень быстро изнашиваются и нуждаются в регулярной замене. Компактная кислородно-топливная горелка QUATTROJET имеет и другие функции — внутреннюю систему воспламенения, защищенную от грязи и повреждения, и устройство для быстрой замены сопла без использования инструментов.





ПРИЧИНЫ ВТОРИЧНОГО УПРОЧНЕНИЯ В Cr–Mo–V ШВЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

П. МОГИЛА, И. ГЛАВАТИ, П. ТОМЧИК

(VSB — Технический университет г. Остравы, Чешская Республика)

Представлены результаты микроструктурного анализа, который дает количественную оценку изменений в дисперсной фазе металла шва системы Cr–Mo–V при длительном тепловом воздействии в диапазоне предползучести. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что изменения в дисперсии MX частиц при длительном тепловом воздействии являются значительными.

Ключевые слова: жаропрочные низколегированные стали, хромомолибденовые швы, диапазон предползучести, вторичное упрочнение, карбиды ванадия и карбонитриды, микроструктурный анализ, анализ изображения

Низколегированные жаропрочные стали типа 0,5 % Cr–0,5 % Mo–0,3 % V используются для изготовления труб малого и большого диаметров в энергетике, их длительная жаропрочность, которая выражается как длительная прочность (ДП) после 10^5 ч, значительно выше по сравнению со сталями 2,25 % Cr...1 % Mo. Характерным для жаропрочных сталей, содержащих ванадий, является их сложная технологическая обработка, обусловленная доминирующим влиянием дисперсионной фазы на механические свойства таких сталей. Параметры дисперсионной фазы являются очень чувствительными к тепловой обработке. Ключевую роль в Cr–Mo–V сталях играют карбиды ванадия и карбонитриды (частицы MX), которые в основном выделяются при отпуске.

Однако при длительном тепловом воздействии количество, средний размер и среднее расстояние между частицами изменяется, что существенно влияет на механические свойства, следовательно, на продолжительность, а также эксплуатационную надежность энергетического оборудования. Функционирование испытываемой стали 14MoV6-3 в температурном интервале предползучести (максимально 480 °C) приводит к вторичному упрочнению, которое сопровождается понижением ударной вязкости. Особенно заметно вторичное упрочнение проявляется в сварных соединениях, отпущенных при температуре, ниже указанной в технических условиях на материал, т. е. ниже 720 °C. На рис. 1 представлены изменения твердости и ударной вязкости металла шва, отпущенного при температуре 680 °C. Механические свойства определяли в соответствии с действующими стандартами [1]. Для подтверждения дополнительного выделения частиц MX в металле

шва стали 14MoV6-3 выполнен микроанализ с использованием электронной микроскопии.

В качестве материала для исследования использованы образцы металла шва, отпущенные при температуре 680 °C и после соответствующего теплового воздействия. Параметры моделированного теплового воздействия следующие:

образец 1.0 — начальное состояние; 1.11 — после отжига 500 °C (23,4 ч); 1.1 — после отжига 550 °C (50,4 ч); 1.20 — после отжига 550 °C (546,5 ч).

Режимы обработки и твердость данных образцов показаны на рис. 2. Параметры моделированного теплового воздействия пересчитаны для рабочей температуры 450 °C.

Структурно-фазовый анализ металла шва. Микроструктура металла шва состоит из смеси феррита и бейнита. Электронно-микроскопическое исследование выполнили с помощью просвечивающего электронного микроскопа типа JEM 200CX, оборудованного анализатором, который работает на основе метода энергетической дисперсии. Идентификацию неосновных фаз выполнили с учетом анализа дифракции электронов и качественного энергорассеивающего анализа частиц, которые присутствуют в экстракционных угольных репликах. Тонкие металлические фоль-

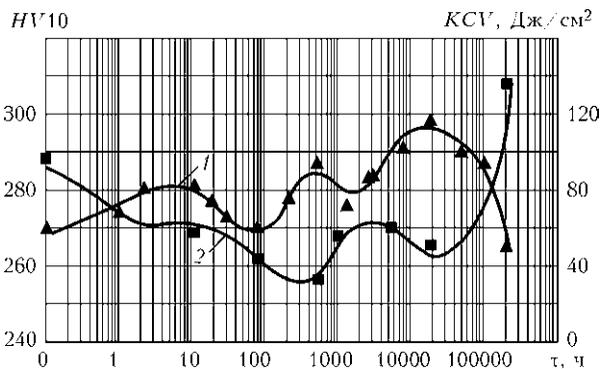


Рис. 1. Твердость (1) и ударная вязкость (2) металла шва при рабочей температуре 450 °C, предварительно отпущенного при 680 °C (2 ч)

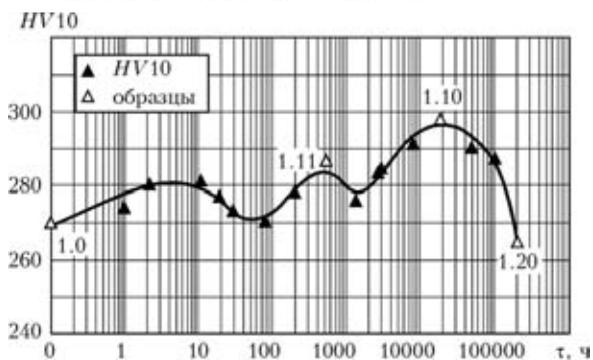


Рис. 2. Микротвердость и отбор образцов для электронного микроструктурного анализа (отпуск при 680 °С (2 ч) рабочая температура 450 °С)

ги подготовили с помощью струйной полировки в электролите (95 % CH_3COOH и 5 % HClO_4) при комнатной температуре и напряжении $U = 80$ В.

Результаты исследования неосновных фаз следующие: у образца 1.0 — MX , M_3C ; у образца 1.11 — MX , M_3C ; у образца 1.1 — MX , M_3C ; у образца 1.20 — MX , M_3C . Очевидно, что все образцы включали частицы цементита и MX , где $\text{M} = \text{V}$, $\text{X} = \text{C}$, N . Типичный пример распределения выделений в экстракционных угольных репликах представлен на рис. 3. Тонкодисперсные включения MX выделялись внутри ферритных и бейнитно-ферритных зерен, тогда как относительно крупные частицы цементита, как правило, располагались на бейнитно-ферритной границе. Волнистая морфология частиц MX , наблюдаемая в работах [2, 3], в исследуемых образцах не обнаружена. Более того, металл шва включал большое количество сферических частиц комплексных оксидов кремния, марганца и титана.

Плотность дислокации в бейнитно-ферритных пластинах рассчитывали с помощью метода Хема:

$$\rho = \left(\frac{N_1}{L_1} \right) + \left(\frac{N_2}{L_2} \right) \frac{1}{t} X \quad (\text{м}^{-2}), \quad (1)$$

где N_1 , N_2 — количество пересечений двух параллельных линий с дислокациями; L_1 , L_2 — об-

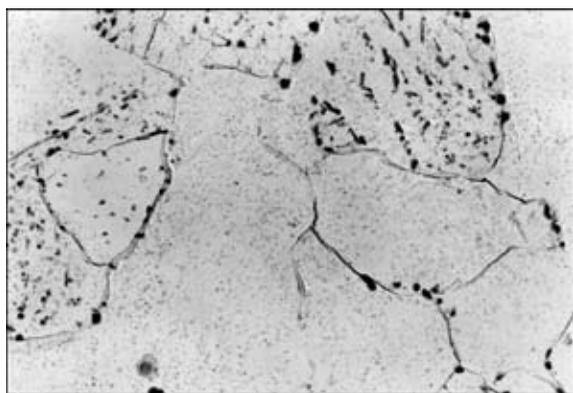


Рис. 3. Микроструктура ($\times 9000$) участка металла шва с выделившимися фазами в экстракционных угольных репликах (образец 1.0)

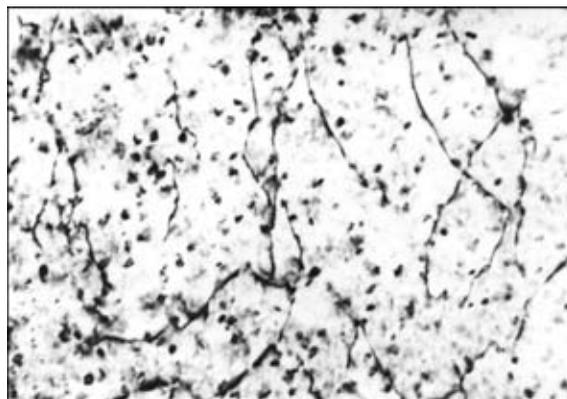


Рис. 4. Дислокационная субструктура металла шва (тонкая фольга, образец 1.20, $\times 109000$)

щая длина линий; t — толщина пленки (выбрали $t = 125$ нм); X — коэффициент, учитывающий долю невидимых дислокаций для выбранных условий отображения дифракции.

Плотность дислокаций в отдельных образцах оценивали при общем увеличении 109000 (рис. 4). Результаты измерения (среднее арифметическое и стандартное отклонение ($\rho \cdot 10^{-14}$, м^{-2})) следующие: у образца 1.0 — $4,91 \pm 0,94$; у образца 1.1 — $4,26 \pm 0,97$; у образца 1.1 — $4,50 \pm 0,66$; у образца 1.20 — $3,60 \pm 0,95$.

Очевидно, что в измеренных образцах различия в плотности дислокации в бейнитно-ферритном металле значительны.

Анализ изображения. Методы анализа изображения позволяют определить такие важные параметры, характеризующие распределение фазы, как средний размер частицы или количество частиц на единицу площади, и далее — рассчитать количество частиц на единицу объема или средний промежуток между частицами. Нашей целью было определить эти параметры для частиц MX , т. е. во время различных стадий длительного теплового воздействия на металл шва в области предползучести. Для этого было выбрано три образца (см. рис. 2). Экстракционные угольные реплики изготовлены из этих трех образцов и впоследствии сняты при увеличении 151000. Снимки образца 1.20 представлены на рис. 5. Все фотографии преобразованы в электронные изображения, которые были подвергнуты анализу с помощью программного обеспечения Micro Image 4. Результатом является набор выходных данных: площадь частицы A_x , максимальный диаметр D_{max} , средний диаметр D_{mean} , минимальный диаметр D_{min} , эквивалентный диаметр частицы d_{ekv} и соотношение площадь частицы — общая площадь снимка P_A , а также количество частиц n_0 , количество снимков и общая исследованная площадь A_0 .

Анализ изображения для каждого образца был выполнен по нескольким снимкам, следовательно,

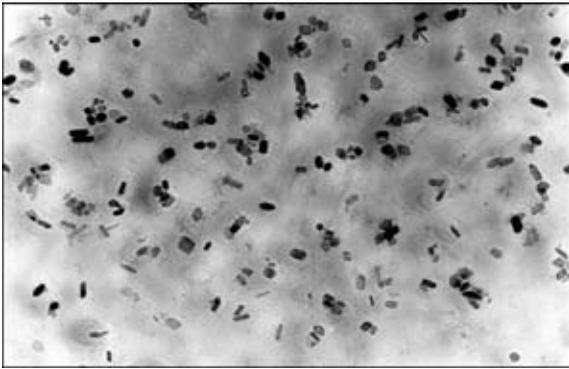


Рис. 5. Распределение частиц МХ в микроструктуре металла шва (бейнит, экстракционная угольная реплика, образец 1.20, ×151000)

общая исследованная площадь A_0 — сумма отдельных участков снимка.

Количество частиц на единицу площади n_s было рассчитано как соотношение количества исследуемых частиц n_0 и исследуемой площади A_0 :

$$n_s = \frac{n_0}{A_0}. \quad (2)$$

Расчет количества частиц на единицу объема выполнили с помощью формулы из статьи Ашби и Эбелинга [4], которая позволяет определять количество, размер и расстояние между частицами вторичных фаз в экстракционных репликах

$$\frac{n_v}{n_s} = \frac{1}{d_{ekv}} \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma}{d_{ekv}} \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

где n_v , n_s — соответственно количество частиц на единицу объема и единицу площади; d_{ekv} — эквивалентный диаметр сферической частицы (среднее арифметическое); σ — стандартное отклонение эквивалентного диаметра.

Эквивалентный диаметр частицы d_{ekv} , представляющий собой диаметр проекции эквивалентной сферической (круглой) частицы на отрезок плоскости такой же площади, как и для площади реальной частицы (общая форма), определяли исходя из измеренной площади частицы A_x по формуле

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4A_x}{\pi}}. \quad (4)$$

Расстояние между частицами определили в соответствии с моделью расположения частиц пос-

редством деления на квадраты, которая очень удобна для оценки дисперсионного упрочнения низколегированной стали [5]. Расчет выполнили с помощью двух альтернативных вариантов согласно работе [6]. В соответствии с данными работы [7] среднее расстояние для кромок частицы определяли из следующего выражения:

$$\lambda = (n_v d_{ekv})^{-1/2} - \sqrt{\frac{2}{3}} d_{ekv}. \quad (5)$$

Согласно данным работы [8] уравнение (5) вследствие совместного взаимодействия участков дислокации после обхода частицы трансформируется следующим образом:

$$\lambda = 0,69(h_v d_{ekv})^{-1/2} - \sqrt{\frac{2}{3}} d_{ekv}. \quad (6)$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

Таким образом, доминирующими процессами, происходящими в металле шва, являются наблюдаемое выделение и укрупнение частиц МХ. Образец 1.1 с наивысшей твердостью во время теплового воздействия (см. рис. 2), характеризуется наличием дополнительного выделения частиц МХ. На это указывает самое высокое количество частиц на единицу объема, наименьший размер и наименьшее среднее внутреннее расстояние между частицами в сравнении с другими образцами. Если сравнивать с начальным состоянием (образец 1.0), количество частиц увеличилось практически в четыре раза, среднее расстояние между частицами сократилось более чем в два раза. Для сравнения, в образце 1.20 наблюдается область укрупнения вторичных частиц, что подтверждается наибольшей средней площадью частицы, значительным уменьшением количества частиц (приблизительно в 4 раза) и практически двойным увеличением среднего расстояния между частицами (если сравнивать с образцом 1.1).

Значительное влияние вторичных фаз на механические свойства стали 14MoV6-3 также подтверждается тем фактом, что плотность дислокации осталась практически неизменной при очевидном тепловом воздействии.

В заключение следует отметить, что характер распределения частиц МХ в сталях 0,5 % Cr–0,5Mo–0,3 % V меняет свои параметры при отпуске стали и последующем длительном тепловом воздействии, что значительно влияет на механические свойства материала. Эксплуатация соеди-

Результаты расчетов n_s , n_v и λ

Номер образца	$A_x, \text{нм}^2$	$d_{ekv}, \text{нм}$	$n_s \cdot 10^{-14}, \text{м}^{-2}$	$n_v \cdot 10^{-22}, \text{м}^{-3}$	$\lambda, \text{нм}$ по [7]	$\lambda, \text{нм}$ по [8]
1.0	168,24 ± 10,59	13,65 ± 0,33	2,13037	1,79595	52,72	32,92
1.1	124,01 ± 3,24	12,10 ± 0,15	7,96117	7,08676	24,26	13,68
1.20	246,10 ± 8,04	16,91 ± 0,29	2,81644	1,82597	43,10	25,46



нений с металлом шва типа 0,5 % Cr–0,5Mo–0,3 % V в диапазоне предползучести вызывает вторичное упрочнение, которое сопровождается деградацией пластических свойств. Такое упрочнение является сильно выраженным, особенно в сварных соединениях, которые были отпущены при более низких температурах отпуска (приблизительно 680 °С). Для сварных соединений стали 14MoV6-3 после сварки рекомендована термообработка при температуре 720 °С.

1. *Krejci L.* Mechanical testing of welded joints // Proc. of seminar «Svarovací den 2006». Hnevkovice–Ostrava: VSB — Technical University of Ostrava, 2006. — P. 40–47.
2. *Schmidova E., Svanda P., Vesely D., Kalendova A.* Mechanism of degradation of stabilised corrosion resistant steel du-

ring the welding Cycle // Anti-corrosion methods and materials. — 2009. — 56, № 4. — P. 206–217.

3. *Bosela M., Vinas J., Varga V.* The analysis of welds-on with resistance against of high area pressure // CO-MAT-TECH 2001: 9th. Intern. scientific conf.: Trnava, 25–26.10.2001. Bratislava: STU, 2001. — P. 186–191.
4. *Ashby M. F., Ebeling R.* On the determination of the number, size, spacing and volume fraction of spherical second-phase particles from extraction replicas // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. — 1966. — Vol. 236.
5. *Prnka T.* Disertation work. — VSB Technical University of Ostrava, VUHZ Dobra.
6. *Purmensky J.* Disertation work. — VSB Technical University of Ostrava, 1978.
7. *Kelly A., Nicholson R. B.* Precipitation hardening // Progress in Material Sci. — 1963. — Vol. 10.
8. *Ashby M. F.* Physics of strength and plasticity. — A. S. Argon, MIT Press, 1969. — 113 p.

The article presents the results of microstructural analysis, which quantifies changes in the dispersion phase in Cr–Mo–V weld metal during heat exposure in the sub-creep range. The hypothesis that changes in the dispersion of MX particles during long-term heat exposure are significant has been confirmed by the presented results.

Поступила в редакцию 07.05.2010

КОМПАНИЯ «THERMADYNE» (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ) ВЫПУСТИЛА НОВУЮ МАСКУ СВАРЩИКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ СВЕТОФИЛЬТРОМ

Компания «Thermadyne» сообщила о запуске нового продукта — маски сварщика с АСФ под торговой маркой TWECO, которая расширяет спектр уже выпускаемых TWECO сварочных аксессуаров и горелок.

Маска имеет следующие особенности:

- **Автоматическое затемнение:** автоматически переключается из светлого состояния в затемненное и от затемненного в светлое
- **Регулируемое затемнение:** степень затемнения регулируется от 9 до 13 раз в соответствии с мощностью дуги
- **Минимальная масса** для повышения удобства работы оператора
- **2 датчика**, быстро реагирующие на сварочную дугу
- **Легкое изменение процесса** со сварки на шлифовку
- **Переключатель времени задержки срабатывания:** длинная/средняя/короткая задержка
- **Широкое поле зрения**
- **Питание от солнечных батарей:** нет необходимости беспокоиться о замене элементов питания
- **Привлекательная цена**



Маска TWECO подвергнута тщательному тестированию, гарантийный срок 2 года.



ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА*

Ю. Н. ТЮРИН, Ю. М. КУСКОВ, Л. И. МАРКАШОВА, доктора техн. наук,
Я. П. ЧЕРНЯК, Е. Н. БЕРДНИКОВА, кандидаты техн. наук, **В. И. ПОПКО, О. С. КУШНАРЕВА,**
Т. А. АЛЕКСЕЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен эксперимент по наплавке высокохромистым чугуном. Установлена возможность влияния на структурообразование наплавленного металла низкочастотных колебаний, частота которых совпадает с частотой собственных колебаний изделия (в условиях резонанса). При этом наплавленный металл имеет большую твердость, а также характеризуется равномерным распределением хрома между дендритами и эвтектикой, меньшими размерами дендритов у линии сплавления. Отмечена более высокая трещиностойкость наплавленного металла.

Ключевые слова: дуговая наплавка, низкочастотные колебания, условие резонанса, структура наплавленного металла, холодные трещины

Деформации и напряжения, образующиеся при наплавке изделий, могут приводить к появлению в металле холодных трещин. Наиболее распространенными способами борьбы с холодными трещинами являются предварительный сопутствующий подогрев, а также замедленное охлаждение. Указанные способы энергоемкие и их применение не улучшает качество наплавки. Так, наплавка высокохромистых чугунов сопровождается образованием поперечных трещин в наплавляемом валике сразу же за зоной прохождения сварочной дуги, и нагрев изделия не гарантирует их отсутствия.

В работе [1] предложены способы повышения сопротивляемости сплавов образованию холодных трещин за счет рациональной системы легирования свариваемых материалов или состава металла шва, выбора исходной структуры стали перед сваркой и др. Однако эти рекомендации сложно использовать при наплавке.

Одним из путей улучшения трещиностойкости сплавов является внешнее воздействие на кристаллизующийся металл. В качестве источников внешних воздействий используют электромагнитные, ультразвуковые, низкочастотные и другие виды колебаний [2–5]. В результате их воздействия получают металл с микрокристаллической структурой, имеющий повышенные механические свойства, что снижает вероятность образования трещин [6].

Разработаны способы сварки, наплавки и снятия напряжений, когда на изделия воздействуют

упругими колебаниями звукового диапазона. Утверждение об эффективности способов сварки, при которых выполняются условия резонанса частот возбуждающей силы и частот собственных колебаний детали, встречается и в других публикациях [7–9]. Однако на практике при использовании этой технологии, как правило, частоту воздействия на свариваемую деталь выбирают произвольно. Эффективность сварки оценивают по структуре наплавленного металла. В работе [10] такой подход характеризуется следующим образом: «... вопрос об оптимальной частоте и амплитуде колебаний расплава с точки зрения достижения максимального измельчения первичной структуры пока еще должен, очевидно, решаться эмпирическим путем с учетом практических результатов уже проведенных работ».

Цель настоящей работы — оценка эффективности низкочастотных резонансных колебаний (НРК) и их влияния на образование трещин в наплавленном высокохромистом чугуне. Указанную оценку осуществляли визуально по количеству трещин в наплавленном металле, а также путем сравнительного анализа его структуры.

Схема наплавки образцов с внешним воздействием НРК приведена на рис. 1. Для наплавки были подготовлены образцы из стали Ст3 размером 50×60×180 мм и массой 6 кг, которые наплавливали на установке АД-231 порошковой проволокой ПП-АН197 диаметром 2,6 мм, обеспечивающей получение наплавленного металла — хромистого чугуна. Длина наплавленного валика составляла 140...150 мм. Режим наплавки был следующим: ток $I = 500$ А, напряжение на дуге $U_d = 28$ В, скорость наплавки $v_n = 20$ м/ч. Образцы не подвергали предварительному подогреву, а после наплавки охлаждали на воздухе. При вы-

* В порядке обсуждения.

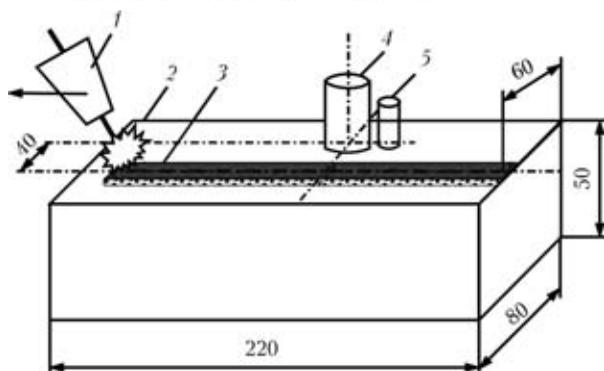


Рис. 1. Схема наплавки образцов с внешним воздействием НРК: 1 — сварочная головка; 2 — образец; 3 — наплавленный на чугуне валик; 4 — возбудитель колебаний; 5 — датчик

полнении наплавки частоту возбуждающей силы изменяли в соответствии с показаниями датчика. Выполнялось условие, при котором датчик показывал максимальную амплитуду колебания образца, что соответствовало совпадению частот внешних и собственных колебаний образца (резонансу). Частота внешних колебаний составляла 136 Гц, мощность — 20 Вт.

Установлено, что наплавка с применением НРК позволяет повысить сопротивляемость, наплавленного металла образованию трещин. Так, при экспериментах лишь в одном из пяти образцов возникла поперечная трещина. Наплавка с НРК не на резонансных частотах (больше или меньше

136 Гц) ожидаемого эффекта не дала: на поверхности валиков было обнаружено до 7...8 поперечных трещин, как и при наплавке без НРК.

Результаты металлографических исследований на оптическом микроскопе показали, что в зоне сплавления основного и наплавленного металла (высокохромистого чугуна) в обоих случаях формируется переходной слой толщиной 8...20 мкм, имеющий аустенитно-мартенситную структуру с четко выраженными иглами, его твердость составляет около $HV\ 7400...7900\ \text{МПа}$ (рис. 2, а, б).

Структура наплавленного металла включает дендриты (легированный аустенит-карбиды) и эвтектику розеточного типа, состоящую из аустенита и карбидов (Cr_7C_3 или FeCr_7C_3), а также продукты распада аустенита (троостита) (рис. 2, в, г).

Применение НРК обеспечило снижение размеров дендритов в наплавленном слое. По мере приближения к зоне сплавления их размеры уменьшаются в 2 раза. Так, средний размер дендритов при применении НРК составляет 5...7 мкм, а без НРК — 13...15 мкм (рис. 3). Непосредственно у линии сплавления толщиной $\delta \approx 100...200\ \text{мкм}$ благодаря воздействию НРК размеры дендритов D_d уменьшились приблизительно до 1...2 (минимально) и 5 мкм (максимально). Аналогичная тенденция к изменению размеров дендритов (имеет место и в эвтектической составляющей структуры разме-

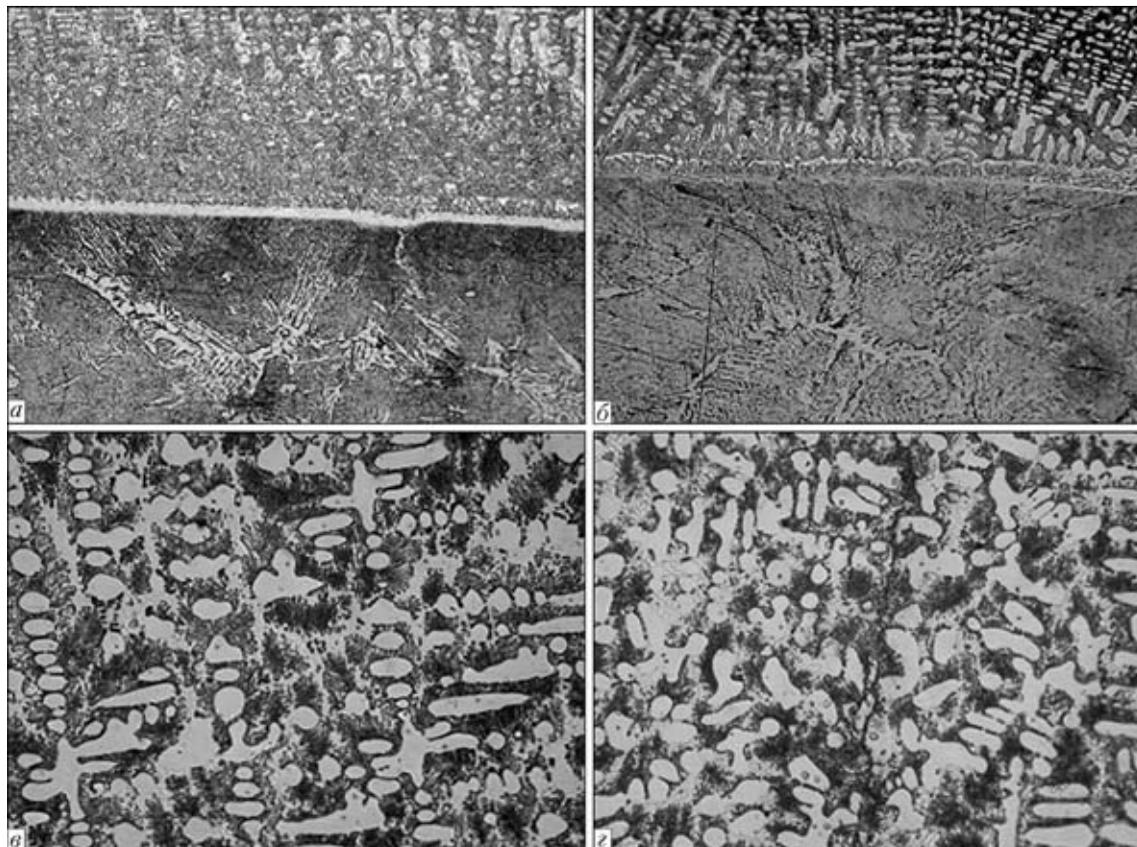


Рис. 2. Микроструктуры зоны сплавления стали Ст3 (а, б, $\times 400$) с наплавленным высокохромистым чугуном (в, г, $\times 1000$), полученные без НРК (а, в) и с использованием НРК (б, г)

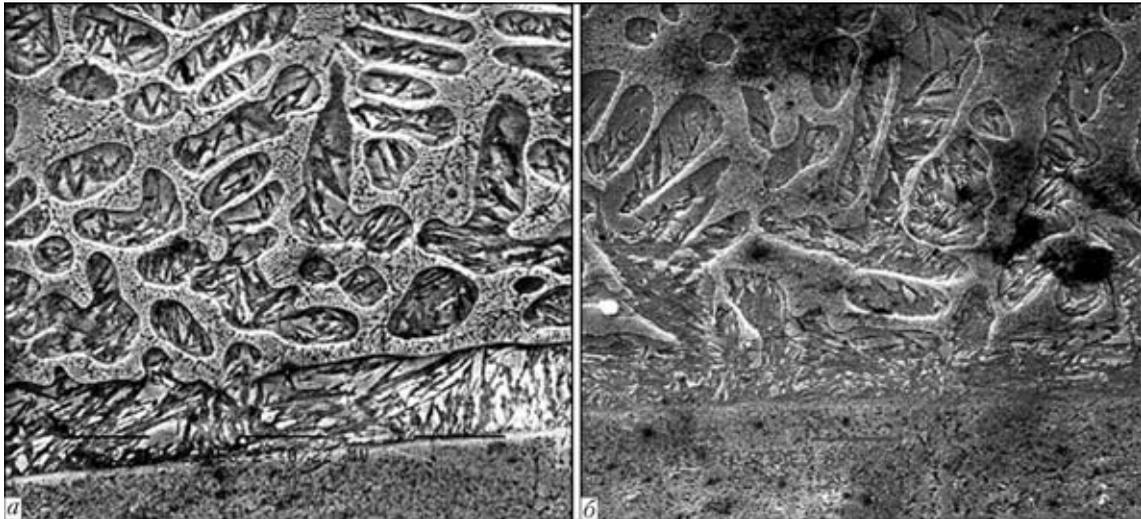


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 2300$) зоны сплавления высокохромистого чугуна при режимах без НРК (а) и с использованием НРК (б), полученные на растровом электронном микроскопе

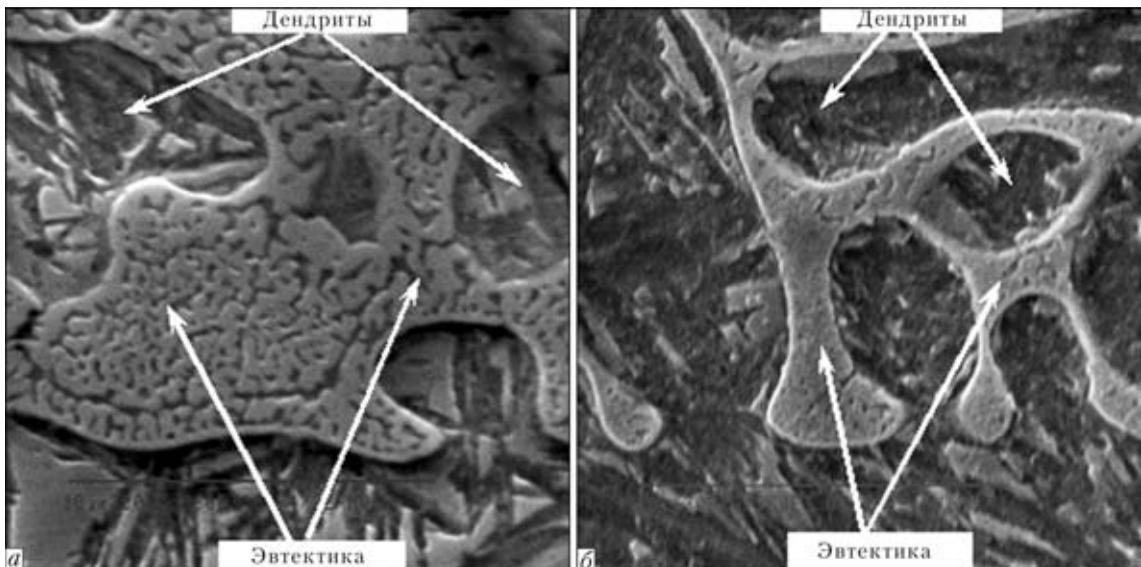


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 9600$) зоны сплавления стали Ст3 с высокохромистым чугуном, иллюстрирующие дендрито-эвтектическую структуру, полученные без НРК (а) и с использованием НРК (б)

ром $D_{\text{эвт}} \approx 15$ (без НРК) и $D_{\text{эвт}} \leq 8$ мкм (с использованием НРК) (рис. 4).

У дендритов, кроме отличия в размерах, наблюдаются различия и в морфологии фазовых составляющих. Так, в структуре наплавленного металла, полученного без НРК, дендриты имеют характерную неравноосную форму (например, размеры 15×10 , 15×13 мкм и т. п.) (рис. 4, а). В случае же применения НРК форма дендритов становится более глобулярной (например, 5×7 мкм) (рис. 4, б). При наплавке без НРК дендриты имеют четко направленную ориентацию — в основном перпендикулярно линии сплавления (столбчатые кристаллы) (см. рис. 2, в).

Использование НРК способствует разориентации границ кристаллов по отношению к линии сплавления; угол разориентации изменяется от 20° и более (см. рис. 2, г). Кроме того, с НРК

дендриты, особенно малого размера, отличаются большей (примерно на 13...40 %) твердостью. Твердость эвтектики также увеличивается приблизительно на 22...48 %.

Усредненные (по 5...10 измерениям) значения массовой доли основного легирующего элемента хрома в дендритах и эвтектике свидетельствуют о том, что его содержание в эвтектике выше, чем в дендритах (таблица). И если химическая неоднородность хрома в наплавленном металле, полученного без НРК составляет 5...8 %, то при воздействии НРК, она равна 1...5 %. Это свидетельствует об усреднении содержания хрома в наплавленном металле при использовании НРК. Кроме того, за счет увеличения содержания хрома (рис. 5) происходит упрочнение зоны сплавления, при этом снижается вероятность образования трещин.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что использование НРК при наплавке



Распределение содержания хрома (приблизительно, мас. %) по глубине наплавленного слоя

Исследуемый участок наплавленного слоя	Режим наплавки			
	без НРК		с НРК	
	Дендриты	Эвтектика	Дендриты	Эвтектика
Поверхность	12,3	17,5	11,5	16,5
Слаботравящаяся зона	10,0	18,8	15,0	16,9
У линии сплавления	10,0	18,0	10,3	14,0...15,6
Линия сплавления	9,0...1,0	9,0...1,0	8,0...4,0	8,0...4,0

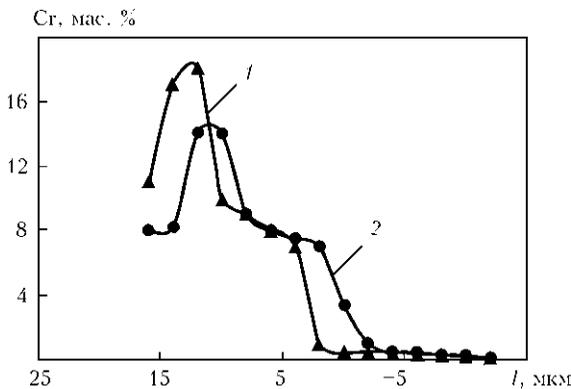


Рис. 5. Зависимость содержания хрома в зоне сплавления от режима наплавки: 1 — без НРК; 2 — с использованием НРК; l — расстояние от линии сплавления

высокохромистого чугуна способствует формированию в структуре наплавленного металла более дисперсных дендритов и эвтектик, причем их дисперсность увеличивается с приближением к зоне сплавления (рис. 6). Применение НРК способствует морфологическим изменениям в структурных составляющих металла. Они приобретают глобулярную форму с дезориентированными границами кристаллов, вследствие чего уменьшаются размеры междендритных областей в местах зарождения трещин — в зоне перехода от основного металла к наплавленному (рис. 6, б). Металл, на-

плавленный с применением НРК, имеет более высокую твердость.

Структура наплавленного металла, полученного без использования НРК, характеризуется наличием у зоны сплавления столбчатых дендритов (рис. 6, а). Как правило, образующиеся в наплавленном металле холодные трещины, имеют четко направленный характер — располагаются вдоль дендритов. При этом ширина раскрытия трещины составляет примерно от 10...20 (у основания трещины) и до 35...85 мкм (по мере ее распространения в глубину наплавленного металла). Формирование трещин происходит преимущественно вдоль границ раздела дендритов с эвтектикой. Трещины главным образом зарождаются в зоне сплавления. Следует отметить, что наплавленный металл у линии сплавления, шириной около 10...20 мкм имеет четко выраженную игольчатую структуру в основном с мартенситной составляющей, что подтверждается очень высокими значениями твердости (около *HV* 7400 МПа). При этом примыкающий к линии сплавления наплавленный металл характеризуется крупнозернистой структурой и невысокой твердостью дендритов (около *HV* 2970...3300 МПа). Эвтектика также имеет низкую твердость (приблизительно *HV* 1400...1430 МПа).

Таким образом, в зоне сплавления твердость изменяется от *HV* 1400 до 7400 МПа, что, по-видимому, и создает благоприятные условия для зарождения трещин.

В ряде случаев трещины образуются и в чугуне, наплавленном с использованием НРК. Но при этом существуют отличия в их размере, характере распространения и ширине раскрытия по сравнению с трещинами, образовавшимися при режиме без НРК (рис. 6, б).

Во-первых, при использовании НРК зарождение трещин происходит не у линии сплавления, а на значительном от нее расстоянии (примерно 125...150 мкм), т. е. в глубине (в объеме) наплавленного металла. Во-вторых, ширина раскры-

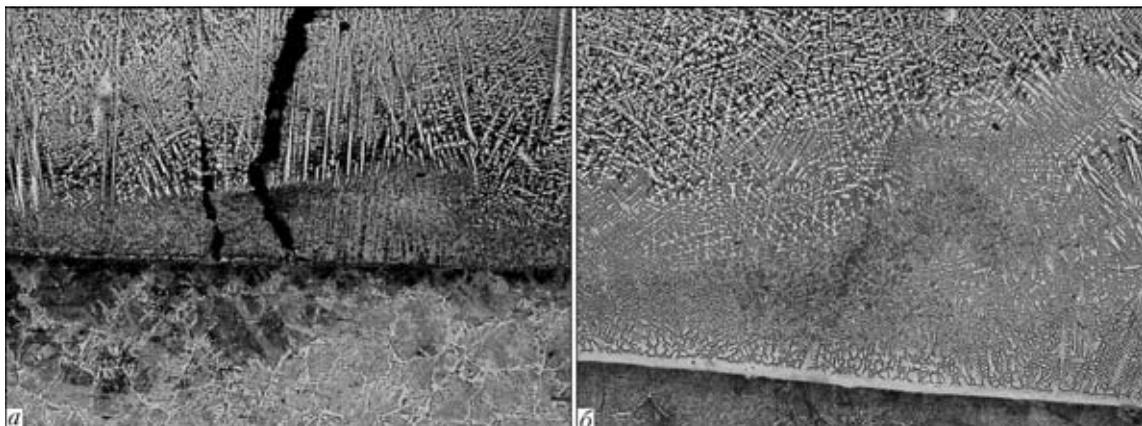


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 300$) типичных мест зарождения трещин в наплавленном высокохромистом чугуне, полученные без использования НРК (а) и с НРК (б)



тия трещины составляет около 2...8 мкм, что по сравнению с наплавкой без использования НРК, меньше в 10...15 раз. В-третьих, распространение трещины имеет извилистый характер, что свидетельствует о значительных барьерах, с которыми она сталкивается, а таковыми являются дисперсные разориентированные структурные составляющие чугуна с повышенной твердостью.

Выводы

1. Вводимые в наплавляемое изделие НРК, частота которых совпадает с частотой собственных колебаний изделия (условие резонанса), оказывают влияние на структуру и механизм образования трещин при наплавке высокохромистого чугуна.
2. Высокохромистый чугун, наплавленный с использованием НРК, отличается большей твердостью, более равномерным распределением основного легирующего элемента хрома между дендритами и эвтектикой, а также меньшими размерами образовавшихся дендритов.
3. В металле, наплавленном с использованием НРК, существенно уменьшается склонность к образованию холодных трещин, характерных для высокохромистого чугуна.
4. Для достижения максимальной эффективности воздействия НРК на кристаллизующийся металл необходимо создание более совершенной автоматизированной аппаратуры, которая способна обеспечить управление частотой внешних ко-

лебаний в зависимости от изменяющихся условий наплавки, массы наплавленного металла и температуры наплавляемого изделия.

1. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
2. Погодин-Алексеев Г. И., Гаврилов В. И. Влияние упругих колебаний на кристаллизацию металлов и сплавов // Изв. АН СССР. Металлы. — 1966. — № 1. — С. 80–101.
3. Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Свароч. пр-во. — 1976. — № 2. — С. 53–54.
4. Рыжов Р. Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов // Автомат. сварка. — 2007. — № 2. — С. 56–58.
5. Руссо В. Л. Исследование воздействия упругих колебаний различных частот на кристаллизацию сварочной ванны // Сварка. — Л.: Судпромгиз, 1958. — С. 3–15.
6. Корытов В. А., Гостица И. А., Бутаков Б. И. Виброимпульсная обработка стали в разливочном ковше — эффективный метод повышения трещиностойкости литого металла // Сталь. — 1995. — № 5. — С. 38–42.
7. Заявка 2003136226/02 РФ, МПК⁷ С 21 Д 1/30. Способ снятия остаточных напряжений сварных соединений сосудов и аппаратов, а также их элементов / Ю. Е. Матюхин. — Заявл. 15.12.2003; Опубл. 20.05.2005.
8. Заявка 2002125911/02 РФ, МПК⁷ В 23 К 9/16. Способ сварки деталей из металла / Б. И. Бурышев. — Заявл. 30.09.2002; Опубл. 27.02.2005.
9. Заявка 2002125910/02 РФ, МПК⁷ В 23 К 9/16. Способ сварки деталей из металла / Б. И. Бурышев. — Заявл. 30.09.2002; Опубл. 27.02.2005.
10. Аристов С. В., Руссо В. Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Свароч. пр-во. — 1982. — № 11. — С. 42–44.

An experiment on high-chromium cast iron surfacing has been performed. Possibility of influence of low-frequency oscillations, the frequency of which coincides with the frequency of characteristic oscillations of the product (under resonance conditions) on deposited metal structure formation was established. Deposited metal has higher hardness, and is also characterized by uniform distribution of chromium between the dendrites and eutectics, and smaller dendrite dimensions at the fusion line. A higher crack resistance of the deposited metal was noted.

Поступила в редакцию 11.06.2010

КАТАЛОГ ЗАВОДА АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ « Д О Н М Е Т »



Завод «Донмет» является крупнейшим в Украине предприятием по проектированию и производству сертифицированного газокислородного оборудования для резки, сварки и пайки металлов.

В каталоге представлена обширная номенклатура выпускаемых предприятием изделий. Среди них: резаки, горелки, клапаны обратные и огнепреградительные, редукторы баллонные газовые, регуляторы расхода, редукторы пищевые, стенд для испытания газопламенного оборудования, комплекты и посты газосварщика.



ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ

С. КАЙТЕЛЬ, д-р-инж., Я. НОЙБЕРТ, инж. (Учеб.-исслед. ин-т, г. Галле (Зале), Германия)

Рассмотрена перспективность применения гибридной лазерно-дуговой сварки для соединения труб при строительстве трубопроводов. Показано, что сочетание гибридной сварки с дуговой позволяет формировать полнопрофильное сечение металла шва при толщине стенки трубы 10 мм. Гибридную сварку также можно успешно применять при выполнении корневого прохода в соединениях труб с притуплением 12...15 мм.

Ключевые слова: дуговая сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, трубопроводы, технология сварки, аппаратура, производительность сварки, монтажные условия

Трубы большого диаметра для нефте- и газопроводов на протяжении многих лет соединяют испытанным и хорошо себя зарекомендовавшим способом дуговой сварки. В зависимости от длины прокладываемого трубопровода, толщины стенки отдельных труб и материала, из которого они изготовлены, применяют различные варианты этого способа сварки — от ручной дуговой штучными электродами (рис. 1) до орбитальной дуговой сварки МАГ, выполняемой на специальных установках. При этом перемещение поста производится сварщиком не вручную, а механически с помощью систем, которые приводятся в действие двигателем, и зажимных приспособлений, расположенных по всему периметру трубы. Если длина трубопровода и профиль местности позволяют, то применяют сразу несколько орбитальных установок, причем каждый отдельный пост предназначен для сварки одного или двух слоев, после чего он перемещается на следующий стык, где продолжается сварка таких же швов. Как правило, каждая установка оснащена несколькими сварочными головками [1]. Такое конструктивное решение свидетельствует о высоком уровне развития оборудования и сварочной технологии, однако характеризуется в то же время большими затратами с точки зрения комплектации и технического обслуживания (рис. 2).

В связи с нехваткой энергоресурсов разработки подземных недр ведутся во все более сложных условиях. При растущих потребностях в надежном энергоснабжении в Германии и Европе остро стоит вопрос о создании новых мощных технологий прокладки трубопроводов, соответствующих современным запросам. Проблемой является то, что применяемые дуговые процессы с точки зрения производительности процесса плавления и скорости сварки достигли уже своего предела

и значительного улучшения в этой области не даст даже оптимизация оборудования.

В этих условиях актуальным является разработка таких высокопроизводительных процессов сварки, которые позволяют сократить количество проходов при многослойной сварке, а также снизить затраты на персонал и оборудование.

Перспективными в плане выполнения этих требований с точки зрения и технологии, и аппаратуры являются сварочные процессы на базе лазера.

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки открывает новые возможности. Оба эти процесса сварки тесно связаны, поскольку и лазерный луч, и дуга взаимодействуют в общей жидкой ван-



Рис. 1. Вид верхнего слоя шва, выполненного на трубе ручной дуговой сваркой



Рис. 2. Монтажная площадка для прокладки трубопровода

не. Совместное воздействие обоих источников энергии и присадочного материала позволяет достичь высокой эффективности процесса сварки. При этом очень важны синергетические эффекты, которые проявляют и усиливают преимущества каждого из двух способов сварки.

Шов получается таким же глубоким, как при лазерной сварке, а перекрытие зазора гораздо лучше. При соединении тонких листов можно достичь очень высокой скорости сварки, иногда во много раз большей, чем при сварке в защитном газе. При сварке более толстых листов преимущество состоит в том, что вместо обычных многослойных швов сварку можно выполнять за один проход и часто без дополнительной разделки кромок. На рис. 3 представлен вид шва типичной формы, выполненного гибридной лазерно-дуговой сваркой на листе толщиной 8 мм.

Применение лазерных источников в условиях монтажных площадок стало возможным благодаря бурному развитию этой области. Лучевые источники последнего поколения (так называемые оптоволоконные лазеры) имеют не только большую мощность, но и надежную компактную конструкцию. Они характеризуются высоким КПД и превосходным качеством луча (в отличие от обычных лазерных источников — CO_2 - или Nd:YAG-лазер) в связи с этим существуют все предпосылки для их широкого применения. Последние пять лет мобильные оптоволоконные лазеры успешно используются в судостроении и при строительстве трубопроводов [2].

Целью описанных ниже исследований было определение возможностей использования технологии и аппаратуры для гибридной лазерно-дуговой сварки применительно к соединениям труб с учетом таких важных аспектов, как допуски, влияние внешней среды, мобильность сварочного оборудования, а также возможность сварки в принудительном положении в монтажных условиях.

Основным направлением в исследованиях была возможность использования типичного для лазера эффекта глубокого провара для получения высококачественного свободного корневого слоя с высотой притупления 6...10 мм. Для этого сравнивали варианты лазерных и дуговых систем, которые применяют для гибридной сварки стыковых соединений с различными типами разделки кромок.

Для соединения труб выбран способ сварки двух швов сверху вниз, при котором значительно уменьшается необходимая для формирования шва степень свободы при компоновке лазерного луча и дуги. После определения технологических параметров гибридной сварки первого слоя в структуру эксперимента нужно было интегрировать процесс дуговой сварки МАГ, чтобы за один оборот получить на листе толщиной до 12 мм зам-

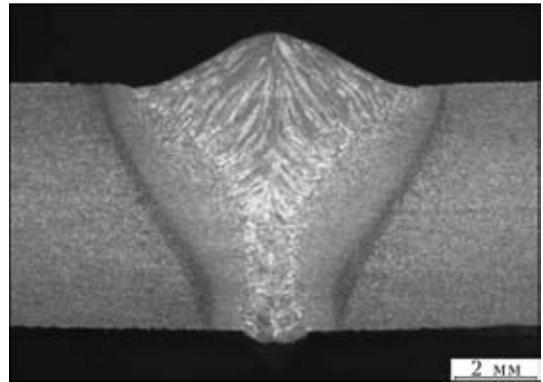


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения, полученного гибридной лазерно-дуговой сваркой

кнутый профиль шва. Предполагалось, что второй процесс сварки сможет положительно повлиять на механико-технологические свойства выполняемого сварного шва.

Чтобы подтвердить технологическую целесообразность гибридного лазерно-дугового процесса орбитальной сварки применяли обычные технологии. Базовым оборудованием для выполнения исследований служила поворотная система для труб фирмы «Gullco» (рис. 4).

Указанная система оснащена трактором на кольцевой направляющей для перемещения по кругу, тактильными системами слежения за швом и управления, базирующимися на установочных осях для регулирования процессом сварки относительно разделки кромок. В процессе сварки тактильный датчик располагается впереди по направлению движения.

Сварочную головку с различными элементами жесткости адаптировали к установочной оси для регулирования по высоте. Для реализации воз-

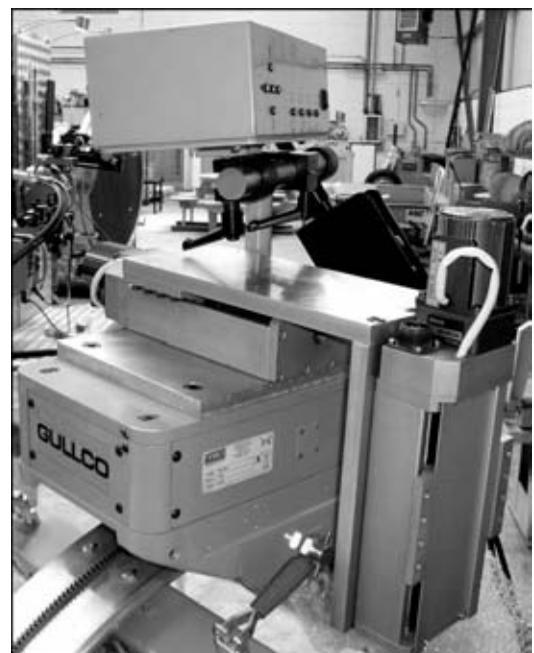


Рис. 4. Установка для орбитальной сварки МАГ



Таблица 1. Варианты компоновки лазерный луч + дуга МАГ

№ варианта	Основной процесс (нейтральное положение)	Второй процесс (положение)	Схема процесса
1	Лазерный луч	Горелка впереди (наклон назад)	
2		Горелка позади (наклон вперед)	
3	Дуга	Лазерный луч впереди (наклон вперед)	
4		Лазерный луч позади (наклон назад)	

можных серийных вариантов (табл. 1) система лазерный луч+дуга МАГ может иметь дополнительные средства перемещения горелки и луча (рис. 5).

В табл. 1 для упрощения эксперимента лазерный луч или дуга представлены в нейтральном положении. От промежуточных ступеней сознательно отказались.

Применяли две различные системы оптоволоконного лазера. На первом этапе исследований при высоте притупления до 6 мм использовали оптоволоконный лазер мощностью 4,5 кВт (рис. 6, а), а на втором при высоте притупления 8 мм в эксперименте — лазер мощностью 10 кВт Учебно-исследовательского института земли Мекленбург-Форпоммерн (рис. 6, б).

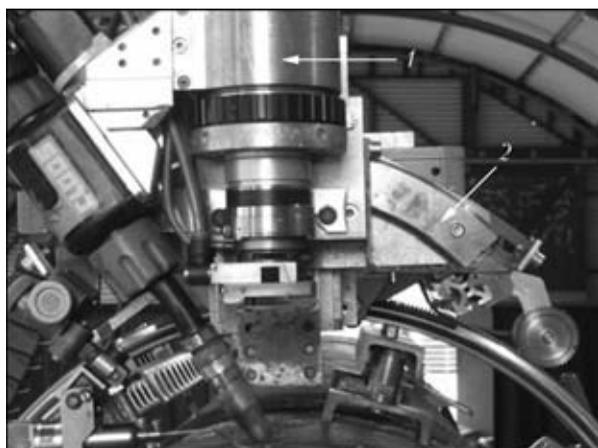


Рис. 5. Реализация дополнительных средств перемещения серийной системы лазерный луч+дуга МАГ: 1 — поворотный шарнир с опорой для перемещения горелки; 2 — направление дуги под углом к стыку

Первый оптоволоконный лазер, который применили для сварки лазерным источником мощностью 4 кВт, был выпущен в 2003 г. и за годы эксплуатации подтвердил свою эффективность.

Для получения замкнутого профиля шва к сварочной головке подсоединили еще одну дуговую горелку (рис. 7), что позволило за один оборот сварить гибридной сваркой корень, а сваркой МАГ — верхний слой, т. е. благодаря двум швам, выполненным сверху вниз, обеспечили полное заполнение кромок.

Сваривали отрезки труб длиной до 6 м. По этой причине допуски к соединениям были большими по сравнению с соединениями калиброванных труб, особенно с точки зрения качества, в том числе и по величине смещения кромок. С учетом изложенного выше для выполнения сварки применяли установку опытной конструкции (рис. 8).



Рис. 6. Внешний вид лазерных систем, применявшихся в экспериментах

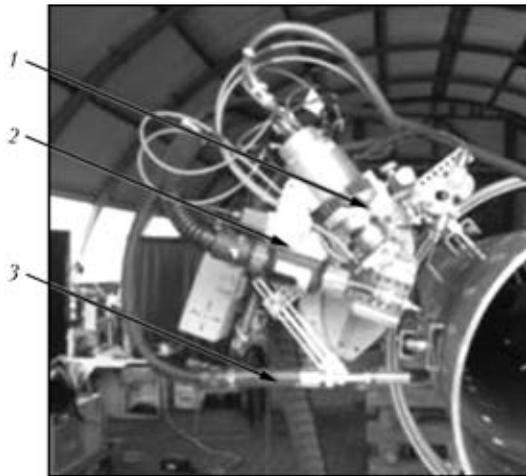


Рис. 7. Сварочная головка с гибридной оснасткой для сварки корня и дуговая горелка для заполнения разделки: 1 — лазерная оптика; 2 — гибридная дуга; 3 — сварка МАГ верхнего слоя



Рис. 8. Сварка труб с помощью установки опытной конструкции

Исследования проводили на двух лазерных источниках разной мощности. На первом этапе исследований у лазера мощностью 4,5 кВт были определены основные параметры гибридной дуги и чувствительность гибридного процесса к допускам при постоянно изменяющемся положении сварки по периметру трубы. Второй этап исследований был посвящен оценке потенциала гибридного процесса при использовании более мощного (10 кВт) оптоволоконного лазера и одновременном увеличении высоты притупления в корневом слое с 6 до 8 мм.

При проведении сварочных экспериментов были поставлены следующие задачи: удаление внутреннего покрытия на всех соединяемых кромках; измерение толщины стенки, высоты и ширины притупления каждой соединяемой кромки; прихватка стыка с внешней центровкой таким образом, чтобы продольный шов подсоединяемой трубы стыковался с продольным швом приваренной трубы; замер смещения кромок и воздушного зазора на прихваченном стыке; установление положения

фокуса и геометрических параметров заново для каждого стыка; направляющей для тактильного слежения за швом служит стационарно закрепленная труба; сварка двух швов осуществляется сверху вниз (после выполнения первого слоя смена ориентации на второй шов сверху вниз); вырезка макрошлифов выполняется из участков, соответствующих углам поворота сварочной головки 45, 90, 150° и 315, 270 и 210°.

В табл. 2 показаны макрошлифы первого слоя, полученного гибридной сваркой, и всего профиля замкнутого шва с предпочтительной разделкой кромок при мощности лазера 4,6 и 6,5 кВт.

Благодаря допускам, замеренным на стыках труб, и соответствующим им сварочным параметрам имеются точные данные о воздействии допусков на процесс сварки. Этот этап исследований завершился определением твердости металла в области корня шва, поскольку именно там доминирует лазерный луч и возможно повышение твердости. Для сравнения исследовали первый гибридный слой и замкнутый профиль шва, сва-

Таблица 2. Макрошлифы соединений, полученных гибридной сваркой

Разделка кромок	Первый слой	Замкнутый профиль шва
<i>Лазер мощностью 4,6 кВт, высота притупления 6 мм</i>		
<i>Лазер мощностью 6,5 кВт, высота притупления 8 мм</i>		

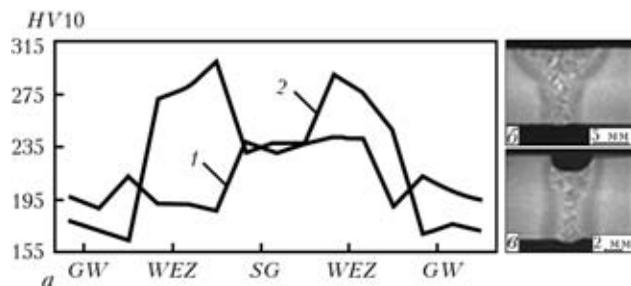


Рис. 9. Зависимость твердости в области корня шва от пространственного положения сварочной головки (а) и макрошлифы, полученные с подкладкой (1, б) и без (2, в): GW, WEZ, SG — пространственное положение сварочной головки

ренный дугой, следующей за лучом, результаты представлены на рис. 9.

Важным объектом исследований было определение типичных при строительстве трубопроводов допусков и исследование их влияния на процесс гибридной сварки. На всех соединяемых кромках измеряли толщину стенки, высоту и ширину притупления, ширину зазора в стыке и смещение кромок.

Качество выполненного шва исследовали методами неразрушающего и разрушающего контроля. Сначала проводили ультразвуковой контроль (методом фазированных решеток) и контроль просвечиванием. С помощью металлографии определяли положение и размер выявленных внутренних дефектов (рис. 10) [3].

На основе полученных данных построены диаграммы, с помощью которых объясняются нештатные ситуации, последние сопоставляются с результатами сварки в зависимости от определенных предварительно допусков.

Основной целью описанных исследований была проверка технологии и оборудования для гибридной сварки труб при строительстве трубопроводов в сложных условиях монтажа. Получена важная информация об имеющихся недостатках конструкции оборудования: слишком малая скорость сварки (увеличить до 3 м/мин); необходимость согласования мощности лазера с положением, в котором выполняется сварка; переналадка оборудования, которая при изменении направления

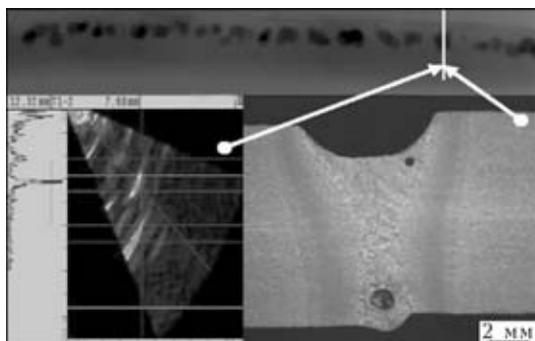


Рис. 10. Макрошлиф участка шва с дефектами, обнаруженными методами неразрушающего контроля

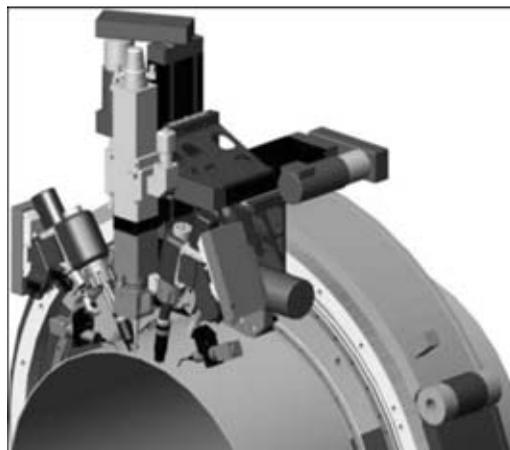


Рис. 11. Проектный вариант оборудования для гибридной сварки труб усовершенствованной поворотной конструкции

или ориентации сварки занимает много времени и вследствие многопозиционной настройки является источником образования дефектов; существующая технология по своим механическим свойствам не отвечает требованиям процесса сварки.

На рис. 11 показан внешний вид проектного варианта оборудования для гибридного процесса орбитальной сварки конструкций без указанных недостатков.

Реализованный на этой базе и предоставленный для последующих экспериментов прототип оборудования (рис. 12) имеет следующие технические характеристики: скорость перемещения при позиционировании до 6 м/мин; скорость сварки до 3 м/мин; диаметр свариваемых труб 500...700 мм; изменение параметров режима в зависимости от положения сварки; слежение за направлением шва. Встроенная лазерная головка может быть подсоединена к любому оптоволоконному твердотельному лазеру мощностью до 20 кВт.

Целью очередной серии исследований была оптимизация процесса сварки первого слоя на трубах с толщиной стенки от 10 мм и разной высотой притупления, осуществляемого с помощью оптоволоконной лазерной системы YLS-12000, внедренной с 2003 г., мощностью 12 кВт (рис. 13) в сварочном

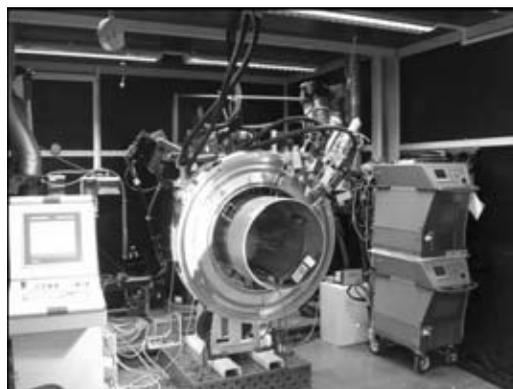


Рис. 12. Прототип оборудования для гибридной сварки трубопроводов



Рис. 13. Оптоволоконная лазерная система YLS-12000



Рис. 14. Рентгенограмма участков в области нахлестки стартовых зон (положение 12 ч)

Учебно-исследовательском институте, г. Галле (Зале).

В центре внимания проводимых исследований, с одной стороны, была возможность формирования валика и корня при данной мощности лазера, а с другой, — область нахлестки начала и конца двух швов, выполненных сверху вниз по периметру трубы. На рис. 14 представлен результат контроля просвечиванием в области нахлестки стартовых зон при толщине стенки трубы, которая составляла 10 мм.

С помощью металлографических исследований контролировали зоны сварного шва на наличие внутренних дефектов. Чтобы получить данные о влиянии допусков на сборку при более высокой мощности лазера и скорости сварки в экспериментах принимали допуски, типичные для труб. На рис. 15 для примера показан макрошлиф соединения в положении 3 ч при толщине стенки трубы 10 мм.

В конце исследований проведен контроль материала L360NB для определения его механико-технологических характеристик. Результаты испытания на растяжение приведены в табл. 3, сред-

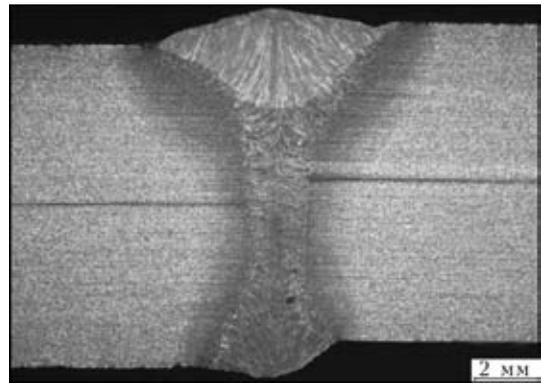


Рис. 15. Макрошлиф сварного соединения при смещении кромок на 1 мм

Таблица 3. Результаты испытания на растяжение

Предел текучести $\sigma_{0,5}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Удлинение при разрыве δ , %	Сужение при разрыве ψ , %
345	532	42	71
368	539	39	69

нее значение ударной вязкости образцов типа ISO-V при температуре испытаний 0 °C составляла 136...177 Дж/см².

Таким образом, для экономичности строительства трубопроводов необходимы исследования новых способов соединения отрезков труб сваркой. Первоочередной задачей является повышение скорости сварки при уменьшении количества слоев. С этой целью альтернативой может стать гибридная лазерно-дуговая сварка, поскольку благодаря оптоволоконному лазеру появился источник излучения, открывающий новые возможности в области сварки [4].

1. Blackman D., Dorling V., Howard R. High-speed tandem GVAW for pipeline welding // 4th Intern. pipeline conf., Calgary, Alberta, Canada, 2002. — P. 517–523.
2. Keitel S., Jasnau U., Neubert J. Applications of fiber laser based deep penetration welding in shipbuilding, rail car industries and pipe welding // 4th Intern. symp. on high-power laser and their applications, June 24–26, 2008, St. Petersburg, Russia.
3. Schwalenberg Ch. Technologieentwicklung fuer das MSG-Laserstrahnybridschweißen in Zwangslagen an hochwertigen Rohrleitungswerkstoffen. — Diplomarbeit Hochschule Merseburg, 2008.
4. Keitel S., Neubert J., Strofer M. Laser based girth welding technologies for pipelines — GMAW gets support // IIW-Tagung, June 12–17, 2009, Singapore.

Potential of application of hybrid laser-arc welding for joining pipes in construction of pipelines is considered. It is shown that the combination of hybrid welding with the arc one allows formation of the full-profile section of the weld metal at a pipe wall thickness of 10 mm. Hybrid welding can also be successfully applied to make the root pass in joints on pipes with a root face of 12...15 mm.

Поступила в редакцию 03.11.2010



ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ БЕСШОВНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ*

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, А. С. КОТЕЛЬЧУК, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности конструкции бесшовных порошковых проволок, предназначенных для электродуговой сварки. Проанализированы их технические и экономические преимущества и недостатки. Описаны технологические схемы изготовления бесшовных порошковых проволок с заполнением предварительно сваренной трубной заготовки, а также с поточным заполнением U-образного профиля заготовки трубки флюсом с последующей сваркой продольного стыка оболочки проволоки.

Ключевые слова: электродуговая сварка, бесшовная порошковая проволока, технологический процесс изготовления порошковой проволоки, ее преимущества и недостатки

Порошковой называют проволоку, имеющую порошковый или флюсовый сердечник, который заключен в металлическую оболочку (рис. 1). К порошковым относят также проволоки, у которых сердечник состоит из смеси металлических порошков или только металлического порошка. Такая проволока называется metal-core, т. е. проволока с металлическим сердечником. В качестве оболочки при изготовлении порошковой проволоки используют металлическую заготовку, способную подвергаться значительной пластической деформации (формовке, редуцированию) [1].

Среди порошковых проволок, предназначенных для электродуговой сварки сталей, особо выделяют так называемые бесшовные порошковые проволоки, сердечник которых заключен в цельную оболочку. Благодаря герметичности конструкции такие порошковые проволоки отличаются рядом специфических свойств, которые сложно, а зачастую практически не возможно получить в вальцованных порошковых проволоках, имеющих стык в оболочке.

Технические решения по изготовлению порошковых проволок. Одним из первых был опробован способ изготовления порошковой проволоки из крупных отливок или поковок. Технология изготовления проволоки сплошного сечения достаточно хорошо отработана в металлургическом и метизном производстве. Однако заполнение крупной заготовки порошковым наполнителем вызывает серьезные технические трудности уже

на стадии первичной обработки — горячей прокатки. При традиционных способах прокатки по схеме формовки круг–квадрат–круг происходит разрушение заготовок даже при их незначительном заполнении. Изменение схемы формовки проката или включение операции ротационнойковки приводит к существенному удорожанию переделов. Тем не менее до настоящего времени эту технологию продолжают ограничено применять. К ее преимуществам можно отнести использование известных технических средств и способов обработки металла для получения достаточной герметичной проволоки, поскольку ее сердечник

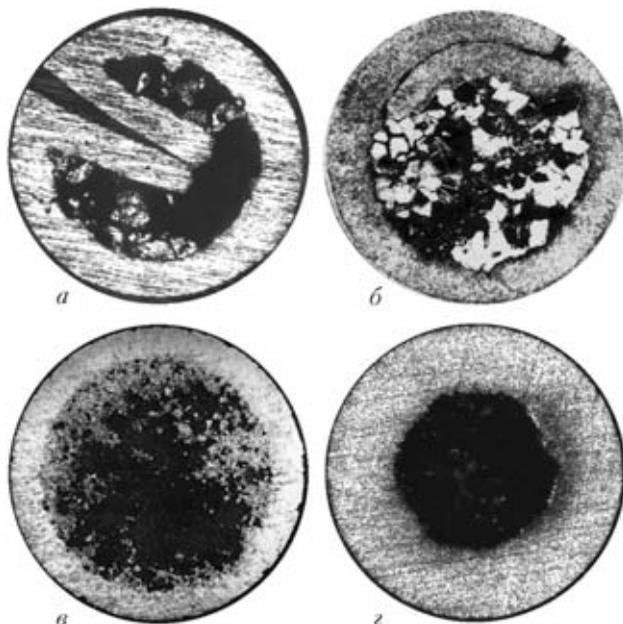


Рис. 1. Различные конструкции оболочек порошковых проволок: а — вальцованная с двойным загибом кромок; б — вальцованная с нахлестом кромок; в — бесшовная проволока, полученная путем поточного заполнения U-образного профиля заготовки трубки флюсом с последующей сваркой продольного стыка оболочки проволоки; з — бесшовная, полученная путем заполнения предварительно сваренной трубной заготовки

* По материалам доклада, представленного на V международной конференции «Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкурентоспособность» (г. Артемовск, 7–11 июня 2010 г.).

надежно защищен от увлажнения. К недостаткам указанной технологии можно отнести сложность в решении металлургических задач при многократном нагреве заготовки, потребность в большом количестве оборудования и высокие энергозатраты при производстве.

Получение герметичной проволоки и возможность применения для ее обработки известных технологий лежит в основе способа изготовления порошковой проволоки из трубной заготовки. При этом используют длинномерную сварную трубку с продольным швом, к качеству которого предъявляют высокие требования.

За последние десятилетия разработаны промышленные технологии изготовления бесшовной порошковой проволоки из толстостенных лент в единой технологической линии — формовка, заполнение флюсом, сварка стыка оболочки, редуцирование и достижение необходимого диаметра. Положительные результаты получены при сварке трубчатой оболочки высокочастотной контактной сваркой, а в последнее время — лазером.

Преимуществами указанной технологии являются отсутствие горячей прокатки, герметичность полученной проволоки, возможность применения традиционных процессов редуцирования, термической обработки и нанесения защитного покрытия, а недостатками — необходимость решать металлургические проблемы при создании композиций сердечника и термообработке заготовки проволоки, применять агломерированный флюс высокого качества, приготовленный по специальным формулам, а также значительные энергозатраты. Тем не менее этот способ реализуется в промышленности ряда стран (фирмы «Air Liquid Welding Group—Oerlikon», Франция—Швейцария, «Drahtzug Stein», Германия, «Nippon Steel», Япония).

Основные особенности бесшовных порошковых проволок следующие:

сердечник не увлажняется, в связи с этим гарантируется содержание в наплавленном металле диффузионного водорода менее $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$;

омеднение поверхности дает определенную защиту от коррозии поверхности и обеспечивает лучший электрический контакт, способствует надежному сплавлению кромок;

для придания специальных свойств металлу шва можно использовать легирующие и микролегирующие элементы;

обеспечивается стабильность формы проволоки по всей ее длине, что позволяет применять подающие механизмы с одной парой роликов;

производительность сварки повышается примерно в 1,5 раза по сравнению с проволокой сплошного сечения.

Основные технологические преимущества бесшовных порошковых проволок достигаются благодаря ультранизкому содержанию водорода в ме-

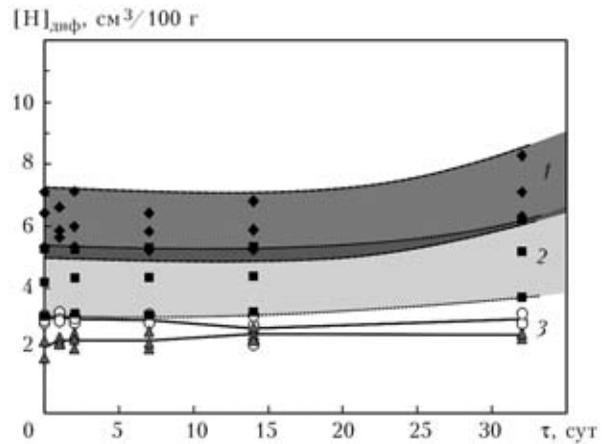


Рис. 2. Содержание диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ в металле, наплавленном порошковыми проволоками различных типов: 1 — бесшовная [3]; 2 — вальцованная, но обработанная шихтой и поверхностью; 3 — обычная вальцованная проволока после хранения в условиях цеха [3]; τ — время выдержки

талле шва, что дает возможность избежать появления холодных трещин при сварке высокопрочных сталей или снизить температуру необходимого подогрева перед сваркой [2].

Благодаря отсутствию щели в оболочке порошковой проволоки и защитному покрытию на ее поверхности гарантируется низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле даже при длительном хранении проволоки (рис. 2).

Точность подачи бесшовной порошковой проволоки к точке сварки по данным работы [3] в большинстве случаев намного выше, чем вальцованных порошковых проволок (рис. 3). Возможными дефектами, возникающими вследствие чрезмерного давления подающих роликов на бесшовную проволоку, являются незначительные продольные углубления на поверхности проволоки [4].

Бесшовные порошковые проволоки имеют определенные недостатки технического и экономического характера: практически отсутствие возможности производства самозащитных проволок; ограничения в отношении введения в сердечник легкоплавких веществ; необходимость использования жидких стекол для агломерированного флюса; капитальные затраты на производство бесшовной проволоки на порядок выше, чем вальцованной порошковой проволоки; значительные энергозатраты при изготовлении; высокие цены на готовый продукт (например, на бесшовную порошковую проволоку в 1,5...2,0 раза выше, чем на вальцованную).

Большинство мировых производителей порошковой проволоки используют технологию ее изготовления из холоднокатаной ленты. При этом проволоку получают на одной технологической линии, которая включает агрегат формовки про-

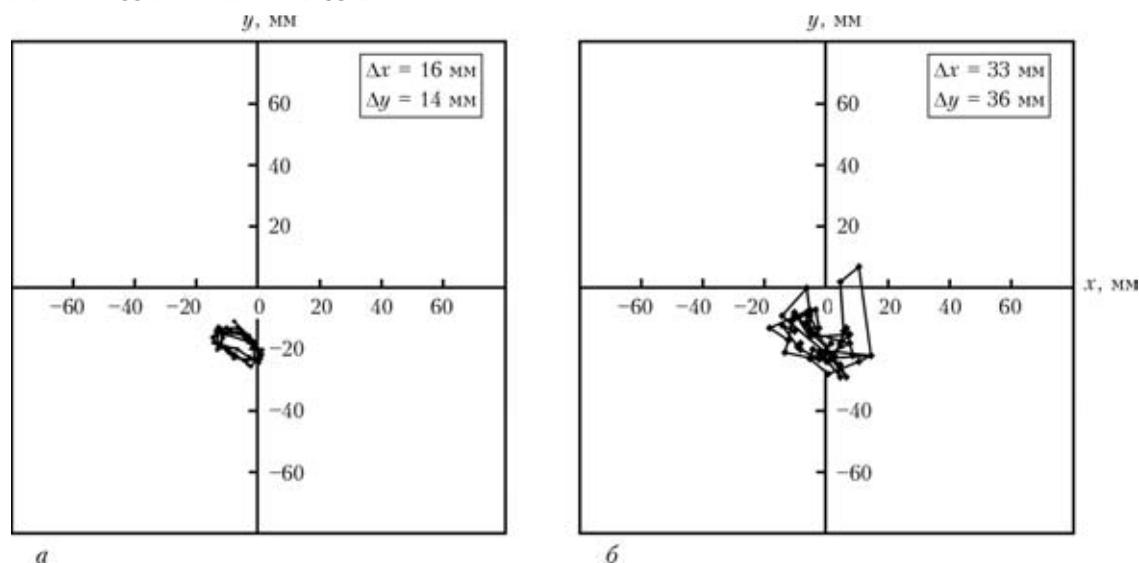


Рис. 3. Точность подачи бесшовной (а) и вальцованной (б) порошковых проволок диаметром 1,2 мм при вылете 150 мм к точке сварки прямой сварочной горелкой [3] (вид сверху на плоскость сварки, ось ординат указывает направление движения сварочной горелки): Δx , Δy — среднее отклонение точки попадания проволоки от точки прицеливания соответственно поперек и вдоль направления сварки

волоки различной конструкции со встроенной операцией непрерывного заполнения смесью порошков и волочильный многократный стан, где осуществляется редуцирование проволоки до требуемого размера.

Преимуществами такой технологии изготовления порошковой проволоки является малое количество оборудования и персонала, низкие энергозатраты, возможность получения проволок широкой номенклатуры с оперативной перестройкой производства. В этой технологии используется ролликовое редуцирование, различные способы получения заготовок проволоки и обработки поверхности готовой проволоки для нанесения покрытия, что придает ей специальные свойства.

Поставка порошковой проволоки осуществляется исключительно с применением стандартизированных способов намотки и упаковки. Так, пластиковые катушки или проволочные каркасы с проволокой упаковывают в пленку или фольгу, а затем в картонные, металлические или пластиковые контейнеры типа «Marathon». Согласно стандартам ISO предусмотрено использование сквозной инспекции со строгим документированием процедур. При этом широко применяют современную технику управления производственным процессом, привлекают квалифицированный персонал, обеспечивающий стабильное качество продукции.

Обобщенные сведения о производстве и применении порошковых проволок для электродуговой сварки в сравнении с проволоками сплошного сечения представлены в таблице.

Технология изготовления бесшовной порошковой проволоки. Из существующих основных технологических процессов изготовления

бесшовной порошковой проволоки процесс, предусматривающий заполнение готовой (предварительно сваренной) трубки флюсом, существенно отличается от процесса поточного заполнения трубки флюсом (шихтой) с последующей сваркой стыка оболочки проволоки током высокой частоты или лазером.

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования и опытно-промышленные работы по ряду способов изготовления бесшовных порошковых проволок, начиная с изготовления горячей прокаткой различных заготовок и включая перечисленные выше способы. Работы по конкретным проблемным вопросам технологии производства бесшовных порошковых проволок и специализированного оборудования продолжают и в настоящее время.

В этих вопросах выделим те аспекты, которые, по мнению наших специалистов, являются существенными для достижения желаемых результатов.

Бесшовная порошковая проволока с заполнением предварительно сваренной трубной заготовки [4]. Исходная заготовка представляет собой ленту из низкоуглеродистой стали горячего (после травления и нейтрализации) или холодного проката, которая разматывается через накопитель-регулятор и поступает в формовочную приводную машину для формирования в трубку с прорезью (зазором) с высокой точностью выравнивания кромок. Следующим технологическим этапом в поточной схеме является получение стыкового соединения высокочастотной контактной сваркой с контролируемым термическим циклом, а также редуцирование и калибровка трубной заготовки. Трубная заготовка наматывается в бунты и подвергается очистке, а затем инспекции качества.

Преимущества и недостатки порошковых проволок по сравнению с проволоками сплошного сечения

Сварочные порошковые проволоки	Недостатки	Преимущества
	<i>Общего характера</i>	
Бесшовные трубчатые	Отсутствие возможности производства самозащитных проволок Существенные ограничения по введению легкоплавких веществ Необходимость использования жидкого стекла для изготовления наполнителя — агломерированного флюса	Возможность достижения высоких показателей свойств (в частности, ударной вязкости) при низкой температуре Малая склонность к образованию трещин, особенно индуцированных водородом, в металле шва и сварном соединении Высокие технологические свойства при сварке в защитных газах Возможность микролегирования для обеспечения особых свойств металла сварного шва
Вальцованные	Трудность с обеспечением низкого содержания водорода (необходимость сушки, прокalkи) Высокий уровень выделения дыма при сварке самозащитными проволоками	Возможности достижения высоких показателей прочности и вязкопластических характеристик при сварке низколегированных и легированных сталей Высокие технологические сварочные свойства Возможность осуществления сварки без дополнительной защиты Высокая производительность процесса сварки (особенно для проволок типа metal-core)
Сплошного сечения	Необходимость обеспечения комплексного легирования Потери электродного металла на разбрызгивание Необходимость использования дополнительной защиты расплавленного металла	Высокая стабильность получения заданного химического состава и свойств при низком уровне легирования Надежность подачи по шлангам сварочных полуавтоматов Удобство при использовании в роботизированных процессах сварки Отсутствие шлаковой корки на поверхности шва
<i>Технико-экономические</i>		
Бесшовные трубчатые порошковые	Высокие затраты на производство, значительное энергопотребление Высокие цены на готовый продукт Затраты на удаление шлака	Возможность омеднения или нанесения покрытий других типов на поверхность проволоки Применение при различных способах механизированной и автоматической сварки Более длительный срок хранения с сохранением сварочных свойств Использование при сварке легированных сталей
Вальцованные порошковые	Сложности подачи проволок с тонкой оболочкой Затраты на удаление шлака (за исключением проволок типа metal-core)	Применение для всех способов автоматизированной и роботизированной электродуговой сварки и наплавки Возможность очистки и обработки поверхности специальными покрытиями Адаптация к условиям сварки (использование на монтаже) Невысокая стоимость изготовления, особенно проволок легированных типов
Сплошного сечения	Затраты на удаление брызг и доведение формы шва Высокая стоимость проволок легированных типов	Возможность нанесения любых типов покрытий на поверхность Пригодность для всех механизированных и роботизированных способов сварки Более длительный срок хранения с сохранением сварочных свойств Низкая стоимость изготовления, особенно проволок низколегированных типов

Последующий этап — это промежуточный отжиг и протяжка трубки на расчетный размер для заполнения флюсом. Отжиг выполняют при температуре 600...670 °С в шахтных печах, обогреваемых с помощью газа или электричества, и хотя отжиг при этом неполный, он позволяет устранить последствия холодной деформации и снять внутренние напряжения.

Основной специализированный этап изготовления порошковой проволоки включает две операции — намотку трубной заготовки на каркас (катушку) и вибрационное заполнение агломерированным флюсом. Намотка выполняется рядо виток к витку с жесткой фиксацией. Как правило, на катушку наматывается от 500 до 1000 м труб-

ной заготовки. При этом исходные размеры труб составляют от 9 до 15 мм в диаметре (снаружи), а толщина стенок трубы — от 1,8 до 2,0 мм.

В зависимости от мощности привода на установке виброзаполнения закрепляют одну или две катушки с трубной заготовкой. Вибрационный стол приводится в рабочий режим вибрации мощным электродвигателем с короткозамкнутым ротором (трехфазным). Вибротранспортер совершает быстрые синусоидальные колебания, регулируемые дебалансной массой. Благодаря симметричным, косо направленным движениям носителя частицы флюса приводятся в движение в обе стороны по эллиптической траектории вдоль окружной направляющей. В установившемся режиме



порошок-наполнитель плавно движется по трубной заготовке до полного ее заполнения (рис. 4).

Порошок может подаваться в трубную заготовку из бункера через соединительный шланг. При этом на свободный конец трубной заготовки надевается прозрачный шланг для контроля полного прохода порошка. По схеме, разработанной ИЭС им. Е. О. Патона, флюс-порошок с контролируемой скоростью подается в трубную заготовку специальным узкоструйным дозатором, что исключает образование «пробок» и выбросы порошка воздушным потоком, вытесняемым из трубки. Выходной конец трубной заготовки замыкается дроссельной вставкой [5]. Установка конструкции ИЭС им. Е. О. Патона оснащена также прибором непрерывной регистрации траектории вибрационных колебаний, что важно как при настройке рабочего режима, так и при заполнении заготовки, учитывая, что масса заполняемой заготовки порошковой проволоки возрастает к моменту завершения процесса на 15...20 %.

Агломерированный флюс для порошковой проволоки изготавливают по традиционной схеме. Его сушку-прокалку выполняют при температуре 250...300 °С. При этом учитывается, что высокотемпературную прокалку продолжают при промежуточном отжиге полуфабриката бесшовной порошковой проволоки.

Изготовление порошковой проволоки из заполненного флюсом полуфабриката включает следующие операции: промежуточные сухое волочение и отжиг, чистовое волочение до заданного размера и нанесение медного покрытия.

Промежуточное волочение в основном выполняют с использованием волочильных станов (пяти- или шестикратных) с диаметром волочильных барабанов 600 мм и скоростью протяжки 5...6 м/с. Промежуточный отжиг выполняют при диаметре проволоки 5,4...5,5 мм (диаметр исходной заготовки 11...12 мм) и 4,7...4,8 мм (диаметр исходной заготовки 9...10 мм). Если необходимо получить проволоку диаметром 1,0...1,2 мм, то

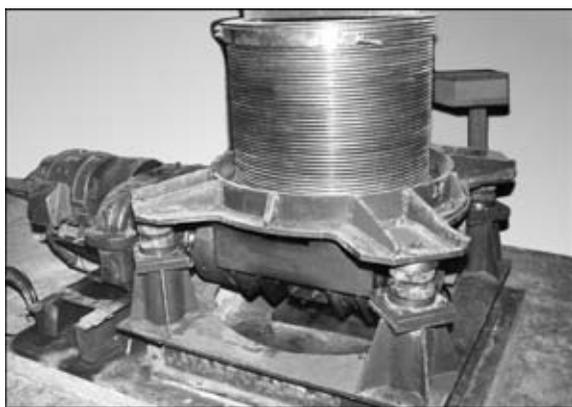


Рис. 4. Спирально-вибрационный дебалансный конвейер для заполнения трубных заготовок шихтой, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона

отжиг желательно проводить при промежуточном диаметре проволоки 3,6 мм.

Заключительное волочение, омеднение и намотка на товарные носители (катушки, каркасы) и формовка проволоки в бунты при поставке в контейнерах типа «Marathon» — широко известные операции при изготовлении большинства типов порошковых проволок.

Отличительной особенностью технологии производства бесшовной порошковой проволоки является контроль заполнения проволоки шихтой (флюсом) перед омеднением [4].

Прибор конструкции фирмы «Oerlikon» типа FKG предусматривает применение датчика щелевого типа, а прибор типа КЗП разработки Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины (г. Львов) — двухконтурного датчика [6]. Оба прибора включают систему измерения магнитного потока насыщения сечения металла. Для повышения точности измерений используют дифференциальный метод (сравнение проверяемой трубки с эталонной). При этом фиксируются недозаполненные участки проволоки. Однако регистрация колебаний при заполнении проволоки требует индивидуальной настройки измерительных модулей при контроле каждого типа проволоки.

Бесшовная порошковая проволока в поточном производстве. Наиболее часто применяемыми для изготовления бесшовной порошковой проволоки являются два близких по схеме процесса, в которых заполнение формуемой трубки, последующее замыкание профиля и сварка выполняются последовательно в потоке с формовкой и редуцированием трубки, заполненной флюсом. Поточность осуществляемых операций позволяет избежать смещения порошкового наполнителя до его уплотнения при редуцировании.

По сути однотипной с ранее рассмотренной является технология изготовления агломерированного флюса, которая включает ряд известных операций: изготовление сухой смеси по рецептуре, смешивание сухой смеси с жидким стеклом, окатывание гранул, прокалку флюса, его просеивание, а после этого дробление крупных фракций. Отличается включением более высокой температуры сушки-прокалки (обычно 350 °С) и выдержке до охлаждения в плотных стальных контейнерах перед просеиванием флюса для снижения содержания водорода. Такая технологическая операция может быть достаточной для изготовления порошковых проволок рутитового типа и недостаточной для проволок низководородного типа, если при этом не предусмотрена последующая дегазация (прокалка).

Бесшовная порошковая проволока с поточным заполнением трубки флюсом и сваркой стыка трубки лазером. Технология рассчитана на относительно небольшое производство. В зависи-

мости от комплектации одной технологической линии может быть достигнут объем выпуска продукции от 1 (при двухсменной работе) до 2 тыс. т/год (при трехсменной работе).

В основу технологии положено формирование U-образной трубной заготовки, засыпка в ее профиль дозированного порошка, роликковое замыкание и лазерная сварка стыка трубки с последующим охлаждением и редуцированием проволоочной заготовки методом холодной прокатки до получения полуфабриката. Редуцирование полуфабриката выполняется в две стадии холодной прокатки с использованием четырех- или восьмиклетьевых обжимных роликковых машин до получения проволоки заданного диаметра (1,2, 1,4 и 1,6 мм). При проведении редуцирования может выполняться промежуточный низкотемпературный отжиг полуфабриката. Последующие заключительные операции (финальная калибровка, очистка, омеднение и намотка на товарные носители) являются типичными для всех способов изготовления бесшовной порошковой проволоки.

Основная часть процесса до получения заготовки проволоки из ленты холодного проката выполняется в одной технологической линии, оснащенной установкой размотки ленты с катушек. Такие технологические катушки вмещают до 1 т ленты. Через регулятор натяжения лента поступает на устройство подготовки кромок, а далее — на агрегат жидкостного обезжиривания ленты. Подготовленная лента поступает в формовочную машину со встроенным дозатором флюса. Замкнутая трубная заготовка с фиксированным положением стыка оболочки трубки подается на участок лазерной сварки. Приемлемое качество сварки достигается при мощности CO_2 -лазера от 6 до 10 кВт и скорости сварки до 15 м/мин. В секцию обжатия заготовки пятиклетьевого роликкового стана сваренная заготовка подается после камеры охлаждения. Результатом поточного процесса является полуфабрикат порошковой проволоки диаметром от 7,0 до 7,5 мм, который наматывается на технологическую катушку.

Следующий этап включает двух- или четырехстадийную холодную прокатку полуфабриката до заданного размера. Стадии этого процесса исходя из диаметра проволоки располагаются в таком порядке: на первом стане на входе 7,0... 7,5 мм, на выходе до 3,0 мм, с промежуточным диаметром 4,6 мм; на втором стане на входе 3,0 мм, на выходе 1,2 мм, с промежуточным диаметром 1,9 мм.

Технико-экономические показатели производства свидетельствуют о том, что эта технология не является высокочрезвычайно затратной благодаря рациональному использованию оборудования и небольшим капиталовложениям в автоматизацию и контрольно-измерительную технику (в частности, за-

полнение U-образного профиля ленты шихтой контролируется прибором, измеряющим уровень слоя флюса в профиле). Использование небольших технологических емкостей унифицированных размеров способствует снижению затрат, но при этом необходимы дополнительные перегрузки и соответствующие настройки оборудования, вследствие чего коэффициент использования основного оборудования не превышает 0,80...0,85.

В ИЭС им. Е. О. Патона были исследованы основные процессы технологии и выработаны решения по качественной очистке ленты и проволоки, непрерывному контролю и мониторингу заполнения проволоки флюсом. В настоящее время продолжают работы, связанные с совершенствованием технологии лазерной сварки, реализация которой в современном производстве является недостаточно надежной.

Бесшовная проволока с поточным заполнением трубки флюсом и высокочастотной контактной сваркой. Технология рассчитана на поточное массовое производство с высоким качеством и уровнем управления автоматизированными системами. Принципиальная схема основного технологического процесса (до получения полуфабриката порошковой бесшовной проволоки) аналогична описанной выше. Основное отличие заключается в способе сварки стыка трубки. В данной технологии используется индукционно-контактная высокочастотная сварка с контролируемыми параметрами. Основными составляющими технологической схемы являются качественная (по точности) формовка трубчатого профиля без замыкания кромок, заполнение заготовки флюсом с использованием автоматизированного дозатора, замыкание кромок профиля, сварка продольного стыка трубки, контролируемое охлаждение, редуцирование заполненной флюсом трубки до уплотнения сердечника и калибровка (при необходимости с предварительным снятием грата) [3].

Стабильное качество сварки обеспечивается системой автоматического управления, поддерживающей заданный уровень тепловложения при изменении скорости движения трубки. Если при использовании стандартного оборудования для высокочастотной сварки колебания температуры в центре стыка достигают 150...170 °С, то система управления позволяет удерживать колебания температуры в пределах ± 12 °С от заданной (около 1250 °С).

После сварки заполненная порошком трубка охлаждается. При этом контролируется скорость воздушного охлаждения до температуры ниже 500 °С (температуры мартенситного превращения).

Редуцирование заполненной трубки для уплотнения сердечника и калибровка по форме и размеру производится в потоке на формующей установке (роликковые клетки 4×4). В эту операцию дополнительно включен блок контроля качества



сварки трубки различными методами неразрушающего контроля (с помощью ультразвука, вихревых токов).

После прохождения основной стадии изготовления заготовка бесшовной проволоки подвергается отжигу на поточных агрегатах с использованием индукционного нагрева. Эта операция особенно важна при изготовлении порошковых проволок с оболочкой из нержавеющей стали.

Дальнейший технологический процесс проходит по типовой технологии, включающей роликовую холодную прокатку, волочение через стандартные или роликовые волоки. Заключительные операции очистки, омеднения и намотки на товарные носители выполняются с помощью типового оборудования для производства проволок.

Следует учесть, что затраты мощности оборудования существенно зависят от диаметра и толщины стенки трубной заготовки, а также скорости формовки и редуцирования. Так, электрическая мощность установки высокочастотной сварки при повышении рабочей скорости формовки-редуцирования от 50 до 120 м/мин возрастает от 100 до 150 кВт. Аналогично повышается мощность установки отжига полуфабриката. Несмотря на используемые технические решения и автоматизацию операций капитальные затраты на производство по этой технологической схеме велики, как и затраты на энергоносители. Такое производство будет эффективно только при больших объемах выпускаемой продукции (свыше 10 тыс. т/год) и достаточно высоких ценах на проволоку.

Заключение. Представленные технологии изготовления бесшовной порошковой проволоки требуют для реализации довольно значительного объема инвестиций, отличаются высокой энерго-

емкостью и требуют привлечения высококвалифицированного персонала (особенно для обеспечения качества формовки и сварки).

Технические характеристики полученного продукта имеют определенные преимущества по сравнению с проволоками сплошного сечения и вальцованными порошковыми проволоками, главным из которых является низкий уровень содержания водорода в металле сварного шва. Рыночные цены на бесшовные порошковые проволоки превышают в 1,5...2,0 раза цены на вальцованные порошковые проволоки, в связи с этим необходимо находить специфический сектор рынка сварочных материалов, где достигаемые преимущества будут оправдывать затраты.

1. *Производство порошковой проволоки* / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер и др. — Киев: Виц. шк., 1980. — 231 с.
2. *Yurioka Nobutaka, Kasuya Tadashi. A chart method to determine necessary preheat temperature in steel welding* // Quarterly J. Jap. Weld. Soc. — 1995. — 13, № 3. — P. 347–357.
3. *Shimura K. Seamless flux cored wire: Presentation of «Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.»*, Japan intern. welding show 2008, Tokyo, Apr. 9–12, 2008. — 18 p.
4. *Самородов И. Г. Особенности производства и применения бесшовных порошковых проволок* // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте газопроводов», Москва, 22–23 нояб. 2007 г. — М., 2007. — 59 с.
5. *Решение задач вибрационного заполнения трубных заготовок порошковой проволоки сыпучими наполнителями* / И. К. Походня, В. Н. Потураев, А. Г. Червоненко и др. // Всесоюз. конф. по сварочным материалам: Тез. докл., Череповец, 10–14 окт. 1983 г. — Киев, 1983. — С. 30–31.
6. *Непрерывный контроль заполнения шихтой порошковой проволоки в процессе ее изготовления* / В. В. Панасюк, А. Я. Тетерко, И. К. Походня и др. // Автомат. сварка. — 1975. — № 5. — С. 48–49.

Design features of seamless flux-cored wires designed for electric arc welding are considered. Their technical and economic advantages and disadvantages have been analyzed. Process flowcharts of manufacturing seamless flux-cored wires with filling of the pre-welded tubular billet, as well as with continuous U-shaped profile of tube billet with subsequent welding of wire shell longitudinal butt are described.

Поступила в редакцию 21.07.2010

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ (Инновационный проект НАН Украины, выполненный в ИЭС им. Е. О. Патона)

Разработан источник питания нового поколения и алгоритм его работы для ВЧ-сварки живых тканей с частотой 440 кГц, который прошел натурные испытания на животных в ИЭС им. Е. О. Патона. Разработана и проверена на практике новая концепция электрохирургического инструмента, предназначенного для массового применения. Проведено исследование с регистрацией электрических параметров при ВЧ-сварке живых тканей и анализ влияния параметров и алгоритмов управления процессов на качество сварных соединений, в том числе непосредственно в клинических условиях. Полученные результаты являются основой для дальнейших разработок нового оборудования и систем управления процессом.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В. М. КУЛИК, канд. техн. наук, **М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук,
В. П. ЕЛАГИН, **Э. Л. ДЕМЧЕНКО**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены технические возможности и целесообразность изготовления передвижных комбинированных сосудов высокого давления с небольшой удельной массой. При этом для заготовок обечаек могут использоваться низколегированные, с низким содержанием углерода стали повышенной, высокой прочности и трубы большого диаметра. Приемлемые по свойствам и циклической долговечности стыковые соединения получают многослойной сваркой под флюсом, улучшение их возможно дуговой обработкой с подплавлением. Сварной корпус подвергается отпуску без выполнения высокотемпературного упрочнения и усиливается по цилиндрической части композиционным материалом с высокой удельной прочностью.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, высокопрочные низколегированные стали, сосуды высокого давления, сварные соединения, аргонодуговая обработка, термический цикл, структура, механические свойства, циклическая долговечность, удельная масса

Как показывает мировой опыт, оперативное газоснабжение таких небольших предприятий, как фермерские хозяйства и других, целесообразно осуществлять с помощью передвижных сосудов высокого давления с небольшой удельной массой M/V , конструкции и технологии изготовления которых прорабатываются рядом фирм. Для морской поставки сжатого природного газа предлагается изготавливать баллоны-хранилища вместимостью $V = 16 \text{ м}^3$ ($M/V = 1,7 \text{ т/м}^3$ (кг/л)) и использовать их с небольшими частотой и количеством циклов нагружения.

Уменьшение удельной массы и повышение циклической долговечности сосудов высокого давления достигается усилением их материалами с высокой удельной прочностью [1, 2]. Ранее разработанный нами технологический процесс изготовления комбинированных сосудов (баллонов) диаметром 219...360 мм для использования природного газа в качестве автомобильного топлива включает сварку А-ТИГ+ТИГ (без скоса кромок) продольного и кольцевых швов обечайки и днищ, выполненных из листовой стали 30ХГСА толщиной 3,5...6,0 мм, высокие послесварочные отпуска, проковку продольного шва, закалку и отпуск сварного корпуса для обеспечения требуемого уровня прочности ($\sigma_{\text{в}} = 950...1000 \text{ МПа}$) [3]. Автомобильные баллоны отличаются необходимой работоспособностью в условиях ежедневной заправки и использования энергоносителя и характеризуются небольшой удельной массой $M/V =$

$= 0,65...0,75 \text{ кг/л}$. Однако небольшая вместимость (30...60 л) обуславливает ограничение практической возможности газоснабжения такими баллонами. Для существенного повышения их вместимости необходимо увеличить диаметр до 600...1000 мм и толщину стенки (при использовании легированной стали) до 10...17 мм. При этом усложняется подготовка и сборка кромок под сварку, возникает необходимость подогрева, увеличивается в 3,5...25 раз продолжительность сварочного процесса ($v_{\text{св}} = 3,0...4,5 \text{ м/ч}$), расход электроэнергии и аргона, а образование пригара на поверхности стального корпуса при закалке в масле затрудняет ее зачистку.

В данной работе рассмотрено повышение технологической эффективности изготовления комбинированных сосудов высокого давления с небольшой удельной массой для оперативного снабжения газом отдельных потребителей. Она может быть достигнута путем использования труб большого диаметра из низколегированных сталей повышенной прочности и применения более производительной сварки плавящимся электродом.

Оптимальное сочетание служебных и весовых характеристик комбинированных сварных автомобильных баллонов и сосудов высокого давления обеспечивается при запасе прочности сварного корпуса $K = 1,60...1,65$. Для изготовления сосудов давления применяют стали различного химического состава, структуры и механических свойств и трубы из них, в том числе сварные с соотношением $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ в пределах 0,48...0,87 [4]. Повышение $\sigma_{\text{в}}$ стального корпуса от 500 до 1000 МПа позволяет снизить M/V комбинированного сосуда на рабочее давление до 19,6 МПа от 1,33 до 0,65 кг/л за счет увеличения соотношения

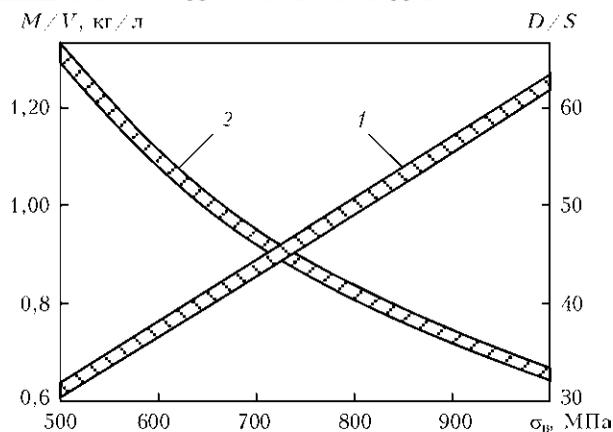


Рис. 1. Влияние прочности стали на размерный параметр D/S (1) и удельную массу M/V (2) комбинированного сосуда высокого давления

D/S (диаметра к толщине стенки) от 31 до 63 (рис. 1). У комбинированных сосудов из сталей с $\sigma_B \geq 550$ МПа $M/V \leq 1,18...1,22$ кг/л, что ниже $M/V = 1,25...2,0$ кг/л производимых стальных автомобильных баллонов. Соблюдение при этом соотношения $D/S = 0,016...0,032 > 0,010$ обуславливает необходимость проведения термообработ-

ки сварного корпуса, а пропорциональное уменьшение D и S способствует упрощению и сокращению продолжительности выполнения сварочно-технологических работ.

Сварные швы должны иметь временное сопротивление разрыву при температуре 20 °С, соответствующее σ_B основного металла, и иметь KCU не ниже 50 и 30 Дж/см² соответственно для температуры 20 и ниже -20 °С, а сварные соединения низколегированных марганцовистых и кремнемарганцовистых сталей — выдерживать испытания при статическом изгибе на угол не менее 80° [4]. Долговечность сосудов $N = 5500$ циклов можно считать достаточной для каждодневных заполнений и выпусков газа в течение 15 лет эксплуатации, как и у автомобильных баллонов.

Как известно, высокая прочность низколегированных сталей, в том числе трубных, обеспечивается повышением содержания марганца до 2 %, микролегированием ниобием, ванадием, титаном, хромом, медью, никелем, бором, переходом от горячей прокатки (нормализации) к кон-

Таблица 1. Расчетные характеристики сосудов высокого давления из сварных труб для магистральных трубопроводов

№ п/п	Класс прочности стали	σ_B , МПа	Труба		Корпус	Сосуд
			D , мм	S , мм	K	M/V , кг/л
1	X65	590	762	19,1	1,51	1,02
2		590	762	20,2	1,60	1,08
3		670	1220	18,9	1,06	0,63
4		590	914,4	25,0	1,65	1,11
5	X70	600	914,4	19,1	1,34	0,85
6		620	914,4	28,6	2,10	1,28
7		620	914,4	23,0	1,59	1,03
8*		620	914,4	24,0	1,66	1,07
9	X80	752	610	12,7	1,60	0,85
10		722	762	15,6	1,51	0,84
11		734	1016	17,5	1,29	0,70
12		750	1020	21,5	1,61	0,86
13		750	720	15,5	1,65	0,89
14		750	610	13,0	1,63	0,90
15	X100	801	1219	14,3	0,96	<0,60
16		838	1219	14,3	1,00	<0,60
17		816	914,4	13,2	1,20	0,65
18		858	914,4	13,2	1,26	0,65
19		858	914,4	17,0	1,63	0,80
20		890	914,4	15,0	1,49	0,72
21		890	914,4	16,5	1,64	0,77
22		890	1020	18,5	1,65	0,77
23		890	762	13,5	1,61	0,76
24		890	610	11,0	1,64	0,77

тролируемой прокатке, термомеханической и новым видам обработки. При этом снижением содержания углерода (от 0,2 до 0,03 %) и серы (от 0,035...0,040 до 0,010 %) и менее достигается существенное увеличение пластичности (деформируемости) и вязкости, улучшение их свариваемости по сравнению с углеродистой легированной сталью [5–7]. Тем самым создаются предпосылки для отката от выполнения подогрева и послесварочных отпусков, а также для применения сварки плавящимся электродом вместо аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В Украине и за рубежом трубы большого диаметра производятся с применением продольной сварки под флюсом низколегированных трубных сталей класса прочности X65, X70, X80 и X100 с $\sigma_B \geq 550, 560, 620$ и 760 МПа, $\sigma_{0,2} \geq 450, 480, 550$ и 690 МПа, $\delta \geq 18$ %. Магистральные газопроводы, свариваемые кольцевыми швами, эксплуатируются при изменяющихся давлении и температуре, в том числе в условиях Крайнего Севера. Очевидно, что сварные сосуды, изготавливаемые из перечисленных сталей и труб, приемлемы для эксплуатации и в менее экстремальных условиях.

Анализ данных табл. 1 свидетельствует о том, что запас прочности K сварного корпуса сосуда может изменяться в широких пределах от 0,96 до 2,10. При $K = 1,60...1,65$ удельная масса комбинированных сосудов, изготавливаемых с применением труб из сталей класса прочности X65, X70, X80 и X100, может быть 1,08...1,11; 1,03...1,06; 0,85...0,89 и 0,76...0,77 кг/л. Перспективным является использование труб из стали класса X80, производство которых осваивается в Украине. Поэтому дальнейшие наши исследования были направлены на оценку возможности использования трубных заготовок из указанной стали применительно к изготовлению передвижных сосудов высокого давления.

В качестве объекта исследований выбраны стыковые соединения по ГОСТ 8713–79 и 14771–76 с многослойными швами из стали класса X80 толщиной 20 мм следующего химического состава (%): 0,094 C; 1,97 Mn; 0,362 Si; 0,03 Mo;

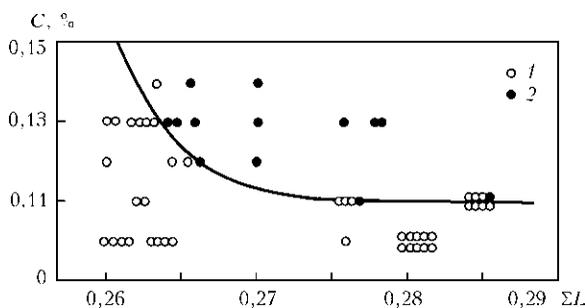


Рис. 2. Влияние углерода и легирующих элементов на образование холодных трещин в соединении высокопрочной стали, сваренной под флюсом [9]: 1 — нет трещин; 2 — есть трещины

0,02 Nb; 0,014 Ti; 0,02 P и 0,03 S, которая характеризуется следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 547$ МПа, $\delta = 21,6$ %, $KCV^{+20} = 327$ Дж/см² и $KCV^{-40} = 245,5$ Дж/см². Углеродный эквивалент $C_{э\text{кв}} = 0,20...0,44 < 0,45$ %, рассчитанный по разным формулам, позволяет причислять ее к несклонным к образованию холодных трещин [8]. Она отвечает также такому сочетанию содержания углерода и параметра легирования

$$\Sigma L = (\text{Mn} + \text{Cr})/20 + \text{Si}/30 + (\text{Ni} + \text{Cu})/60 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 = 0,22 \%,$$

при котором в сварных соединениях высокопрочных сталей, сваренных под флюсом, холодные трещины отсутствуют (рис. 2) [9]. В связи с этим сварка таких соединений под флюсом осуществляется без предварительного подогрева, а при сварке в среде защитных газов он рекомендуется, и его температура зависит от углеродного эквивалента, толщины стали и температуры окружающего воздуха. Предотвращению трещинообразования способствует автоподогрев, замедленное охлаждение, термоциклирование при многопроходной сварке.

Автоматическая сварка указанных соединений осуществлялась под флюсом АН-47 проволоками Св-10Х2М и Св-08ХМ, а механизированная сварка в углекислом газе — проволокой Св-08Г2С. Часть сварных соединений подвергали аргонодуговой обработке с подплавлением посередине шва, в участках перехода от шва к основному металлу и печному отпуску при температуре 600 °С в течение 1 ч. Термические циклы сварки (рис. 3) и аргонодуговой обработки фиксировались с помощью термопары ВР-20/5, закрепленной с обратной стороны стыка, и потенциометра КСП-4. Сварные соединения исследовали металлографически, дюраметрически, испытывали на статический разрыв, статический изгиб на угол 90°, ударный изгиб образцов с круглым надрезом по шву, зоне сплавления и ЗТВ (на расстоянии 2 мм от шва), а также на усталость при растяжении с частотой 5 Гц до $\sigma_{\text{max}} = 300...350$ МПа цикла с соблюдением соотношения $\sigma_{\text{max}}/\sigma_B = 0,48...0,56$ (как при циклических испытаниях внутренним давлением комбинированных баллонов со сварным корпусом из стали 30ХГСА).

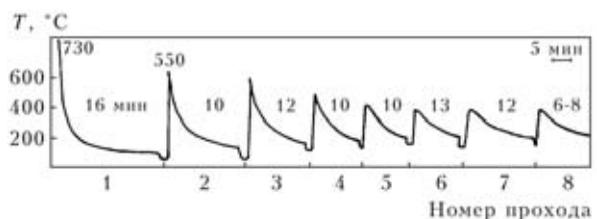


Рис. 3. Характерный термический цикл многослойной сварки под флюсом

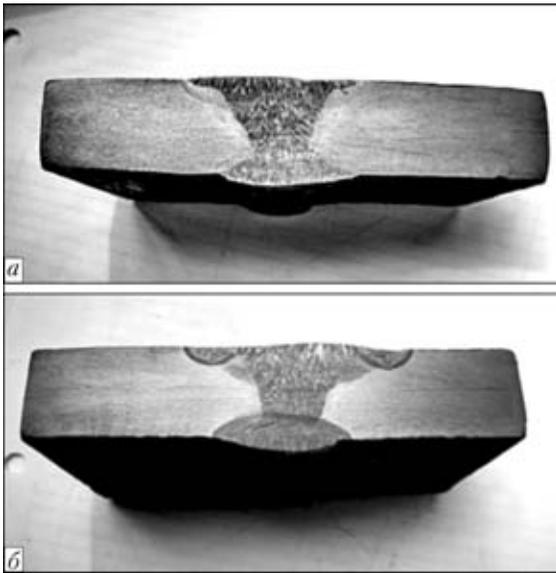


Рис. 4. Макроструктуры стыковых соединений, полученных сваркой под флюсом до (а) и после (б) аргонодуговой обработки

Как показал анализ термических циклов, при наплавке первых валиков шва соединений, выполненных как под флюсом, так и в углекислом газе на погонной энергии 21,6 и 9 кДж/см, их охлаждение происходит со скоростью $w_{6/5} = 8...12$ и $14...18$ °C/с, что соответствует рациональному интервалу $w_{6/5} = 5...35$ °C/с при $q/v_{св} = 9...35$ кДж/см [10]. При последующих проходах, которые осуществлялись после охлаждения сварных соединений до температур 90...180 и 80...120 °C (в течение 5...16 мин), корень шва нагревается до температур 680...350 и 540...290 °C. С возрастанием очередности и удаленности выполняемых валиков температура нагрева металла нижней части сварных соединений снижается и металл подвергается многократным кратковременным отпускам, что обуславливает отсутствие холодных трещин в сварных соединениях (рис. 4, а).

В процессе аргонодуговых обработок с $v_{обр} = 7,5$ м/ч ($q/v_{обр} = 12,5$ кДж/см) и $v_{обр} = 4,8$ м/ч ($q/v_{обр} = 19,5$ кДж/см) с подплавлением шириной 7...10 и 13...14 мм соответственно в местах перехода от шва к основному металлу, а также шириной 25...27 мм посередине шва устранялись подрезы, резкие переходы к основному металлу (рис. 5, б) и сглаживались межваликовые впадины. Сварное соединение прогревается по всей толщине. При этом металл верхней части соединения на глубине до 8...12 мм претерпевает фазовые и структурные превращения. В нижней части он подвергается кратковременному отпуску.

Как свидетельствуют результаты металлографических исследований, в металле ЗТВ соединений, выполненных сваркой под флюсом, формируется ферритно-бейнитная структура с включениями МАК-фазы (рис. 5). Его твердость постепенно снижается на расстоянии 0,1...0,3 мм до

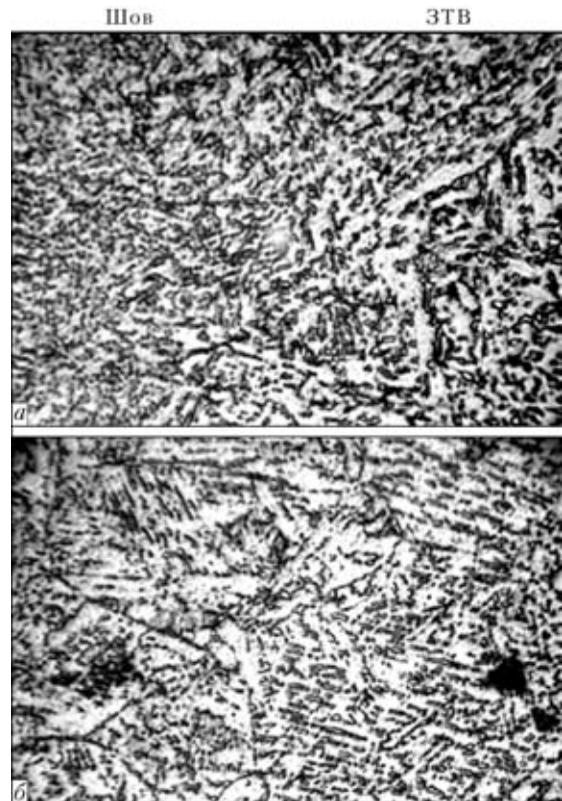


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 320$) металла зоны сплавления (а) и ЗТВ (б) стали класса X80, сваренной под флюсом

$HV0,2 = 193$ и на расстоянии 3 мм от шва до $HV0,2 = 178$ относительно $HV0,2 = 215$ основного металла (рис. 6, кривая 2). Меньшее разупрочнение металла ЗТВ (на расстоянии 0,1...0,3 мм от шва) до $HV0,2 = 195$ и 2 мм от шва до $HV0,2 = 192$ наблюдается после сварки в углекислом газе (рис. 6, кривая 1). После аргонодуговой обработки и печного отпуска характер распределения твердости по ширине ЗТВ не изменяется (рис. 6, кривые 3, 4), а ее значения снижаются. Зональные снижения твердости в металле ЗТВ, по нашему представлению, являются проявлением локализованного обезуглероживания металла в

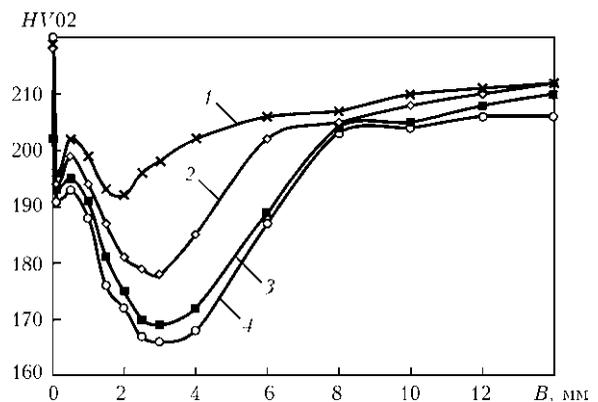


Рис. 6. Распределение твердости по ширине B металла ЗТВ на стали класса X80, сваренной под флюсом (2–4) и в углекислом газе (1) в состоянии после сварки (1, 2), аргонодуговой обработки (3) и высокого отпуска (4)

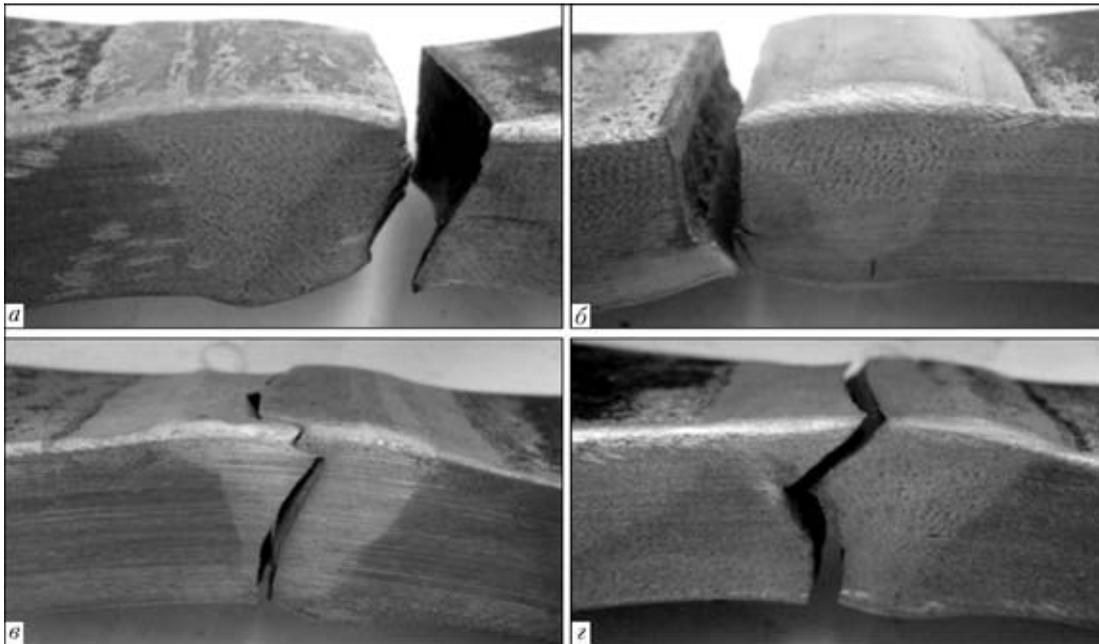


Рис. 7. Характер разрушения при испытании на усталость соединений стали класса X80, сваренной под флюсом, в состояниях после сварки (а), аргонодуговой обработки с подплавлением шва (б), мест перехода от шва к основному металлу (в) и высокого отпуска (д)

зоне сплавления и на участках, которые нагрелись при сварке до температур превращения.

После аргонодуговых обработок соединений с подплавлением шва типа 10X2М и перехода от него к основному металлу твердость этих участков повышается до $HV0,2$ — (243...262; 230...245 и 145...163). Вблизи подплавлений шва она снижается до $HV0,2$ — (225...237) и практически не изменяется с обратной стороны соединения. Печной отпуск вызывает снижение твердости до $HV0,2$ — (233...247). Повышенная твердость хромомолибденового металла шва в разных состояниях свидетельствует о его большей прочности, чем основного металла.

Временное сопротивление сварных соединений, выполненных сваркой под флюсом, составляет 610 МПа. Их разрушение происходит за пределами шва. Угол загиба таких соединений не ниже 90° . Ударная вязкость металла ЗТВ составляет $KCU^{+20} = 286$ Дж/см² и $KCU^{-40} = 144$ Дж/см² после сварки под флюсом и $KCU^{+20} = 321$ Дж/см² после сварки в углекислом газе. У металла швов типа 10X2М и 08ХМ, полученных сваркой под флюсом, $KCU^{+20} = 86$ и 139 Дж/см² и $KCU^{-40} = 38$ и 52 Дж/см² соответственно. После дуговых обработок и печного отпуска ударная вязкость этих участков изменяется незначительно ($KCU^{+20} = 279...305$ Дж/см² металла ЗТВ и $KCU^{+20} = 87...95$ Дж/см² шва типа 10X2М). Как видно, ударная вязкость сварных соединений стали класса X80, свариваемой под флюсом, превышает нормативные требования.

При испытании на усталость плоских образцов установлено, что разрушение сварного соединения (рис. 7) начинается с образования трещин в местах

концентрации напряжений, преимущественно переходов от шва к основному металлу с лицевой или обеих сторон, и развивается по шву, зоне сплавления или металлу ЗТВ. Если разрушение сварных соединений в состояниях после сварки и аргонодуговой обработки с подплавлением посередине шва начинается с лицевой стороны и их долговечность составляет 58100...86100 и 49300...104900 циклов нагружения, то после дуговых подплавлений мест перехода от шва к основному металлу (при этом увеличивается угол и радиус сопряжения между швом и основным металлом) разрушение инициируется на более поздней стадии с корневой части. Долговечность таких соединений повышается до 86300...106400 циклов (табл. 2). После выполнения высокого отпуска, повышающего равновесность структуры и снижающего уровень остаточных напряжений, она возрастает до 114100...312400 циклов. При со-

Таблица 2. Циклическая долговечность стыковых соединений стали класса прочности X80, полученных многослойной сваркой под флюсом проволокой Св-10X2М

Послесварочная обработка	$\sigma_{ц}$, МПа	N , циклы
Без обработки	300	58100
	350	86100
Дуговое подплавление шва	300	104900
	350	49300
Дуговые подплавления мест перехода	300	106400
	350	86300
Высокий отпуск	300	312400
	350	114100



четании двух последних технологических операций можно ожидать еще большего повышения циклической долговечности. Установленная циклическая долговечность при одноосном растяжении сварных соединений низколегированной стали в различных состояниях превышает долговечность гидравлически испытываемых комбинированных баллонов с термоупрочненным корпусом из легированной стали (15000...24000 циклов [3]) в 3,3...13 раз.

Проведенные исследования свидетельствуют, что передвижные сосуды высокого давления для оперативного снабжения сжатыми газами целесообразно изготавливать, используя производимые трубы большого диаметра в качестве заготовок обечаяк и листового проката для формирования днищ из низколегированных, с низким содержанием углерода, сталей повышенной прочности. Кольцевые швы обечаяк и днищ с толщиной стенки 13...24 мм целесообразно выполнять многослойной сваркой под флюсом встык без предварительного подогрева. Пропорциональное уменьшение толщины стенки и диаметра сосуда способствует упрощению и сокращению продолжительности выполнения сварочно-технологических работ. Для улучшения работоспособности стыковые соединения целесообразно подвергать дуговой обработке с подплавлением мест перехода от шва к основному металлу. Сварной корпус подлежит обязательному отпуску. Цилиндрическая часть его усиливается полимерным композиционным материалом с высокой удельной прочностью.

При этом из технологического процесса изготовления комбинированных сосудов исключается формирование и сварка обечаяки, проковка продольного шва, печные послесварочные отпуски и высокотемпературный нагрев с последующей закалкой.

1. Пат. 18874 Україна. Балон / Б. Є. Патон, М. М. Савицький, В. М. Кулик та ін. — Опубл. 25.12.1997, Бюл. № 6.
2. Пат. 61162 Україна. Балон тиску / Б. Є. Патон, М. М. Савицький, В. М. Кулик та ін. — Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.
3. Облегченные сварные баллоны для автотранспорта / М. М. Савицкий, А. А. Савиченко, В. М. Кулик и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 1. — С. 52–53.
4. Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. — К., 1998. — 373 с.
5. Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению / Ф. Б. Тухбатуллин, З. Т. Галиуллин, С. В. Карпов и др. // Обз. информ. Сер. Транспорт и надземное хранение газов. — М.: ИРЦ Газпром, 2001. — 54 с.
6. Микроструктура и характеристики трубных сталей после термомеханической обработки / Д. Бауер, П. Флюс, Е. Аморис и др. // Новости черн. металлургии за рубежом. — 2006. — № 4. — С. 65–76.
7. Набуки И., Шигери Е., Джос К. Трубы УОЕ с высокими характеристиками для магистральных трубопроводов // Там же. — С. 77–80.
8. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
9. Мальшевский В. А., Грищенко Л. В., Барышников А. П. Сварочные материалы и технологии сварки высокопрочных сталей // Вопр. материаловедения. — 1999. — 20, № 3. — С. 46–62.
10. Структура и свойства металла ЗТВ соединений низколегированных трубных сталей, модифицированных кальцием / И. В. Захарова, Е. А. Чичкарев, В. Г. Васильев и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 18–21.

Technical capabilities and rationality of manufacturing mobile combined high pressure vessels with small specific weight are considered. Low-alloyed low-carbon steels of higher and high strength and large diameter pipes can be used here for shell billets. Butt joints acceptable in terms of properties and cyclic fatigue life are produced by multilayer submerged-arc welding, and they can be improved by arc treatment with partial melting. Welded case is subjected to annealing without performing high-temperature strengthening and is reinforced along the cylindrical part of a composite material with high specific strength.

Поступила в редакцию 20.05.2010

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

15-й международный конкурс молодых сварщиков «Золотой кубок Линде» состоится в Чехии (г. Фридек-Мистек) 19–20 апреля 2011 г. Конкурсанты должны быть учениками профтехучилищ и не старше 20 лет. Номинации конкурса — ручная дуговая сварка (ММА), полуавтоматическая в среде защитных газов (МАГ/МИГ), ручная сварка неплавящимся электродом (ТИГ) и газовая сварка. Сайт организаторов конкурса — <http://www/sssdmf.cz/>. Команду конкурсантов от Украины формирует Общество сварщиков Украины (tzu@e-mail.ua, тел. 442-872-466).

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРИВОД УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ УСТАНОВОК ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, В. В. БУРЛАКА, асп. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Предложена конструкция механизма перемещения электрода для наплавки рабочих поверхностей деталей машин и инструмента валиками сложной формы с электронной системой автоматического управления. Устройство выполнено в виде модификации кривошипно-шатунного механизма, в котором шатун изготовлен с возможностью автоматического регулирования его длины.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, привод колебания электрода, кривошипно-шатунный механизм, система автоматического управления

Для обеспечения качественного формирования наплавленного рабочего слоя со сложной траекторией на восстанавливаемой детали необходимо управление траекторией валика. Оно должно учитывать, в частности, резкое изменение траектории перемещения в вершинах, например, зигзагов (рис. 1), сопровождаемое возможным искажением формы сварочной ванны при перемене направления перемещения электрода.

Целью данной работы является разработка и исследование простого и надежного устройства колебания электрода, позволяющего формировать требуемую траекторию его перемещения.

В качестве базового устройства колебания электрода использован кривошипно-шатунный механизм (КШМ), обеспечивающий траекторию перемещения рабочего органа, близкую к синусоидальной. Изменение формируемой траектории в нем возможно путем управления приводным двигателем или изменения геометрических параметров элементов КШМ.

Формирование траектории движения путем управления приводным двигателем требует его частых реверсов и значительных ускорений, что приводит к перегревам и снижению надежности системы.

В работе предложен привод на основе КШМ, в котором шатун выполнен с возможностью программного регулирования его длины в процессе работы механизма [2] (рис. 2). При этом минимальная и максимальная длина шатуна определяют границы получающегося «коридора» допустимых положений рабочего органа (рис. 3, кривые L_{\max} , L_{\min}). Линейные параметры шатуна изменяются с помощью смонтированного на нем дополнительного привода. Таким образом, возможно формирование наплавленного валика любой

формы в пределах «коридора» допустимых положений, например, треугольной (рис. 3, кривая 1) или трапециевидальной (рис. 3, кривая 2).

Из рис. 2 следует, что координата $y(\varphi)$ держателя электрода из геометрических соображений определяется как

$$y(\varphi_{\text{КШМ}}) = R \sin \varphi_{\text{КШМ}} + \sqrt{L(\varphi_{\text{КШМ}})^2 - (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2}, \quad (1)$$

где R — длина кривошипа, м; $\varphi_{\text{КШМ}}$ — угол поворота КШМ, град; $L(\varphi_{\text{КШМ}})$ — длина шатуна, м.

Из выражения (1) видно, что, управляя в течение периода колебания (полного оборота кривошипа) длиной шатуна L , можно существенно влиять на закон перемещения держателя электрода.

Изменение длины шатуна $L = f(\varphi)$ (рис. 2) обеспечивается системой автоматического управления (САУ) таким образом, чтобы траектория перемещения электрода $y(\varphi)$ соответствовала заданной.

Так, для получения треугольной траектории перемещения электрода функция $y(\varphi)$ может быть следующего вида:



Рис. 1. Поверхность валика с наплавленными валиками зигзагообразной формы



$$y(\varphi) = Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin(\varphi_{\text{КШМ}})), \quad (2)$$

где Y_0 — смещение, м; H — размах колебаний, м.

Коэффициент $2/\pi$ перед функцией арксинуса является нормированным. Смещение Y_0 удобно выбирать равным

$$Y_0 = \frac{\sqrt{L_{\text{min}}^2 - R^2} + \sqrt{L_{\text{max}}^2 - R^2}}{2}, \quad (3)$$

что дает центрирование в «коридоре» допустимых положений.

Таким образом, для реализации треугольной траектории перемещения электрода длина шатуна КШМ должна изменяться таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\begin{aligned} R \sin \varphi_{\text{КШМ}} + \sqrt{L(\varphi_{\text{КШМ}})^2 - (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2} = \\ = Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin \varphi_{\text{КШМ}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\begin{aligned} L(\varphi_{\text{КШМ}}) = \\ = \sqrt{\left[Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin \varphi_{\text{КШМ}}) - R \sin \varphi_{\text{КШМ}} \right]^2 + (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Получение трапецеидальной траектории возможно путем модификации треугольного колебания следующим образом:

$$y(\varphi) = Y_0 + \frac{H}{\pi} \arcsin \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\pi}{2} - \gamma, \text{ если } \varphi \in \left[\frac{\pi}{2} - \gamma; \frac{\pi}{2} + \gamma \right], \\ & \frac{3\pi}{2} - \gamma, \text{ если } \varphi \in \left[\frac{3\pi}{2} - \gamma; \frac{3\pi}{2} + \gamma \right], \\ & \varphi, \text{ если } \varphi \in (0; \frac{\pi}{2} - \gamma) \cup (\frac{\pi}{2} + \gamma; \frac{3\pi}{2} - \gamma) \cup (\frac{3\pi}{2} + \gamma; 2\pi), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где γ — половинная угловая ширина вершины трапеции.

При этом размах трапецеидального колебания H' и параметр γ связаны соотношением

$$H' = H \left(1 - \frac{2\gamma}{\pi} \right). \quad (7)$$

САУ предложенным составным приводом перемещения электрода должна обеспечивать надежную работу, безошибочное продолжение работы после отключения и последующего восстановления питания, хорошие параметры качества, такие, как время регулирования и перерегулирование.

Составной привод перемещения электрода как объект управления, включающий КШМ с переменной длиной шатуна и двигатель постоянного тока, управляющий этой длиной, представляет собой достаточно сложную нелинейную систему с внутренними обратными связями.

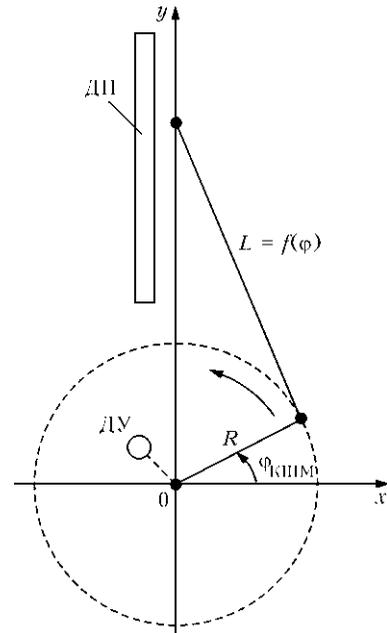


Рис. 2. Кинематическая схема привода: ДУ — датчик угла поворота кривошипа; ДП — датчик положения электрода

Параметром объекта управления, посредством которого возможно влияние на него со стороны САУ, является напряжение якоря. Последнее должно изменяться таким образом, чтобы координата держателя электрода $X_{\text{вых}}$ изменялась по заданному закону. При этом из-за частых реверсов и ускорений двигателя вспомогательного привода необходимо обеспечить ограничение его тока якоря на безопасном уровне. Система также должна быть устойчива к самовозбуждению.

Реализация САУ в виде классического одноконтурного регулятора с общей отрицательной обратной связью по положению электрода приводит к неудовлетворительным параметрам качества регулирования, так как объект управления представляет собой инерционное звено второго поряд-

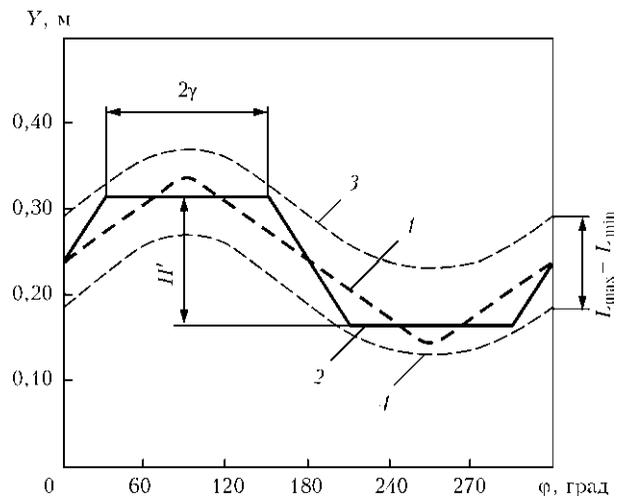


Рис. 3. Траектории КШМ: 1 — треугольная; 2 — трапецеидальная; 3, 4 — соответственно при предложенных длинах L_{max} и L_{min}

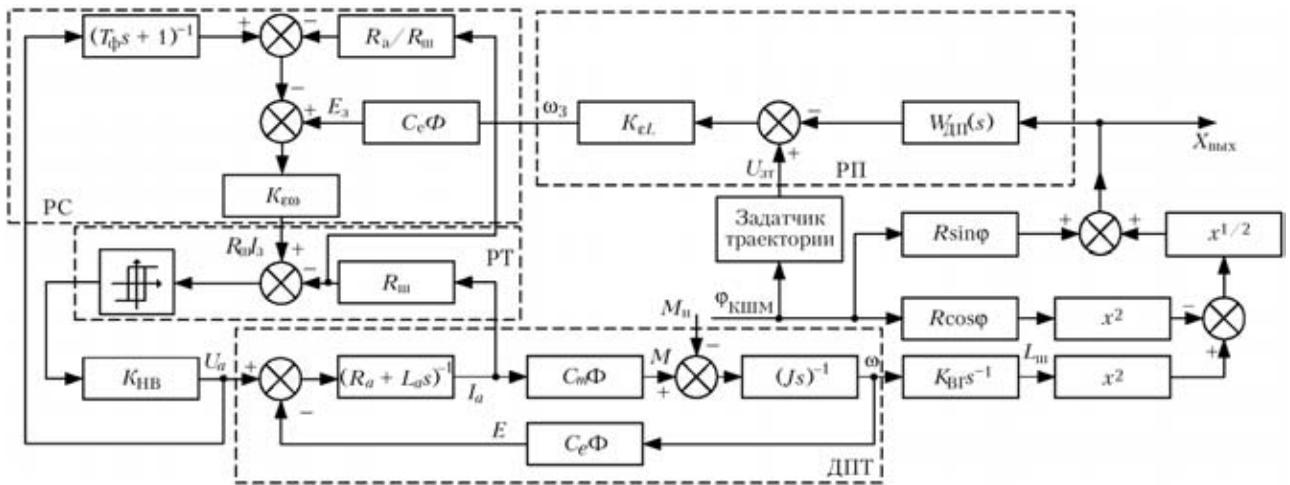


Рис. 4. Структурная схема системы управления механизмом колебания электрода

ка, что затрудняет стабилизацию замкнутой системы.

Улучшить параметры регулирования в одноконтурной схеме автоматического управления не представляется возможным из-за отсутствия информации о работе внутренних обратных связей в объекте управления.

Для облегчения синтеза САУ и обеспечения лучших характеристик регулирования применено разбиение всей системы управления на вложенные контуры с тем, чтобы иметь возможность их последовательной настройки и оптимизации. При этом отдельные контуры регулирования обеспечивают «развязывание» внутренних обратных связей в объекте управления, что дает возможность максимально снизить время регулирования, сохраняя при этом физические ограничения по напряжению и току якоря двигателя.

Система управления имеет три контура регулирования: регуляторы тока (РТ) якоря, скорости (РС) и положения (РП). Структурная схема системы управления приведена на рис. 4. Задачей каждого регулятора является максимально быстрая и точная обработка соответствующего задания. При этом возможна организация местных отрицательных обратных связей.

Формирование тока якоря двигателя вспомогательного привода обеспечивается импульсным гистерезисным регулятором, что предопределяет высокую скорость реакции системы и малые потери мощности в регуляторе.

Практическая реализация САУ выполнена на однокристальном микроконтроллере фирмы ATMEL ATmega168-20. Совмещение большинства функций регулирования на одном кристалле позволяет получить систему с возможностью гибкой настройки практически всех параметров регулятора. Кроме того, применение микромодулятора позволяет легко обеспечить диагностирование работы привода в реальном времени и с ми-

нимальным временем обнаруживать сбой в его работе.

Двигатель основного привода представляет собой двигатель постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 230 Вт, номинальным напряжением якоря 110 В, током 2,9 А и номинальной скоростью вращения 2400 об/мин.

Во вспомогательном приводе выбран двигатель с возбуждением от постоянных магнитов типа ДП-40-40, что объясняется простотой управления (регулирование скорости вращения вала производится только изменением напряжения на якоре), малой инерционностью (электромеханическая постоянная времени порядка 300 мс), большим предельным моментом (порядка $5 M_{ном}$), хорошими массогабаритными показателями и высоким отношением мощности к массе (40 Вт при массе 1,1 кг).

Режим работы двигателя в линейном приводе может быть классифицирован как повторно-кратковременный (S3 по ГОСТ 183-74), поскольку время цикла колебания (порядка 30 с) не превышает постоянной времени нагрева машины. Исходя из этого система управления допускает кратковременные пятикратные перегрузки двигателя в моменты реверса; при этом среднеквадратичный ток якоря, взятый за время цикла, не превышает номинального, что гарантирует отсутствие перегрева.

Для определения угла поворота кривошипа механизма перемещения применен сельсин, на обмотку статора которого подана симметричная трехфазная система напряжений. Электродвижущая сила обмотки ротора и напряжение одной из фаз подается на схему управления. Угол поворота определяется программно по сдвигу фазы между названными выше сигналами.

Положение колеблющейся платформы, на которой установлен механизм подачи электрода, определяется с помощью бесконтактного датчика Micropulse, выходной сигнал которого имеет пределы изменения (-15...+15) В и обновляется с частотой 2 кГц.

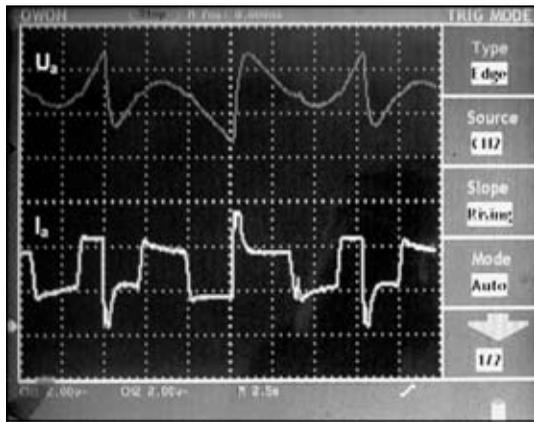


Рис. 5. Осциллограммы напряжения U_a и тока якоря I_a двигателя вспомогательного привода при отработке треугольной траектории перемещения электрода

Для интерактивной настройки параметров системы применен жидкокристаллический индикатор типа TIC154 в типовой схеме включения и четырехкнопочная клавиатура. Настройка производится с помощью иерархического меню.

Напряжения питания обоих двигателей формируются с помощью полумостовых инверторов, управляемых от контроллера и выполненных с применением транзисторов IRG4PC30UD и драйверов IRS2113 в типовой схеме включения. В схеме предусмотрена также возможность обмена данными с персональным компьютером посредством интерфейса RS-232 и возможность внутрисхемного перепрограммирования контроллера.

Применение составного привода позволяет изменять также амплитуду колебаний в процессе работы, что дает возможность проводить наплавку слоя с заданным распределением свойств, например, поверхности лунчатых валков [3].

Авторами выведена зависимость оптимальной длины кривошипа от амплитуды требуемой траектории колебаний, при которой от вспомогательного привода требуется минимальная мощность [4]. Это улучшает динамические характеристики системы (снижение момента инерции) путем предварительной настройки длины кривошипа перед началом цикла наплавки.

На рис. 5 приведены осциллограммы напряжения и тока якоря двигателя вспомогательного при-

вода при изменении длины шатуна при отработке треугольной траектории перемещения электрода с оптимально выбранной длиной кривошипа. Предложенная система управления приводом перемещения электрода имеет характеристики, позволяющие формировать оптимальную для наплавки траекторию перемещения.

В заключение следует отметить, что разработано электромеханическое устройство управления траекторией перемещения электрода, включающее КШМ, приводимый в движение мощным электроприводом, и устройство изменения длины шатуна, содержащее привод постоянного тока, установленный непосредственно на нем, и САУ, регулирующую по заданному закону геометрические параметры шатуна. Система выполнена с использованием микропроцессорной техники и обеспечивает минимизацию мощности устройства изменения длины шатуна путем предварительного выбора оптимальной длины кривошипа. Проверка устройства в лабораторных опытно-промышленных условиях показала высокие динамические характеристики (перерегулирование порядка 10 %, время регулирования 1,8 с при отработке ступенчатого воздействия) и достаточную (порядка 7 %) точность работы колебательного механизма.

Проведены испытания устойчивости данной системы к воздействию внешних возмущений с учетом реальных механических характеристик устройства и ограничений параметров (тока якоря и максимальной скорости). По результатам выполнена оптимизация параметров контуров регулирования САУ.

1. Гулаков С. В., Носовский Б. И. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств. — Мариуполь: ПГТУ, 2005. — 170 с.
2. Пат. 86294 Украина, МПК В23К 9/04. Привод перемещения электрода в наплавочной установке / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, І. С. Псарева. — Заявл. 24.07.2007; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.
3. А. с. 1403498 СССР. Устройство управления процессом наплавки зигзагообразного шва / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский. — Заявл. 28.10.86; Опубл. 15.04.88.
4. Управление процессом дуговой наплавки рабочего слоя валиками зигзагообразной формы / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, І. С. Псарева, А. В. Ярыза-Стеценко // Захист металургійних машин від поломок. — 2006. — Вип. 9. — С. 202–207.

Suggested is the design of the electrode movement mechanism for deposition of complex-configuration beads on working surfaces of machine parts and tools by using the automatic electron control system. The device is a modification of the connecting rod gear, in which the connecting rod is made with a possibility of automatic adjustment of its length.

Поступила в редакцию 31.08.2010



ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНАЯ СИСТЕМА ГИГИЕНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО, д-р техн. наук, В. В. САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, А. О. ЛУКЬЯНЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

В компьютерной системе представлены показатели уровней выделений и химического состава аэрозолей, загрязняющих воздух рабочей зоны при сварке покрытыми электродами, а также система расчета необходимого воздухообмена вентиляции. С их помощью можно рассчитывать содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны при применении разных видов вентиляции (местной и общеобменной), а также выбирать вид системы вентиляции при сварке на различных режимах.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, гигиенические характеристики, сварочные аэрозоли, прогнозирование, вентиляция

Основным средством защиты рабочих от сварочных аэрозолей (СА), загрязняющих воздух производственных помещений, при электродуговой сварке является вытяжная механическая вентиляция. Эффективность удаления СА с рабочего места зависит от правильного выбора вида системы вентиляции и ее производительности, которая рассчитывается на основе экспериментальных данных по интенсивности выделений компонентов СА.

В настоящей работе рассматривается созданная компьютерная информационно-расчетная система (ИРС), позволяющая получать информацию о показателях уровней выделений вредных компонентов СА при ручной дуговой сварке на различных режимах, прогнозировать концентрацию СА и газов (оксида углерода и диоксида азота) в воздухе рабочей зоны, а также рассчитывать требуемый воздухообмен и выбирать вид системы вентиляции.

Основные функции ИРС «Гигиена сварки»:

ввод и редактирование информации об исходных данных и гигиенических показателях сварочных электродов;

хранение и отображение информации;

поиск необходимой информации;

прогнозирование концентрации СА, марганца, оксида углерода и диоксида азота в воздухе рабочей зоны в зависимости от режима сварки и расстояния до сварочной дуги;

расчет показателей воздухообмена вентиляции, т. е. количества воздуха, необходимого для разбавления вредных веществ в воздухе рабочей зоны до предельно допустимых концентраций (ПДК);

выдача рекомендаций о выборе системы вентиляции или средства индивидуальной защиты органов дыхания.

В состав ИРС входят следующие подсистемы: выбор марки электрода; выбор режима сварки; выбор условий сварки (без вентиляции, с общеобменной или местной вентиляцией).

По сравнению с известными информационными системами [1–4] в разработанной нами ИРС «Гигиена сварки» более полно и в доступной форме представлена информация об исходных характеристиках сварочных электродов (назначение, вид покрытия, род тока, режим сварки) и общих показателях уровней выделений СА: интенсивности образования (V_a , г/мин), удельного выделения (G_a , г/кг), коэффициента интенсивности образования (β_a , г/(кВт·ч)) и коэффициента удельного выделения (γ_a , г/(кВт·кг)). В системе представлены данные об экспериментальных и расчетных концентрациях СА в воздухе рабочей зоны на различных расстояниях до сварочной дуги при наличии общеобменной, местной вентиляции и без нее, по которым осуществляется выбор наиболее эффективной системы вентиляции. ИРС позволяет провести гигиеническую оценку известных марок покрытых электродов для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей и в итоге дать рекомендации по выбору соответствующих систем вентиляции (местной или общеобменной).

База данных ИРС «Гигиена сварки» содержит также информацию о качественных показателях выделений СА: их химическом составе для низкоуглеродистых, низколегированных, среднелегированных и высоколегированных сталей. Вместе с тем в ней представлены результаты исследований зависимостей концентрации СА, марганца как определяющего токсичного компонента при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей [5], а также газов (оксида углерода и оксидов азота), характерных для сварки электродами, не содержащими в своем покрытии фторидов. Данные зависимости используются компьютерной системой для выбора вида системы вентиляции,

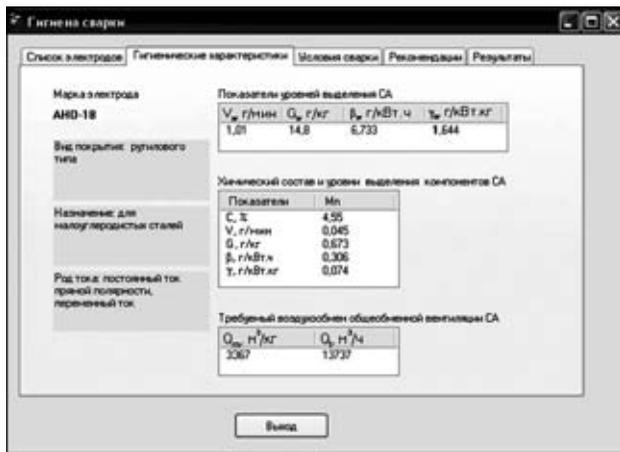


Рис. 1. Выходной документ ИРС «Гигиена сварки»

обеспечивающей содержание СА согласно нормативным требованиям [6].

Поиск информации в базе данных осуществляется по заданной марке сварочного электрода. Результат поиска оформляется в виде выходного документа (рис. 1).

По результатам работы компьютерной системы можно получить гигиенические показатели, характеризующие химический состав, уровень выделений СА, а также с учетом ПДК вредных веществ рассчитывать требуемый воздухообмен общеобменной вентиляции. Последний представлен в виде двух показателей: первый — количество вентилируемого воздуха в расчете на килограмм израсходованных на сварку электродов (Q_m , м³/кг), второй — то же за единицу времени сварки (Q_r , м³/ч). По значениям этих показателей ИРС позволяет выполнить сравнительную гигиеническую оценку сварочных электродов разных марок, в том числе отечественных электродов с зарубежными, используя показатель Q_r .

Концентрацию марганца в воздухе рабочей зоны можно получить расчетным путем по данным интенсивности его образования, используя полученные в работе [5] графические и аналитические зависимости. Для этого в составе базы данных системы «Гигиена сварки» представлена графическая информация (рис. 2), позволяющая в зависимости от условий вентиляции (общеобменной, местной или без вентиляции), режима сварки и расстояния от дуги L определить концентрацию марганца (C_{Mn}) в требуемой точке.

Кроме того, в правой части окна ИРС (рис. 2) представлена текстовая информация о рекомендациях по нормализации содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Эти рекомендации определяют в каких случаях можно использовать общеобменную вентиляцию, а в каких местную, что зависит от марки электрода, параметров режима сварки и расстояния от сварочной дуги до требуемой точки. Если на рабочем месте отсут-

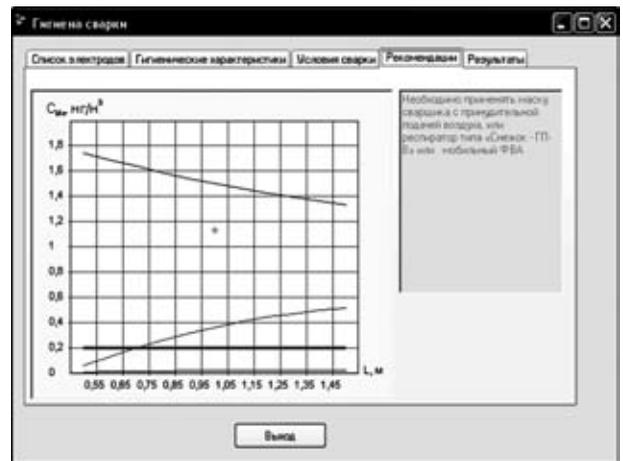


Рис. 2. Графические зависимости ИРС и рекомендации по выбору вида системы вентиляции и (или) средства индивидуальной защиты органов дыхания

твует устройство местной вентиляции, ИРС предлагает применять автономный фильтровентиляционный агрегат. Если и местная вентиляция не обеспечивает содержание вредных веществ в данной точке до ПДК, то предлагается применять средства индивидуальной защиты органов дыхания (фильтрующий респиратор или защитную маску сварщика с системой подачи очищенного воздуха в зону дыхания).

Вместе с тем как альтернатива графические зависимости, представленные в ИРС (рис. 2), показывают как и насколько можно уменьшить воздействие СА на организм присутствующих возле сварочного поста рабочих путем изменения параметров режима сварки и расстояния до сварочной дуги этих рабочих.

Данная система будет полезна для специалистов сварочного производства и служб охраны труда предприятий, применяющих дуговую сварку. Она обеспечит их систематизированной информацией о гигиенических характеристиках сварочных электродов с целью выбора наименее опасных марок, позволит осуществлять адекватный выбор систем вентиляции для рабочих мест и индивидуальной защиты органов дыхания. В результате это позволит повысить уровень защиты рабочих сварочных профессий и снизить риск развития их профессиональной заболеваемости.

1. Информационно-поисковая система гигиенических характеристик сварочных аэрозолей / В. Ф. Демченко, О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, С. С. Козлитина // Свароч. пр-во. — 2001. — № 8. — С. 41–45.
2. Полукаров О. И., Кружилко О. Е., Полукаров Ю. О. Використання інформаційно-аналітичної системи при плануванні працезахоронних заходів у зварювальному виробництві // Сварщик. — 2006. — № 2. — С. 42–44.
3. Machaczek S., Matusiak J. Katalog charakterystyk materialow spawalniczych pod wzgledem emisji zanieczyszczen. — Gliwice: Instytut Spawalnictwa, 1994. — 63 S.
4. Programy Komputerowe dla potrzeb spawalnictwa. — Gliwice: Instytut Spawalnictwa, 1994. — 40 S.



5. Левченко О. Г., Лукьяненко А. О., Полукаров Ю. О. Экспериментальное и расчетное определение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны при дуговой

сварке покрытыми электродами // Автомат. сварка. — 2010. — № 1. — С. 31–35.

6. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. — Введ. 01.01.89.

The computer system is presented, comprising indicators of the levels of emissions and chemical composition of the fumes that pollute the work zone air in covered-electrode welding, as well as system for calculation of the required ventilation air exchange. They can be applied to calculate the content of harmful materials in the work zone air when using different types of ventilation (local and common), and select the type of the ventilation system for welding under different conditions.

Поступила в редакцию 26.10.2010

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
А. Н. Кислица (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 22 декабря 2010 г. кандидатскую диссертацию на тему «Микроплазменное

напыление с использованием проволочных электродов». В ней установлены основные технологические особенности процесса микроплазменного напыления из проволочных материалов и определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс напыления и свойства покрытий.

Расчетно-теоретический анализ процесса диспергирования расплава материала нейтральной проволоки в условиях микроплазменного напыления показал, что условием отрыва капли расплава с торца нейтральной проволоки является необходимая скорость микроплазменной струи, которая зависит от свойств материала проволоки, главным образом от поверхностного натяжения ее расплава и для $\sigma = 0,914 \dots 2,3$ Дж/м² составляет 270...430 м/с. Это соответствует устанавливаемому расходу плазмообразующего газа в пределах 100...300 л/ч. Данные расхода плазмообразующего газа приводят к турбулентному характеру истечения плазменной струи ($Re = 5000 \dots 9000$).

Диаметр проволоки и скорость ее подачи в зону дуги при МПН зависят от теплофизических свойств ее материала, которые определяют ее стабильное плавление в зоне дуги. В случае применения проволок W, NiCr, Ti диаметр проволоки составляет 0,2...0,4 мм, а скорость подачи — 3...6 м/мин.

Определены ВАХ микроплазмотрона с выносным анодом и защитным соплом для условий микроплазменного напыления из проволочных материалов. Исследовано влияние технологических параметров на КПД плазмотрона, который достигает 73 %, а температура плазмы при этом — 17700 К.

Степень влияния различных факторов процесса распыления проволоки на средний размер частиц для различных материалов при диспергировании расплава проволоки плазменной струей, а также на КИМ определена с применением метода планирования многофакторного эксперимента. Математическая обработка полученных данных позволила получить линейные регрессионные модели, показывающие влияние наиболее существенных параметров процесса (силы тока, расхода плазмообразующего газа, дистанции напыления, скорости подачи проволоки) на формирование струи частиц напыляемого материала и комплекса характеристик покрытий из W, NiCr и Ti в условиях микроплазменного напыления с использованием проволочных материалов.

Для условий микроплазменного напыления из проволочных материалов определены скорость частиц напыляемого материала, которая зависит от силы тока и расхода плазмообразующего газа и обратно пропорциональна удельному весу распыляемого материала. Скорость достигает для Ti-частиц — 75, NiCr-частиц — 70, W-частиц — 45 м/с.

Проведено исследование фигуры металлизации для МПН с использованием NiCr-проволоки. Установлено, что профиль фигуры металлизации описывается распределением Гаусса. Диаметр пятна напыления составляет 5...10 мм, угол раскрытия струи находится в пределах 4,6...9,4°, что сравнимо с данными для ламинарных плазменных струй, и, вероятно, связано с наличием обжимающей струи защитного газа. Показано, что в связи с возможностью сокращения дистанции напыления при проволочном МПН до 40...60 мм достигается пониженное содержание в покрытиях оксидных и нитридных фаз. Так, для Ti-покрытия минимальные значения составили O₂ — 0,88, N₂ — 0,57 %.

В результате установления возможности управления макропористостью Ti-покрытий при проволочном МПН, соответствия значения их сцепления с основой из Ti-сплава на отрыв ($25,6 \pm 4,6$ МПа)



и на сдвиг ($24,2 \pm 3,5$ МПа), требованиям ASTM C633, а также данным испытаний этих покрытий *in-vivo*, показана эффективность их применения при изготовлении эндопротезов различного назначения (тазобедренных, дентальных и др.).



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
И. А. Рябцев (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 2 февраля 2011 г. докторскую диссертацию на тему «Восстановление и упрочнение методами наплавки деталей, эксплуатирующихся в ус-

ловиях изнашивания и различных видов циклических нагрузок».

Диссертация посвящена разработке теоретических представлений о наплавляемой детали как многослойной конструкции, каждый из слоев которой имеет свое функциональное назначение и вносит свой вклад в напряженно-деформированное состояние детали в целом и влияет на ее эксплуатационные свойства, срок службы и возможность многократной восстановительной наплавки.

На основе современных моделей вязкопластического неизотермического течения, термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита наплавленного и основного металлов с использованием численного метода конечных элементов разработана методика расчета остаточного напряженно-деформированного и структурного состояния цилиндрических и плоских деталей при одно- и многослойной наплавке и их влияния на усталостную прочность при циклических механических или термомеханических нагрузках. Расчеты подтверждены испытаниями термической и механической усталостной прочности наплавленных образцов и деталей.

Разработана методика и проведен расчет напряженно-деформированного и структурного состояния в процессе наплавки и эксплуатационных циклических термических нагрузок деталей типа прокатных валков, наплавленных инструменталь-

ной сталью, без и с пластичным подслоем. Расчетами установлено, что наплавка с пластичным подслоем обеспечивает снижение на 25...30% напряжений в наиболее нагруженном наружном рабочем слое, в результате чего примерно на 35% повышается термическая стойкость наплавленной детали. Экспериментальные исследования термической стойкости наплавленных образцов подтвердили результаты расчетов. Для управления структурой и свойствами наплавленного металла предложено использовать эффект структурной наследственности в системе электродный (присадочный) материал–сварочная ванна–наплавленный металл. Установлено, что при дуговой наплавке на структуру и износостойкость наплавленного металла влияет способ подготовки шихтовых материалов и их структура. При одинаковом химическом составе в структуре металла, наплавленного проволокой с шихтой из порошков ферросплавов, в том числе высокоуглеродистого феррохрома, содержание карбидов приблизительно 1,2...1,3 раза больше, чем в структуре металла, наплавленного проволокой с шихтой из предварительно выплавленного и распыленного высоколегированного порошка. Эффект структурной наследственности предложено использовать для измельчения структуры и увеличения термической стойкости износостойкого наплавленного металла типа инструментальных сталей за счет введения в шихту наплавочных порошковых проволок ультрадисперсных эвтектических карбидных композиций основных легирующих элементов хрома, вольфрама, ванадия и др.

Проведенные исследования позволили разработать новые высокоэффективные наплавочные материалы и технологии наплавки деталей, эксплуатирующихся в условиях изнашивания и циклических механических или термомеханических нагрузок. Разработанные материалы и технологии наплавки прошли опытно-промышленную проверку и используются на горно-обогатительных комбинатах и металлургических предприятиях Украины.



В. А. Троицкому — 75



Исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины Владимиру Александровичу Троицкому. Свою научную деятельность он начал в 1958 г. после окончания с отличием Московского элект-

ромеханического института. В 1961 г. В. А. Троицкий впервые начал использовать магнитодиэлектрики в низкочастотной технике. Это научное направление радикально изменило технологию производства некоторых электрических машин, реакторов и других электромагнитных устройств. Этой проблеме была посвящена кандидатская диссертация.

В 1964 г. В. А. Троицкий был приглашен для работы в ИЭС им. Е. О. Патона, где в 1973 г. защитил докторскую диссертацию. Им разработаны теоретические основы принципа амплитудного регулирования, получившего название магнитной коммутации, методики расчета различных сварочных источников питания, созданы сварочные источники с ускоренными переходами тока и напряжения через нулевое значение, резонансные источники сварочного тока, исследованы преддуговые процессы. Созданное под руководством В. А. Троицкого оборудование было освоено на 12 предприятиях СССР. С 1976 г. В. А. Троицкий руководит отделом неразрушающих методов контроля качества сварных соединений в ИЭС им. Е. О. Патона. В отделе представлены все основные физические методы (радиационные, магнитные, акустические, капиллярные, вихретоковые, тепловые и т. п.).

В. А. Троицким созданы теоретические основы намагничивания сложных магнитных цепей, возникающих при магнитных видах НК, сформулированы условия, ограничивающие возможности магнитных методов с учетом геометрии детали, форм частиц магнитного порошка. Впервые магнитная суспензия представлена как магнитодиэлектрик. Под его руководством разработана и внедрена в различных отраслях промышленности гамма магнитных дефектоскопов, три из которых выпускается серийно. Это широко известные магэкссы. На протяжении почти 35 лет им ведется разработка и внедрение систем НК на разных заводах, в том числе на трубопрокатных и машиностроительных.

Под руководством В. А. Троицкого созданы уникальные методики и приборы для неординарных задач дефектоскопии таких, как УЗК продольных и кольцевых швов с раздельной фиксацией дефектов шва и зон термического влияния с точным слежением за осью сварных швов; УЗК ванной сварки

арматуры, способы для послойного контроля толстостенных конструкций, тренажеры различных систем для подготовки операторов УЗ контроля, устройства для запоминания и анализа результатов УЗК; внедрены ультразвуковые методы TOFD, SAFT для точного определения размеров внутренних дефектов, основанные на использовании дифрагированных волн и математических методов построения искусственных апертур; УЗ методики и устройства для нахождения дефектов типа матовых пятен и оксидных пленок, не имеющих раскрытия (объема), являющихся зародышами будущих усталостных трещин в швах контактной, диффузионной сварки. Под руководством В. А. Троицкого созданы комплексы для цифровой радиографии, так называемые рабочие места рентгенолога для обработки и архивации R-информации, улучшения качества R-изображений, документирования результатов R-контроля; им разработана методика диагностики тел вращения (труб реакторов и т. п.) без снятия изоляции, так называемый метод тангенциального радиационного просвечивания.

В. А. Троицкий является членом многих зарубежных обществ НКТД. Активно работает во Всемирном конгрессе (ISNDT) и в Европейской федерации (EFNDT), принимает участие в подготовке специалистов по линии МАГАТЭ, занимается гармонизацией правил аттестации персонала НК. Принимал участие в подготовке и гармонизации более 40 стандартов по проблемам НК, выполнении европейских программ LRUT и Shipinspector. В 2008 г. совместно с другими учеными мира организовал Интернациональную академию НК (IANDT), штаб-квартира которой находится в г. Breshia (Италия). В данное время проф. В. А. Троицкий работает над УЗК протяженных объектов без сканирования их поверхности и над внедрением портативного рентгентелевизионного контроля, который на порядок дешевле, чем пленочная радиография.

Деятельность В. А. Троицкого отмечена премией Совета Министров СССР и Государственной премией Украины. В. А. Троицким подготовлено 14 кандидатов наук, написано 12 книг, в том числе шесть учебных пособий, он имеет порядка 500 патентов, авторских свидетельств, научных статей. В. А. Троицкий много лет является членом редколлегии английского журнала «Insight», зам. редактора журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», членом ряда ученых советов.

Институт электросварки, редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка» сердечно поздравляют Владимира Александровича с юбилеем, желают ему доброго здоровья и успехов в его многогранной научной деятельности.

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ М. Н. СИДОРЕНКО



Михаил Николаевич Сидоренко родился в с. Солошино Полтавской области. В 1930-х годах учился в Днепропетровском институте инженеров транспорта на электротехническом факультете. С 1934 г. и до последних дней своей жизни (1992 г.) работал в Институте электросварки им. Е. О. Патона, где

прошел путь от лаборанта до руководителя группы. В 1941–1944 гг. вместе с институтом работал на эвакуированном из Харькова танковом заводе № 183 в Нижнем Тагиле. В 1944 г. вернулся в Киев и продолжил работу в институте в отделе электрических процессов, где организовал и 18 лет руководил мастерской по изготовлению лабораторных и опытных образцов сварочных источников питания и другого сварочного оборудования. Впоследствии стал руководителем группы в отделе источников питания.

М. Н. Сидоренко, будучи опытным специалистом в области сварочных источников питания, выполнял сложные электромагнитные расчеты силовых узлов различных источников питания от сварочных трансформаторов до статических и машинных преобразователей. Им создана серия выпрямителей ВС-300, ВС-400, ВС-500, ВС-600 и ВС-1000 для сварки в защитных газах. М. Н. Сидоренко разработал трансформаторы СТ-1000 и СТ-2000 для ав-

томатической сварки под слоем флюса, а также для электрошлаковой сварки ТШС-1000/1, ТШС-3000/3 и электрошлакового переплава ТШП-10000/1. Он принимал непосредственное участие в создании серии трансформаторов типа СТШ для сварки электродами с покрытием. Весомый вклад сделан им при создании уникальных трансформаторов для контактной стыковой сварки труб и железнодорожных рельсов. Особо следует отметить работы М. Н. Сидоренко по созданию многопостового выпрямителя ВМГ-5000 для сварки в защитных газах, основными заказчиками которого были предприятия судостроения и заводы металлоконструкций, и источники питания переменного тока прямоугольной формы типа ТФТ-2000 для автоматической сварки под флюсом в трубном производстве. М. Н. Сидоренко имел богатый практический опыт, который всегда охотно передавал молодежи.

В 1982 г. за большой вклад в развитие сварочной техники М. Н. Сидоренко был удостоен звания «Заслуженный машиностроитель УССР», кроме того, награжден медалями «За трудовую доблесть», «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За трудовое отличие».

М. Н. Сидоренко — автор десятков статей и изобретений. Имя Михаила Николаевича Сидоренко надолго сохранится в памяти всей сварочной общности.

МУЛЬТИСИСТЕМА СВАРОЧНАЯ ВДУ-511 (три режима сварки МИГ/МАГ, ТИГ, ММА)

**В ОАО Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»
разработана мультисистема, предназначенная для:**

- комплектации полуавтоматов дуговой сварки. В комплекте с полуавтоматом используется для полуавтоматической сварки плавящейся электродной проволокой на постоянном токе в среде защитных газов (CO₂, аргон, смеси) (режим МИГ/МАГ-DC);
- ручной дуговой сварки покрытыми электродами на постоянном токе (режим ММА-DC);
- аргонодуговой сварки неплавящимся электродом на постоянном токе (режим ТИГ-DC).

Мультисистема обеспечивает:

- в режиме МИГ/МАГ-DC — жесткие вольт-амперные характеристики с регулируемой индуктивностью для полуавтоматической сварки в среде защитных газов стальными и порошковыми проволоками;
- в режиме ММА-DC — вольт-амперные характеристики с плавной регулировкой тока короткого замыкания для ручной дуговой сварки покрытыми электродами различных типов;
- в режиме ТИГ-DC — вольт-амперную характеристику для сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом, в среде аргона.

Основные преимущества:

- универсальность источника (наличие трех режимов сварки — МИГ/МАГ, ММА и ТИГ);
- наличие специальной вольт-амперной характеристики для сварки неплавящимся электродом в режиме ТИГ;
- плавная регулировка сварочного тока в режиме ММА и сварочного напряжения в режиме МИГ/МАГ;
- цифровая индикация сварочного тока и напряжения;
- индикация сварочного тока и сварочного напряжения после окончания сварки;
- удобное расположение элементов управления и индикации;
- дистанционное регулирование сварочных параметров с помощью пульта;
- наличие розетки 36 В для питания подогревателя газа;
- класс изоляции Н;
- быстроразъемные, безопасные токовые разъемы;
- уменьшенные масса и габаритные размеры по сравнению с аналогами;
- мобильный в передвижении (установлен на колеса — опция).

Совершенство сварочного процесса:

- низкое разбрызгивание в режимах ММА и МИГ/МАГ (минимальная обработка сварного изделия после сварки);
- высокая стабильность длины дуги при сварке угловых и тавровых соединений во всех пространственных положениях;
- высокая эластичность сварочной дуги в режиме ММА;
- наличие регулировки индуктивности сварочного контура позволяет оптимально выбрать сварочный режим для сварки различными сварочными материалами во всех пространственных положениях;
- регулировка динамики переноса металла при сварке в режиме МИГ/МАГ;
- легкое зажигание и устойчивое горение дуги;
- плавная регулировка тока короткого замыкания в режимах ММА и ТИГ.

Безопасность и надежность в работе:

- наличие термозащиты от перегрузки;
- наличие защиты от короткого замыкания в нагрузке;
- меньшая подверженность загрязнению вследствие расположения электронных компонентов в месте, защищенном от пыли.

Области применения:

- производственные и ремонтные работы в металлообрабатывающей промышленности, изготовление и монтаж стальных конструкций, машиностроение, строительство резервуаров, автомобилестроение и судостроение, строительно-монтажные работы и др.



Технические характеристики

Наименование параметра	ВДУ-511		
	МИГ/МАГ-DC	ММА-DC	ТИГ-DC
Напряжение питающей сети, В	3×380		
Частота питающей сети, Гц	50		
Номинальный сварочный ток, А (при ПВ, %)	500 (60%); 400(100%)		
Пределы регулирования сварочного тока, А	50...500	30...400	30...400
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	16,5...39	21...36	11...26
Напряжение холостого хода, В, не более	55		
Регулирование сварочного тока	Плавное		
Диаметр электрода, электродной проволоки, мм	—	2...8	0,8...8
Потребляемая мощность при номинальном токе, кВт·А, не более	29	23	24
Масса, кг, не более	240		
Габариты (длина x ширина x высота), мм, не более	845×520×795		

ПОДПИСКА — 2011 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, 200-82-77; факс: (38044) 528-34-84, 200-82-77.

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 _____ **20** г. по _____ **20** 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) — 340\$
 - Четвертая страница обложки (200×290мм) — 340\$

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

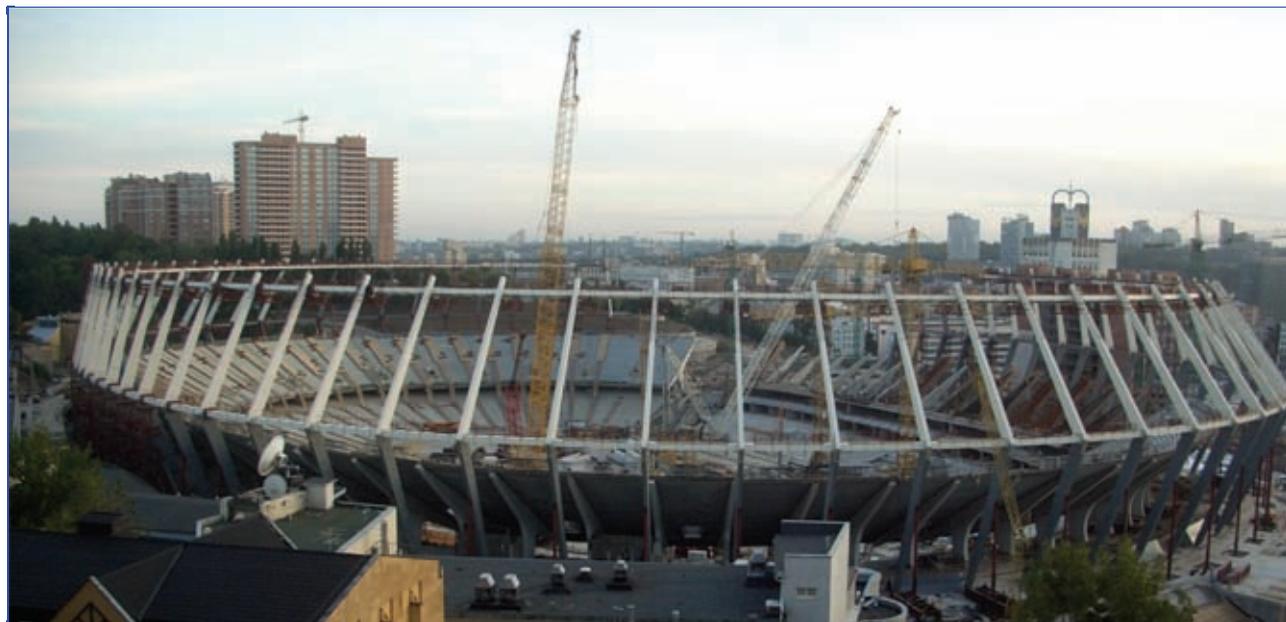
- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия 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 13.01.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,94. Уч.-изд. л. 10,45 + 5 цв. вклеек. Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРЫ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ НСК «ОЛИМПИЙСКИЙ» (г. Киев)

При подготовке к проведению Чемпионата Европы по футболу ЕВРО 2012 выполняется большой комплекс работ по реконструкции существующих и строительству новых объектов НСК «Олимпийский» в Киеве.



Реконструкция стадиона НСК «Олимпийский»



Сварное соединение



Сварные ригели

Свой вклад в осуществление масштабных проектов в запланированные сроки внес Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В частности, отделом сварки давлением института разработаны технологии контактной стыковой сварки стержневой арматуры железобетона и образец передвижного комплекса для реализации этих технологий непосредственно на строительной площадке. Комплекс включает ранее созданные в ИЭС им. Е. О. Патона мобильные контактные стыковые машины. В течение июня – октября 2010 года с помощью предложенной технологии и оборудования выполнен большой объем работ по контактной стыковой сварке стержневой арматуры железобетона диаметром 20, 25, 28, 32 и 36 мм для изготовления двадцати ригелей верхнего яруса зрительских трибун VIP-зоны и монолитных плит зоны подъезда автобусов команд.

Проведенные металлографические исследования и механические испытания показали, что качество сварных соединений полностью соответствует требованиям действующих нормативных документов.

Эта разработка может широко использоваться при строительстве промышленных и жилых сооружений, мостов, виадуков и других объектов.



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, ТМА-1У, ТМА-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-НnX25П4Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — 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	Тел.:	(044)	456-64-95
г. Киев-112			456-63-69
ул. О. Телиги, 2	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



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, наплав
напыления и металлизации

Электроды наплавочные, специального назнач
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и лигатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

**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

SELMA 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 аргодуговой 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.



STEIN-MEGAFIL®

МЫ НЕ ИЗОБРЕЛИ КОЛЕСО,
НО МЫ ИЗОБРЕЛИ
ПРОВОЛОКУ.



STEIN-MEGAFIL® - для решения Ваших задач в области сварки. Эта полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами создана для удовлетворения Ваших требований к сварке. Она отличается высокой конструктивной размерной стабильностью, не скручивается, не деформируется, благодаря чему идеально подходит для прецизионной сварки. Проволока влагостойка и, следовательно, не требует повторной сушки. Кроме того, она обладает прекрасной электропроводностью и обеспечивает стабильность горения дуги и формирования жидкой ванны.

DRAHTZUG STEIN
wire & welding

Drahtzug Stein
67317 Altleiningen (Germany)
Tel: +49(0)6356 966-0 info@drahtzug.com
Fax: +49(0)6356 966-114 www.drahtzug.com

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ
83017, г. Донецк, пер. Вятский, 2а
тел.: (062) 332-2650(52) info@arcsel.dn.ua
тел./факс: 382-9449, 332-2651 www.arcsel.dn.ua

NGM **ООО НПФ «Нефтегазмаш»**

Проволоки порошковые наплавочные

Наплавка открытой дугой
(HRC наплавленного слоя от 26 до 67, диаметр проволок от 1,6 до 3,6 мм)

Наплавка под флюсом
(HRC наплавленного слоя от 24 до 50, диаметр проволок от 1,6 до 3,6 мм)

Проволоки порошковые сварочные

для сварки конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей (диаметр проволок от 1,6 до 3,0 мм)

Тел.: (38044) 536-10-16, 536-10-21, 374-03-10
Киевская обл., пгт. Буча, ул. Чкалова, 2
e-mail: ngm@nbi.com.ua; http://ngm.com.ua

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. Днепрпетровск, 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
рифленные

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

**ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ**

www.dneprometiz.com.ua

ТМ.ВЕЛТЕК

ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И НАПЫЛЕНИЯ

- порошковые проволоки для изготовления и ремонта прокатного оборудования
- порошковые проволоки для изготовления, ремонта, восстановления узлов и агрегатов горно-рудных и обогатительных комплексов
- порошковые проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного износа
- порошковые проволоки для сварки малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей

Мы создаем то, что объединяет и укрепляет

03680, г.Киев, Украина ул. Боженко, 15, корп.7, оф. 303
тел./факс: (044) 200-84-85 (044) 200-86-97
weldtec@iptelecom.net.ua www.weldtec.com.ua

Специальные Научные Разработки **СНР**
Научно-производственная фирма

Магнитные материаловедческие измерения

✓ С измерением характеристик петли магнитного гистерезиса на стационарных высокоточных (баллистических) установках.

✓ Оценка деградации (микрповрежденности) металлов по наиболее чувствительному магнитному параметру.

✓ Разработка и поставка магнитоизмерительных установок, комплексов, приборов:

- универсальных и специализированных;
- стационарных, настольных, портативных, автономных;
- для научных, учебных, производственных, диагностических задач;
- для входного, сдаточного, технологического контроля;
- измерения по любым национальным и зарубежным стандартам;
- быстро и точно, за минуты – объем измерений, как ранее – за часы;
- модернизируем старые установки, купим их фрагменты.

► **Мировая новизна принципов и продуктивности измерений.**
► **Лучшее сочетание цена / качество.**

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

Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

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



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



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.
Электросварка.**

**100% гарантия от
производителя**

GYS **ТБ**
ДОНМЕТ[®]

ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ

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

ЗАПОРОЖЬ
Тел./факс (061) 224-11-56

ПУГАНСК • 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
- Плазмтроны 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



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ для СВАРКИ и РЕЗКИ

Модульная система привода

Обеспечивает непрерывную сварку и резку с точной скоростью перемещения, создавая качественный швы и разрезы в промежуток времени необходимый для работы вручную. Различные типы рельс позволяют использовать систему во всех типах применений

Альтернативный модуль управления позволяет системе выполнять:

- Непрерывную сварку без поперечных колебаний электрода
- Зачистку
- Прерывистую шовную сварку
- Разделку кромок
- Сварку с поперечными колебаниями электрода
- Программируемую профильную резку

Для получения дополнительной информации просьба обращаться:

eurobugo@aol.com, www.bugo.com

Bug-O Systems 161 Hillpointe Dr. Canonsburg, PA 15317 USA



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ
ФИРМЫ LORCH SCHWEISSTECHNIK GmbH

LORCH

ПРИНЦИП КАЧЕСТВО



Сварочная техника



LORCH

49027, г. Днепропетровск, ул. Ворошилова, 12
Тел.: (056) 3742481, (056) 3742480
e-mail: info@delta.in.ua; www.delta.in.ua