Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 4 (601)
Апрель 2003

Издается с 1948 года

Учредители: *Национальная академия наук Украины*
Институт электросварки им. Е. О. Патона
Международная ассоциация «Сварка»

Издатель: *Международная ассоциация «Сварка»*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Н. П. Алешин (Россия)
Б. Брейтвейт (Великобритания)
К. Буше (Франция)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
Т. Игар (США)
К. Иноуэ (Япония)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Д. фон Хофе (Германия)
Чжан Янмин (Китай)
В. К. Шелег (Беларусь)

Адрес редакции:
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, Т. В. Юштина.
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова,
И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева.

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечень утвержденных ВАК Украины изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.
За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет.
Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Семенов С. Е., Рыбаков А. А., Гончаренко Л. В., Филипчук Т. Н., Дрогомирецкий М. Н., Педько Б. И. Оценка состояния металла сварных труб длительно эксплуатируемых газопроводов 3
Нестеренков В. М. Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины 8
Лобанов Л. М., Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Миходуй О. Л., Васильев В. Г., Стрижак П. А. К вопросу образования продольных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей 14
Максимов С. Ю., Савич И. М., Захаров С. М., Зайцева Н. В., Козлов Е. В. Структура и свойства металла, наплавленного под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой 19
Борисов Ю. С., Колисниченко О. В. Влияние плазменно-детонационной обработки поверхности на тепловое состояние и фазовый состав модифицированных слоев стали У8 23
Григоренко Г. М., Грабин В. Ф., Головко В. В., Костин В. А., Алексеенко И. И., Капитанчук Л. М. Методика определения размеров ультрадисперсных неметаллических включений в металле сварных швов низколегированных сталей 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Добрушин Л. Д. Прецизионная сварка взрывом конструкций 31
Горбач В. Д., Черных В. В. Обеспечение экологической и производственной безопасности сварочного производства в российском судостроении 35
Фирма «Фрониус» представляет: Time Twin — высокопроизводительный способ сварки 39
НКМЗ меняет облик 43

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Цзи Чжень Чун, Коринец И. Ф. Номограмма для определения режима дуговой сварки в смеси Ar + 25 % CO_2 плавящимся электродом 45
Сидорук В. С. О служебных изобретениях, полезных моделях и произведениях 47
Разработано в ИЭС: Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом 48
Диссертация на соискание ученой степени 49
Патенты в области сварочного производства 49
По зарубежным журналам 51
Новая книга 54

ХРОНИКА

Вручение Президенту Европейской федерации сварки серебряного знака 55
Перспективы развития высшего образования (по материалам V Международной научно-практической конференции) 55
В Межгосударственном научном совете по сварке и родственным технологиям 57
Международная конференция «Ультразвуковая дефектоскопия 75» 57
Наши соболезнования 59

РЕКЛАМА

Е. О. Патон Интернешнл Холдингс 61

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:
КЗЭСО Каховский завод электросварочного оборудования
СП «ТМ ВЕЛДТЕК»
Опытный завод сварочных материалов ИЭС им.Е.О.Патона
NKMZ Ново-Краматорский машиностроительный завод
Технопарк «ИЭС им.Е.О.Патона»
Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им.Е.О.Патона

© НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2003

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 4 (601)
April 2003

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

Published since 1948

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

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

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

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
B. Braithwaite (UK)
C. Boucher (France)
Guan Qiao (China)
U. Diltey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
D. von Hofe (Germany)
Zhang Yanmin (China)
V. K. Sheleg (Belarus)

Address:
The E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:
E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
T. V. Yushtina.
Electron galley:
I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegiryova.

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

Semyonov S. E., Rybakov A. A., Goncharenko L. V., Filipchuk T. N., Drogomiretsky M. N., Pedko B. I. Evaluation of metal condition in welded pipes of gas pipelines of long-term service 3
Nesterenkov V. M. Peculiarities of capillary waves in vapour-gas channel in electron beam welding of thick metals 8
Lobanov L. M., Mikhoduy L. I., Poznyakov V. D., Mikhoduy O. L., Vasiljev V. G., Strizhak P. A. Towards the formation of transverse cracks in high-strength steel welded joints 14
Maksimov S. Yu., Savich I. M., Zakharov S. M., Zaitseva N. V., Kozlov E. V. Structure and properties of deposited metal made under water using nickel-sheath flux-cored wire 19
Borisov Yu. S., Kolisnichenko O. V. Effect of plasma-detonation treatment of surface on thermal state and phase composition of modified layers of steel U8 23
Grigorenko G. M., Grabin V. F., Golovko V. V., Kostin V. A., Alekseenko I. I., Kapitanchuk L. M. Method of determination of sizes of ultradispersed non-metallic inclusions in low-alloy steel weld metal 28

INDUSTRIAL

Dobrushin L. D. Explosion precision welding of structures 31
Gorbach V. D., Chernykh V. V. Assurance of ecological and production safety of welding jobs in Russian shipbuilding 35
Company «FRONIUS» promotes : Time Twin — high-efficient method of welding 39
NKMZ changes its image 43

BRIEF INFORMATION

Gi Gian Chun, Korinets I. F. Nomogram for determination of arc consumable electrode welding condition in mixture Ar + 25 % CO_2 45
Sidoruk V. S. About inventions, useful models and publications 47
Developed at the Paton Institute: Power source for pulsed-arc consumable electrode welding 48
Thesis for scientific degree 49
Patents in the field of welding 49
Review of foreign journals 51
New book 54

NEWS

President of EWF is awarded by Silver Token 55
Prospects of development of higher education (from materials of the V International Scientific-Practical Conference) 55
In Interstate Scientific Council on Welding and Related Technologies 57
International Conference «Ultrasonic flaw detection 75» 57
Our condolences 59

ADVERTISING

E. O. Paton International Holdings 61

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

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2003

УДК 621.791:621.643.1/.2

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ТРУБ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

С. Е. СЕМЕНОВ, **А. А. РЫБАКОВ**, кандидаты техн. наук, **Л. В. ГОНЧАРЕНКО**, **Т. Н. ФИЛИПЧУК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. Н. ДРОГОМИРЕЦКИЙ, **Б. И. ПЕДЬКО**, инженеры (ГК «Укртрансгаз», г. Киев)

Исследованы служебные свойства образцов труб, вырезанных из действующих газопроводов, а также из труб аварийного запаса. Показана возможность сохранения работоспособности трубного металла после длительных сроков эксплуатации. Установлено, что пониженные показатели прочности металла отдельных труб по сравнению с нормативными значениями не связаны с влиянием эксплуатационных нагрузок. Для обеспечения надежной эксплуатации старых газопроводов необходимо выявлять и устранять опасные дефекты металла, а также проводить диагностические обследования с идентификацией уложенных труб, оценкой уровня технических характеристик и стабильности качества.

Ключевые слова: газопровод, материал, эксплуатация, исследование, служебные свойства, состояние, старение

В ряде работ, посвященных оценке состояния действующих газо- и нефтепроводов, высказывается мнение об отрицательном влиянии длительности эксплуатации на работоспособность материала магистральных трубопроводов.

В результате проведенных нами ранее исследований материала длительно эксплуатируемых (до 35 лет) нефтепроводов [1, 2] не выявлено значительных изменений основных служебных свойств металла труб, что позволило сделать вывод о возможности сохранения работоспособности металла трубопроводов в процессе их длительного силового нагружения. При этом не исключается возможность появления локальных изменений трещиностойкости металла трубопровода, связанных с развитием деформационного старения [3, 4].

В отличие от нефтепроводов в газопроводах возможно развитие протяженных разрушений. Последствия процессов старения материала могут представлять значительную опасность для работы газопроводов. Поэтому большое значение имеет сохранение в металле длительно эксплуатируемых газопроводов прочностных и особенно вязкостных свойств.

Накопление данных о свойствах металла долговременно работающих газопроводов позволит с большей достоверностью судить о влиянии фактора длительного нагружения на материал трубопровода.

В связи с этим было исследовано состояние металла образцов труб, вырезанных из действующих газопроводов, а также из соответствующих труб аварийного запаса.

До 1970-х гг. при сооружении магистральных газопроводов использовали трубы из нормализованных и горячекатаных сталей. Трубы из современных сталей контролируемой прокатки начали применять позже. Срок работы таких газопроводов, как правило, не превышает 20 лет.

В настоящей работе исследовали образцы труб, соответствующие представительному ряду материалов газопроводов с достаточно длительным (более 25 лет) периодом эксплуатации. Изучение поведения труб из стали контролируемой прокатки при длительной эксплуатации с учетом специфических особенностей структуры и химического состава представляет самостоятельный интерес.

Бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 508 мм (сталь типа 19Г) поставлялись в 1950–1970-х гг. из бывшей ЧССР. В отличие от сварных они имеют повышенную разностенность.

Горячеправленые трубы диаметром 529 мм производства Ждановского металлургического завода им. Ильича впервые стали изготовлять для систем магистральных трубопроводов нефти и газа в бывшем СССР из листовой кремнемарганцевой стали 10Г2СД (впоследствии 10Г2С1) с пониженным (до 0,12 %) содержанием углерода. Существенным недостатком технологического процесса их производства являлось применение односторонней сварки продольного шва, хотя механические характеристики основного металла и сварного соединения существенно улучшались благодаря горячей правке труб при нагреве до температуры нормализации стали.

Прямошовные трубы диаметрами 720 (сталь 17ГС) и 1220 мм (17Г1С) производства Челябинского трубопрокатного завода, а также трубы диаметром 1020 мм (сталь 17Г1С) производства Новомосковского трубного завода (НТЗ) являлись наиболее распространенной продукцией, поставляемой для сооружения нефте- и газопроводов. В отличие от труб диаметром 530...820 мм, изготовляемых из горячекатаной стали, трубы диаметрами 1020 и 1220 мм выполняли только из нормализованных листов.

Трубы, производимые в ФРГ из нормализованной листовой стали типа 17Г1СФ, начали использоваться для строительства газопроводов диаметром 1420 мм самыми первыми.

До 1975 г. (до введения СНиП II-45–75) трубы изготовляли без учета ряда современных требований к их качеству. В частности, металл труб не контролировали по критериям, служащим для оценки сопротивления протяженным разрушениям. Не производили и обязательный в современных условиях производства 100%-й ультразвуковой

© С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, Л. В. Гончаренко, Т. Н. Филипчук, М. Н. Дрогомирецкий, Б. И. Педько, 2003

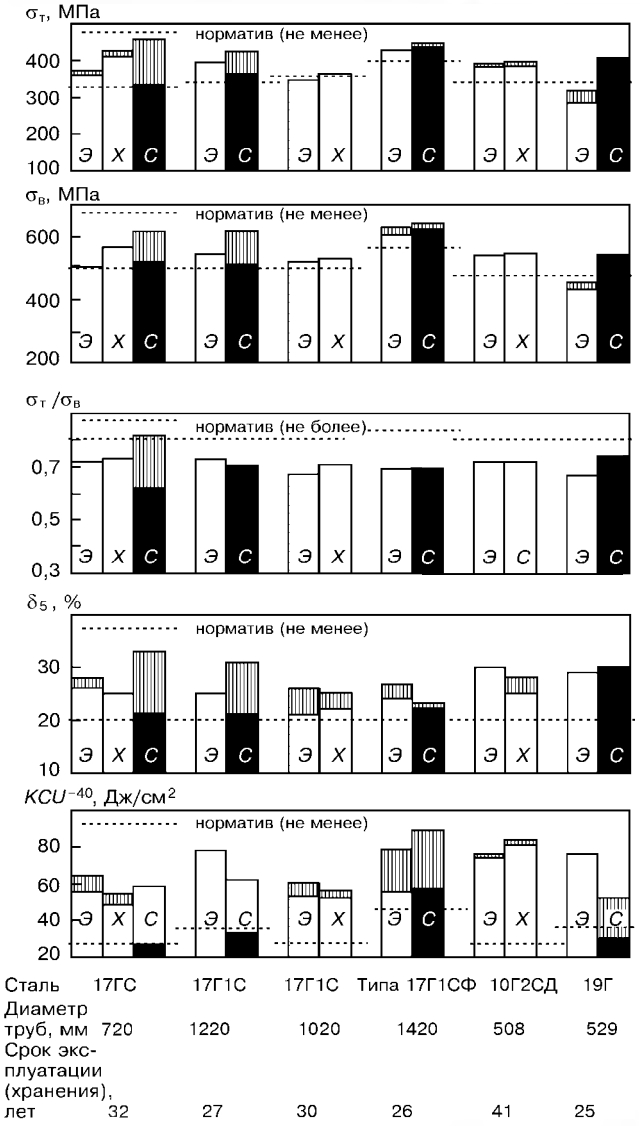

Рис. 1. Механические свойства основного металла исследованных труб: *Э* — трубы после эксплуатации; *Х* — трубы аварийного запаса; *С* — сертификатные данные; заштрихованная зона — область разброса значений

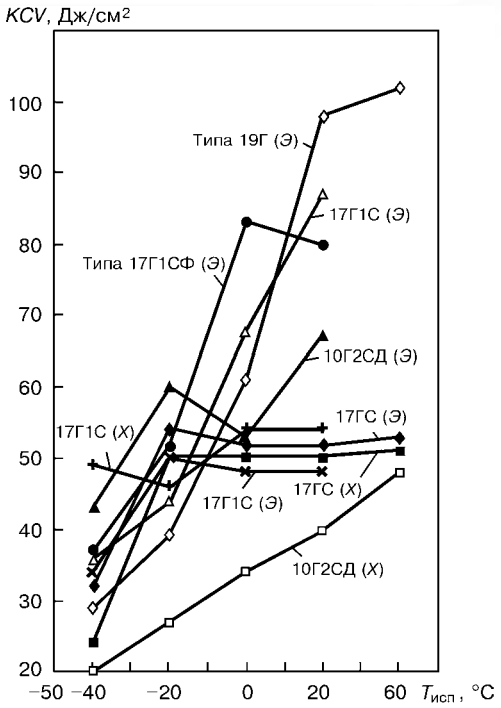

Рис. 2. Ударная вязкость основного металла исследованных труб

контроль листового проката и сварных соединений труб. После введения требований, касающихся ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом и доли вязкой составляющей в изломе образцов типа DWTT, полностью отказались от производства упомянутых труб.

Методологические подходы к определению состояния материала действующих магистральных газопроводов рассмотрены в работе [1].

Материал труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса исследовали в соответствии с требованиями технических условий, по которым они были изготовлены, а также с современными требованиями (СНиП 2.05.06–85) с учетом критериев оценки сопротивления инициированию и развитию вязких и хрупких разрушений.

Определены стандартные основные прочностные и пластические свойства, характеристики вязкости, хладостойкости, сопротивления протяженным разрушениям (на полнотолщинных образцах типа DWTT), а также структурные особенности состояния металла.

Сопротивление инициированию и стабильному развитию вязкой трещины определяли с помощью деформационных критериев: раскрытия вершины дефекта в момент инициирования вязкой трещины δ_i и угла раскрытия вязкой трещины при ее стабильном развитии tg α [4].

Оценивали возможное изменение различных показателей металла труб относительно их исходного состояния. Свойства металла труб в этом состоянии устанавливали на основе анализа требований нормативной документации, обработки данных сертификатов. При определении влияния эксплуатационных нагрузок учитывали также результаты испытаний труб аварийного запаса.

Химический состав металла труб из всех исследованных сталей по результатам контрольного анализа соответствовал нормативным требованиям, а структурные параметры основного металла и металла швов были в основном характерными для применяемых марок сталей и типов сварных соединений.

Результаты механических испытаний образцов основного металла приведены на рис. 1–3.

Эксперименты показали, что все служебные характеристики основного металла исследованных труб (кроме бесшовной) после длительной эксплуатации удовлетворяли требованиям нормативной документации, в соответствии с которой они были изготовлены, и находятся в поле разброса или на уровне аналогичных показателей металла труб в исходном состоянии. Это касается и труб аварийного запаса.

Металл бесшовной трубы диаметром 508 мм производства ЧССР имеет пониженные значения предела текучести и временного сопротивления. Указанные отклонения обусловлены недостаточным легированием стали бесшовной трубы, нормативные требования к которому были ограничены только сверху (C ≤ 0,18 %, Mn ≤ 1,5 %). Понижен-

Таблица 1. Характеристики металла исследованных труб

Марка стали	Состояние металла труб	$\varepsilon_в$, %	$\sigma_т/\sigma_в$	δ_i, мм	n	tg α
17ГС	Э	18,0	0,68	0,10	0,15	0,15
	Х	16,0	0,71	0,08	0,13	0,12
10Г2СД	Э	19,8	0,72	0,09	0,17	0,15
	Х	19,3	0,64	0,07	0,16	0,17
Типа 19Г	Э	18,8	0,58	0,17	0,15	0,19
Типа 17Г1СФ	Х	11,6	0,70	0,10	0,10	0,11
17Г1С (∅ 1020 мм)	Э	14,0	0,67	0,08	0,12	0,12
17Г1С (∅ 1220 мм)	Х	18,8	0,74	0,13	0,15	0,14

ной исходной прочности способствовала также крупнозернистая структура металла данной трубы. Следует отметить, что характеристики прочности металла отдельных сварных труб, в частности $\sigma_т$ металла трубы диаметром 1020 мм из стали 17Г1С и $\sigma_в$ металла трубы диаметром 720 мм из стали 17ГС, находятся на нижнем граничном уровне соответствующих требований (см. рис. 1), что в общем свидетельствует о недостаточных гарантиях прочности металла труб соответствующего периода их производства.

Металл образцов с острым надрезом в интервале температур +60...−40 °С имеет достаточную ударную вязкость вплоть до температуры −20 °С для всех исследованных труб, за исключением трубы аварийного запаса из стали 10Г2СД (см. рис. 2). В металле указанной трубы значение ударной вязкости соответствует нижнему уровню, требуемому современными нормами. Температура перехода в хрупкое состояние металла исследованных труб составляла 0 °С и ниже, за исключением бесшовной трубы с температурой перехода в хрупкое состояние металла 20 °С.

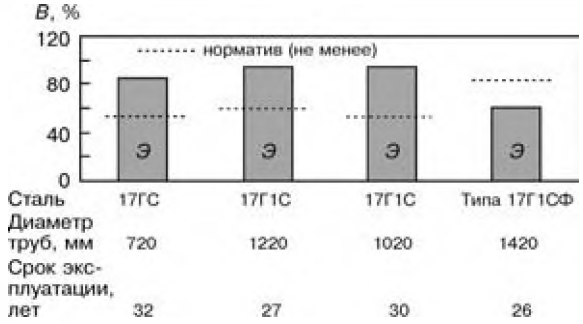

Рис. 3. Доля вязкой составляющей B в изломе образцов DWTT при температуре испытаний 0 °С

В целом ударная вязкость металла труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса мало отличается от ее сертификатных значений для соответствующих материалов.

Нужно отметить, что свойства металла труб, которые находились в эксплуатации, существенно не отличаются от таковых металла труб аварийного запаса (после длительного хранения).

Сопротивление протяженному разрушению, оцениваемое по доле вязкой составляющей в изломе образцов DWTT, не во всех исследованных трубах соответствует нормам СНиП 2.05.06–85 (рис. 3). В частности, пониженное сопротивление разрушению при температуре 0 °С выявлено в металле трубы диаметром 1420 мм производства ФРГ.

Характеристики сопротивления вязким разрушениям металла труб приведены в табл. 1. Очевидно, что деформационный показатель трещиностойкости металла исследуемых труб δ_i находится в пределах, обычных для низколегированных сталей [5]. Несколько пониженные показатели указанных характеристик обнаружены у металла труб производства ФРГ.

Модуль разрыва или критический угол раскрытия берегов вязкой трещины tg α также соответствует пределам, характерным для исследованных типов стали.

Следовательно, заметного ухудшения трещиностойкости металла труб после длительной эксплуатации не обнаружено. Сравнительно невысокие значения $\sigma_т/\sigma_в$ и соответствующие им повышенные показатели деформационного упрочнения n, а также значения равномерной критической деформации свидетельствуют о возможности обеспечения достаточной деформационной способности металла в условиях нагружения труб.

Металл сварных соединений всех исследованных труб (кроме одной) с достаточным запасом удовлетворяет установленным требованиям по прочностным и вязкостным свойствам (табл. 2, рис. 4). Низкая прочность разрушившегося по основному металлу сварного соединения трубы диаметром 1020 мм из стали 17Г1С (про-

Таблица 2. Механические свойства металла продольных сварных соединений исследованных труб

Марка стали	Состояние труб	$\sigma_в$, МПа	KCU^{-40}, Дж/см^2	
			металла шва	металла ЗТВ
17ГС	Э	551,0...551,6 / 551,3	60,7...67,7 / 65,3	60,8...68,5 / 63,2
	Х	551,3...559,5 / 555,3	50,8...64,8 / 58,0	69,1...76,7 / 71,2
	С	511,0...617,4 / 571,9	Не определяли	
10Г2СД	Х	524,3...524,4 / 524,4	76,6...97,6 / 87,1	60,8...68,5 / 63,2
	С	555,0...570,0 / 563,0	41,0...136,5* / 75,0	Не определяли
Типа 17Г1СФ	Э	595,9...606,1 / 601,0	47,1...53,0** / 54,3	43,5...62,5** / 53,5
	С	650,0...694,0 / 688,0	42,0...57,0** / 53,0	Не определяли
17Г1С (∅ 1020, мм)	Х	498,0...499,0 / 499,0	71,6...73,3 / 72,3	61,6...72,3 / 67,0
17Г1С (∅ 1220, мм)	Э	533,0...533,0 / 533,0	25,5...38,0 / 31,7	63,0...65,6 / 64,3
	С	558,2...583,0 / 568,4	Не определяли	

* При температуре −20 °С.
** При температуре −55 °С.

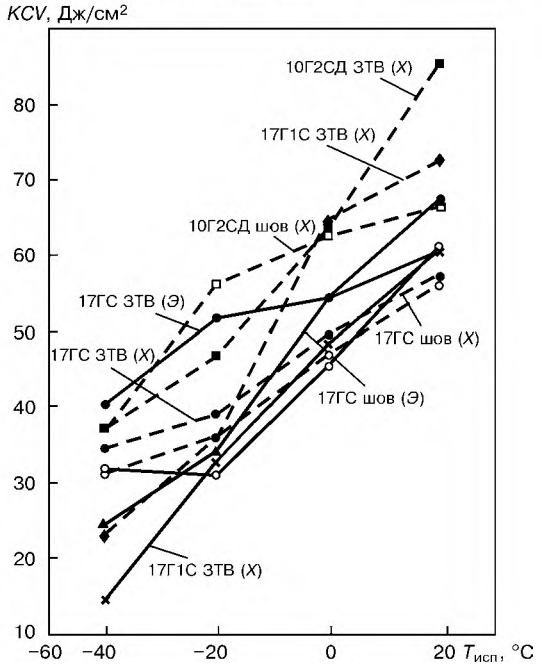

Рис. 4. Ударная вязкость металла продольных сварных соединений исследованных труб

изводства НТЗ) обусловлена пониженным уровнем прочностных свойств основного металла.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают возможность сохранения служебных свойств металла трубопроводов в условиях длительного силового нагружения (в течение плановых и даже сверхплановых сроков эксплуатации).

При длительной эксплуатации работоспособность газопроводов будет определяться не столько связанным со старением общим ухудшением свойств трубного металла, сколько другими факторами, способствующими локальному повреждению материала.

Уже упоминалось о том, что ранее трубы изготовлялись без учета современных требований. Тем не менее, горячекатаные и нормализованные трубные стали первых поколений, образцы которых исследовали в работе [2] и в настоящей, в большинстве случаев вполне соответствуют условиям эксплуатации газопроводов в районах с умеренным климатом (в том числе в Украине). С точки зрения обеспечения служебных свойств металла самые большие опасения могут вызывать газопроводы диаметром 1420 мм, построенные с использованием труб из нормализованных сталей. Действительно, как следует из приведенных данных, металл таких труб (производства ФРГ) не вполне надежен в отношении сопротивления протяженному разрушению.

Для труб прежнего производства с недостаточными технологическими гарантиями требуемого качества особое значение приобретает выявление и устранение дефектов, снижающих прочность трубопроводов. Значительную опасность могут представлять дефекты в зонах холодного деформирования, поскольку при этом заметно ухудшается сопротивление разрушению металла труб.

При обсуждении результатов проведенных исследований, на наш взгляд, целесообразно остановиться на некоторых вопросах общего характера, которые в первую очередь касаются методологии определения состояния материала действующих магистральных трубопроводов. Различные оценки явлений старения металла трубопроводов свидетельствуют прежде всего о сложности данной проблемы и значительных трудностях прогнозирования последствий продолжительной эксплуатации. Это подтверждает высказанное в работе [1] мнение о целесообразности дифференциального подхода к оценке текущего состояния металла действующих трубопроводов в зависимости от конкретных условий эксплуатации, внешних воздействий, исходных характеристик материала и т. п. В большинстве проведенных исследований отмечается незначительное влияние условий эксплуатации на стандартные механические свойства металла труб. Это практически нивелирует значение фактора старения металла при расчетах на прочность магистральных трубопроводов в рамках традиционно принятых подходов. Такая оценка приемлема только для материала без дефектов, способного к пластическому (вязкому) разрушению при заданных температурно-силовых нагрузках.

Что касается старых трубопроводов, тем более с пониженными значениями характеристик сопротивления разрушению материала, то подобный подход к оценке прочности является недостаточным. На основе реальных остаточных свойств металла труб необходимо выполнить расчетную оценку прочности трубопровода с такими дефектами металла, параметры которых, согласно действующей нормативной документации, считаются допустимыми.

Решение этой и других подобных задач требует комплексного нормативного и технологического обеспечения, включая методики расчетной оценки прочности, определение параметров дефектности и свойств материала, правила обследования, восстановления поврежденных участков и др.

Если рассматривать влияние фактора времени, то практически во всех случаях отсутствуют образцы-свидетели, на основании которых можно было бы выполнить наиболее достоверную оценку изменений параметров состояния материала. Очевидно также, что полностью отсутствует информация об исходных характеристиках материала, которые определяются новыми методами испытаний. Отметим, что некорректная оценка уровня исходных свойств может привести к ошибочным выводам относительно последствий процессов старения.

Как подчеркивалось в работе [1], нельзя игнорировать некоторые особенности трубного металла, например, довольно существенный разброс исходных значений механических свойств или изменения качественных характеристик в разные периоды времени, что связано с широкомасштабностью производства трубной стали и труб, особенно в прошедшие годы, а также с усовершенствованием производственных технологий.

Таким образом, оценка текущего состояния металла с точки зрения его пригодности к эксплуатации при заданных условиях должна производиться с обязательным учетом уровня качества труб прежнего производства.

Самостоятельный интерес представляет изучение состояния металла отдельных участков трубопроводов, на которых вследствие нештатных ситуаций и особых обстоятельств возникают условия, способствующие повреждению металла по причине наводороживания, холодного пластического деформирования, поличастотного нагружения, разных химико-механических воздействий.

Разнообразие возможных явлений требует проведения более широких исследований с целью выявления специфических признаков, которые сопровождают развитие тех или иных процессов старения. Комплекс таких исследований выходит за рамки процедуры контроля и испытаний при изготовлении трубной продукции.

Существенной помощью при решении этих задач может стать классификация состояний материала, например на основании приведенного в работе [1] подхода. На наш взгляд, в дальнейшем целесообразно разработать для типичных групп трубных сталей шкалу предельных параметров, характеризующих работоспособное, частично работоспособное и предаварийное состояния материала.

Выводы

1. Проведенные исследования образцов основного металла и сварных соединений, вырезанных из «старых» магистральных газопроводов, проложенных на территории Украины, после эксплуатации сроком до 35 лет подтвердили возможность сохранения приемлемых служебных свойств металла труб в плановые и даже сверхплановые сроки эксплуатации. Таким образом, для обеспечения длительной эксплуатационной надежности «старых» газопроводов наиболее важное значение имеет выявление и устранение опасных дефектов в металле труб и сварных соединений.

2. В связи с несовершенством комплекса первоначальных технических требований к трубам особого внимания заслуживает оценка состояния действующих газопроводов (или участков газопроводов), при строительстве которых в 1950–1970-х гг. применялись трубы с недостаточными технологическими гарантиями качества. Существенное значение при диагностических обследованиях и реабилитации таких газопроводов имеет идентификация уложенных труб, оценка уровня технических характеристик и стабильности качества используемых материалов.

1. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
2. *Экспериментальная* оценка состояния металла длительно работающих сварных нефтепроводов / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, В. И. Кирьян и др. // Там же. — 2001. — № 5. — С. 18–22.
3. *Лейкин И. М., Литвиненко Д. А., Рудченко А. В.* Производство и свойства низколегированных сталей. — М.: Металлургия, 1972. — 255 с.
4. *Гиренко В. С., Семенов С. Е., Гончаренко Л. В.* Деформационное старение трубных сталей // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
5. *Патон Б. Е., Труфяков В. И., Кирьян В. И.* Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // Автомат. сварка. — 1982. — № 12. — С. 5–7.

Service properties of pipe samples, cut out of operating pipelines, as well as pipes of emergency stock were studied. Possibility of preservation of pipe metal performance after long-term operation is demonstrated. It is established that lowering of strength indices of the metal of individual pipes, compared to standard values, is not related to the influence of service loads. To provide a reliable service of old pipelines, it is necessary to detect and repair hazardous metal defects, as well as conduct diagnostic investigations with identification of the laid pipes, evaluation of the level of technical characteristics and uniformity of quality.

Поступила в редакцию 24.09.2002,
в окончательном варианте 25.11.2002

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

15–16 мая 2003 г. г. Могилев, Беларусь

ОРГАНИЗАТОРЫ: Минобразования РБ, Могилевский облисполком, НАН РАБ

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:
- ✓ прогрессивные технологические процессы, механизмы и средства автоматизации
- ✓ технологии получения и обработки новых материалов и покрытий
- ✓ прогрессивные технологии сварки, наплавки и контроля металлических конструкций
- ✓ проектирование, производство и эксплуатация строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин
- ✓ прогрессивные технологии в строительстве, строительные материалы и конструкции
- ✓ проектирование, производство и эксплуатация транспортных средств
- ✓ приборы и методы контроля качества и диагностики состояния объектов
- ✓ электропривод и автоматизация технологических процессов

Адрес оргкомитета: Республика Беларусь, 212005 г. Могилев, пр-т Мира 43, корп. 3
Тел./факс: (+375222) 225821; (+375222) 236422; E-mail: jsk@mgtu.mogilev.unibel.by

УДК 621.791.72

ОСОБЕННОСТИ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ПАРОГАЗОВОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

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

Изучены особенности собственных колебаний жидкого металла на стенках парогазового канала. Показано, что при сварке равномерно движущимся электронным лучом на поверхности расплава под действием силы реакции давления отдачи, возникающей в результате взаимодействия электронного пучка с передней стенкой канала, образуются капиллярные волны, имеющие дискретный спектр собственных частот, плотность которого возрастает с увеличением глубины проплавления. Получено дисперсионное соотношение для капиллярных волн на внутренней поверхности цилиндрического канала. Подобные низкочастотные колебания расплава могут приводить к нестабильности сварочного процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, парогазовый канал, капиллярные волны, гидродинамическая стабильность, ламинарное течение, спектр собственных колебаний, дисперсионное соотношение, коэффициент затухания

Как свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные [1], гидродинамическая устойчивость расплавленного металла в парогазовом канале важна для нормального протекания сварочного процесса и получения качественных сварных швов. И напротив, колебания поверхности расплава, возникающие на фоне общего движения жидкого металла в сварочной ванне, могут приводить к неоднородностям сварных соединений и образованию разнообразных дефектов типа корневых, ложного канала, раковин. Роль подобных колебаний поверхности расплава в формировании сварных швов возрастает с увеличением толщины свариваемых металлов от 80 мм и выше [2]. Поскольку при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) металлов средней и даже малой толщины также существуют трудности в получении качественных соединений [3], в данной статье анализируются особенности собственных колебаний жидкого металла на стенках парогазового канала и выделяются те из них, которые определяют параметры технологии ЭЛС металлов и сплавов большой толщины.

Ввиду того, что различного рода турбулентности, возникающие при течении расплава по стенкам парогазового канала, негативно сказываются на его гидродинамической устойчивости (и, как следствие, на качестве сварного соединения в целом), для обеспечения максимальной стабильности сварочного процесса необходимо, чтобы движение расплава внутри канала было ламинарным. Из практики известно, что диаметр парогазового канала d, как правило, намного меньше его глубины H ($d << H$), поэтому для анализа движения расплава в канале можно использовать известную из гидродинамики аналогию обтекания жидкостью простого или эллиптического длинного цилиндра [4]. Чем больше глубина канала, тем более правомерным будет подобное описание, особенно при сквозном проплавлении. При этом, вследствие малости коэффициента кинематической вязкости расплавленного металла при высоких температурах ($\nu \approx 10^{-3}...10^{-2}$ см^2/с), движение жидкого металла вдоль поверхности парогазового канала можно рассматривать как бездиссипативное, считая вязкость отличной от нуля лишь в слое, прилежащем к твердой стенке канала. В этом случае движение расплава вдоль стенок парогазового канала можно считать потенциальным, т. е. течением, описываемым единой функцией — потенциалом скоростей Φ_0, связанной в каждой точке расплава с компонентами вектора скорости $\mathbf{v}_i$ соотношением [5]:

$$\mathbf{v}_i = \partial\Phi_0 / dx_i, \qquad (1)$$

где x_i — пространственные координаты (i = 1, 2, 3).

Таким образом, скорость расплава определяется как градиент функции Φ_0. Из условия непрерывности несжимаемой жидкости следует, что потенциал скоростей Φ_0 должен удовлетворять уравнению Лапласа во всем объеме расплава

$$\Delta\Phi_0 = 0. \qquad (2)$$

где Δ — оператор Лапласа.

С точки зрения взаимодействия электронного пучка со стенками парогазового канала важны возмущения, возникающие на стенках канала (особенно на передней стенке). В ряде опубликованных работ [6, 7] рассмотрены волны на торцевой поверхности сплошного цилиндра из жидкого металла, вопрос о капиллярных волнах на внутренней поверхности парогазового канала оставался неосвещенным. Анализ влияния таких волн на стабильность канала и формирование шва при ЭЛС представляет большой практический интерес.

Считая расплав несжимаемой жидкостью и пренебрегая кинетической энергией ($v^2/2$) как членом второго порядка малости, запишем согласно [5] уравнение для возмущенной добавки потенциала скоростей Φ в парогазовом канале

© В. М. Нестеренков, 2003

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (3)$$

где p — давление расплава в канале вблизи его поверхности на глубине z; ρ — плотность расплавленного металла; g — ускорение силы тяжести; Φ — разность между возмущенным и невозмущенным потенциалами скоростей; z — координата в вертикальном направлении, отсчитываемая от верхнего края канала.

Давление p в расплаве вблизи границы раздела фаз газ–жидкость определяется как разница между давлением на поверхность расплава внутри парогазового канала p_c и давлением Лапласа

$$p = p_c - \frac{\sigma}{R}, \quad (4)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла; R — внутренний радиус парогазового канала; $p_c = p_c(r, t)$ — давление в канале (в общем случае функция координат и времени). В свою очередь, давление на поверхность расплава внутри канала p_c состоит из давления газа и паров металла в канале p_v и давления отдачи p_r, возникающего в результате испарения металла с поверхности расплава под воздействием электронного пучка.

В статическом пределе формула (3) переходит в известное условие равновесия для вертикального парогазового канала [8]

$$p_c = \frac{\sigma}{R} - \rho g z. \quad (5)$$

Поскольку малые возмущения ζ, образующиеся на свободной поверхности расплава внутри канала, направлены по нормали к самой поверхности, то в случае вертикального парогазового канала они не влияют на гравитационную составляющую уравнения (3). Вычитая из (3) аналогичное уравнение для возмущенного потенциала и пренебрегая членами второго порядка малости, для возмущенной добавки потенциала скоростей Φ при $r = R$ получаем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\sigma}{\rho}\left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R}\right) + \frac{\Delta p_c}{\rho} = 0, \quad (6)$$

где Δp_c — разность между возмущенным и невозмущенным давлением на поверхность расплава в канале; R_s и R — радиус кривизны соответственно возмущенной и невозмущенной поверхности расплава.

После дифференцирования по времени уравнения (6) приходим к следующему уравнению для Φ на поверхности расплава внутри канала

$$\left\{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{R_s}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\Delta p_c}{\rho}\right)\right\}_{r=R} = 0. \quad (7)$$

При сварке равномерно движущимся электронным лучом давление p_c, оказываемое на стенки парогазового канала, слабо меняется в ходе квазистационарного сварочного процесса, поэтому в первом приближении последним членом в уравнении (7) можно пренебречь. Тогда решение этого уравнения сводится к задаче о собственных колебаниях расплава в парогазовом канале. Для этого необходимо определить радиус кривизны R_s внутренней поверхности расплава, в первом приближении не сильно отличающейся от цилиндрической. В этом случае форму жидкого металла на стенках канала можно представить в виде полого цилиндра соответственно с внутренним и внешним радиусами R и R_2 (рис. 1). Возмущение поверхности расплава внутри канала ζ будет меняться по глубине канала вдоль оси z, в результате чего на поверхности канала могут распространяться капиллярные волны. Определить R_s можно путем минимизации площади внутренней поверхности цилиндра. Площадь поверхности S, описываемой функцией $r = r(\varphi, z)$, в цилиндрических координатах можно представить в виде [9]

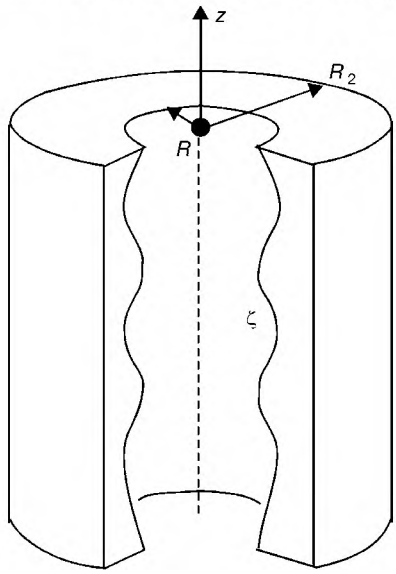

Рис. 1. Капиллярные волны на поверхности расплава ζ внутри парогазового канала в виде полого цилиндра с радиусами R и R_2

$$S = \int_0^{2\pi}\int_0^{H} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{r}\frac{\partial r}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial z}\right)^2}\, r d\varphi dz, \quad (8)$$

где φ — азимутальный угол.

Цилиндрическая поверхность задается уравнением $r = R = \text{const}$, а близкая к ней поверхность, слабо отличающаяся от цилиндрической, описывается уравнением $r = R - \zeta$ с малым ζ. Подставляя эту величину в формулу (8), приближенно получаем

$$S = \int_0^{2\pi}\int_0^{H} \left\{(R - \zeta) + \frac{1}{2(R - \zeta)}\left(\frac{\partial \zeta}{\partial \varphi}\right)^2 + \frac{(R - \zeta)}{2}\left(\frac{\partial \zeta}{\partial z}\right)^2\right\} d\varphi dz. \quad (9)$$

Решив задачу минимизации S методом вариации функционала [5] с точностью до членов первого порядка малости по ζ, получим

$$\frac{1}{R_s} = -\frac{1}{R}\left(1 + \frac{\zeta}{R} + \frac{1}{R}\frac{\partial^2 \zeta}{\partial^2 \varphi} + R\frac{\partial^2 \zeta}{\partial^2 z}\right). \quad (10)$$

Подставляя формулу (10) в уравнение (7) после дифференцирования по времени, получаем

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = \frac{\sigma}{\rho R}\frac{\partial}{\partial t}\left(1 + \frac{\zeta}{R} + \frac{1}{R}\frac{\partial^2\zeta}{\partial^2\varphi} + R\frac{\partial^2\zeta}{\partial^2 z}\right). \quad (11)$$

Используя кинематическое граничное условие на внутренней поверхности цилиндра

$$v_r = \frac{\partial\Phi}{\partial r}\Big|_{r=R} = -\frac{\partial\zeta}{\partial t}, \quad (12)$$

получаем следующее условие для потенциала скоростей Φ при $r = R$:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = -\frac{\sigma}{\rho R^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\Phi + \frac{\partial^2\Phi}{\partial^2\varphi} + R^2\frac{\partial^2\Phi}{\partial^2 z}\right)_{r=R}. \quad (13)$$

Комплексное решение уравнения (13) в виде стоячей волны

$$\Phi = \exp(-i\omega t)\, f(r, \varphi, z), \quad (14)$$

где ω — частота собственных колебаний; t — время; функция $f(r, \varphi, z)$, выраженная в цилиндрических координатах, удовлетворяет уравнению Лапласа (2) во всем объеме жидкостного цилиндра.

Как известно [9], решение уравнения Лапласа для цилиндра можно представить в виде

$$f = \exp[\pm i(kz + m\varphi)]M_m(kr), \quad (15)$$

где k — волновой вектор; m — целое число; M_m — линейная комбинация из модифицированных функций Бесселя первого и второго рода $I_m(kr)$ и $K_m(kr)$:

$$M_m(kr) = [A_m I_m(kr) + B_m K_m(kr)]; \quad (16)$$

A_m, B_m — коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Решение вида (15) допускает распространение синусоидальных волн вдоль внутренней поверхности полого цилиндра. С помощью дополнительного кинематического граничного условия для потенциала скоростей Φ на внешней поверхности цилиндра ($r = R_2$)

$$v_r = \frac{\partial\Phi}{\partial r}\Big|_{r=R_2} = 0, \quad (17)$$

можно исключить коэффициент B_m в формуле (16). Данное граничное условие означает, что радиальная компонента скорости расплава обращается в нуль на твердой стенке парогазового канала. Тогда формула (16) принимает вид

$$M_m(kr) = A_m\left[I_m(kr) - K_m(kr)\frac{I'_m(kR_2)}{K'_m(kR_2)}\right], \quad (18)$$

где $I'_m(kR_2)$ и $K'_m(kR_2)$ — соответственно производные от модифицированных функций Бесселя первого и второго рода.

Подставив в уравнение (13) Φ в виде (14), получаем следующее граничное условие при $r = R$:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = \frac{\sigma}{\rho R^2}[(m^2 + k^2R^2) - 1]\left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)_{r=R}. \quad (19)$$

После некоторых упрощений в уравнении (19) с помощью формул (14) и (15) приходим к дисперсионному соотношению для полого цилиндра

$$\omega_m^2 = \frac{\sigma}{\rho}\frac{k}{R^2}[1 - (k^2R^2 + m^2)]\frac{\partial M_m(kr)}{\partial(kr)}\Big|_{r=R}\frac{1}{M_m(kR)}, \quad (20)$$

где ω_m — частота m-й моды собственных колебаний.

Продифференцировав множитель $M_m(kr)$ по радиусу r и подставив полученное выражение в уравнение (20), получаем следующее дисперсионное соотношение:

$$\omega_m^2 = \frac{\sigma}{\rho}\frac{k}{R^2}[(k^2R^2 + m^2) - 1]\, C_m, \quad (21)$$

где $C_m = C_m(k, R, R_2)$ — множитель, зависящий от волнового вектора k и параметров парогазового канала R и R_2, который имеет следующий вид:

$$C_m(k, R, R_2) = \frac{[K'_m(kR)I'_m(kR_2) - I'_m(kR)K'_m(kR_2)]}{[I_m(kR)K'_m(kR_2) - K_m(kR)I'_m(kR_2)]}. \quad (22)$$

Следует отметить, что соотношение (21) принципиально отличается от аналогичного для волн на плоской поверхности цилиндра, во-первых, наличием множителя C_m, а, во-вторых, присутствием зоны неустойчивости для нулевых ($m = 0$) собственных колебаний, так как при $kR < 1$ величина ω_0 становится чисто мнимой ($\omega_0^2 < 0$).

С учетом дисперсионного соотношения (21) граничное условие (19) можно записать в виде

$$\left\{\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + \omega_m^2\Phi\right\}_{r=R} = 0. \quad (23)$$

Соотношение (23) представляет собой уравнение собственных колебаний поверхности расплава в парогазовом канале. Ситуация, когда колебания расплава определяются уравнением (23), реализуется, например, при сварке равномерно движущимся электронным лучом. В отсутствие сканирования электронного луча давление, оказываемое на переднюю стенку канала, слабо меняется в ходе квазистационарного сварочного процесса, и колебания расплава осуществляются на собственных частотах.

Поскольку в реальном сварочном процессе имеется направление движения электронного луча (или изделия), то при сварке равномерно движущимся лучом в первую очередь возбуждается первая мода колебаний расплава в парогазовом канале ($m = 1$), соответствующая продольным колебаниям расплава типа смещений вдоль направления сварки. Для первой моды колебаний дисперсионное соотношение (21) принимает вид

$$\omega_1^2 = C_1\frac{\sigma k^3}{\rho}. \quad (24)$$

где $C_1 = C_1(k, R, R_2)$ — коэффициент, определяемый по формуле (22) при $m = 1$. Это означает, что при больших значениях k спектр колебаний расплава в парогазовом канале описывается степенным законом: $\omega \sim k^{3/2}$. Коэффициент поверхностного натяжения σ и плотность расплава ρ,

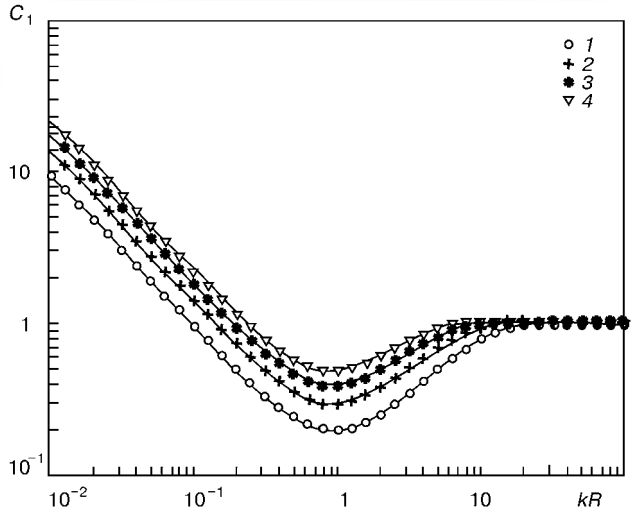

Рис. 2. Зависимость коэффициента $C_1 = f(kR)$ для первой моды собственных колебаний расплава ($m = 1$) в цилиндрическом парогазовом канале при различных параметрах канала: R_2/R = = 1,10 (*1*); 1,15 (*2*); 1,20 (*3*); 1,25 (*4*)

входящие в формулы (24) и (21), являются функциями температуры. Эти величины убывают с повышением температуры, так что частота собственных колебаний ω, пропорциональная лишь их отношению ($\omega \sim \sqrt{\sigma/\rho}$), слабо меняется в интервале температур $T_m < T < T_b$, где T_m и T_b — соответственно температура плавления и кипения металла. Следовательно, при определении ω_1 температурные зависимости этих величин в первом приближении можно не учитывать. Проанализируем множитель C_1 в формуле (24). На рис. 2 приведены зависимости $C_1 = f(kR)$ для $m = 1$ в парогазовом канале с внешним радиусом R_2 = = 2,75 мм при различных значениях параметра R_2/R = 1,10; 1,15; 1,20; 1,25. Из рисунка видно, что, во-первых, с ростом волнового вектора k величина C_1 вначале быстро падает, достигая минимума при $kR \approx 1$, а затем возрастает, стремясь к единице ($C_1 \to 1$) при $k \to \infty$. Во-вторых, с уменьшением внутреннего радиуса канала R (а, значит, с увеличением толщины слоя расплава на стенках парогазового канала $d = R_2 - R$) величина C_1 в длинноволновой части спектра также возрастает.

Каждой моде колебаний расплава в парогазовом канале конечной глубины соответствует целый набор собственных частот колебаний. Подобная дискретность спектра собственных колебаний расплава следует из того факта, что потенциал скоростей Φ, наряду с уравнением Лапласа, должен также удовлетворять граничным условиям на дне и наверху парогазового канала

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}\Big|_{z=-H} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z}\Big|_{z=0} = v_z, \tag{25}$$

где v_z — скорость расплава на свободной горизонтальной поверхности расплава.

Эти граничные условия аналогичны известным условиям для колебаний струны или мембраны с одним закрепленным, а другим свободным концом, и означают, что вдоль всей длины канала H должно укладываться определенное число колебаний. Следовательно, для волнового вектора k n-й гармоники должно выполняться соотношение

Значения волновых векторов и собственных частот для первой моды ($m = 1$) колебаний поверхности расплава в парогазовом канале при различных глубинах проплавления

H, мм	k_1, см$^{-1}$	Δk, см$^{-1}$	ω_1, рад/с	f_1, Гц
50	0,314	0,628	3,38	0,54
75	0,209	0,419	2,25	0,36
100	0,157	0,314	1,69	0,27
125	0,126	0,251	1,35	0,21
150	0,105	0,209	1,12	0,18

$$k_n H = \left(n - \frac{1}{2}\right)\pi, \tag{26}$$

где n — номер гармоники колебаний, $n = 1, 2, 3, \ldots$ Так, например, для $n = 1$ получаем значение волнового вектора $k_1 = \pi/2H$, которое соответствует четверти длины волны колебаний.

Из формул (24) и (26), в частности, следует, что с ростом глубины проплавления H значения волновых векторов k_n для всех гармоник колебаний расплава смещаются в сторону меньших значений (что соответствует сдвигу всего спектра колебаний в низкочастотную область), а интервал между соседними значениями собственных частот ($\Delta\omega_n$ = = $\omega_{n+1} - \omega_n$) уменьшается. В таблице приведены значения волновых векторов и соответствующие им значения наименьшей собственной частоты для первой моды колебаний ($m = 1$) расплава железа (σ = 1,5 Н/м и ρ = 7,86 г/см^3), рассчитанные по формуле (24) при различных глубинах проплавления. Из таблицы видно, что с ростом H значения собственных частот убывают и достигают субгерцового диапазона ($f_1 \approx 0{,}1$ Гц). Кроме того, интервал между разрешенными волновыми векторами колебаний расплава в канале $\Delta k = k_2 - k_1$ также уменьшается с ростом H, что соответствует переходу от дискретного спектра колебаний к непрерывному при $H \to \infty$.

Колебания расплава в парогазовом канале могут отличаться не только по частоте, но и по форме. Поэтому спектр колебаний будет состоять из целого набора собственных частот ω_{mn}, где $m = 0, 1, 2, \ldots$ — вид (мода) колебаний. Причем большие значения n соответствуют более высоким частотам колебаний. Так, моде $m = 0$ отвечают осесимметричные колебания внутренней поверхности парогазового канала типа перетяжек и растяжений (рис. 3, *а*), а моде $m = 1$ — колебания типа смещений и изгибов вдоль некоторого выделенного направления, например, направления движения сварки (рис. 3, *б*).

Таким образом, при сварке равномерно движущимся электронным лучом колебания расплава в парогазовом канале в основном осуществляются на собственных частотах ω_{mn}, причем возбуждаться может весь спектр частот. В то же время осесимметричные колебания ($m = 0$) приводят к неустойчивости парогазового канала, начиная уже с глубин проплавления H всего в несколько раз больших, чем внутренний радиус канала $R/H \geq$ $\geq \pi n R$ [7]. Данная оценка не учитывает наличие свободной поверхности наверху парогазового ка-

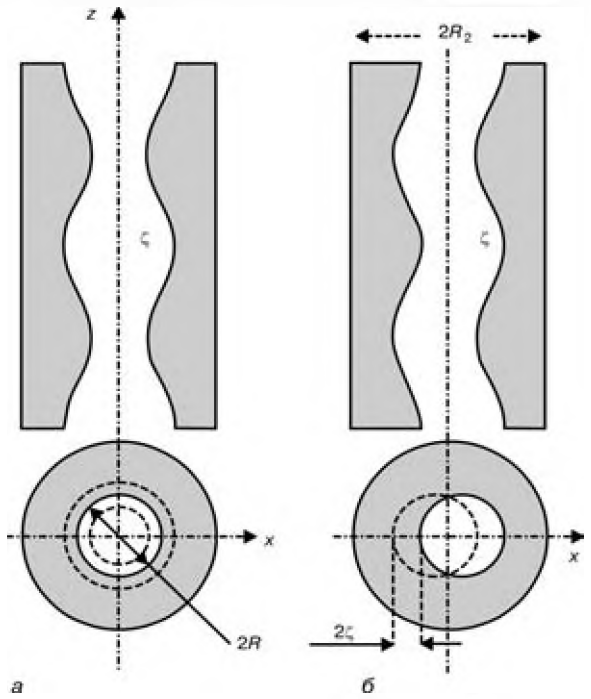

Рис. 3. Моды собственных колебаний внутренней поверхности расплава ζ в парогазовом канале: *а* — осесимметричные перетяжки ($m = 0$); *б* — поперечные смещения ($m = 1$)

нала, поэтому более правильным является условие неустойчивости канала, которое следует из (26)

$$H \geq \left(n - \frac{1}{2}\pi R\right) (n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots). \qquad (27)$$

Из рассмотренного выше следует, что при разработке технологии ЭЛС необходимо учитывать предел наименьшей скорости сварки, снижение которого будет приводить к возбуждению осесимметричной моды ($m = 0$) колебаний расплава и, как следствие, к неустойчивости парогазового канала в целом. Устойчивость канала может быть повышена путем возбуждения других колебательных мод, в частности, $m = 1$. Это достигается увеличением скорости сварки и, как следствие, подавлением осесимметричных колебаний расплава. В этом случае в первую очередь возбуждаются гармоники колебательной моды $m = 1$, соответствующей раскачиванию жидкого металла вдоль направления сварки x. Такие колебания в отличие от колебаний нулевой моды являются устойчивыми и могут осуществляться в широком диапазоне частот.

Для колебаний с $m = 1$ и $n = 1$ проведем численные оценки частоты ω_{11} и соответствующего ей коэффициента затухания $\gamma(\omega_{11})$. Для этого используем выражение для коэффициента затухания капиллярных волн [5], которое с учетом (24) принимает вид

$$\gamma = 2\nu k^2 = 2\nu\left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^{2/3} \frac{\omega_1^{4/3}}{C_1^{2/3}}. \qquad (28)$$

Вследствие того, что с ростом глубины проплавления происходит сдвиг спектра колебаний расплава в сторону низкочастотных колебаний, коэффициент затухания каждой из гармоник в отдельности $\gamma(\omega_{1n})$ также уменьшается. Так, при глубине проплавления $H = 50$ мм волновой вектор первой гармоники равен $k_1 = 0{,}314$ см$^{-1}$. Следовательно, если взять динамическую вязкость расплава железа порядка $\nu_{Fe} \approx 10^{-2}$ см^2/с, то коэффициент затухания составит $\gamma(\omega_{11}) = 2\cdot10^{-2}(0{,}314)^2 \approx 2\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$, что соответствует крайне малому ослаблению первой гармоники колебаний расплава. При таком затухании уменьшение амплитуды колебаний в e раз происходит за достаточно большое время $t \approx 5\cdot10^2$ с. При этом, вследствие дисперсии коэффициента затухания $\gamma = \gamma(\omega)$, высокочастотные гармоники ($n >> 1$) затухают быстрее, чем низкочастотные. В итоге при колебании расплава на собственных частотах будет доминировать нижайшая гармоника ($n = 1$), имеющая максимальную амплитуду, для которой коэффициент затухания γ принимает наименьшее значение. Проявления подобных низкочастотных колебаний всегда наблюдаются в виде выноса расплавленного металла из парогазового канала на поверхность сварочной ванны при ЭЛС металлов большой толщины.

На рис. 4 приведена фотография низкочастотных возмущений в виде крупных наплывов металла на поверхности шва алюминиевого сплава 2024, возникающих при сварке в нижнем положении равномерно движущимся электронным лучом. Глубина проплавления при скорости сварки $v_{св} = 4$ мм/с составляла $H = 120$ мм. На фотографии четко прослеживается периодичность выноса жидкого металла из парогазового канала в ходе сварочного процесса. Оценим частоту низкочастотных колебаний, приведенных на рис. 4, *а*. Используя масштаб рисунка и значение скорости сварки (4 мм/с), находим, что средняя частота колебаний, имеющих наибольшую амплитуду, $f \approx 0{,}33$ Гц. Сравним полученное значение с теоретическим, для чего подставим известные значения глубины проплавления образца ($H = 120$ мм), плотности ($\rho = 2{,}5$ г/см^3) и коэффициента поверхностного натяжения ($\sigma = 0{,}9$ Н/м) для жидкого алюминия в формулы (24) и (26). Для расчета коэффициента C_1, входящего в (24), необходимо знать размеры парогазового канала R и R_2. Значение радиуса внешней стенки канала R_2 можно определить довольно точно по макрошлифу сваренного образца (для шва, приведенного на рис. 4, $R_2 = 2{,}75$ мм). В связи с тем, что непосредственное измерение внутреннего радиуса канала на практике трудноосуществимо, величина R при расчете будет использоваться в качестве варьируемого параметра. Наилучшее согласование между теоретическим и экспериментальным значениями f получается при среднем радиусе поверхности расплава внутри канала, равном $R = 2{,}35$ мм. При этом средняя толщина слоя расплава на стенках канала составляет $d = R_2 - R \approx 0{,}4$ мм. Подставляя все полученные значения ($k_1 = \pi/2H \approx 0{,}131$ см$^{-1}$, $R = 2{,}35$ мм и $R_2 = 2{,}75$ мм) в формулу (22) при $m = 1$, имеем $C_1 = 5{,}0737$. Следовательно, для наименьшей частоты колебаний расплава f_1 по формуле (24) получаем

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{C_1 \frac{\sigma}{\rho}\left(\frac{\pi}{2H}\right)^3} \approx 0.325 \text{ (Гц)}. \qquad (29)$$

Теоретическое ($f_1 \approx 0{,}325$ Гц) и экспериментальное ($f_1 \approx 0{,}33$ Гц) значения для нижайшей частоты колебаний расплава в сварочной ванне при внутреннем радиусе парогазового канала $R = 2{,}35$ мм практически совпадают, что свидетельствует о хорошем согласовании теории с экспериментом.

На рис. 4, *б* показан внешний вид шва, выполненного при тех же параметрах, что и шов на рис. 4, *а*, но уже с применением продольных колебаний луча на частоте 180 Гц. Как видно из рисунка видно, в этом случае не наблюдается периодических крупных наплывов металла на поверхности сварного шва, свидетельствующих о колебательном характере движения расплава внутри парогазового канала. Практически ровный верхний валик на рис. 4, *б* указывает на ламинарный характер течения жидкого металла по стенкам канала при использовании развертки электронного луча.

Таким образом, применение сканирования электронного луча позволяет, с одной стороны, избирательно возбуждать определенные колебательные моды отдельно от других мод (избавляясь, тем самым, от неустойчивой нулевой моды колебаний), а с другой, путем выбора соответствующей частоты колебаний электронного луча, уменьшить амплитуду собственных колебаний расплава в парогазовом канале. В частности, применив продольную развертку, можно возбуждать устойчивую первую моду колебаний ($m = 1$), подавляя при этом неустойчивую нулевую моду ($m = 0$). В результате удается повысить гидродинамическую стабильность парогазового канала, что выражается в более равномерном формировании шва.

В рамках предложенной модели парогазового канала рассмотрены колебания расплава под действием силы реакции давления отдачи, возникающей при испарении металла с передней стенки канала под воздействием электронного пучка. Показано, что при сварке равномерно движущимся электронным лучом на внутренней поверхности расплава в парогазовом канале возникают возмущения (капиллярные волны), имеющие дискретный спектр колебаний, плотность которого возрастает с увеличением глубины проплавления. Амплитуда колебаний расплава в канале зависит от частоты собственных колебаний и достигает максимального значения при наименьшей разрешенной частоте.

Получено дисперсионное соотношение $\omega = \omega(k)$ для капиллярных волн на внутренней поверхности парогазового канала, отличающееся от известного соотношения для волн на торцевой поверхности цилиндра. Показано, что из-за дисперсии коэффициента затухания капиллярных волн $\gamma = f(\omega)$, самой долгоживущей оказывается первая гармоника собственных колебаний расплава ($n = 1$), имеющая наименьшую частоту и наибольшую амплитуду, существование которой подтверждается экспериментально. Подобные низкочастотные колебания расплава в парогазовом канале могут приводить к нестабильности сварочного процесса, связанной с попаданием расплавленного металла непосредственно под электронный пучок и, как следствие, к образованию различного рода дефектов в сварных швах.

Рис. 4. Возмущения (вид сверху), возникающие на поверхности шва алюминиевого сплава при ЭЛС в нижнем положении со скоростью 4 мм/с: *а* — статическим электронным лучом; *б* — использованием развертки электронного луча ($f_1 = 180$ Гц)

Для стабилизации движения расплава в парогазовых каналах большой глубины (≥ 80 мм) рекомендуется применять развертку электронного луча на максимально возможной частоте, значение которой ограничено сверху наличием затухания в вязком слое жидкого металла, прилежащем к твердой стенке сварочной ванны.

1. *Электронно-лучевая* сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. *Патон Б. Е., Лесков Г. И., Нестеренков В. М.* Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. — 1988. — № 1. — С. 1–6.
3. *Рыжков Ф. Н., Постников В. С.* Сварка колеблющимся вдоль шва электронным лучом // Там же. — 1963. — № 11. — С. 43–47.
4. *Яблонский В. С.* Краткий курс технической гидромеханики. — М.: Физматгиз, 1961. — 355 с.
5. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. — М.: Гостехиздат, 1954. — 788 с.
6. *Акопянц К. С., Назаренко О. К., Нестеренков В. М.* Электронно-лучевая сварка стали толщиной 60 мм с продольными пилообразными колебаниями пучка // Автомат. сварка. — 2002. — № 9. — С. 1–3.
7. *Mario H., Hirata Y.* Natural frequency and oscillation mode of welding pool // Quarterly J. of the Jap. Weld. Soc. — 1993. — **11**, № 1. — P. 50–54.
8. *Судник В. А., Радаи Д., Ерофеев В. А.* Компьютерное моделирование лазерно-лучевой сварки: модель и верификация // Свароч. пр-во. — 1997. — № 1. — С. 28–33.
9. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 832 с.

Peculiarities of natural oscillations of liquid metal on walls of the vapour-gas channel were studied. It is shown that welding using a uniformly moving electron beam results in capillary waves formed on the melt surface under the effect of the reaction force of the recoil pressure caused by interaction of the electron beam with the front wall of the channel. The waves have a discrete spectrum of natural frequencies with a density growing with increase in the penetration depth. The variance ratio was derived for the capillary waves on the internal surface of the cylindrical channel. Such low-frequency oscillations of the melt may lead to instability of the welding process.

Поступила в редакцию 19.07.2002

УДК 621.791.01:536.2

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Л. И. МИХОДУЙ**, д-р техн. наук, **В. Д. ПОЗНЯКОВ**, **О. Л. МИХОДУЙ**, **В. Г. ВАСИЛЬЕВ**, кандидаты техн. наук, **П. А. СТРИЖАК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны технологическая проба и методика исследований, позволяющие оценить влияние остаточных напряжений на сопротивляемость сварных соединений с многослойными швами образованию продольных холодных трещин. Оценена сопротивляемость образованию продольных холодных трещин сварных соединений стали 14ХГН2МДАФБ, выполненных проволокой Св-10ХГН2СМФТЮ в смеси газов 75% Ar + 25% CO_2, с учетом уровня остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, низкоуглеродистая легированная сталь, структурные превращения, замедленное разрушение, предел текучести, пластичность

В отечественной и зарубежной практике при изготовлении ответственных сварных конструкций широкое применение находят низкоуглеродистые (≤ 0,2 % С) высокопрочные стали с пределом текучести 600...1000 МПа. Как показывает опыт, их рациональное использование позволяет существенно улучшать технико-экономические показатели машин, механизмов и инженерных сооружений. Главные проблемы при сварке таких сталей связаны с предотвращением замедленного разрушения в сварных соединениях. Как известно, существенное влияние на этот процесс оказывают структура металла шва и ЗТВ, концентрация диффузионного водорода, сварочные напряжения в соединениях. Применительно к низкоуглеродистым высокопрочным сталям отечественными и зарубежными исследователями всесторонне исследованы две основные причины замедленного разрушения: водородный и структурный факторы. При этом, по возможности, учитывали и воздействие остаточных сварочных напряжений. Более широкому изучению влияния последних на процесс образования и развития холодных трещин препятствуют методологические трудности, обусловленные высокими прочностными свойствами и значениями твердости сварных соединений, а также сложными структурными превращениями, протекающими в металле шва и ЗТВ в процессе охлаждения. Как правило, с одной стороны, они приводят к существенному повышению прочностных свойств, с другой — протеканию весьма сложных фазово-структурных превращений. Все эти факторы могут оказывать существенное влияние на уровень напряжений в сварных соединениях легированных сталей. Возможности современных методов исследований свариваемости позволяют в определенной степени анализировать эти процессы. Это прежде всего относится к имитированию термических циклов сварки на образцах достаточно больших размеров, дилатометрическим исследованиям, высокотемпературным испытаниям и др. Впоследствии такие подходы могут дополняться и уточняться анализом уровня остаточных напряжений на реальных сварных соединениях с помощью метода голографической интерферометрии или других методов исследований [1, 2].

В качестве базы для таких исследований служили высокопрочные легированные стали марок 12ГН2МФАЮ, 14ХГ2САФД, 12ГН3МФАЮДР, 14ХГН2МДАФБ, 12ХГН2МФБДАЮ и 12ХГН2МФДРА с $\sigma_{0,2}$ = 630...850 МПа (табл. 1). Практически все они были разработаны в 1970–1980-х годах в ЦНИИЧМ им. И. П. Бардина и ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова [3–5]. Указанные стали содержат до 0,17 % углерода, комплексно легированы марганцем, хромом, никелем, молибденом и другими элементами (при суммарном

Таблица 1. Химический состав и механические свойства высокопрочных легированных сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	N_2	V	B
12ГН2МФАЮ (ВС-1)	0,12	0,50	1,20	0,50	1,50	0,19	–	0,10	0,027	0,07	–
14ХГ2САФД	0,13	0,57	1,42	0,44	0,16	0,03	0,39	0,08	–	0,08	–
12ГН3МФАЮДР	0,12	0,23	1,26	–	3,08	0,33	0,40	0,02	0,015	0,05	0,003
14ХГН2МДАФБ	0,15	0,23	1,30	0,97	2,20	0,33	0,41	0,07	0,015	0,14	–
12ХГН2МФБДАЮ	0,13	0,41	1,11	0,76	1,63	0,53	0,55	0,03	0,020	0,08	–
12ХГН2МФДРА	0,12	0,32	1,10	1,08	2,00	0,52	0,60	–	–	0,10	0,002

© Л. М. Лобанов, Л. И. Миходуй, В. Д. Позняков, О. Л. Миходуй, В. Г. Васильев, П. А. Стрижак, 2003

Продолжение таблицы 1

Марка стали	$P^*_{см}$	Механические свойства сталей			
		$\sigma_{0,2}$, МПа	$T_{исп}$, °С	KCU, Дж/см^2	KCV, Дж/см^2
12ГН2МФАЮ (ВС-1)	0,27	628	–70	46	–
14ХГ2САФД	0,34	635	–40	43	–
12ГН3МФАЮДР	0,303	768	–70	–	72
14ХГН2МДАФБ	0,372	752	–40	–	75
12ХГН2МФБДАЮ	0,334	828	–70	47	–
12ХГН2МФДРА	0,356	849	–50	–	30

* $P_{см} = C + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$.

содержании 4...6 %). В процессе изготовления они подвергаются термической обработке (закалка и отпуск). Введение в состав таких сталей азота (0,02...0,03 %), нитридобразующих и микролегирующих элементов позволяет уменьшать склонность к росту аустенитного зерна в металле ЗТВ. Учитывая, что структура металла отдельных участков этой зоны неоднородна, а их размеры крайне малы, для исследований использовали образцы-имитаторы размером 13×13×150 мм, обработанные в соответствии с различными термическими циклами сварки на установке МСР-75 [6]. В процессе исследований образцы нагревали до температуры 1350 °С, а скорость охлаждения изменяли в диапазоне $w_{6/5}$ = 2,7...35 °С/с. Из заготовок, подвергнутых воздействию имитированного термического цикла сварки, изготавливали образцы для испытаний на статическое растяжение (в интервале температур 20...800 °С). Проведенные исследования свидетельствуют о существенном повышении прочности металла ЗТВ исследованных сталей (рис. 1), обусловленном воздействием протекающих в них тепловых процессов. В зависимости от состава конкретной стали ее предел текучести может быть в 1,03...1,35 раза выше, чем у основного металла при замедленных скоростях охлаждения ($w_{6/5}$ = 2,7 °С/с) и в 1,20...1,56 раза при интенсивных ($w_{6/5}$ ≈ 36 °С/с).

Как известно, в приближенных расчетах низкоуглеродистых сталей обычно используются схематизированные диаграммы зависимости предела текучести от температуры. В легированных сталях этот показатель обычно определяется как условная величина по остаточной пластической деформации 0,2 %. Результаты высокотемпературных исследований механических свойств (прочности и пластичности) высокопрочных сталей приведены на рис. 2. При температуре 750 °С предел текучести сталей 12ГН2МФАЮ и 14ХГН2МДАФБ составляет около 50...100 МПа. С понижением температуры примерно до 600 °С он возрастает и достигает уровня 60...65 % $\sigma_{0,2}$ (определяемый при температуре + 20 °С). Эта закономерность сохраняется и в металле имитированной ЗТВ высокопрочных сталей (рис. 3).

Обобщенная информация о влиянии температуры испытаний на изменение прочности исследованных сталей и металла ЗТВ приведена на рис. 4. В отличие от известной диаграммы σ–ε в ней по оси ординат приведен не предел текучести основного металла $\sigma_г$, а отношение величин условного предела текучести металла при конкретной повышенной температуре $\sigma_{темп}$ к его условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ при температуре + 20 °С. В данном случае такой подход был обусловлен отсутствием явно выраженной площадки текучести на диаграмме растяжения изучаемых сталей. Кроме того, условно принималось, что при T ≈ 780...800 °С в исследованных участках сварных соединений $\sigma_{0,2}$ = 0. К моменту достижения металлом температур 600...400 °С в сварных соединениях возможно формирование высокого уровня временных растягивающих напряжений, значение которых зависит от состава сталей и особенностей их охлаждения. Однако при этих температурах в металле начинают происходить структурные превращения, сопровождаемые увеличением его объема, что приводит к сжатию соседних участков сварного соединения. Деформации определяли по результатам обработки соответствующих дилатометрических кривых. Дилатометрические исследования предусматривали нагрев образцов из указанных материалов до температуры 1350 °С со скоростью 150 °С/с, а затем их охлаждение со скоростями, соответствующими различным термическим циклам сварки (рис. 5). Это позволяет воспроизводить процессы, происходящие в леги-

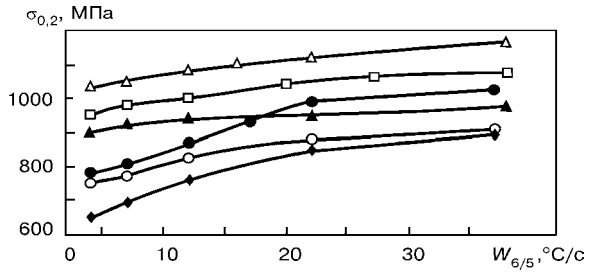

Рис. 1. Влияние скорости охлаждения на предел текучести металла ЗТВ образцов-имитаторов: ◆ – сталь 12ГН2МФАЮ; ○ – 14ХГ2САФБ; ● – 12ГН3МФАЮДР; Δ – 14ХГН2МДАФБ, ▲ – 12ХГН2МФБДАЮ; ❑ – 12ХГН2МФДРА

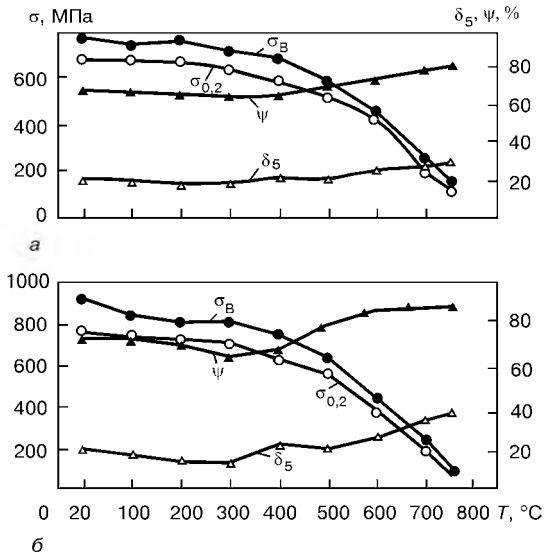

Рис. 2. Механические свойства стали 12ГН2МФАЮ (*а*) и 14ХГН2МДАФБ (*б*) при изменении температуры испытаний

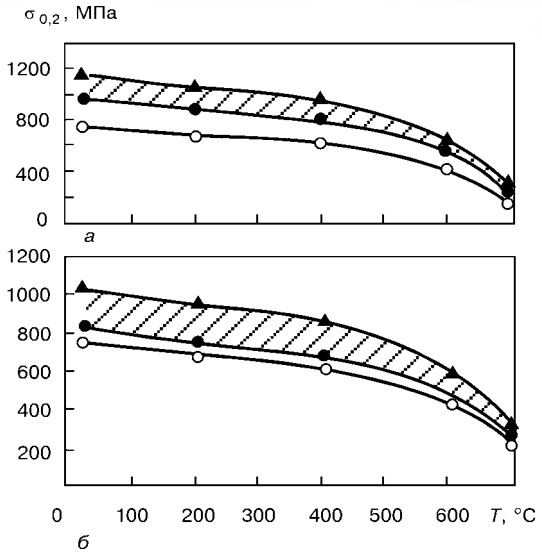

Рис. 3. Влияние температуры испытаний на предел текучести основного металла (○) и ЗТВ соединений при скоростях охлаждения $w_{6/5}$ = 2,7 (●) и 36 °С/с (▲): *а* — сталь 14ХГН2МДАФБ; *б* — 12ГН3МФАЮДР

рованных сталях при формировании структуры сварных соединений.

Охлаждение легированного металла сопровождается уменьшением его объема. Процесс деформирования усложняется при γ→α-превращениях, поскольку последние приводят к увеличению объема кристаллической решетки в области температур фазовых превращений. Конечный результат указанных процессов определяется конкретным составом металла, а также особенностями протекания и диапазоном температур фазовых превращений. В данном случае датчики дилатометра фиксировали изменение длины ΔL исследуемых об-

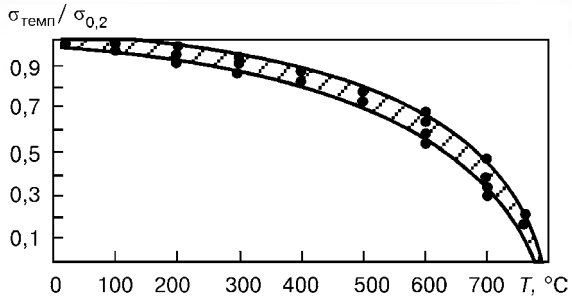

Рис. 4. Влияние температуры испытаний на изменение прочности легированных конструкционных сталей

разцов при заданной базе исследований L, что позволяло рассчитывать для каждого конкретного варианта относительную деформацию

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} 100\ \%$$

С помощью дилатометрических кривых относительную деформацию рассчитывали на прямолинейных участках через каждые 50 °С, а на участках, которые сопровождаются структурными превращениями, — через каждые 5...10 °С. За нуль на графиках принимали точку начала нагрева образцов. Обработку дилатограмм проводили в соответствии с методикой, представленной в работе [7].

В исследуемых сталях структурные превращения, как правило, завершаются ($T_к$, °С) при температурах ниже 300 °С и приводят (рис. 6) к достаточно большим деформациям ε_c. Обобщенные сведения о фазово-структурных изменениях низколегированных сталей приведены в табл. 2. Все они относятся к диапазону скоростей охлаждения $w_{6/5}$ ≈ 5...36 °С/с, наиболее характерных для дуговой сварки легированных сталей. Из приведенных данных следует, что для всех исследованных сталей сохраняется общая закономерность — увеличение структурных сжимающих деформаций в металле ЗТВ при высоких скоростях охлаждения (ограниченное тепловложение сварки). По-видимому, на окончательный уровень остаточных напряжений в металле ЗТВ таких сталей оказывают влияние особенности протекания температурных и структурных деформаций свариваемого металла. Об этом свидетельствуют результаты сравнительного анализа сталей марок 12ГН3МФАЮДР и 14ХГН2МДАФБ (рис. 3). Изменение прочности металла ЗТВ под влиянием термического цикла сварки происходит по-разному. У стали 12ГН3МФАЮДР по отношению к основному металлу она увеличивается в 1,03 ... 1,3 раза, в то время как у стали 14ХГН2МДАФБ — в 1,36 ... 1,56 раза. В то же время при сопоставимых скоростях охлаждения в металле ЗТВ стали 12ГН3МФАЮДР может формироваться более высокий уровень сжимающих деформаций, обуслов-

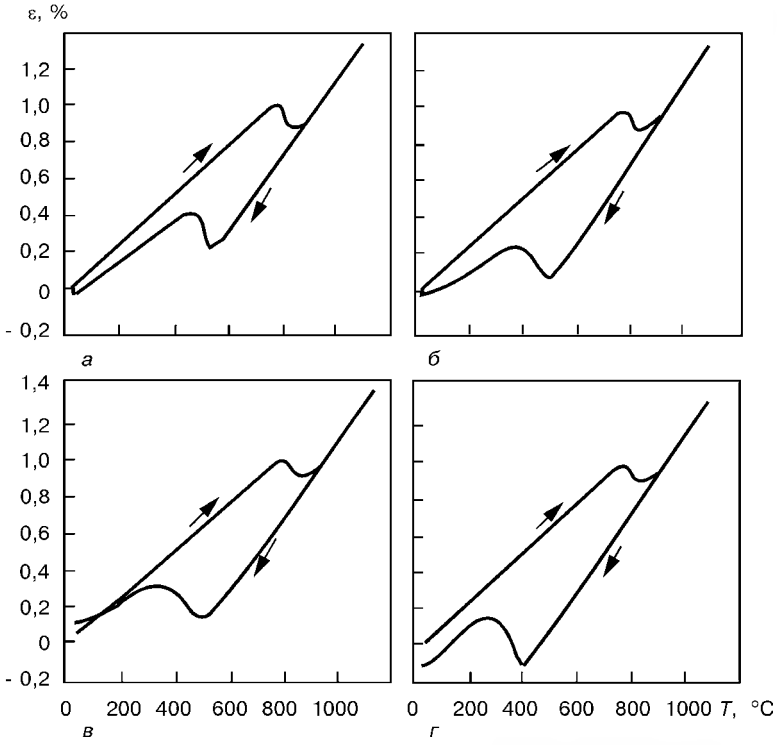

Рис. 5. Дилатометрические кривые нагрева-охлаждения образцов из стали 12ХГ2САФД с различными скоростями охлаждения: *а* — $w_{6/5}$ = 5,0; *б* — 8,5; *в* — 14,0; *г* — 36 °С/с

ленных структурными превращениями. Это дает основания предполагать, что в

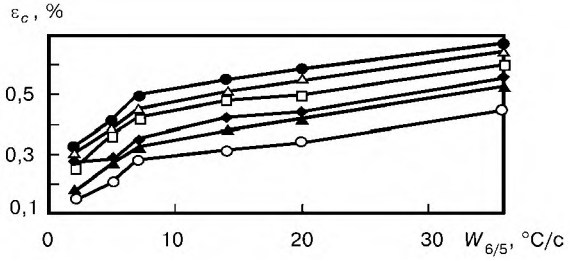

Рис. 6. Влияние скорости охлаждения на величину деформации в металле ЗТВ легированных сталей, обусловленную протеканием в них структурных превращений (обозначения см. на рис. 1)

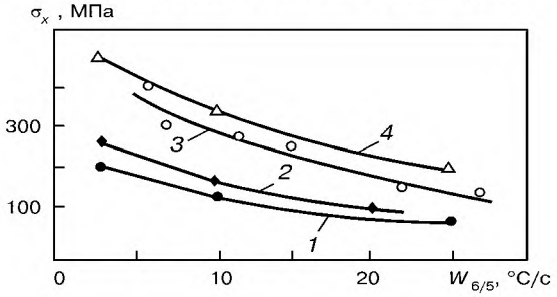

Рис. 7. Влияние скорости охлаждения на изменение остаточных сварочных напряжений σ_x в металле ЗТВ сталей 12ГН3МФАЮДР (*1*); 12ГН2МФАЮ (*2*); 14ХГ2САФД (*3*); 14ХГН2МДАФБ (*4*)

сварных соединениях этой стали уровень остаточных сварочных напряжений будет ниже. По сравнению со сталью 14ХГН2МДАФБ она не легирована хромом и имеет более низкое содержание углерода и ванадия при практически равноценных количествах марганца и молибдена. Все эти элементы в значительной степени способствуют увеличению прочности металла ЗТВ конструкционных сталей и повышению показателя свариваемости $P_{см}$, что характеризует снижение ее сопротивляемости к замедленному разрушению. Аналогичные наблюдения связаны еще с одной парой сталей (12ГН2МФАЮ и 14ХГ2САФД), которые также имеют равноценные показатели прочности, но отличаются легированием. В данном случае с точки зрения формирования остаточных сварочных напряжений предпочтительнее сталь 12ГН2МФАЮ.

Таким образом, в результате взаимодействия температурных и структурных деформаций в металле ЗТВ легированных конструкционных сталей будут формироваться остаточные растягивающие напряжения. Результаты проведенных исследований могут быть интерпретированы применительно к условиям выполнения однопроходной наплавки на массивную плиту. Формирование напряжений в стыковых соединениях происходит существенно сложнее и, как правило, зависит от многих факторов: конструктивного оформления соединений и их жесткости, значения погонной энергии, схемы заполнения разделки кромок, количества слоев и валиков в шве и др. [7]. Об этом свидетельствуют исследования металла ЗТВ, полученного при выполнении однослойной наплавки на массивную плиту и сварке жесткозакрепленных стыковых соединений с многопроходными швами. Для выполнения однослойных наплавок автоматической сваркой под флюсом и ручной электродуговой были использованы пластины из сталей 12ГН2МФАЮ, 14ХГ2САФД, 12ГН3МФАЮДР и 14ХГН2МДАФБ размером 400×300×30 мм. В процессе исследований регулировали режимы сварки и температуру предварительного подогрева, что позволяло изменять скорости охлаждения металла ЗТВ в интервале $w_{6/5}$ = 7...27 °С/с. После этого методом голографической интерферометрии (разработанном в ИЭС им. Е. О. Патона) [8] определяли продольные остаточные напряжения в этих образцах. Как правило, они сформированы неравномерно по длине: минимальные их уровни расположены в начале и конце, а максимальные — в средней части. Усредненные значения остаточных напряжений в металле ЗТВ исследуемых сталей в зависимости от скорости их охлаждения приведены на рис. 7. Полученные данные свидетельствуют, что рассматриваемые стали весьма условно могут быть разделены на две группы. К первой следует отнести стали 12ГН2МФАЮ и 12ГН3МФАЮДР, у которых даже при сварке на повышенных тепловложениях формируется относительно низкий уровень остаточных напряжений (σ_x < 260 МПа). Ко второй группе относятся остальные стали (14ХГ2САФД, 14ХГН2МДАФБ, 12ХГН2МФБДАЮ и 12ХГН2МФДРА), у которых при замедленных скоростях охлаждения ($w_{6/5}$ < 5,0 °С/с) в результате использования больших тепловложений может формироваться достаточно высокий уровень продольных остаточных растягивающих напряжений (σ_x ≈ 350...450 МПа). С повышением скоростей охлаждения общий уровень остаточных напряжений в металле ЗТВ таких сталей может снижаться.

Для изготовления технологических проб использовали стали с достаточно близким уровнем служебных свойств — марок 12ГН3МФАЮДР и 14ХГН2МДАФБ. Выбранная в качестве основы исследований технологическая проба представляла собой плиту размером 400×400×40 мм, на которую устанавливали и приваривали по всему периметру (угловым швом с катетом 10...12 мм) пластины из исследуемой стали. При этом образовывалось стыковое соединение с V-образной разделкой кро-

Таблица 2. Характеристики фазово-структурных превращений высокопрочных легированных сталей

Марка стали	$T_н$, °С	$T_к$, °С	ε_c, %	Составляющие микроструктуры
12ГН2МФАЮ	620...515	420...270	0,26...0,61	Бейнит, мартенсит
14ХГ2САФД	575...411	318...232	0,14...0,47	Феррит, бейнит, мартенсит
12ГН3МФАЮДР	510...404	228...203	0,33...0,68	Бейнит, мартенсит
14ХГН2МДАФБ	531...445	336...300	0,30...0,65	»
12ХГН2МФБДАЮ	484...416	305...253	0,18...0,53	»
12ХГН2МФДРА	480...450	269...239	0,24...0,60	»

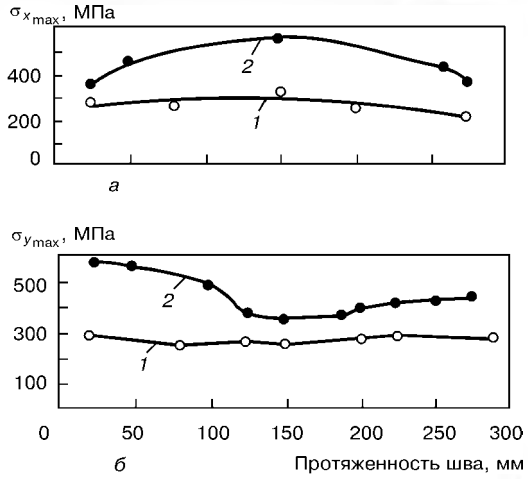

Рис. 8. Остаточные продольные σ_x (*а*) и поперечные σ_y (*б*) напряжения в металле ЗТВ технологических проб из сталей 12ГН3МФАЮДР (*1*) и 14ХГН2МДАФБ (*2*)

мок размерами 100×300×15 мм. Сварку образцов проводили проволокой сплошного сечения марки Св-10ХН2ГСМФТЮ диаметром 1,2 мм в смеси газов на основе аргона (80 % Ar + 20 % CO_2) на следующих режимах: $I_{св}$ = 130...140 А; $U_д$ = = 22...24 В; $v_{св}$ = 13...14 м/ч. Выполнение каждого из следующих за корневым валиком слоев шва начинали после остывания сварного соединения до температуры 20...30 °С. При таких условиях сварки скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °С составляла 26...28 °С/с. Содержание диффузионного водорода $[H]_{диф}$ во всех случаях оставалось неизменным и равнялось 3,0...4,0 мл на 100 г наплавленного металла. Его концентрацию определяли хроматографическим методом.

Остаточные напряжения в исследованных образцах также определяли методом голографической интерферометрии. Их уровни в металле ЗТВ соединений из сталей 12ГН3МФАЮДР и 14ХГН2МДАФБ приведены на рис. 8. Полученные данные свидетельствуют, что выбранная конструкция и размеры образцов способствуют формированию в сварных соединениях достаточно высокого уровня и специфического распределения остаточных напряжений как вдоль, так и поперек оси шва. Так, в сварных соединениях стали 14ХГН2МДАФБ значение напряжений составляет 350...580 МПа. Ориентировочно они равны $(0,5...0,8)\sigma_{0,2}$ основного металла. Значительно ниже уровень остаточных напряжений при аналогичных условиях сварки в соединениях стали 12ГН3МФАЮДР — 240...310 МПа. В сварном соединении они распределены практически равномерно, а их уровень не превышает 45 % предела текучести стали. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в таких соединениях в меньшей степени вероятно образование и развитие холодных трещин. Аналогичные закономерности в формировании и распределении продольных и поперечных напряжений получены и при исследовании соединений сталей марок 12ГН2МФАЮ и 14ХГ2САФД. В первой они значительно ниже. Следует отметить, что результаты проведенных исследований подтверждаются большим опытом использования упомянутых сталей [9, 10]. При изготовлении уникальных ответственных конструкций из сталей марок 12ГН2МФАЮ и 12ГН3МФАЮДР с соблюдением определенных технологических рекомендаций в сварных соединениях практически всегда удавалось избегать появления холодных трещин. В значительной степени это связано с формированием относительно низкого уровня остаточных напряжений.

Результаты выполненных исследований показывают, что рациональное использование методов исследований свариваемости позволяет получать ориентировочную информацию об уровне остаточных напряжений в соединениях легированных сталей, классифицировать их по этому показателю и выбирать более приемлемые составы металлов для изготовления ответственных сварных конструкций.

1. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А.* Методы исследования и регулирования сварочных напряжений и деформаций // Совершенствование сварных металлических конструкций. — Киев: Наук. думка, 1992. — 272 с.
2. *Махненко В. И.* Компьютерное моделирование сварочных процессов // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 108–124.
3. *Гладштейн Л. И., Литвиненко Д. А.* Высокопрочная строительная сталь. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
4. *Никитин В. Н.* Высокопрочные низколегированные стали для автомобильной, экскаваторной и горной техники // Сталь. — 1977. — № 11. — С. 1044–1047.
5. *Исследования* и разработка новой высокопрочной стали для сварных конструкций / Л. И. Гладштейн, Л. А. Бобылева, Л. Г. Онучин и др. // Там же. — 1978. — № 6. — С. 548–551.
6. *Саржевский В. А., Сазонов В. Я.* Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75 // Автомат. сварка. — 1981. — № 5. — С. 69–70.
7. *Особенности* протекания термодеформационных процессов при дуговой сварке высокопрочных сталей / Л. М. Лобанов, Л. И. Миходуй, В. Г. Васильев и др. // Там же. — 1999. — № 3. — С. 3–11.
8. *Lobanov L. M., Pivtorak V. A.* Development of holographic interferometry for investigation of the stress-strain state and quality control of welded structures. — S. l., [2000]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XV-1036-00).
9. *Сварка* высокопрочной стали 12ГН2МФАЮ / В. Ф. Мусиянченко, Б. С. Касаткин, Л. И. Миходуй и др. // Автомат. сварка. — 1982. — № 5. — С. 47–50.
10. *Свариваемость* высокопрочной стали 12ГН3МФАЮДРСШ / Л. И. Миходуй, А. К. Ющенко, В. Д. Позняков и др. // Там же. — 1991. — № 11. — С. 12–16.

Technological sample and investigation procedure have been developed, which allow evaluation of the influence of residual stresses on resistance of welded joints with multipass welds to formation of longitudinal cold cracks. Resistance to formation of longitudinal cold cracks of welded joints on 14KhG2MDAFB steel, made with Sv-10KhGN2SMFTYu wire in a gas mixture of 75 % Ar +25 %CO_2, was estimated, taking into account the level of residual stresses.

Поступила в редакцию 10.04.2002

УДК 621.791.75

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОД ВОДОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ С НИКЕЛЕВОЙ ОБОЛОЧКОЙ

С. Ю. МАКСИМОВ, **И. М. САВИЧ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. М. ЗАХАРОВ, канд. физ.-мат. наук, **Н. В. ЗАЙЦЕВА**, канд. техн. наук, **Е. В. КОЗЛОВ**, инж.
(Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Оценено влияние окружающей среды на газонасыщенность и плотность высоконикелевого (60...70 % Ni) металла шва, структуру и свойства различных зон сварного соединения. Для повышения показателей их механических свойств в состав шихты порошковой проволоки необходимо дополнительно вводить легирующие, модифицирующие и поверхностно-активные элементы.

Ключевые слова: подводная сварка, порошковая проволока, наплавленный металл, зона термического влияния, газонасыщенность, структура, механические свойства

При строительстве и ремонте подводных трубопроводов важное место занимает сварка. В последнее время для этих целей широко используется мокрая сварка. Она выполняется непосредственно в водной среде и исключает применение дорогостоящих кессонов и камер. Однако использование разработанных ранее материалов при сварке современных трубных сталей типа Х60 [1] дает отрицательные результаты — наблюдается появление холодных трещин в зоне термического влияния (ЗТВ). Эта проблема может быть решена путем применения электродных материалов, которые обеспечивают образование аустенитной структуры металла шва [2] и тем самым уменьшают содержание водорода, диффундирующего в металл ЗТВ. Исследование образцов, сваренных электродами со стержнем из нержавеющей стали, выявило ряд недостатков [3–5]. Из-за разности в значениях коэффициента линейного теплового расширения металла шва и основного металла при кристаллизации возможно возникновение трещин в зоне сплавления. Кроме того, вследствие перемешивания металла первого прохода с основным металлом вблизи границы сплавления появляется хрупкая мартенситная прослойка, склонная к образованию холодных трещин. Поэтому в данном случае более перспективно применение никелевых электродов [4–6]. При этом металл шва и основной металл имеют близкие значения коэффициента линейного теплового расширения, а наличие большого запаса аустенитности позволяет избежать образования мартенситных прослоек. И хотя металл таких швов склонен к образованию пор и горячих трещин, особенно в корневом проходе, сварные соединения, выполненные никелевыми электродами, имели высокую стойкость против образования холодных трещин.

Применение в ИЭС им. Е. О. Патона порошковых проволок со шихтой на основе рутила и оболочкой из стальной ленты не обеспечивает выполнение сварных соединений стали типа Х60 без трещин в ЗТВ. Получить высокое содержание никеля в металле шва за счет легирования сердечника не удалось. Более рациональным является использование никелевой ленты. Поскольку ранее такие проволоки не применялись, целью настоящей работы было получение предварительных данных о возможности формирования качественного наплавленного металла, оценка его структуры и свойств, в том числе в ЗТВ, при сварке порошковой проволокой с никелевой оболочкой. Основу шихты опытной порошковой проволоки составляли фториды щелочных и щелочноземельных металлов, раскислителем являлся металлический марганец. В качестве оболочки использовали никелевую ленту размером 0,3×8,0 мм. Наплавку на пластину из стали Х60 толщиной 14 мм выполняли на следующем режиме: $I_{св}$ = 160...180 А; $U_д$ = 32...34 В; $v_{св}$ = 6 м/ч; ток обратной полярности; диаметр проволоки — 1,8 мм; коэффициент заполнения — 26...28 %. В ходе исследований применяли методы дюрометрии, оптической и растровой электронной микроскопии, газового анализа [7], волюмометрии [8] и флюоресцентного рентгеновского анализа (ФРА). При этом для удобства изучения в образцах были выделены три зоны — наплавки, оплавления и ЗТВ, заметно отличающиеся между собой по структуре. На рис. 1 показаны микроструктуры названных зон в привязке к макроструктуре. Как видно из рис. 1, макроструктура наплавленного металла шва содержит хорошо различающиеся области сравнительно мелких равноосных кристаллитов, расположенных на его границах, столбчатых кристаллов, вытянутых вдоль направления теплоотвода, и крупнозернистого ядра, в котором и завершается кристаллизация металла.

Химический состав наплавленного под водой металла приведен в табл. 1. Если сравнить его с химическим составом металла, наплавленного этой же проволокой на воздухе, то заметно увеличение содержания железа. По-видимому, контрагирование дуги и наличие турбулентных газовых потоков в парогазовом пузыре в условиях подводной сварки приводят к повышению степени

© С. Ю. Максимов, И. М. Савич, С. М. Захаров, Н. В. Зайцева, Е. В. Козлов, 2003

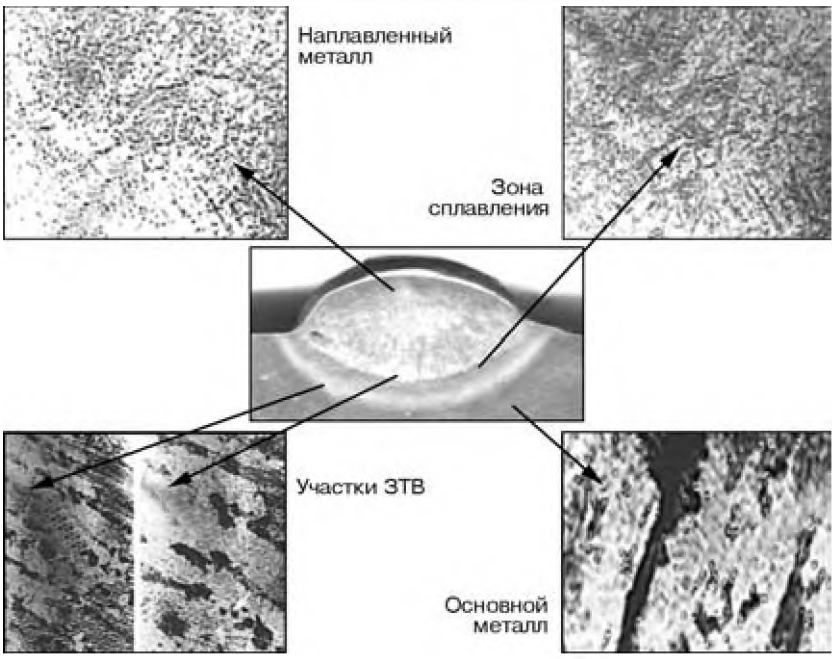

Рис. 1. Микроструктуры (×309) различных участков наплавки (макрошлиф в центре), выполненной под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой на сталь Х60

перемешивания с основным металлом и проплавляющей способности дуги. Последнее подтверждается увеличением на 15...20 % глубины проплавления при сварке под водой по сравнению со сваркой на воздухе. В результате доля основного металла в расплавленном металле увеличивается. Согласно диаграмме фазовых равновесий [9], такому составу должно соответствовать двухфазное состояние, представляющее собой преимущественно твердый раствор железа в никеле и упорядоченную фазу $FeNi_3$. Однако вторая фаза в исследованном образце не была выявлена ни металлографическим, ни рентгенографическим методом. По-видимому, условия кристаллизации таковы, что вместо равновесных структур формируется метастабильное состояние, представляющее собой пересыщенный твердый раствор железа в никеле или разупорядоченный интерметаллид [10, 11].

Ширина зоны, имеющей переменный химический состав вблизи границы сплавления (рис. 2), достаточно мала (около 40 мкм), наличия в ней прослоек с закалочной структурой не обнаружено.

Микроструктура ЗТВ образцов, выполненных на воздухе и под водой, отличается мало. Граница ЗТВ определяется местоположением изотермы, обеспечивающей прямое ($\alpha \to \gamma$) и обратное ($\gamma \to \alpha$) фазовые превращения. При сварке под водой геометрические размеры ЗТВ из-за интенсивного охлаждения уменьшаются почти в 3 раза. Металл ЗТВ претерпевает некоторую деградацию исходной строчечной структуры прокатанной стали. При нагреве в области γ-превращений происходит частичное растворение цементита эвтектоидных колоний в аустените, а при последующем охлаждении вновь образуются эвтектоидные колонии, морфология и местоположение которых отличаются от исходных. Деградация исходной строчечной структуры ЗТВ прокатанной стали проявляется более заметно при сварке под водой. Это обусловлено высокой скоростью охлаждения металла v, которая имеет значения, превышающие необходимые для образования слоистой структуры [12]:

$$v \le D_C \Delta T / \alpha^2, \qquad (1)$$

где D_C — коэффициент диффузии углерода; ΔT — разница температур $\gamma \to \alpha$-превращения в локальных участках материала; α — расстояние между слоями перлитных колоний.

Условия сварки наиболее заметно влияют на микроструктуру зоны сплавления. В случае сварки на воздухе она практически не выявляется отдельно от ЗТВ и представляет собой участок с наиболее дисперсной ферритно-перлитной структурой, характерной для всей ЗТВ. Охлаждение водой изменяет

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла, полученного при различных условиях сварки (по данным ФРА)

Условия сварки	Массовая доля элементов, %			
	Fe	Ni	Cr	Mn
На воздухе	23,90	73,14	0,01	2,85
Под водой	36,12	61,03	0,02	2,82

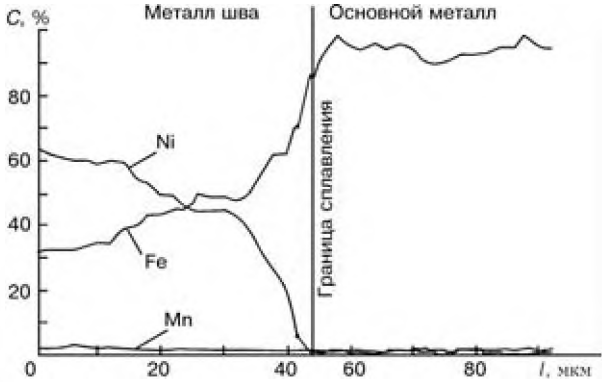

Рис. 2. Распределение элементов вблизи границы сплавления при сварке под водой (по данным микрорентгеноспектрального анализа): C — содержание элементов; l — расстояние

ситуацию и приводит к образованию мелкодисперсных закалочных структур (см. рис. 1). При этом трещины в наплавленном металле и ЗТВ отсутствуют.

Для определения механических свойств металла шва выполняли стыковые соединения из стали Х60 толщиной 14 мм. Однако получить качественный металл шва, пригодный для испытаний, не удалось из-за шлаковых включений между проходами и вблизи свариваемых кромок, что вызвано использованием фторидного шлака. Поэтому для исследований выполняли трехслойную наплавку в канавку, после чего были изготовлены образцы типа II (по ГОСТ 6996–66). Результаты испытаний показали, что наплавленный металл отличается низким уровнем механических свойств ($\sigma_в \leq 290$ МПа, $\delta \leq 6$ %). Причиной этого является наличие грубой крупнокристаллической структуры в крупнозернистом ядре в сочетании с сегрегацией оксида никеля и водорода по границам зерен. Интенсивный теплоотвод в участках наплавленного металла, прилегающих к поверхности и границе сплавления, приводит к образованию сравнительно мелкокристаллитной структуры. Поэтому фрактографические исследования поверхности разрушения образцов после испытания на растяжение показали, что этот процесс носит смешанный характер (рис. 3): хрупкий в центральном участке в месте зарождения трещин и вязкохрупкий при последующем распространении трещины в периферийные области наплавленного металла [13].

С помощью дюрометрических исследований удалось определить механические свойства локальных участков наплавленного металла (прилегающий к границе сплавления наплавленный металл с мелкозернистой структурой), зоны сплавления и ЗТВ. Полученные результаты (табл. 2) отражают неоднородность его структуры и влияние окружающей среды. Обогащение наплавленного металла железом за счет основного металла (см. табл. 1) и ускоренное охлаждение приводят к повышению твердости и прочности в образцах, сваренных под водой.

Для материалов с неоднородно распределенными свойствами оценить в локальных участках пластические свойства весьма сложно. Поэтому представляют значительный интерес оценки, полученные методом дюрометрии [14, 15]. При этом в качестве параметра пластичности $\delta_п$ используется соотношение

$$\delta_п = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon}, \qquad (2)$$

где ε_e — упругая деформация: $\varepsilon \approx 0{,}076$ — общая деформация на контактной площадке индентор–

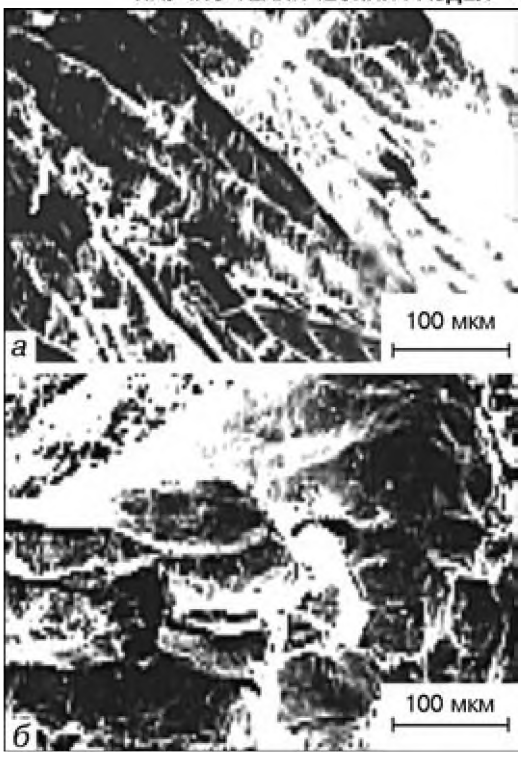

Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения образцов: *а* — центральный участок наплавленного металла; *б* — его периферийный участок

образец в направлении действия растягивающего усилия. Упругую деформацию ε_e определяем по формуле

$$\varepsilon_e = 1.08\,(1 - \nu - 2\nu^2)\,\frac{HV}{E}, \qquad (3)$$

где ν — коэффициент Пуассона; HV — твердость по Виккерсу; E — модуль Юнга. Значения $\delta_п$, рассчитанные для большого количества материалов, отражают сложившиеся на основе стандартных механических испытаний представления об их пластичности. Установлено, что критическое значение пластичности составляет $\delta_п \geq 0{,}9$. Достижение этого значения — необходимое условие проявления пластичности при испытании материалов на растяжение и изгиб.

Измерения показали, что при сварке под водой наплавленный металл с мелкозернистой структурой в зоне сплавления, а также в ЗТВ в локальных участках имеет достаточно высокий запас пластичности, так как во всех исследованных зонах $\delta_п > 0{,}9$, что выше критического значения [15]. Вместе с тем, в зоне сплавления и ЗТВ значения $\delta_п$ уступают аналогичным показателям основного металла. Пластичность наплавленного металла, хотя и ниже, чем при сварке на воздухе, но больше, чем у основного металла.

Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла (на воздухе и под водой) на сталь Х60

Условия сварки	Твердость HV_{100}, ГПа				Предел текучести $\sigma_{0.2}$, ГПа				Параметр пластичности $\delta_п$, %			
	НМ	ЗС	ЗТВ	ОМ	НМ	ЗС	ЗТВ	ОМ	НМ	ЗС	ЗТВ	ОМ
На воздухе	1,120	1,58	1,61	1,60	37,3	52,5	53,5	53,2	0,959	0,938	0,937	0,937
Под водой	1,415	2,16	2,03	1,60	47,2	72,0	67,7	53,2	0,948	0,914	0,910	0,937

Примечание. НМ — наплавленный металл; ЗС — зона сплавления; ОМ — основной металл.

Таблица 3. Плотность наплавленного металла и содержание в нем газов при различных условиях сварки

Условия сварки	Плотность наплавленного металла, г/см^3		Изменение плотности		Содержание газа $S \cdot 10^{-2}$, мас. %	
	измеренная $\rho_п$	расчетная $\rho_р$	$\Delta\rho = \rho_р - \rho_п$, г/см^3	$\Delta\rho / \rho_р$, %	[O]	[H]
На воздухе	8,27691	8,4999	0,22298	2,623	2,00	0,16
Под водой	8,37890	8,5711	0,1922	2,242	0,71	0,36

Среда, в которой выполняется сварка, также существенно влияет на плотность наплавленного металла и содержание в нем газов (табл. 3). При этом содержание газов и плотность не коррелируют между собой.

Наплавленный металл большой плотности получают при сварке под водой, что априори не было очевидным. Следует отметить, что при оптическом металлографическом исследовании заметной пористости в наплавленном металле не наблюдалось, несмотря на пониженную по сравнению с основным металлом плотность, которую определяли гидростатическим взвешиванием. Известно [16], что, будучи активным элементом, кислород образует с никелем химическое соединение

$$O + Ni \leftrightarrow NiO.$$

Водород, выделяющийся из никеля одновременно с кислородом, в связи с уменьшением растворимости восстанавливает закись никеля:

$$NiO + 2H \leftrightarrow Ni + H_2O.$$

При протекании этой реакции в сварочной ванне в результате выделения паров воды происходит бурное кипение жидкого металла, после окончания кристаллизации в металле шва, как правило, появляются поры. В случае сварки под водой значительное содержание водорода в парогазовом пузыре приводит к связыванию определенного количества кислорода, при этом вероятность образования в расплавленном металле закиси никеля уменьшается. Следовательно, в момент кристаллизации сварочной ванны процесс взаимодействия между водородом и закисью никеля носит ограниченный характер, благодаря чему уменьшается вероятность образования пор.

Таким образом, результаты исследований показали, что применение порошковой проволоки с оболочкой из никелевой ленты позволило получить достаточно плотный наплавленный металл без трещин, крупных пор и неметаллических включений. Хрупкий характер разрушения образцов при испытании на растяжение связан с образованием грубой крупнокристаллической структуры в центральной части шва. Однако пластичность локальных участков наплавленного металла с мелкозернистой структурой имеет значения выше критических. С учетом того, что порошковая проволока с никелевой оболочкой без дополнительного легирования шихты была использована для исследований исключительно в качестве модельного материала, необходимые свойства и структуру металла шва можно получить с помощью целенаправленного легирования путем введения модификаторов и активных раскислителей в сердечник порошковой проволоки. После решения этой задачи дальнейшие усилия будут направлены на оценку сварочно-технологических свойств порошковой проволоки и определение служебных свойств сварного соединения стали типа X60 в целом.

1. *Ibarra S., Grubbs C. E., Liu S.* State of the art and practice of underwater wet welding of steel // International workshop on underwater welding of marine structures, Dec. 7–9, 1994. New Orleans, Miami. — New York: ABS, 1995. — P. 49–112.
2. *Koibushi M., Yokota T.* Underwater wet welding with Ni, Fe–Ni and stainless steel electrodes // J. of JWS. — 1981. — № 5. — P. 489–495.
3. *Liu S., Olson D., Ibarra S.* Electrode formulation for underwater welding // Proc. Intern. conf. on underwater welding, March 20–21, 1991, New Orleans, Miami. — New Orleans, Miami: AWS, 1991. — P. 98–119.
4. *Properties* of wet welded joints / H. Szelagowski, H. Stuhff, P. Loebel // 21-st Annual OTC, May 1–4, 1989. Houston. — Houston, 1989. — P. 77–87.
5. *Bailey N.* Welding under water — a metallurgical appraisal // Proc. of the First intern. offshore and polar engineering conf., August 11–16, 1991, UK, Edinburg. — Edinburg, 1991. — P. 331–337.
6. *Gooch T. G.* Properties of underwater welds. Pt. 1: Procedural trials // Metal Construction. — 1983. — № 3. — P. 164–167.
7. *Походня И. К.* Газы в сварных швах. — М: Машиностроение, 1972. — 256 с.
8. *Гаврилюк В. Г.* Волюмометрический анализ // Энциклопедия неорганических материалов. — Киев: Главн. ред. Укр. сов. энцикл., 1977. — Т. 2. — С. 214–216.
9. *Хансен М., Андреенко К.* Структуры двойных сплавов: Справочник. — М.: Металлургиздат, 1962. — 1488 с.
10. *Голубцова Р. Б.* Фазовый анализ никелевых сплавов. — М.: Наука, 1969. — 232 с.
11. *Мальцев М. В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1970. — 368 с.
12. *Мартин Дж., Доэрти Р.* Стабильность микроструктуры металлических систем. — М.: Атомиздат, 1978. — 280 с.
13. *Энгель Л., Клинкеле Г.* Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справочник. — М.: Металлургия, 1986. — 230 с.
14. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 190 с.
15. *Мильман Ю. В., Галанов Б. А., Чугунова С. И.* Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости / АН Украины. Ин-т проблем материаловедения. — Препр. — Киев, 1992. — 25 с.
16. *Багрянский К. В., Кузьмин Г. С.* Сварка никеля и его сплавов. — М.: Машгиз, 1983. — 164 с.

The work evaluates the influence of the environment on gas content and density of high-nickel (60 ...70 % Ni) weld metal and structure and properties of various zones of the welded joint. In order to improve the indices of mechanical properties, it is necessary to further add the alloying, modifying and surface-active elements to the charge of flux-cored wire.

Поступила в редакцию 10.04.2002

УДК 621.791:669.14:018.2-195

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ У8

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, **О. В. КОЛИСНИЧЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

На основе решения нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных разностей определены температурные поля поверхностных слоев в процессе плазменно-детонационной обработки (ПДО) изделий. На базе полученных расчетных зависимостей проведен анализ кинетики фазовых преобразований в структуре стали У8 при ПДО. Результаты расчетно-теоретического анализа сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: углеродистая сталь, плазменно-детонационная обработка, метод конечных разностей, нестационарное уравнение теплопроводности, температурные поля, высокоскоростной нагрев (охлаждение), структурно-фазовые превращения

В процессе воздействия высокоинтенсивными тепловыми потоками, создаваемыми плазменным генератором, лазером, электронным лучом, происходит нагрев поверхности с последующим охлаждением ее путем отвода тепла в материал и окружающую среду, в результате чего в приповерхностном слое происходят структурно-фазовые превращения. В условиях скоростного нагрева и охлаждения изменяется кинетика структурных преобразований, что обусловливает сдвиг соответствующих критических точек фазовых превращений [1, 2]. При высокоскоростном нагреве подводимая тепловая энергия превосходит энергию, необходимую для перестройки кристаллической решетки $\alpha \to \gamma$, а сама перестройка идет с некоторой скоростью. Кроме того, гомогенизация аустенита и процесс рекристаллизации деформированных сплавов смещаются в область еще более высоких температур.

Для определения смещений температур фазовых превращений в сталях во время действия концентрированного источника энергии относительно критических точек на равновесной диаграмме железо–углерод важно знать температурное поле и изменение скорости нагрева (охлаждения) в зоне обработки. Математическому моделированию воздействия концентрированных тепловых потоков на материалы посвящено большое количество работ [3–5]. В них рассмотрены как аналитические методы, так и методы численного анализа теплового состояния материала. В ряде работ моделируется воздействие на поверхность не стационарным, а периодическим тепловым потоком.

Цель работы заключалась в численном расчете температурных полей, скоростей их изменения, а также анализе их влияния на кинетику фазовых преобразований в модифицированных слоях при плазменно-детонационной обработке (ПДО) поверхности изделий. Технология ПДО [6] позволяет получать импульсные потоки плазмы, под действием которых поверхность изделия испытывает циклическую термообработку. Температурный диапазон нагрева поверхности велик: 20...2000 °С и выше. Вследствие этого, кроме изменения теплофизических характеристик в зависимости от температуры обрабатываемого материала, необходимо учитывать и скрытую теплоту фазового перехода. Отличительной особенностью ПДО является то, что изделие может быть включено в разрядный контур. Исследование амплитудно-временных характеристик тока при ПДО показало, что плотность тока в обрабатываемой области выше 10^8 А/м^2 [7]. Таким образом, нагрев поверхностного слоя материала в условиях ПДО происходит благодаря внешнему тепловому потоку, составляющими которого являются: энергия, приносимая электронами, ионами, нейтральными атомами, лучистая энергия, а также энергия в результате тепловыделения в процессе прохождения импульсного тока. Принимая во внимание широкий температурный диапазон нагрева поверхности, необходимо также учитывать изменения электрофизических свойств материала. Таким образом, для расчета динамики температурных полей при ПДО предпочтительнее использовать численное моделирование процесса. Для этого применяли метод конечных разностей. При решении задачи этим методом использовали полностью неявную схему.

В осесимметричном приближении рассмотрено нестационарное уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами и наличием объемного тепловыделения:

$$C(T)\,\rho(T)\,\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(T)\,\frac{\partial T}{\partial z}\right] + \frac{1}{r}\,\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda(T)\,\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{j^2(t)}{\sigma(T)}, \quad 0 \le r \le R,\ 0 \le r \le H. \tag{1}$$

где C, λ, σ, ρ — соответственно удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, удельная электропроводность и плотность материала; j — плотность тока, определяемая экспериментально с использованием методики поясов Рогов-

© Ю. С. Борисов, О. В. Колисниченко, 2003

ского [7]; R, H — соответственно радиус и толщина образца.

Соотношение поверхностного и объемного источников тепла имеет вид [8]

$$\theta = \lambda T/(\chi j^2 \delta^2),$$

где λ = 20 Вт/(м·К); T = 1000 К — температура в слое; $\chi = 2\cdot10^{-6}$ Ом·м — удельное электрическое сопротивление; $j = 3\cdot10^8$ А/м^2; $\delta = 10^{-4}$ м — характерная глубина слоя.

Проведенная оценка показывает, что объемное тепловыделение составляет 10 % общего теплового вклада. При формулировке граничных условий для уравнения (1) приняли следующие допущения: изделие теплоизолировано; удельный тепловой поток в изделие имеет гауссово распределение $q(r) = q_0\exp[-(\xi r)^2]$ (q_0 — максимальное значение удельного теплового потока, ξ — коэффициент, учитывающий изменение удельного теплового потока по радиусу); охлаждение поверхности осуществляется за счет теплоотвода вглубь металла, а также лучистого потока с поверхности изделия $q_{луч} = \varepsilon\sigma_{SB}T^4$ (ε — степень черноты поверхности, σ_{SB} — постоянная Стефана – Больцмана)

$$z = 0,\ 0 \le r \le R:\ \lambda\frac{\partial T}{\partial z} = -q(r) + q_{луч};$$

$$z = H,\ 0 \le r \le R:\ \lambda\frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

$$r = 0,\ 0 \le z \le H:\ \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R,\ 0 \le z \le H:\ \lambda\frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$t = 0,\ T = 293\ \text{К}.$$

Для упрощения разностной схемы уравнение (1) преобразовано к квазилинейному виду путем замены

$$S(T) = \int_{273}^{T} \lambda(T)\mathrm{d}T,$$

тогда уравнение (1) принимает вид

$$\frac{C(T)}{\lambda(T)}\rho\frac{\partial S(T)}{\partial t} = \frac{\partial^2 S(T)}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial S(T)}{\partial r}\right) + \frac{j(t)^2}{\sigma(T)}. \quad (2)$$

При импульсном плазменном воздействии в поверхностных слоях возникает большой градиент температур. Таким образом, нестационарное уравнение теплопроводности следует решать на неравномерной сетке, что несколько усложняет задачу. Для перехода к равномерной сетке было осуществлено преобразование координаты z [9]

$$z = H\frac{1 - e^{\eta\tilde{z}}}{1 - e^{\eta}}, \quad (3)$$

где η — коэффициент, учитывающий степень неравномерности сетки; $\tilde{z} = \dfrac{\ln(1 - z(1 - e^{\eta})/H)}{\eta}$ — безразмерная координата на равномерной сетке.

Уравнение (2) на равномерной сетке с учетом преобразования (3) в новой системе координат имеет вид

$$\frac{C(T)}{\lambda(T)}\rho\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial^2 S}{\partial \tilde{z}^2}\frac{1}{\eta^2}\left(\frac{e^{\eta} - 1}{He^{\eta\tilde{z}}}\right)^2 - \frac{\partial S}{\partial \tilde{z}}\frac{1}{\eta}\left(\frac{e^{\eta} - 1}{He^{\eta\tilde{z}}}\right)^2 + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial S(T)}{\partial r}\right) + \frac{j(t)^2}{\sigma(T)}. \quad (4)$$

После приведения к безразмерному виду разностный аналог уравнения (4) решается с использованием схемы Писмена – Рэкфорда [9] методом одномерных прогонок по z и r.

Для обеспечения экономичности схемы и уменьшения шагов при остывании поверхности использовали неравномерную сетку по времени. Сетка сгущается во временном интервале существования больших градиентов температур и разрежается при малых градиентах. Шаг сетки определяется из выражения

$$\tau = \frac{\tau_1(1 - \omega^k)}{1 - \omega},\ k = 0, 1, \ldots, l_c,$$

где l_c — количество шагов в расчетной сетке по времени при остывании; ω — коэффициент геометрической прогрессии, описывающей неравномерность сетки по временной координате; τ_1 — первый шаг по времени при остывании.

Учет теплоты фазового перехода в расчетной модели проводили путем замены значений истинной теплоемкости $C(T)$ на эффективную в интервале температур перехода из одного агрегатного состояния в другое [10].

Численный расчет изменения температурного поля поверхностных слоев образцов из стали марки У8 был проведен при следующих условиях ПДО: удельный тепловой поток в поверхность q_0 = = $7{,}2\cdot10^8$ Вт/м^2; длительность импульса τ = 0,6 мс; амплитуда тока $I = 5{,}0\cdot10^3$ А; толщина образца $H = 5{,}0\cdot10^{-3}$ м; радиус образца $R = 5{,}0\cdot10^{-3}$ м; количество импульсов n = 6; частота следования импульсов ν = 3 Гц.

При нагреве критическая точка A_{c_1} смещается в область высоких температур на величину $\Delta T_к$ [1]:

$$\Delta T_к = \left(\frac{3k^2x^2}{4D}\right)^{1/3} v_н^{1/3}, \quad (5)$$

где D — коэффициент диффузии углерода в аустените; $v_н$ — скорость нагрева в критическом интервале температур; k — параметр, определяемый из диаграммы Fe–Fe$_3$C (для стали k = 110); x — структурный фактор (половина расстояния между соседними центрами кристаллизации аустенита).

На рис. 1 показано изменение температуры во времени в точках с координатой r = 0 мм на различном расстоянии от поверхности z. Использование равновесной диаграммы железо–углерод для определения толщины модифицированного слоя дает завышенное значение — 60 мкм. Для определения толщины поверхностного слоя, испытавшего фазовые превращения в условиях ПДО, необходимо знать

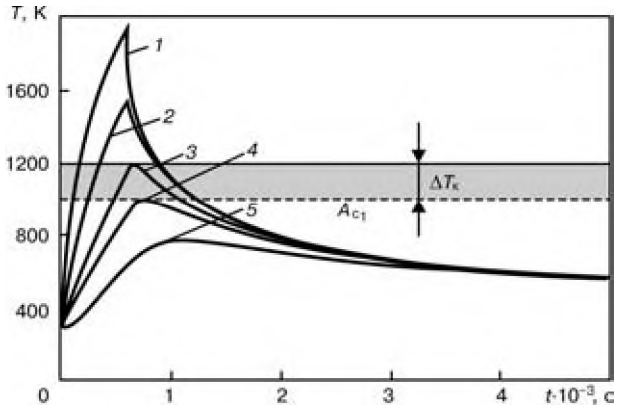

Рис. 1. Температурные кривые в точках с координатой r = 0 мм на глубине: *1* — z = 0; *2* — 20; *3* — 40; *4* — 60; *5* — 100 мкм

скорость нагрева. На рис. 2 изображены расчетные кривые скорости нагрева на различной глубине. Видно, что при $t = 6{,}0 \cdot 10^{-4}$ с на глубине z = 60 мкм скорость нагрева $v_н \approx 1 \cdot 10^6$ К/с, а на расстоянии от поверхности $z \leq 40$ мкм $v_н \approx 1{,}5 \cdot 10^6$ К/с. Для закаленной стали У8 структурный фактор x = = 10^{-5} см, коэффициент диффузии углерода в аустените в рассматриваемых условиях $D \approx$ $\approx (15...18) \cdot 10^{-8}$ см^2/с [1]. Исходя из уравнения (5), критическая точка A_{c_1} смещается в область высоких температур на $\Delta T_к$ = 182...196 °С, и, следовательно, неизотермическое аустенитное превращение заканчивается при температуре около 1200 К. Таким образом, при последующем охлаждении в поверхностном слое ≈ 40 мкм возможно мартенситное превращение (рис. 1, 3). Глубже будет располагаться структура, образующаяся при высокотемпературном скоростном отпуске. В зависимости от скорости охлаждения в модифицированном слое возможно получение перлита, сорбита, троостита, бейнита и мартенсита. Результаты, полученные при электротермической обработке материалов [2], показывают, что при скорости охлаждения 10000 К/с и выше удается полностью подавить высокотемпературный распад аустенита и

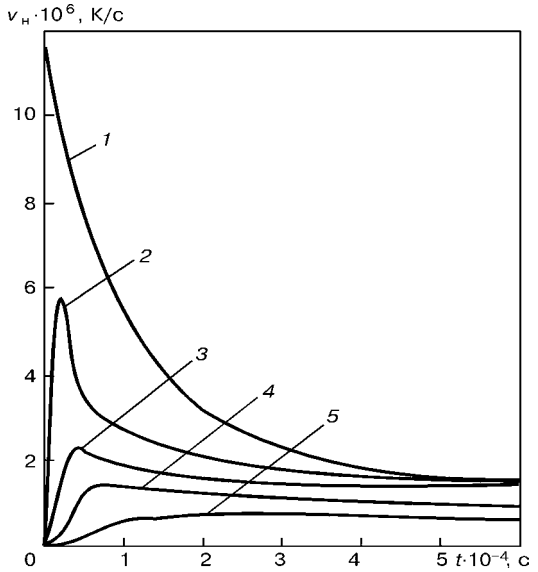

Рис. 2. Скорость нагрева на расстоянии от поверхности: *1* — z = 0; *2* — 20; *3* — 40; *4* — 60; *5* — 100 мкм

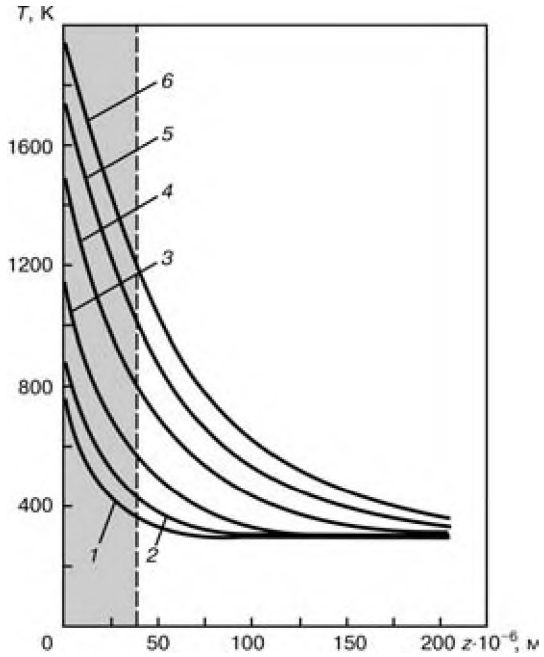

Рис. 3. Распределение температуры по толщине поверхностного слоя при r = 0 мм на стадии нагрева: *1* — $t = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$; *2* — $7{,}5 \cdot 10^{-3}$; *3* — $1{,}5 \cdot 10^{-1}$; *4* — $3{,}0 \cdot 10^{-1}$; *5* — $4{,}5 \cdot 10^{-1}$; *6* — $6{,}0 \cdot 10^{-1}$ с

зафиксировать только мартенситное превращение для любой стадии перлитно-аустенитного превращения. На рис. 4 представлено распределение температуры по толщине модифицированного слоя в различные моменты охлаждения. При $t = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ с температура поверхностного слоя меньше температуры мартенситного превращения $M_н$ = 518 К для стали марки У8. В данный момент времени скорость охлаждения $v_{охл} \approx 12000$ К/с (рис. 5). Таким образом, в рассматриваемых условиях ПДО данной стали (согласно результатам расчетно-теоретического анализа) модифицированный слой будет состоять из фаз мартенсита и остаточного

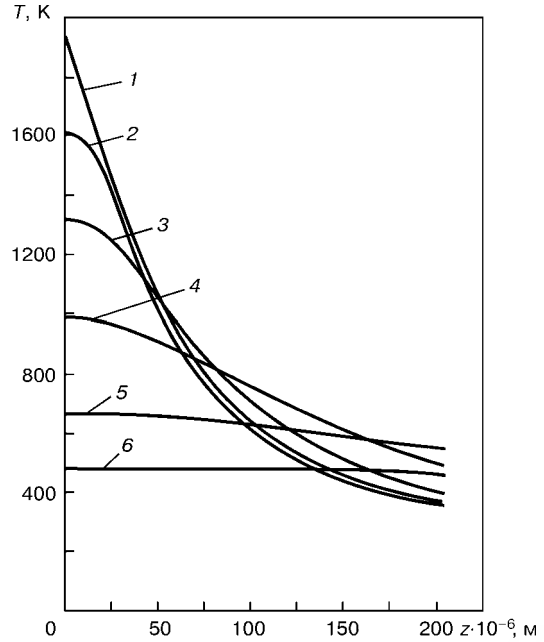

Рис. 4. Распределение температуры по толщине поверхностного слоя при r = 0 мм на стадии охлаждения: *1* — $t = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$; *2* — $6{,}4 \cdot 10^{-3}$; *3* — $7{,}8 \cdot 10^{-3}$; *4* — $1{,}3 \cdot 10^{-2}$; *5* — $3{,}2 \cdot 10^{-2}$; *6* — $1{,}0 \cdot 10^{-2}$ с

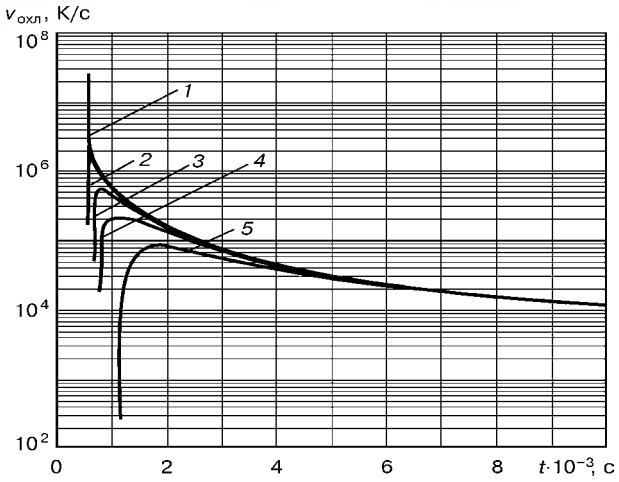

Рис. 5. Скорость охлаждения на глубине: *1* — *z* = 0; *2* — 20; *3* — 40; *4* — 60; *5* — 100 мкм

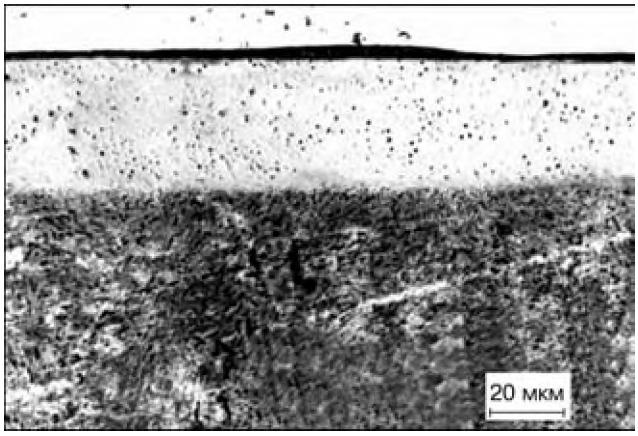

Рис. 6. Микроструктура образца из стали У8 после ПДО

аустенита. Это также подтверждают металлографические исследования модифицированных слоев образцов, прошедших ПДО. На рис. 6 приведена микроструктура поверхностного слоя образца из рассматриваемой стали после ПДО. Рентгенофазовый анализ показал, что слаботравящийся белый слой толщиной примерно 40 мкм представляет собой мелкокристаллический мартенсит и остаточный аустенит [11]. Высокая скорость охлаждения приводит к тому, что после охлаждения наблюдается большая неоднородность структуры, что связано с негомогенностью образовавшегося в процессе нагрева аустенита. Кроме того, это приводит к повышенной дефектности структуры, так как усиливается фазовый наклеп, замедляются процессы отдыха и рекристаллизации и более полно наследуются дефекты γ-фазы. При этом происходит измельчение блоков, увеличение плотности дислокаций и рост напряжений в кристаллической решетке [12]. Образующийся при этом мартенсит более дисперсный, чем при обычной закалке. В стали У8 после обычной закалки длина игл мартенсита составляет 7...10, а после закалки концентрированными источниками нагрева — всего 2...3 мкм [12].

Исходя из расчетных кривых (см. рис. 3), проплавление слоя составляет 5,5 мкм. Из рис. 5 также видно, что скорость охлаждения в момент кристаллизации расплава на поверхности выше 10^6 К/с. В этом случае дендритный рост зерна вырождается и формируется плоский фронт зерна [12]. Измельчение зерен благоприятно сказывается на свойствах сплава и прежде всего возможно достижение наиболее оптимального сочетания прочности и пластичности. Особенно сильное влияние измельчение зерен оказывает на повышение сопротивлению ползучести, поскольку границы зерен эффективно препятствуют пластическому течению металла при повышенных температурах.

Рассмотренные выше расчетные кривые относятся к воздействию одним импульсом. При рассмотрении второго и последующих импульсов характер распределения температурных полей существенно не отличается. Между импульсами происходит интенсивный отвод тепла в металл. Поверхностный слой успевает остыть до температуры, незначительно превышающей первоначальную. Разница температур не превышает 10 °С. Таким образом, в результате ПДО осуществляется процесс термоциклической обработки поверхности, приводящей к усилению фазового наклепа в результате обратимых α↔γ-превращений, увеличению плотности дислокаций, уменьшению размера зерна, что должно способствовать улучшению служебных характеристик изделий. Расширение линий на рентгенограммах образцов, прошедших ПДО, также подтверждает наличие значительного фазового наклепа в результате обратимых α↔γ-превращений при термоциклировании. С учетом сдвига критических точек упрочнению в результате термоциклической обработки при рассматриваемых начальных условиях подвержен слой глубиной около 40 мкм.

Выводы

1. При нагреве поверхности в условиях ПДО стали марки У8 происходит сдвиг критических точек A_{c_1} в область высоких температур на $\Delta T_к$ = = 182...196 °С. При последующем высокоскоростном охлаждении полностью подавляется высокотемпературный распад аустенита и происходит только мартенситное превращение. В таких условиях модифицированный слой состоит из фаз мартенсита и остаточного аустенита.

2. Многократное тепловое воздействие при ПДО позволяет осуществлять процесс термоциклической обработки поверхности, способствующий усилению фазового наклепа в результате обратимых α↔γ-превращений, увеличению плотности дислокаций, дроблению структуры.

3. Расчетная оценка толщины и фазового состава модифицированных слоев сопоставима с данными экспериментальных исследований образцов из стали марки У8, прошедших ПДО. Это дает возможность использовать описанную расчетную модель для прогнозирования кинетики фазовых превращений и толщины модифицированных слоев в условиях ПДО изделий из различного вида сталей.

1. *Физические* основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, В. И. Трефилов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 335 с.

2. *Кидин И. Н.* Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 296 с.
3. *Перелома В. А., Тарасевич Н. И., Ликер Р. А.* Исследование тепловых процессов при лазерной обработке железоуглеродистых сплавов // Процессы литья. — 1995. — № 2. — С. 38–48.
4. *Углов А. А., Волков Л. А., Сагдединов О. Г.* К построению аналитического решения одномерной задачи плавления металлов концентрированным потоком энергии // Инж.-физ. журн. — 1992. — № 1. — С. 31–34.
5. *Лыков А. М., Науменко Н. Н.* Плавление материалов периодическим тепловым потоком // Физика и химия обраб. материалов. — 1995. — № 2. — С. 107–115.
6. *Тюрин Ю. Н., Колисниченко О. В., Цыганков Н. Г.* Импульсно-плазменное упрочнение инструмента // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 38–44.
7. *Борисов Ю. С., Колисниченко О. В.* Исследование амплитудно-временных характеристик импульса тока при плазменно-детонационной обработке изделий // Там же. — 2000. — № 12. — С. 56–60.
8. *Гордеев В. Ф., Пустогаров А. В.* Термоэмиссионные дуговые катоды. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.
9. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2 т.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.
10. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
11. *Борисов Ю. С., Колисниченко О. В.* Влияние условий нагрева поверхности изделия на структуру упрочненных слоев стали У8 при плазменно-детонационной обработке // Автомат. сварка. — 2002. — № 12. — С. 31–35.
12. *Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н.* Лазерная техника и технология. — Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки. — М.: Мир, 1987. — 191 с.

Temperature fields in surface layers during plasma-detonation treatment (PDT) of parts were determined through solving a non-stationary equation of thermal conductivity by the finite difference method. Analysis of kinetics of phase transformations in structure of steel U8 during PDT was conducted on the basis of the derived calculation dependencies. Results of the calculation-theoretical analysis were compared with the experimental data.

Поступила в редакцию 24.07.2002

КОРОТКО О ВАЖНОМ

МАЛ ЗОЛОТНИК ДА ДОРОГ

Превращать отходы в доходы, экономить земельные богатства, уменьшить загрязнение окружающей среды позволит центральным углеобогатительным фабрикам (ЦОФ) новое оборудование, к проектированию и выпуску которого приступил Новокраматорский машиностроительный завод (г. Краматорск, Донецкой обл.).

Уже до конца лета нынешнего года в соответствии со сроками контракта, заключенного между НКМЗ и ООО «Полюс К°» (г. Курахово, Украина), машиностроители изготовят и поставят Кураховской ЦОФ первую современную отечественную установку для сушки энергетического шлама.

По словам ведущего специалиста производства горнорудного и кузнечно-прессового оборудования НКМЗ Александра Токарева, ныне более половины углеобогатительных фабрик Украины в силу недостаточной технической оснащенности пока не в состоянии рационально распорядиться шламом, остающимся после первого углеобогащения, но еще пригодным в производстве. Как правило, этот шлам сваливается в специальные шламохранилища, занимающие большие земельные угодья.

Сушильная машина с маркой НКМЗ позволит обогатительным фабрикам сразу же после первой переработки стандартной угольной массы проводить повторное обогащение шлама, доводить его до требуемых норм и отправлять потребителю для повторного применения.

Одна сушилка способна обогащать в год до 40 тыс. т шлама. Масса ее сравнительно невелика — чуть более 20 т, но польза очевидна.

Пресс-служба НКМЗ

УДК 620.192.45

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ СВАРНЫХ ШВОВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Чл.-кор. НАН Украины **Г. М. ГРИГОРЕНКО**, **В. Ф. ГРАБИН**, **В. В. ГОЛОВКО**, кандидаты техн. наук, **В. А. КОСТИН**, **И. И. АЛЕКСЕЕНКО**, **Л. М. КАПИТАНЧУК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Методика предполагает использование цифровых методов получения изображений применительно к растровому электронному и световому микроскопам. Применение оптического метода определения размеров включений с использованием цифровой камеры дает возможность определять включения, размер которых превышает 0,07 мкм.

Ключевые слова: низколегированная сталь, сварной шов, неметаллические включения, структура, цифровое изображение, электронная микроскопия

В научно-технической литературе последних лет наблюдается большой интерес к проблемам, связанным с условиями формирования структурных составляющих в металле шва. Исследования, выполненные в этой области, направлены на углубление представлений о механизмах зарождения, роста и развития как самой структуры, так и неметаллических включений (НВ), формирующихся в составе литого металла. Такие работы требуют новых подходов к вопросам методики проведения количественных определений ультрадисперсных компонентов структуры (например, НВ размером 0,08...0,2 мкм) с использованием оптических и электронных микроскопов.

В настоящее время широко распространен металлографический метод определения размеров НВ с использованием светового микроскопа (СМ) и автоматизированных приборов типа «Квантимет», «Омнимет», «Эпиквант» и др. Однако эти приборы имеют сравнительно низкую разрешающую способность — возможно определение включений, размер которых превышает 0,27 мкм (физически минимальный размер объектов, доступных для изучения в СМ). Это связано с тем, что объекты, размер которых меньше длины волны света (λ = = 270 нм), не регистрируются. При этом не учитываются более мелкие частицы, с размерами которых многие исследователи связывают формирование структуры игольчатого феррита, обеспечивающего оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств сварных низколегированных швов.

Сегодня все большее применение находят цифровые методы получения изображений (например, с помощью цифровых камер или фотоаппаратов). Затем оцифрованное изображение подвергается анализу с помощью соответствующего программного обеспечения. В результате получают цифровой набор данных, содержащих значительный объем информации, проанализировав который можно получить размерные характеристики исследуемого объекта.

В этой связи актуальным является использование современных средств для выявления неметаллических частиц размером менее 0,5 мкм.

Для анализа размеров НВ был использован растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-840 фирмы «Jeol» (Япония) с системой микроанализаторов фирмы «Link Systems» (Англия). Разрешающая способность микроскопа 40 нм, ускоряющее напряжение 5...35 кВ, ток пучка $10^{-7}...10^{-11}$ А. Исследования проводили в режиме вторичных и обратнорассеянных электронов. Использовали также СМ «Неофот-32» с цифровой фотокамерой OLYMPUS C-3000ZOOM. Общая матрица изображения в ней составляет 3340000 пикселей. Максимальное разрешение камеры 2048×1536 пикселей. Для оперативного управления используется 1,8" цветной LCD дисплей. В режиме ZOOM укрупнение камеры изменяется от 1 до 10 раз. На рис. 1 приведена блок-схема системы анализа НВ.

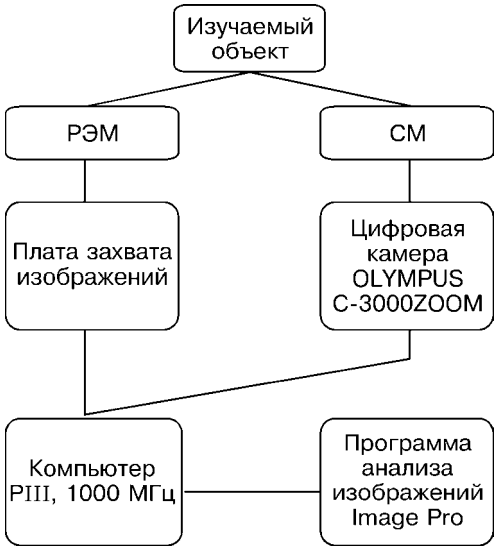

Рис. 1. Блок-схема системы анализа НВ

© Г. М. Григоренко, В. Ф. Грабин, В. В. Головко, В. А. Костин, И. И. Алексеенко, Л. М. Капитанчук, 2003

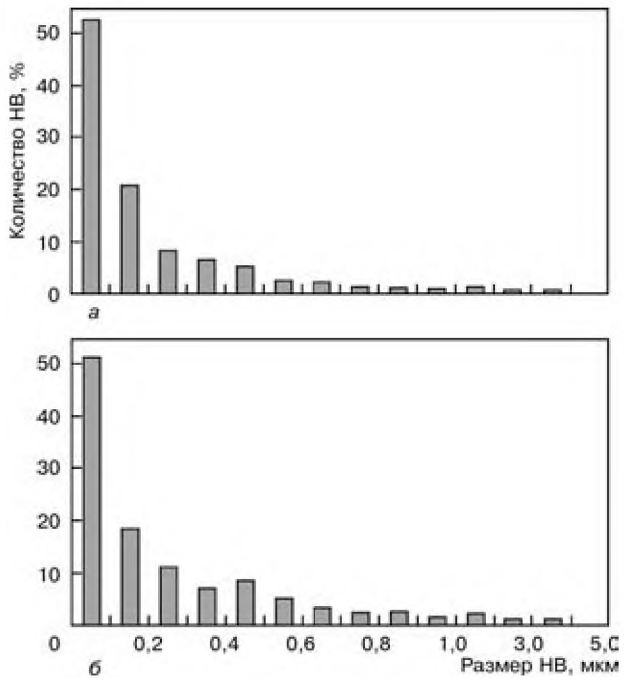

Рис. 2. Распределение НВ по размерам с использованием РЭМ (*а*) и СМ (*б*)

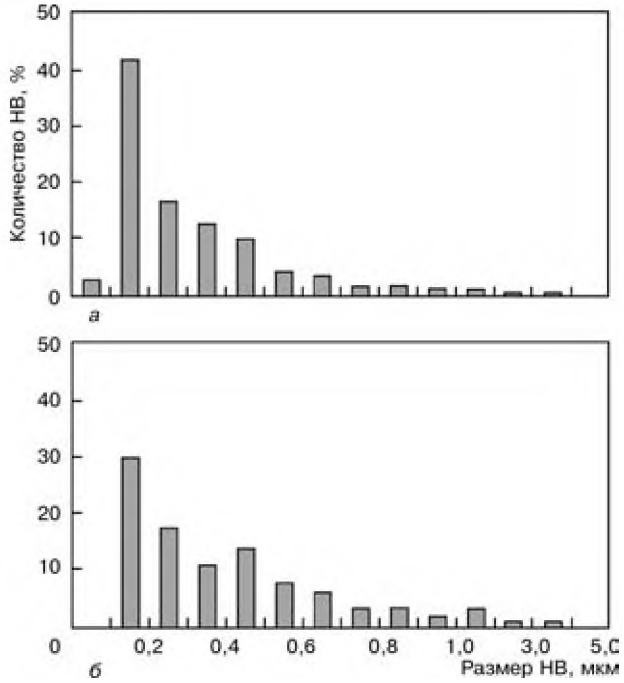

Рис. 3. Распределение НВ по размерам с учетом удаленных шумов: *а* — РЭМ; *б* — СМ

В качестве объекта исследований был выбран шлиф металла шва на стали 14ХГНДЦ, выполненный дуговой сваркой под флюсом (полированный, нетравленый). Предварительно шлиф был подвергнут ионной очистке для удаления с его поверхности различных загрязнений. Полученное цифровое изображение с помощью программы Image Pro преобразовывалось в двухцветное, где изображение одного цвета соответствовало матрице, а другого — НВ (без разграничения их типа). Заметим, что обычно в металле шва наблюдаются НВ различного типа. Как следствие включения имеют различный уровень серого цвета в оцифрованном виде. На этом этапе не стояла задача классификации включений по типам, хотя ее постановка вполне реальна. Все включения условно отнесены к одному классу, уровень верхнего и нижнего порога детектирования устанавливали таким образом, чтобы все они анализировались. Данные о размере и площади включений, полученные с помощью программы Image Pro, пересылали в написанную программу для нахождения распределения включений по размеру, построения гистограммы и вывода графиков на печать. С целью повышения достоверности полученных результатов анализ проводили на десяти независимых участках. Зная общую площадь, на которой подсчитывались включения, определяли также объемную долю НВ с использованием РЭМ и СМ. Полученные результаты представлены на рис. 2. Сопоставив результаты, полученные с использованием РЭМ и СМ, установили, что объемная доля НВ находится в достаточно хорошем согласии друг с другом — соответственно 1,2 и 1,0 %. Вместе с тем наблюдаются некоторые характерные особенности. Во-первых, оба метода показывают чрезвычайно высокое содержание самых мелких включений — до 0,1 мкм; во-вторых, результаты, полученные на РЭМ, дают большее количество мелких включений, тогда как при исследовании с использованием СМ доля средних и крупных возрастает; в-третьих, характер кривой распределения НВ при использовании РЭМ и СМ остается постоянным.

Распределение количества НВ по размерам

Размер включений, мкм	РЭМ		СМ	
	Количество, шт.	%	Количество, шт.	%
0,0...0,1	17	2,982456	0	0
0,1...0,2	240	42,10526	88	29,93197
0,2...0,3	94	16,49123	52	17,68707
0,3...0,4	74	12,98246	32	10,88435
0,4...0,5	57	10,00000	41	13,94558
0,5...0,6	25	4,385965	23	7,823129
0,6...0,7	20	3,508772	18	6,122449
0,7...0,8	11	1,929825	10	3,401361
0,8...0,9	10	1,754386	10	3,401361
0,9...1,0	7	1,228070	5	1,700680
1,0...2,0	9	1,578947	9	3,061224
2,0...3,0	3	0,526316	3	1,020408
3,0...4,0	3	0,526316	3	1,020408
4,0...5,0	0	0	0	0

Примечание. Усредненная объемная доля НВ в исследуемом поле — 1,21 (РЭМ), 1,0 % (СМ).

Проанализировав полученные результаты по НВ с размерами до 0,1 мкм, было высказано предположение, что они включают также шум электронного микроскопа и цифровой камеры, которые продетектированы как включения размером до 0,1 мкм. Для того чтобы отделить при детектировании шум от ультрадисперсных включений, был предложен следующий методологический подход. В качестве анализируемого использован образец из чистого серебра (99,99 %). В связи с высокой чистотой

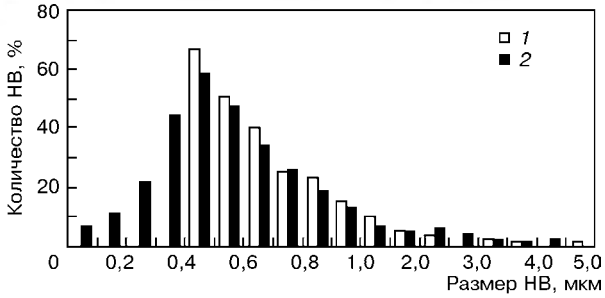

Рис. 4. Гистограмма распределения НВ, полученных с помощью СМ (*1*), оборудованного цифровой камерой, и анализатора изображений «Омнимет» (*2*)

в исследуемом образце не должны наблюдаться НВ, а любые включения, которые будут продетектированы, связаны с электронным шумом регистрирующих приборов. В результате экспериментально был установлен порог (0,07 мкм), при котором шум не детектировался. Скорректированные результаты с учетом удаленных шумов представлены в таблице и в виде гистограммы (см. рис. 3).

Таким образом, при использовании РЭМ наблюдается большее количество высокодисперсных НВ в диапазоне размеров 0,1...0,5 мкм, тогда как в диапазоне более 0,5 мкм данные, полученные с помощью СМ и РЭМ, практически совпадают. Это обстоятельство связано с более высокой разрешающей способностью РЭМ, что приводит к возможности детектирования более мелких НВ. В связи с тем, что при исследовании в СМ используются сравнительно невысокие увеличения, общая изучаемая площадь в этом случае намного больше, чем площадь, исследуемая в РЭМ, т. е. для получения достаточно надежных результатов при определении сравнительно крупных НВ, необходимо в РЭМ значительно увеличить количество изучаемых полей. С целью изучения возможности определения размеров включений, меньше 0,07 мкм, выполнены аналогичные исследования с использованием РЭМ при увеличении в 5000 раз. Анализируя результаты, полученные при большом увеличении, приходим к выводу, что значительную роль начинает играть теневой слой (лежащий между включением и матрицей), формирование которого связано с тем, что размер пикселя изображения становится сопоставим с размером включения. Так, если при ×1000 он составлял порядка 1...2 пикселей, то при ×5000 он соизмерим с размером самих включений. Причем, чем меньше размер частицы, тем выше ошибка при определении размера. Поэтому объемная доля включений, определяемая при ×5000, может заметно изменяться в пределах от 0,1 до 7...8 %, что непосредственно связано с уменьшением изучаемой области. Проведенные исследования показали, что для достижения достоверных результатов необходимо анализировать не менее 250...300 полей. При этом установлено, что минимальный размер определяемых частиц составляет 0,022 мкм.

В заключение необходимо отметить, что сопоставление гистограммы распределения НВ, полученных с помощью СМ, оборудованного цифровой камерой, и данных, определенных с помощью анализатора изображений «Омнимет», показало их достаточно хорошее соответствие в области размеров включений более 0,5 мкм (рис. 4, образцы вырезаны из другого участка шва). Однако объемная доля НВ, полученных с помощью цифровой камеры, оказалась несколько выше, чем объемная доля включений, полученных автоматизированным методом, — соответственно 1,0 и 0,6 %. Это связано с тем, что при подсчете включений анализатором изображений не определяются включения размером менее 0,5 мкм. Применение оптического метода определения размеров НВ с использованием цифровой камеры дает возможность определять включения, размер которых превышает 0,07 мкм, что недоступно на данном этапе для металлографического метода и автоматизированных систем анализа изображений.

На основании проведенных исследований можно утверждать, что значение объемной доли и характер распределения НВ, размеры которых меньше 0,5 мкм, следует определять с использованием РЭМ или СМ, снабженного цифровой камерой. Если в металле шва средний размер включений меньше 0,5 мкм, можно использовать традиционные методы подсчета НВ.

Разработанную методику можно использовать не только для подсчета НВ, но и для определения размера и характера распределения любых типов структурных составляющих в металле шва.

Described is the procedure which provides for the use of numerical imaging methods for scanning electron and light microscopes. The optical method employed for determination of sizes of inclusions using a digital camera makes it possible to determine inclusions more than 0.07 μm in size.

Поступила в редакцию 16.05.2002

УДК 621.791.76:621.7.044.2

ПРЕЦИЗИОННАЯ СВАРКА ВЗРЫВОМ КОНСТРУКЦИЙ

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

Рассмотрена концепция прецизионной сварки взрывом конструкций, основанная на использовании методов и приемов минимизации импульсного воздействия на конструкцию и ее элементы. Представлены новые технологии и получаемые с их помощью изделия, показывающие возможности прецизионной сварки взрывом для решения различных задач современного сварочного производства, которые решить другими способами сварки затруднительно или невозможно.

Ключевые слова: прецизионная сварка взрывом, конструкции, элементы конструкций, трубчатые переходники, мишени-катоды, шины алюминиевые и медные, подвески биметаллические, электролизеры

В настоящее время сварка взрывом (СВ) как технологический процесс продолжает находить широкое и в то же время рациональное применение в сварочном производстве. СВ в основном применяется для получения плоских и трубчатых биметаллических и/или многослойных заготовок и полуфабрикатов из разнородных материалов различных сочетаний, как правило, с последующим переделом под конкретные малоразмерные изделия [1, 2]. В ряде случаев возникает необходимость решения задач конструкционной СВ, когда сварка выполняется на готовой конструкции, а получаемое соединение обычно не требует дальнейших переделов [3]. Однако в большинстве случаев решение такого рода задач лимитируется сопутствующими СВ (процессу с высокими давлениями и импульсами) чрезмерными остаточными деформациями и даже разрушением конструкции в месте сварки и/или плакирования.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона развивается концепция прецизионной сварки взрывом (ПСВ) конструкций и их элементов, преимущественно на ограниченной и/или длинномерной поверхности, с использованием методов и приемов минимизации импульсного воздействия на конструкцию. Они основаны на оптимизации условий образования соединения вблизи нижней границы процесса, повышении энергоемкости режимов и технологических схем СВ и предотвращении недопустимых остаточных деформаций конструкции в области сварки и/или плакирования. Ниже представлены новые технологии и получаемые с их помощью изделия, показывающие возможности ПСВ для решения различных задач современного сварочного производства.

Трубчатые переходники Cu + Ti для рефрижераторов. Совмещение операций сварки с одновременной штамповкой (СВШ) при обработке металлов взрывом является одним из эффективных путей повышения рационального расхода энергии взрывчатого вещества (ВВ). В опубликованных работах по этому вопросу [4] даны основные сведения об особенностях реализации комбинированного процесса СВШ и разработана методика расчета его оптимальных параметров, преимущественно биметаллических заготовок в виде части цилиндра или им подобных. В настоящей работе рассмотрены результаты исследований возможности получения с помощью аналогичного технологического приема трубчатых переходников Cu + Ti переменного сечения [5], удовлетворяющих следующим достаточно жестким техническим требованиям:

свариваемые медная трубка диаметром 50×2,0 мм, длиной 50 мм и титановая трубка диаметром 20×2,0, длиной 20 мм;

соединение медной и титановой трубок должно быть внахлестку, причем длина нахлестки не должна превышать 10 мм;

соединение переходника должно быть термостойким к последующей дуговой сварке, а также выдерживать давление при испытаниях до 1,5 МПа.

С учетом перечисленных технических требований ставилась задача разработать такую технологию прецизионной СВШ, в соответствии с которой энергия строго дозированного (миниатюрного) заряда ВВ будет распределяться последовательно и в то же время непрерывно на сварку титановой и медной трубок и штамповку (развальцовку) последней в матрице с требуемой конечной конфигурацией переходника. Предварительные эксперименты показали, что осуществить развальцовку медной трубки с почти 2,5-кратным увеличением наружного диаметра без разрушения стенки трубки не представляется возможным. Положительные результаты были достигнуты предварительной механической формовкой медной трубки с определенным конусом развальцовки и последующей штамповкой взрывом внутренним стержневым зарядом ВВ с использованием воды как передающей среды.

Для реализации одновременного с процессом штамповки взрывом соединения трубок внахлестку на весьма коротком промежутке (всего 10 мм) была применена угловая схема процесса СВ, для чего изнутри медной трубки выполнялась конусная проточка для формирования углового зазора между свариваемыми поверхностями трубок. Учитывая это, а также утонение медной трубки, происходящее при штамповке, толщина ее стенки была увеличена до 3,0 мм. Расчетно-экспериментальным методом определены основные геометрические параметры нахлестки с конусной проточкой и величина угла конуса предварительной развальцовки

© Л. Д. Добрушин, 2003

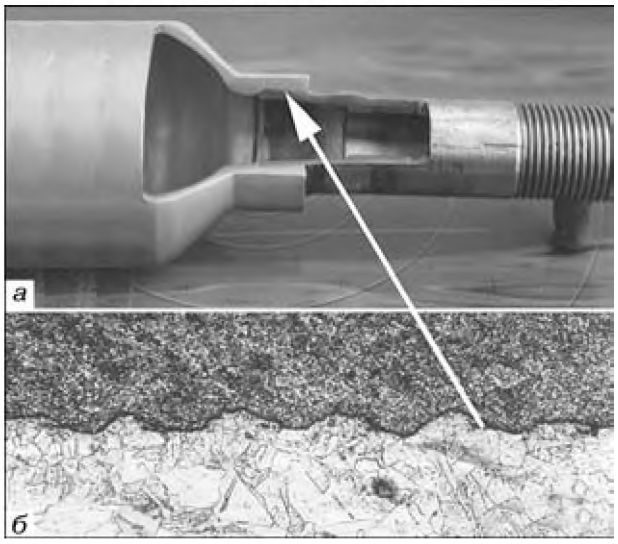

Рис. 1. Макрошлиф трубчатого биметаллического Cu + Ti переходника переменного сечения (*а*) и микроструктура (×156) зоны соединения (*б*)

медной трубки. Внешний вид полученного сварно-штампованного переходника показан на рис. 1.

Проведены металлографические исследования и ультразвуковой контроль зоны соединения медной и титановой трубок. Установлено, что при исходной ширине углового зазора (проточки) около 10 мм ширина зоны соединения находится в пределах 7...8 мм, а ее средняя площадь равна $S_{св} \approx 5{,}0$ см^2. При расчетной массе ВВ $m_{вв} = 2{,}1$ г его удельный расход составил $\eta_{р} = 0{,}42$ г/см^2 (в расчете не учитывалась масса ВВ, расходуемая на инициирование стержневого заряда ВВ), что в несколько раз меньше, чем при обычной СВ, и свидетельствует о достаточно высокой эффективности разработанной технологии прецизионной СВШ. Как видно из рис. 1, граница соединения имеет регулярный волновой профиль и не содержит каких-либо дефектов, в том числе участков термомеханического влияния, часто сопровождающих процесс образования соединения при СВ.

Выполнены измерения температурных полей, возникающих при последующей аргонодуговой сварке переходника с одноименными трубками из меди и титана. Установлено, что максимальная температура зоны соединения при последующей дуговой сварке не поднимается выше 350 °С, и продолжительность ее разогрева до этой температуры не превышает 6...7 мин. Проведенные металлографические исследования не выявили отрицательного влияния послесварочного нагрева на качество полученного соединения Cu + Ti. Достоверность полученных результатов исследований подтверждена успешно проведенными испытаниями переходников на внутреннее давление до 1,5 МПа.

Изготовленная опытная партия переходников передана заказчику в Республику Корея для проведения дальнейших испытаний в промышленных условиях применительно к рефрижераторам.

Мишени-катоды Cu + Ag для напыления стекол. Основная причина неудовлетворительной теплоизоляции оконных стекол состоит в их способности передавать не только видимое солнечное, но и невидимое инфракрасное излучение. Для того чтобы придать оконному стеклу свойства фильтра, препятствующего инфракрасному излучению, на поверхность стекла наносится тонкий слой металла, например, серебра, который отражает указанное излучение. Нанесение металлов или полупроводников на стекла осуществляется методом магнетронного напыления в вакуумной камере. Для реализации процесса напыления необходимо использование специальных мишеней-катодов на основе биметалла Cu + Ag, в котором основание из меди служит охладителем, а плакирующий слой из серебра — распылителем в этой камере.

Биметаллическая мишень-катод Cu + Ag магнетрона представляет собой полосу длиной около 2 м и шириной 100 мм. Толщина плакирующего слоя из серебра находится в пределах 4...5 мм, в то время как толщина основы из меди составляет не менее 10 мм. Процесс СВ является практически единственно возможным методом изготовления такого типа биметаллических мишеней-катодов. Были проведены исследования и разработана технология длинномерного узкополосного плакирования взрывом основы из меди плакирующим слоем из серебра (оба свариваемых материала технической чистоты). В задачу исследований входило решение таких вопросов, как обеспечение высокой надежности процесса детонации длинномерного заряда ВВ, устранение неприваров по периметру плакирующего слоя и предотвращение остаточной деформации (прогиба) изделия после плакирования. На рис. 2 показана биметаллическая мишень-катод длиной около 2 м, полученная по разработанной технологии ПСВ. Мишень сфотографирована на стекле с нанесенным с ее же помощью покрытием из серебра толщиной 14 нм.

В соответствии с разработанной технологией ПСВ возможно изготовление аналогичных мишеней-катодов на основе биметаллов Cu + Sn и Cu + Ti, а также других сочетаний металлов сплавов.

Производство стекол с напылением осуществляется на предприятии «Технолуч» ИЭС им. Е. О. Патона.

Шины анодные Cu + Al для электролизеров. В конструкциях электролизеров различного назначения в ряде случаев возникает необходимость

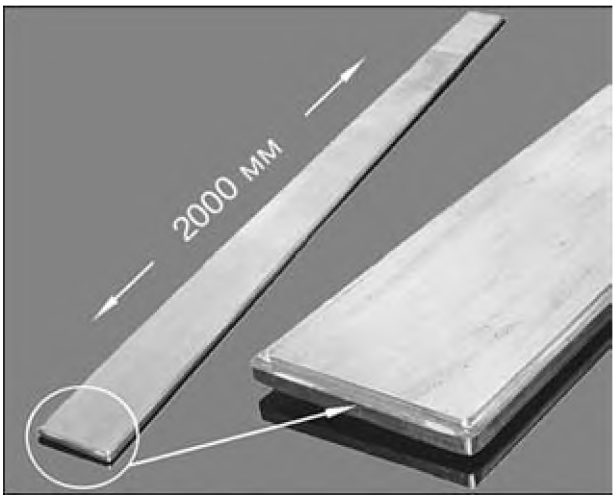

Рис. 2. Длинномерная биметаллическая мишень-катод Cu + Ag, полученная по технологии прецизионной сварки взрывом

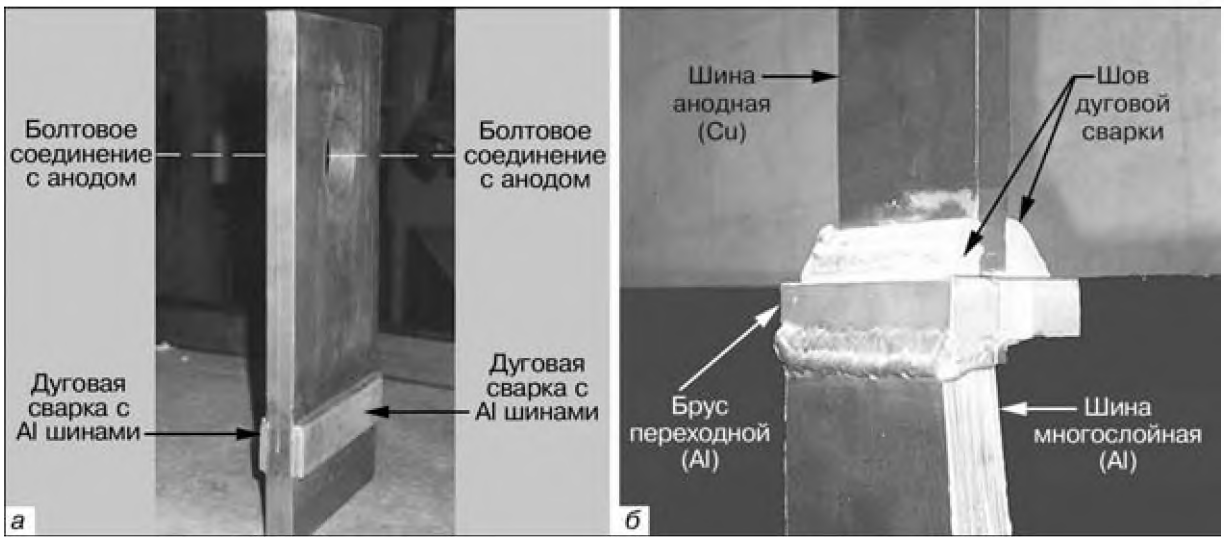

Рис. 3. Внешний вид медной шины, плакированной взрывом с двух сторон узкими алюминиевыми полосами (*а*), и вид сварного узла присоединения гибкой алюминиевой шины (*б*) к медной шине

присоединения гибких многослойных шинопроводов из алюминия к монолитной анодной шине из меди с обеспечением надежного соединения и электрического контакта (оба свариваемых материала технической чистоты). Среди существующих способов соединения алюминия с медью процесс СВ является наиболее эффективным и качественным способом. В то же время рассматриваемая задача является более сложной, чем СВ монолитных алюминиевых и медных шин. Для ее решения была реализована комбинированная схема соединения указанных токоведущих элементов, приведенная на рис. 3.

К медной шине размером 275×130×16 мм с обеих сторон вдоль ее ширины (130 мм) на расстоянии 37 мм от нижнего торца привариваются взрывом две узкие полосы из алюминия размером 25×5 мм (рис. 3, *а*), к которым пристыковываются два алюминиевых переходных бруска размером 25×25 мм. Далее осуществляется дуговая сварка брусков с алюминиевыми полосами угловым швом за несколько проходов. После остывания медной шины до комнатной температуры производится дуговая сварка гибких многослойных пакетов алюминиевых шинопроводов, состоящих из 46 слоев толщиной по 0,5 мм, с переходными брусками соответствующими стыковыми швами (рис. 3, *б*).

В процессе отработки технологии ПСВ необходимо было обеспечить локальное узкополосное плакирование взрывом медной шины без боковых непривaров. Для этого нами разработан принципиально новый подход, заключающийся в использовании специального инерционного устройства вокруг заряда ВВ. Опыт показал практически полное отсутствие боковых непривaров и возможность многоразового использования инерционного устройства.

Шины длинномерные биметаллические Cu + + Al. Следующим характерным примером эффективного и почти безальтернативного применения процесса ПСВ является получение контактных соединений между алюминиевыми и медными шинами. Болтовые контактные соединения между ними обладают пониженной электропроводимостью, которая со временем ухудшается из-за окисления контактной поверхности алюминиевой шины, особенно при работе соединений в условиях повышенных температур. Для решения данной задачи разработана технология ПСВ в режиме остановки процесса детонации плоского заряда ВВ применительно к привариванию взрывом концов длинномерных ($L \approx 2$ м) алюминиевых шин к медным шинам-пластинам, которые имеют одинаковые сечения 100×10 мм. Для устранения начального непривaра концевой участок алюминиевой шины располагается с нависанием относительно медной пластины примерно на длине 50 мм, откуда начинается процесс детонации заряда ВВ. После его инициирования происходит остановка (завершение) процесса детонации строго на кромке медной шины. В результате обеспечивается получение высококачественной сварки между шинами без повреждения длинномерной алюминиевой шины в месте остановки детонации заряда ВВ (рис. 4). Из фотографии можно видеть примерный угол соударения в момент остановки детонации и плавную форму изгиба приваренного концевого участка.

Описанные работы выполнены по заказу НПП «Фероліт» (г. Кременчуг) с целью установки и испытания полученных переходных соединений в

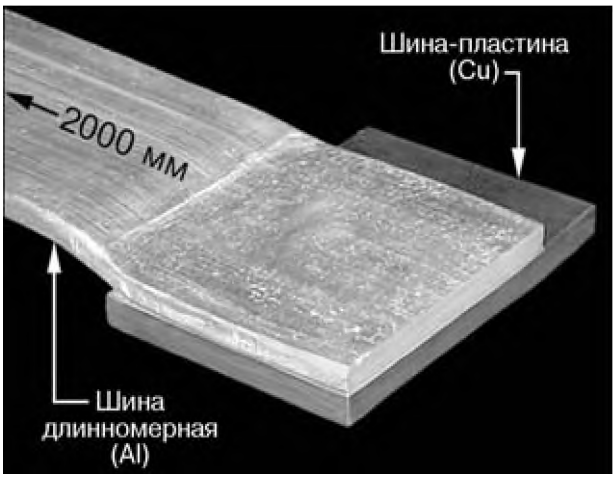

Рис. 4. Переходное сварное соединение длинномерной ($L = 2$ м) алюминиевой шины с медной шиной-пластиной

Рис. 5. Общие виды матрицы с контактными подвесками, плакированными взрывом слоем меди в зоне контакта с медной шиной-штангой (*а*), и цех электролиза катодной меди (*б*)

токоведущие узлы индукционных печей для производства синтетического чугуна из стального лома. Натурные испытания выполненных переходных соединений под нагрузкой при токе 2500 А показали, что в течение более чем года эксплуатации они не нагреваются выше 30 °С. Это свидетельствует об отсутствии значительного электросопротивления и падения напряжения на сваренной взрывом контактной границе алюминиевой длинномерной шины с медной шиной-пластиной.

Подвески контактные сталь + Cu для электролизеров. Недавно впервые в Украине компанией «Панком-Юн» (г. Одесса) с участием ИЭС им. Е. О. Патона организовано производство по электролизу катодной меди сверхвысокой чистоты. Для этого потребовалось разработать технологию ПСВ биметаллических контактных подвесок, которые представляют собою пластину из нержавеющей стали размером 300×110×3,0 мм, плакированную посередине пластиной из меди размером 110×100×1,5 мм. Плакированную пластину изгибают плакирующим слоем вовнутрь с обеспечением П-образного профиля (рис. 5, *б*). Подвески приваривают плавлением к матрице из нержавеющей стали размером 1600× 900× 3,0 мм и, пропуская через них медную шину-штангу сечением 22×22 мм (рис. 5, *а*), матрицу опускают в ванну электролизера (рис. 5, *б*), подвешивая ее на медной шине-штанге. Наличие на подвесках плакирующего слоя меди обеспечивает надежный электрический контакт между медной шиной-штангой и матрицей, на которую осаждается чистая медь.

Получение с помощью СВ прочного и электропроводного соединения меди с нержавеющей сталью в принципе трудностей не вызывает, однако в данном случае необходимо было создать технологию массового производства подвесок, причем без деформаций последних и образования краевых непроваров. Для этого была разработана так называемая кассетная технология плакирования взрывом, согласно которой за один подрыв можно было получить от 5 до 10 биметаллических заготовок подвесок. Всего в течение рабочего дня может быть изготовлено до 200 шт. подвесок. Опыт более чем двух лет эксплуатации подвесок, причем в неблагоприятных для электрических контактных соединений условиях воздействия паров электролита, показал, что зона их контакта с медной шиной-штангой не нагревается выше 40...50 °С, и это является вполне приемлемым. В перспективе планируется переход на матрицы из титана и изготовление в связи с этим биметаллических подвесок на основе биметалла Ti + Cu.

Таким образом, описанные выше технологии и полученные с их помощью изделия показывают новые возможности ПСВ для решения различных задач сварочного производства.

1. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 166 с.
2. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
3. *Производство* металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н., Чернышев и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 496 с.
4. *Кузьмин В. И., Лозовская В. Ф., Гуриков В. М.* Особенности процесса сварки взрывом с одновременной штамповкой // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — Волгоград: ВПИ, 1985. — С. 94–100.
5. *Добрушин Л. Д., Бугаец В. П.* Получение трубчатых переходников «медь-титан» переменного сечения методом прецизионной сварки взрывом с одновременной штамповкой // Междунар. конф. «Слоистые композиционные материалы-98», Волгоград, сент. 1998 г.: Сб. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 1998. — С. 229–230.

Conception of explosion precision welding of structures and their elements, based on using methods and procedures of minimizing a pulsed action on the structure, is considered. Some products, produced by the developed technologies of explosion precision welding and representing the largest interest and demand for welding industry, are described.

Поступила в редакцию 17.03.2003

УДК 621.791.504

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИЙСКОМ СУДОСТРОЕНИИ*

В. Д. ГОРБАЧ, д-р техн. наук (ФГУП «ЦНИИТС», г. Санкт-Петербург, РФ),
В. В. ЧЕРНЫХ, канд. техн. наук (РНТСО, г. Москва, РФ)

Рассмотрены системы обеспечения экологической и производственной безопасности сварочного производства и их гармонизации с международными нормами в судостроительной отрасли.

Ключевые слова: сварочное производство, судостроение, экология, безопасность, экспертиза, стандарты

Объем применения сварки во многих странах мира определяется технологическим уровнем производства в целом. Широкий спектр сварочных технологий, их безотходность и прежде всего доступность обеспечили востребованность и масштабное использование сварки в судостроении, где трудоемкость сварочных работ достигает 30...40 % общей трудоемкости постройки корпусов кораблей и судов.

Существенное улучшение качества сварочных работ и повышение промышленной и экологической безопасности сварочного и сборочно-сварочного производств стали важнейшими современными задачами отрасли. Для их решения предполагается реализация комплекса организационно-технических мероприятий, обеспечивающих переход на новый, гармонизированный с международными стандартами, уровень подготовки персонала сварочного производства, независимость и объективность его аттестации, обязательное выполнение требований производственной и экологической аттестации технологии сварки.

Судостроение — одна из отраслей, где остро стоят вопросы обеспечения экологической и производственной безопасности. Наиболее неблагоприятные условия труда складываются в сварочном производстве. Профессия сварщика по-прежнему является одной из наиболее профессионально опасных, а процессы сварки, наплавки и резки металлов традиционно находятся в поле зрения специалистов-экологов и охраны труда. Комбинированное воздействие на рабочих сварочных профессий вредных производственных факторов (таблица) таких, как химические (сварочные аэрозоли, газы), физические (излучение дуги, электромагнитные поля, физические и тепловые нагрузки и др), природные, способствуют развитию профессиональной заболеваемости и сокращению их трудового долголетия. Совершенствование сварочных процессов приводит к снижению расхода сварочных материалов и уменьшению вредных выбросов в окружающую производственную среду.

В российском судостроении действует система разработки технических и организационных решений по обеспечению безопасности труда и охраны окружающей среды при проектировании и изготовлении судостроительной продукции, в том числе при осуществлении процессов сварки и резки (рис. 1). Активную роль в их обеспечении принимает ФГУП «ЦНИИТС», который уже более 30 лет является головной отраслевой организацией по охране труда, а с 2000 г. — по экологии. За прошедшие годы во ФГУП «ЦНИИТС» создан научно-технический потенциал по данным направлениям и подготовлены квалифицированные специалисты.

Так, действует система экспертизы и санитарно-гигиенической оценки разрабатываемых процессов, материалов и оборудования. При необходимости проводятся экспериментальные санитарно-гигиенические исследования процессов и материалов. Для этого в системе Госстандарта создана сертифицированная санитарно-химическая лаборатория.

Благодаря проводимой экспертизе технологических процессов, материалов, разрабатываемого оборудования создан банк данных по выбросу вредных веществ в ходе основных технологических процессов, применяемых в отрасли. С участием ФГУП «ЦНИИТС» разработаны и внедрены в промышленность нормативные документы по обеспечению безопасности труда при сварке и резке алюминиево-магниевых и титановых сплавов в замкнутых помещениях, на поточно-механизированных линиях. По документации ФГУП «ЦНИИТС» рассчитывается и проектируется вентиляция, встроенная в сварочное оборудование, а также промышленная вентиляция, используемая на предприятиях отрасли.

Развитие работ в части обеспечения производственной безопасности на предприятиях отрасли в новых экономических условиях хозяйствования предопределило создание в составе института в 1999 г. учебного центра «Ритм-охрана труда». В феврале 2001 г. получено разрешение Минтруда на право осуществлять обучение по охране труда,

*В качестве доклада был представлен на международной научно-практической конференции «Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве» (г. Одесса, 11–13 сент. 2002 г.).

© В. Д. Горбач, В. В. Черных, 2003

Условия труда при проведении сварочных работ в судостроении

Вид производства	Воздух рабочей зоны	Микроклимат	Освещенность	Шум и вибрация	Неионизирующие излучения
Корпусообрабатывающее	Пыль оксидов металла, окалины на уровне ПДК Газы (оксиды азота, CO) от 1,5 до 7,0 ПДК Аэрозоли, ЛКМ, пары растворителей на уровне ПДК	В холодное время года ниже ПДУ, в теплое — нормальный	Ниже ПДУ на участках комплектации и разметки, сварки	Шум выше ПДУ на 8...11 дБ (А)	УФ излучение выше ПДУ в сотни раз, ИФ излучение выше ПДУ в 3...4 раза
	Сварочный аэрозоль выше ПДК от 5 до 19 раз, оксиды марганца выше ПДК от 3 до 26 раз, абразивная пыль выше ПДК до 30 раз	То же	Ниже ПДУ на участках разметки, сварки	Шум выше ПДУ на 5...17 дБ (А) Вибрация выше ПДУ на рубильных молотках, зачистных машинках	При сварке УФ излучение выше ПДУ в сотни раз, ИК излучение выше ПДУ при токах свыше 300 А
Корпусостроительное стапельное	В замкнутых отсеках сварочный аэрозоль выше ПДК при сварке до 20 раз, оксиды марганца выше ПДК до 30 раз	В холодное время года в эллингах ниже ПДУ, в теплое время на открытых стапелях — выше ПДУ	Ниже ПДУ в замкнутых и труднодоступных помещениях	Шум выше ПДУ на 7...17 дБ (А) Вибрация выше ПДУ на 2...8 дБ (А)	То же

Примечание. Здесь ПДК — предельно допустимая концентрация; ЛКМ — лакокрасочные материалы; ПДУ — предельно допустимый уровень; УФ — ультрафиолетовое; ИК — инфракрасное излучение.

что позволило проводить занятия не только в северо-западном, но и в других регионах страны. Преподавательская деятельность учебного центра осуществляется аттестованным преподавательским составом из числа наиболее квалифицированных специалистов лаборатории производственной и экологической безопасности. За период деятельности учебного центра обучено более 1500 чел.

Наряду с решением вопросов эффективной подготовки и аттестации персонала сварочного производства организовано проведение аттестации технологий сварки. Необходимая производственно-исследовательская база, оснащенная оборудованием и средствами контроля за качеством сварных соединений, а также подготовленный штат специалистов, аттестованных в установленном порядке, позволили на базе ФГУП «ЦНИИТС» аккредитовать «Независимый орган неразрушаемого контроля».

Концентрация в ФГУП «ЦНИИТС» разнообразных, методически связанных между собой образовательных услуг, экспертизы безопасности потенциально опасных производств и объектов, проектирования и изготовления нового сварочного оборудования, внедрения методов и средств контроля, способствует обеспечению промышленной и эко-

Рис. 1. Блок-схема обеспечения государственной политики в области производственной и экологической безопасности в судостроении (2001 г.)

логической безопасности сварочного производства в отрасли.

Изменения, происходящие в последние годы в российском экономическом пространстве, касаются, в частности, характера взаимоотношений между производителем, поставщиком и потребителем. Российский производитель, стремясь привлечь внимание потребителя к выпускаемой продукции, установить долгосрочные связи, участвовать в тендерах на получение государственных и иных заказов, все чаще проявляет заинтересованность в разработке, внедрении и поддержании на должном уровне систем управления качеством и экологической безопасностью. ФГУП «ЦНИИТС» на систему качества имеет сертификат соответствия требованиям международных стандартов.

Рис. 2. Система экологического контроля EMS согласно стандарту ISO 14000

Многие предприятия, фирмы и целые страны постепенно отказываются от работы с партнерами, не имеющими сертификата на соответствие требованиям ISO 14000. Охрана окружающей среды (ОС) становится важной частью конкурентной борьбы на внутреннем и особенно внешнем рынках. Внедрение и сертификация системы управления окружающей средой (СУОС) способствуют поддержанию имиджа фирмы и достижению основной цели — снижению негативного влияния на природную ОС, а также приносят предприятию другие выгоды.

Для успешной интеграции в мировой товарообмен необходимо повышение конкурентоспособности промышленной продукции, а следовательно, и переход к международным и европейским нормам в области сварки по таким направлениям, как сварочные материалы и оборудование, технологии сварки, персонал, методы контроля, экология и т. д.

Актуальность проблемы охраны и восстановления ОС стала очевидной, в связи с чем правительства стран Европейского союза (ЕС) совместно с руководством промышленных компаний пришли к выводу о необходимости создания системы контроля за состоянием ОС, построенной на единых концептуальных подходах и практических стандартах ЕС, которые в полной мере учитывали бы особенности и специфику национального законодательства каждой страны в области защиты и восстановления природной ОС.

Исходя из этого политика в области сварочного производства должна строиться на принципах внедрения национальных версий международных стандартов ISO и европейских норм EN.

В соответствии со стандартом ISO серии 14000 система экологического контроля EMS представлена на рис. 2.

Реализация комплекса организационно-технических мероприятий, связанных с обучением, подготовкой и аттестацией сварщиков и специалистов сварочного производства в специализированных центрах, проведение производственной и исследовательской аттестации технологии сварки, а также обмен опытом и проведение конференций будут способствовать эффективному решению вопросов обеспечения промышленной и экологической безопасности сварочного производства и потребуют выполнения следующих мероприятий:

разработки, использования и совершенствования нормативных требований, регламентирующих деятельность в сфере экологии;

выделения наиболее приоритетных направлений воздействия на негативные для ОС последствия деятельности предприятия; определения главных моментов негативного воздействия каждого объекта инфраструктуры;

разработки комплекса мер по устранению вредного воздействия на ОС, исходя из первых оценок ее состояния и требований национального законодательства. При этом необходимо обязательное согласование намеченных к выполнению мер с контролирующими ведомствами и организациями;

определения на основе утвержденной политики конкретных целей и задач по защите и восстановлению ОС;

налаживания системы подготовки и тренировки персонала, предназначенного для реализации конкретных задач по обеспечению экологического контроля (ЭК);

разработки комплекта нормативных документов, инструкций и регламентации для каждого вида деятельности;

определения порядка осуществления контроля выполнения требований этих документов и оперативного контроля практической деятельности в сфере экологии;

ведения постоянного учета результатов ЭК;

систематической оценки действенности системы EMS, ее адекватности требованиям конкретных условий по улучшению ОС и восприимчивости к постоянному совершенствованию практических действий в данном направлении;

подготовки регулярной, хорошо обоснованной информации о состоянии ОС и постоянного наполнения базы данных по указанной проблеме.

На многих российских предприятиях внедрены и успешно функционируют системы управления качеством (ISO серии 9000). Органически вписываясь в систему управления качеством продукции и услуг, существующую на предприятии, СУОС способствует повышению экологичности продукции и производства, а также позволяет сделать деятельность предприятия в области экологического менеджмента экономически эффективной.

Вместе с тем двойная сертификация по параллельным комплексам стандартов (серии 9000 и 14000) создает не только организационные трудности, но и требует дополнительных финансовых затрат. В настоящее время возникли устойчивые предпосылки для разработки международных стандартов по другим аспектам деятельности предприятия, в том числе охране труда и профессионального здоровья персонала, что уже частично нашло свое отражение в стандартах ISO 9001-2000. В будущем таких аспектов может стать еще больше.

Разработка и внедрение в промышленности интегрированной системы управления качеством, соответствующей требованиям стандартов как серии ISO 9000, так и серии 14000, имеющей единую структуру административного управления, состоящую из комплекса средств обеспечения планирования, управления документацией, контроля, анализа, управления процессами и воздействием производства на ОС, направленной на повышение качества выпускаемой продукции, конкурентоспособности и снижения негативного воздействия от деятельности предприятия на ОС, является, по нашему мнению, наиболее актуальной и требующей скорейшей реализации.

ФГУП «ЦНИИТС» с учетом имеющегося потенциала и с участием Научно-технического сварочного общества РФ, опыта и рекомендаций МИС, Европейской федерации по сварке и могло бы осуществить реализацию указанных мероприятий.

Systems for ensuring environmental and occupational safety of welding operations in force in ship building are considered.

Поступила в редакцию 26.11.2002

КОРОТКО О ВАЖНОМ

ИЗОБРЕТАЕМ КОЛЕСО

Конкурс на лучшую промышленную линию по производству железнодорожных колес нового технического уровня провел Нижнетагильский металлургический комбинат (НТМК, Россия). Из числа претендентов (в тендере участвовало несколько зарубежных фирм, в том числе знаменитый Уралмаш) победителями названы известная специализированная немецкая фирма СМС Эмуко и Новокраматорский машиностроительный завод (г. Краматорск, Донецкой обл.).

Подписан соответствующий контракт. Согласно этому документу два предприятия-победителя в течение 17 месяцев изготовят и поставят нижнетагильским металлургам 2250 т современного наукоемкого оборудования промышленной линии производительностью до 100 железнодорожных колес в час.

Порядка полутора тысяч тонн из общей массы машин — три сложнейших пресса усилиями в 5900 и 5000 т — в активе новокраматорцев.

По словам главного инженера производства горнорудного и кузнечно-прессового оборудования НКМЗ Владимира Невидомского, у коллектива есть опыт выпуска подобной техники и выполнение ответственного заказа будет обеспечено качественно и в срок.

Пресс-служба НКМЗ

ФИРМА «ФРОНИУС» ПРЕДСТАВЛЯЕТ

TIME TWIN — ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ СВАРКИ

Фирмой «Фрониус» разработан новый высокопроизводительный способ сварки двумя плавящимися параллельно расположенными электродами в защитном газе — Time Twin. При этом используются два источника, устройство для синхронизации их работы и тандем-горелка для подачи двух изолированных друг от друга проволок. По сравнению со способом сварки T.I.M.E. (сварка в четырехкомпонентной смеси газов) Time Twin позволяет повысить производительность процесса сварки, причем с использованием стандартных газов. Кроме того, этот способ удобен для реализации в автоматизированых и механизированных процессах.

Ниже представлена информация об особенностях рассматриваемого способа сварки, оборудования для его реализации и перспективах применения. Она особенно полезна для тех, кто выбирает способ сварки, принимает решения и отвечает за планирование производства и само производство. К этой категории относятся технологи производства, численность которых гораздо шире сертифицированных экспертов в области сварки.

Преимущества. Time Twin значительно повышает скорость сварки и количество наплавленного металла при сварке плавящимся электродом в защитном газе. Товарный вид сварных соединений очень высокий, благодаря хорошей воспроизводимости процесса, низкой разбрызгиваемости металла, гладкой поверхности шва в верхней и корневой его части с плавным переходом к основному металлу.

Способ может использоваться как при сварке сталей (от нелегированных до высоколегированных), так и при сварке алюминия и его сплавов. Хороший провар, незначительные деформации, стабильное горение дуги, высокая скорость сварки, использование стандартных газов обеспечивают получение экономической выгоды и высокого качества.

Область применения. Она определяется техническими характеристиками оборудования, формой разделки соединяемых кромок, чувствительностью свариваемых материалов к перегреву. Классические области применения способа Time Twin — производство транспортных средств, включая рельсовый подвижной состав, строительные машины и суда, производство аппаратов, сосудов, стальных конструкций, машин и оборудования. При этом обеспечивается сварка продольных швов в нижнем положении в лодочку, горизонтальных угловых швов в нижнем положении и швов внахлестку при V- и X-разделке, а также наплавка (рис. 1–3). Скорость сварки продольных швов на стали составляет до 250, а кольцевых — до 400 см/мин. Производительность наплавки — до 16 кг/ч. Алюминиевые материалы сваривают со скоростью 250 см/мин при производительности наплавки 7 кг/ч.

На заводе фирмы «MAN» в Пендберге, выпускающем грузовые транспортные средства, используются два робота, оснащенные источниками питания фирмы «Фрониус» и водоохлаждаемыми сварочными горелками. Каждый робот в месяц сваривает до 4000 опор продольного рычага подвески из мелкозернистой строительной стали. Для сварки угловых швов применяется стандартная электродная проволока, например, Carbotil DIN EN 12534-G3 (Nomo1K000Sm43) диаметром 1,2 мм. Защитный газ Corgon 25 или Corgon 18 (аргон соответственно с 25 или 18 % CO_2). При этом обеспечивается глубокий провар и малое разбрызгивание металла. Особое внимание инженеры фирмы «MAN» уделяют получению оптимальной геометрии шва и плавным переходам от шва к основному металлу (последующая механическая обработка не предусмотрена). По мнению потребителей, вместо 11,5 мин для сварки такой детали с использованием одной электродной проволоки в данном случае требуется 7,5 мин. На заводе способ Time Twin используется только для получения протяженных сварных швов. За год инвестиции на внедрение технологии Time Twin окупились в четырехкратном размере.

По словам Ю. Хвальчика, инженера-сварщика и руководителя отдела фирмы ALSTROM LHB в Зальцгиттере, при производстве алюминиевых конструкций вагонов скоростного поезда ICE фирмой выдвигаются довольно высокие требования к качеству сварных швов, а значит и к соответствующим производственным технологиям. В условиях глобальной конкуренции такое же значение придается и экономическим аспектам. Примером резкого повышения производительности при гарантии качества и надежности процесса может служить способ сварки Time Twin. При сварке элементов пола, крыши и боковых панелей вагонов ICE длиной до 25 м достигается средняя скорость сварки 1,2...1,8 м/мин. Это в 2...3 раза выше, чем при обычной сварке в инертном газе одной электродной проволокой. Кроме того, при толщине профиля 8 мм необходима сварка одного валика, в то время, как при использовании одной проволоки, необходимо 2...3 прохода. В зависимости от толщины шва экономия составляет 25...75 %.

Материал DIN (старый) DIN EN 573	AlMgSi0,5; AlMgSi0,7; AlMg4,5Mn EN AW-AlMgSi (6060); EN AW-AlSiMg (A) (6005A); EN AW-AlMg4,5Mn0,7(5083)
Присадочные материалы DIN (старый) DIN EN 573	S-AlMg4,5MnZr (R-AlMg4,5MnZr)
Защитный газ	Аргон или 50 % Ar + 50 % He с 50 млн$^{-1}$ N_2

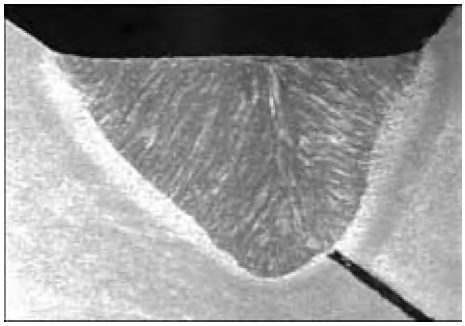

Рис. 1. Шлиф углового шва на продольной опоре двигателя, выполненного способом Time Twin за один проход

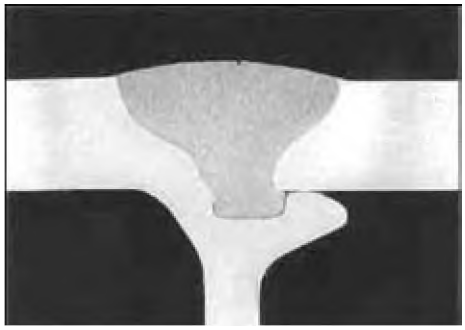

Рис. 3. Макрошлиф V-шва толщиной 8 мм, сваренного способом Time Twin за один проход

Выбор материалов осуществляют в соответствии с таблицей.

Кроме «классической сварки», использование двух проволок открывает дополнительные возможности. Один из субподрядчиков, работающий в автомобильной промышленности, реализовал с помощью фирмы «Фрониус» свою инновационную идею и значительно повысил конкурентоспособность выпускаемой им продукции. Молодой предприниматель Б. Рус производит в Рансбах-Баумбахе наряду с прочими изделиями тормозные цилиндры. При этом важно как соблюдение точных допусков с тем, чтобы подсоединяемые цилиндры точно подходили к системе, так и точное позиционирование привариваемых трубок, положение которых должно оставаться неизменным. Рус установил на роботе две сварочные головки и обеспечил сведение двух соединительных операций в одну. Ранее закрепленные тормозные цилиндры нужно было после прихватки расположить по-новому для нанесения припоя. Благодаря горелке Robacta Drive Twin 500/900 удалось исключить дополнительное перемещение. С помощью горелки попеременно выполняют сварку одной электродной проволокой, а затем обеспечивают подачу припоя в измененном рабочем положении (рис. 4). При этом сокращается не только время сварки, но и достигается высокое качество соединения. Процесс контролирует «Q-Master» — система контроля в реальном времени, которая позволяет получить необходимую документацию, гарантирующую ответственность за продукцию.

Рис. 2. Сравнительная оценка твердости металла шва при сварке одной электродной проволокой и двумя

Сущность процесса. Фундаментальные и прикладные исследования, в частности, в области переноса металла лежат в основе современных технологий дуговой сварки. Дальнейшее их совершенствование связано с разработкой источников тока с микропроцессорным управлением. Этому направлению в полной мере отвечает способ Time Twin, при котором две электродные проволоки синхронно плавятся в общей сварочной ванне. После успешного применения МАГ-сварки нелегированной и легированной сталей специалисты фирмы «Фрониус» разработали способ МИГ-сварки для алюминиевых сплавов. Успеху способствовала замена двухэлектродной сварки с общим токоподводом на двухэлектродную сварку с раздельными токоподводами (рис. 5).

При двухэлектродной сварке с общим токоподводом периодически наблюдаются короткие замыкания между электродной проволокой и ванной. При этом гаснет дуга и на второй проволоке. Высокая плотность тока на первой проволоке при-

Рис. 4. Водоохлаждаемая горелка Robacta Drive Twin в положении для пайки тормозных цилиндров

водит к взрыву перемычки, что вызывает повышенное разбрызгивание металла, нестабильность процесса и колебание длины дуг. При увеличении длины дуг снижается разбрызгивание и повышается стабильность процесса, но при этом снижается скорость сварки. Благодаря применению горелки с двумя изолированными токоподводящими мундштуками для каждой проволоки отмеченные недостатки устраняются. Этому способствует также наличие отдельных источников питания, регулируемых блоков подачи каждой проволоки. Подача питания на каждую из дуг регулируется с помощью синхронизирующего устройства (рис. 5).

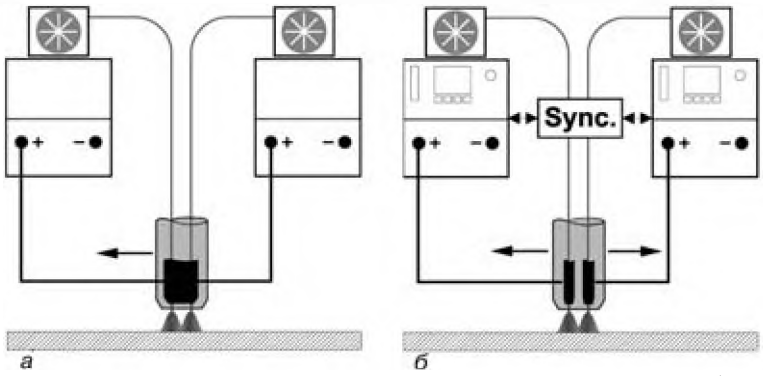

Рис. 5. Принципиальные схемы сварки двумя проволоками с общим (*а*) и раздельным (*б*) токоподводом

Важной особенностью процесса Time Twin является питание каждой из дуг в импульсном режиме. При установлении оптимальных параметров обеспечивается перенос металла — одна капля за импульс без коротких замыканий и почти без брызг. На полученных с помощью скоростной камеры снимках четко видна последовательность: зажигание — горение дуги – образование капли – отделение капли и переход ее в ванну (на одном электроде, а затем идентично и на втором) (рис. 6).

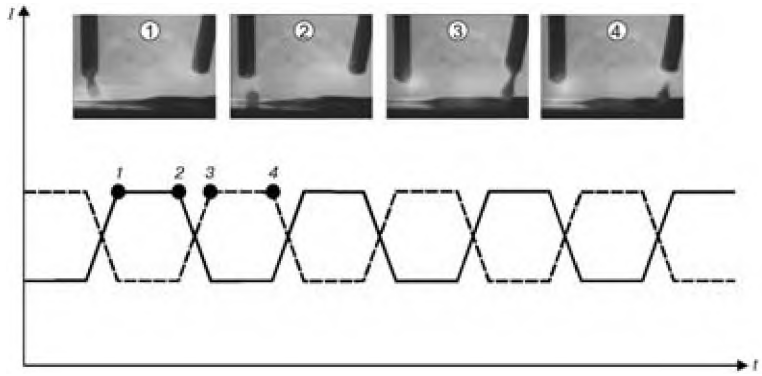

Рис. 6. Установленный по времени перенос материала с 1-го и 2-го электрода в импульсном режиме (снимки выполнены скоростной камерой)

Подача импульсов тока на каждый электрод независимо от мощности дуги позволяет получать постоянный размер капель. Это благоприятно сказывается на равномерности выгорания легирующих элементов. Так, для алюминиевых сплавов системы Al–Mg оно почти постоянно во всем диапазоне мощностей. Кроме того, при раздельной подаче импульсов тока на каждом из электродов можно поддерживать дуги короткими и к тому же отдельно их регулировать. В результате достигается сочетаемое преимущество: короткие дуги дают небольшие расплавленные ванны, а остальная энергия идет на повышение скорости сварки. Возможность смещения электродов относительно друг друга (временное смещение направления перехода расплавленных капель) позволяет получить более однородную сварочную ванну и лучшее формирование сварного шва по сравнению со сваркой «тандем».

Надежность оборудования. Оборудование для сварки Time Twin включает два источника питания, синхронизирующее устройство, два устройства подачи проволоки, два мундштука, встроенных в корпус горелки, с общим соплом для подачи защитного газа.

Источники тока: Master и Slave. Для способа Time Twin требуется два источника тока по принципу Master–Slave. Суммарная сила тока обоих источников составляет 900 А при ПВ 100 %. Управление и регулирование мощностью каждого источника тока осуществляется независимо друг от друга с помощью микропроцессора. В зависимости от условий сварки компьютер определяет, какой источник тока берет на себя функцию Master или

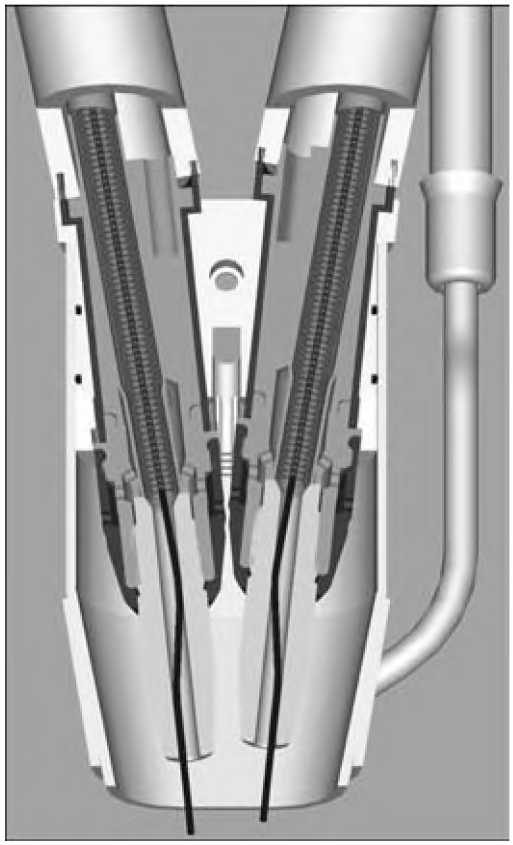
Рис. 7. Горелка Time Twin с принудительным электрическим контактом с двойным охлаждающим контуром и водоохлаждаемым газовым соплом

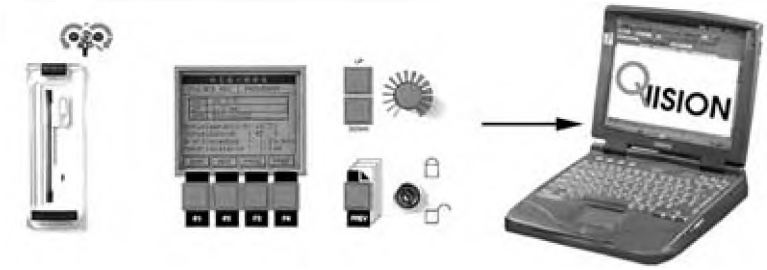

Рис. 8. Системное решение Q-Master и Q-Vision

Slave. Они меняются, например, в зависимости от направления сварки.

Наличие более 30 регулируемых параметров позволяет оператору в каждом случае выбрать необходимый режим работы. Этому же служат дисплей и элементы обслуживания. Серийный интерфейс RS 232 передает при необходимости данные на принтер. Повторяющиеся задачи с полным набором параметров легко вызываются через интерфейс робота или через дистанционный регулятор, так что пользователь может сколько угодно воспроизводить оптимимальные режимы сварки. Каждый источник тока снабжен вентилятором для защиты электроники от пыли.

Синхронизирующее устройство отвечает принципу «целое больше, чем сумма составляющих». По сути дела оно является посредником между Master и Slave. Каждый их источников «знает», что делает другой в данный момент.

Устройства подачи проволоки отвечают принципу «быстро и надежно» и оба представляют собой гармоничное целое. Периодически ими можно управлять совместно или раздельно и использовать их в этом случае как отдельные аппараты для обычной сварки МИГ/МАГ.

Каждое из двух устройств подачи проволоки представляет собой серийный привод с четырьмя роликами. Тахорегулируемые водоохлаждаемые двигатели подают проволоку со скоростью до 30 м/мин. Эти приводы обеспечивают равномерное распределение давления на проволоку и идеальную подачу.

Горелка — «активный инструмент» и решающий «интерфейс» между системой Time Twin и соединяемыми деталями, так как от нее зависит качество сварки. Разработчики и конструкторы уделили ей особое внимание. В результате появилась горелка Robacta Drive Twin.

Отличительные особенности горелки: оба проволочных электрода перемещаются в электрически изолированных токоподводящих мундштуках, подача электрического тока на каждый электрод происходит под точно определенным углом через принудительный контакт (рис. 7). Таким образом исключаются случайные точечные контакты между мундштуком и проволокой. Надежная электрическая изоляция электродов одного от другого является обязательным условием безупречного функционирования способа Time Twin. Для повышения надежности работы горелки при продолжительной эксплуатации каждый из токоподводов и газовое сопло охлаждаются водой.

Системные программы процесса Time Twin подготовлены для серийного производства в двух различных исполнениях: Q-Master и Q-Vision (рис. 8).

Q-Master (сбор информации, контроль, оформление документации) — программное обеспечение, которое пользователь может интегрировать в источниках питания Time Twin. Оно представляет собой базу для «запоминания» рабочих параметров оптимальных режимов сварки с целью их последующего воспроизведения с любой периодичностью. Более того, программное обеспечение, интегрированное в процесс управление качеством, непрерывно собирает все релевантные сварочные параметры и регистрирует в документации превышение предельных значений. Особенно это касается сварочного напряжения, сварочного тока, а также скорости подачи проволоки. Анализ данных позволяет получить сведения о переносе материала, оплавлении и стабильности процесса. Отсюда можно быстро и точно сделать выводы о качестве сварного шва. Пользователь определяет для контролируемых параметров максимально допустимые отклонения, которые вместе с соответствующими рабочими точками запоминаются в источниках тока. Их микропроцессоры в реальном времени контролируют параметры и подают сигнал о каждом нарушении предельного значения.

Q-Vision (оценка и архивирование) — это программа для персонального компьютера. Она может обрабатывать полученные сварочные параметры, производить расчеты и передавать их в архив. Таким образом, благодаря обширным критериям поиска можно иметь информацию о сварных элементах. К тому же программа помогает специалисту определить предельные значения для функции Q-Master.

Перспективы. Разработчики фирмы «Фрониус» особое внимание уделяют конструкции сварочной горелки. Поэтому по-прежнему их целью является создание еще более компактной горелки, которая еще интенсивнее бы охлаждалась для достижения большей производительности при длительной работе, обеспечила бы полную свободу по шести осям, упростила бы подачу расходных материалов и гарантировала бы еще лучшую доступность к изделию. Такая усовершенствованная горелка должна в обозримом будущем заменить сегодняшнюю. В дальнейших совершенствованиях процесса Time Twin будет учитываться опыт практической работы.

НКМЗ МЕНЯЕТ ОБЛИК

25 февраля состоялось собрание акционеров АО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск, Донецкой обл.), на котором с отчетным докладом выступил председатель правления, генеральный директор НКМЗ В. А. Панков. По его оценке, 2002 г. был для предприятия серьезной школой испытаний. Коллектив завода понял, что без качественного технического перевооружения производства, освоения ресурсосберегающих технологий, поиска внутренних резервов минимизации затрат, повышения профессионального мастерства, он не сможет конкурировать на рынке.

Несмотря на снижение основных показателей, именно высокий профессионализм позволил коллективу сохранить работоспособность предприятия: практически осталась на прежнем уровне среднемесячная зарплата, обеспечен рост реализации товарной продукции, в полном объеме профинансирована программа технического перевооружения и социальная сфера, обеспечена поддержка ветеранов предприятия.

НКМЗ продолжает реализацию экспортной стратегии — поставки в страны дальнего зарубежья выросли на 44 %. На Енакиевском МЗ реализован уникальный проект первой отечественной линии непрерывного литья заготовок. На Новолипецком МК проведена реконструкция широкополосного стана горячей прокатки 2000. Отгружено оборудование для комплексной реконструкции стана 2840 горячей прокатки алюминия для Каменск-Уральского МЗ. Осуществлена поставка листоправильной машины, ножниц поперечной резки, корпуса миксера, двух загрузочно-разгрузочных установок для «Северстали» (г. Череповец).

Запорожский завод ферросплавов получил от НКМЗ мостовой кран, Полтавский ГОК — высокопроизводительный шламовый насос нового поколения. На Ингулецкий ГОК ушло специальное конвейерное оборудование для работы в тяжелых условиях. 11 мельниц получили ГОКи Украины и России, 15 проходческих и 7 очистных комбайнов — донбасские и российские шахты. 20 вагонных замедлителей НКМЗ уже обеспечивают сортировочные горки железных дорог Украины и Беларуси.

В прошлом году с привлечением ведущих научных учреждений проведено более 30 научно-исследовательских работ с объемом финансирования более 3 млн грн., что втрое больше, чем в 2001 г. Все научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы направлены на создание новых перспективных наукоемких видов техники и оборудования мирового класса.

Специалисты ПМО освоили современное оборудование по производству сортовой заготовки. Продолжаются работы по созданию станов Стеккеля производительностью до 1,5 млн т продукции в год, обеспечивающих высокое качество выкатки тончайших металлических полос. Осваивается производство дуговых сталеплавильных печей нового поколения.

Специалисты ПГР и КПО разработали проект, и сейчас для Центрального ГОКа изготавливается буровой станок, значительно превосходящий по своим возможностям все применяемые в отечественной горнодобывающей отрасли аналоги. Прошли приемочные испытания добычные узкозахватные комбайны УКД-200 для добычи угля из тонких пластов, созданные специалистами ПСМ для угольной промышленности. Разработана и выдана в производство техдокументация на добычной комбайн УКН-400 со встроенной системой подачи, позволяющий в два раза увеличить производительность труда на шахтах. Впервые в СНГ созданы и успешно прошли заводские испытания поддирочно-погрузочные машины с резцовым и ковшовым рабочими органами. Проводятся работы по совершенствованию конструкции проходческих комбайнов П110 и П110-01, ставших традиционной заводской номенклатурой.

Несмотря на сложные экономические условия, в развитие завода инвестировано 80,184 млн грн., что на 8,2 % больше, чем в 2001 г. Продолжалась работа по созданию новых участков, внедрению новейших ресурсосберегающих технологий.

В 2003 г. планируется ввести в эксплуатацию 19 единиц уникального высокопроизводительного металлорежущего оборудования на сумму более 75 млн грн.

Приобретаемое оборудование обеспечивает рост производительности в 2...5 раз, высокую точность и качество обработки и предъявляет высокие требования к уровню квалификации персонала. Постоянный рост знаний, уровня квалификации и профессионализма сегодня приобретают первостепенное значение.

За 2002 г. подготовлено, переподготовлено и обучено второй профессии 777 человек, из них 82 станочника. Повысили квалификацию более 4,5 тыс. рабочих, в том числе 768 станочников и 3 тыс. руководителей и специалистов.

Продолжается работа по омолаживанию кадрового состава. За 2002 г. в ЗАО НКМЗ на конкурсной основе принято 743 человека, в том числе молодежи до 28 лет — 408 человек, 118 молодых работников с высшим образованием.

В рамках реализации стратегии создания новых видов машин и оборудования с исключительными ценностными характеристиками на основе высокого инжиниринга и роста интеллектуальности выпускаемого оборудования на предприятии создан специализированный центр «НКМЗ-Автоматика». На основе современной элементной базы с использованием собственного программного продукта специалисты центра в прошлом году спроектировали и изготовили системы управления на сумму свыше 10 млн грн. Планом 2003 г. предусмотрено изготовить таких систем более чем на 50 млн грн.

Постоянная работа всего коллектива предприятия по реализации стратегии минимизации затрат за счет реинжиниринга конструкций и технологий, совершенствования системы организации труда позволила получить в 2002 г. экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сумме 28 млн грн.

В 2003 г. коллектив НКМЗ намерен обеспечить рост ключевых показателей: по объему продаж на 38,4 %, товарной продукции — 52,4 %, механоизделий — 40,0 %, инвестиций в развитие завода — 43,2 %. Выполнение планов позволит повысить среднюю зарплату на 26 %.

Заключены контракты на изготовление и поставку второй линии для Енакиевского МЗ. Срок проектирования, изготовления и поставки — 10 месяцев. Никто в мире еще не изготавливал подобное уникальное оборудование в столь короткий срок. Необходимо изготовить три пресса для колесопрокатного цеха Нижне-Тагильского МК, линию цинкования для «Северстали», нагревательные печи для Новолипецкого МК и Нижне-Серьгинского МЗ.

Для заказчиков Украины, Беларуси и России будут изготовлены 16 проходческих и 14 очистных комбайнов, 30 вагонных замедлителей, 10 шахтных машин и 13 мельниц. Для выполнения плана производства 2003 г. имеются все условия: производственные мощности, технические условия, трудовые ресурсы, увеличение объемов разрешенных заказов.

В. А. Панков считает, что поставленные цели сложны, но достижимы.

Главными задачами на 2003 год определены: активизация процессов создания новых ценностей в выпускаемой продукции, своевременная качественная разработка техдокументации с использованием современных информационных технологий, качественное изготовление продукции в договорные сроки на основе сбалансированной загрузки производственных мощностей и оптимизации технологических маршрутов, минимизация затрат на всех этапах изготовления продукции, развитие системы повышения интеллектуального потенциала.

В своем выступлении на собрании акционеров президент АО Г. М. Скударь подытожил планы коллектива предприятия на 2003 г., подчеркнув, что необходимо создать новый облик завода, системы, которые способны производить продукцию совершенно иных, опережающих требование времени, качеств.

Предполагается также установить ценз с набором требований и компетенций для каждой должности, разработать систему аттестаций для всех руководителей, ввести в обиход конкурсы на замещение вакантных должностей главных специалистов. «Мы должны ввести системы новых профессиональных оценочных показателей и уйти от уравниловки» — сказал в своем вступлении Г. М. Скударь.

Собрание акционеров приняло решение ввести в состав совета АО вместо выбывших его членов директора производства серийных машин А. Ю. Зоненко и председателя президиума ассоциации молодежи А. В. Ену, из остатка прибыли выплатить дивиденды в размере 30 грн. на акцию, остальные средства инвестировать в техническое перевооружение предприятия.

Пресс-служба НКМЗ

УДК 621.791.754

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ В СМЕСИ Ar + 25 % CO_2 ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

ЦЗИ ЧЖЕНЬ ЧУН, магистр, **И. Ф. КОРИНЕЦ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

На основе детерминированно-статистической математической модели формы шва разработана номограмма, позволяющая определять основные параметры режима дуговой сварки в смеси Ar + 25 % CO_2 бесскосного стыкового соединения по заданным размерам шва (глубине проплавления, высоте выпуклости и ширине шва) с учетом величины зазора в стыке, оптимизировать его по размерам шва и, наоборот, при известном режиме сварки определять размеры шва.

Ключевые слова: дуговая сварка, смесь Ar + 25 % CO_2, *плавящийся электрод, стыковое соединение, зазор, режим сварки, номограмма, оптимизация размеров шва*

При изготовлении конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей широкое применение находит дуговая сварка в CO_2 и в смеси Ar + 25 % CO_2. Этот способ применяется в виде механизированного процесса (сварка полуавтоматами и автоматами) и автоматического (сварка роботами). Расчетный метод определения режима сварки (построенный на математической модели формы шва) в отличие от табличного с достаточной точностью позволяет не только определять режим, но и оптимизировать его. При наличии модели расчет и оптимизацию режима сварки можно выполнять на компьютере или графически по номограмме. Последняя позволяет наглядно, просто и быстро определять и оптимизировать режим сварки. Ее удобно применять в счетных линейках [1], непосредственно на сварочных аппаратах и при обучении специалистов.

На кафедре сварочного производства НТУУ «Киевский политехнический институт» на протяжении ряда лет выполняются исследования по математическому моделированию формы шва при дуговой сварке [2–4], на основании которых разработаны номограммы и инженерные методы расчета и оптимизации режимов дуговой сварки. Ранее была предложена номограмма [5], позволяющая выполнять эти операции при дуговой сварке в CO_2 плавящимся электродом. Она отличается от предыдущих [6] тем, что в ней в качестве входного параметра применяется не только глубина проплавления, но и ширина шва (и, следовательно, коэффициент формы проплавления). Однако отсутствует выпуклость шва, а влияние зазора учитывается приближенно через расчетную глубину проплавления.

В настоящее время предлагаются более совершенные номограммы, в которых увеличено количество входных геометрических параметров шва. По этим номограммам режим сварки можно определять с учетом глубины проплавления h, ширины шва e, его выпуклости g, а также величины зазора в стыке b (рис. 1). В качестве примера предлагается номограмма для определения режимов дуговой сварки стыкового бесскосного соединения из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в смеси Ar + 25 % CO_2 проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм (рис. 2).

Номограмма состоит из четырех частей. Основная ее часть (рис. 2, *а*) дает возможность определить основные параметры (сварочный ток и скорость сварки) при наплавке валика (b = = 0). Если зазор $b > 0$, то сначала по величине зазора и заданной фактической глубине проплавления находим глубину проплавления при наплавке (рис. 2, *б*). Затем таким же образом по величине зазора и фактического значения выпуклости шва находим высоту выпуклости при наплавке (рис. 2, *в*), а далее по этим данным на основной части номограммы (рис. 2, *а*) находим искомые параметры режима сварки. На графике (рис. 2, *г*) определяем полученную в этих условиях ширину шва, которая не зависит от величины зазора. Для примера при заданных исходных размерах стыкового шва (h = 3 мм, g = 1,5 мм, b = 1 мм) по номограммам определили основные параметры режима сварки: $I_{св}$ = 173 А, $v_{св}$ = 9,9 мм/с. Ширина шва e = 7,4 мм.

Эту номограмму можно применить для решения обратной задачи, т. е. по заданному режиму сварки определить размеры шва. Например, задан режим: $I_{св}$ = 240 А, $v_{св}$ = 8 мм/с, b = = 1 мм. Сначала на основной части номограммы (рис. 2, *а*) находим точку пересечения этих параметров, а на осях — размеры наплавленного валика ($h_н$ = 3,4 мм и $g_н$ = 2,8 мм). Затем учитываем влияние зазора на глубину проплавления (рис. 2, *б*): при b = 1 мм находим фактическую глубину проплавления h = 4,2 мм и высоту выпуклости g = 2,3 мм (рис. 2, *в*). На рис. 2, *г* для $I_{св}$ = 240 А и $v_{св}$ = 8 мм/с находим ширину шва e = 11,2 мм.

Номограмма позволяет оптимизировать режим сварки по производительности, которая в однопроходных швах определяется скоростью сварки. При дуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей можно не учитывать тепловое действие дуги на свойства металла ЗТВ. В этом случае критериями качества сварного соединения можно принять геометрические размеры и форму шва. В процессе оптимизации режима сварки заданная глубина проплавления должна оставаться постоянной, так как она определяет провар по толщине металла. Высота выпуклости шва и его ширина могут изменяться в пределах допуска. На рис. 2 показан пример оптимизации режима сварки при изменении выпуклости шва. Если увеличить ее с 1,5 до 2 мм, то при постоянном зазоре 1 мм необходимо уменьшить сварочный ток со 173 до 151 А и скорость сварки с 9,9 до 6,8 мм/с. При этом ширина шва значительно уменьшится. Наоборот, если уменьшить выпуклость шва с 1,5 до 1 мм, то потребуется увеличить сварочный ток до 207 А и скорость сварки до 16 мм/с. При этом ширина шва значительно возрастет. Очевидно, что второй вариант режима сварки будет более производительным и экономичным, так как обеспечивает большую скорость сварки. Такую же оп-

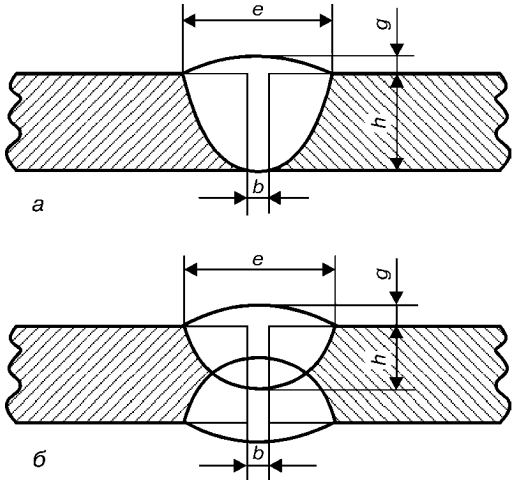

Рис. 1. Размеры шва стыкового соединения без скоса кромок: *а* — односторонний шов; *б* — двусторонний

© Цзи Чжень Чун, И. Ф. Коринец, 2003

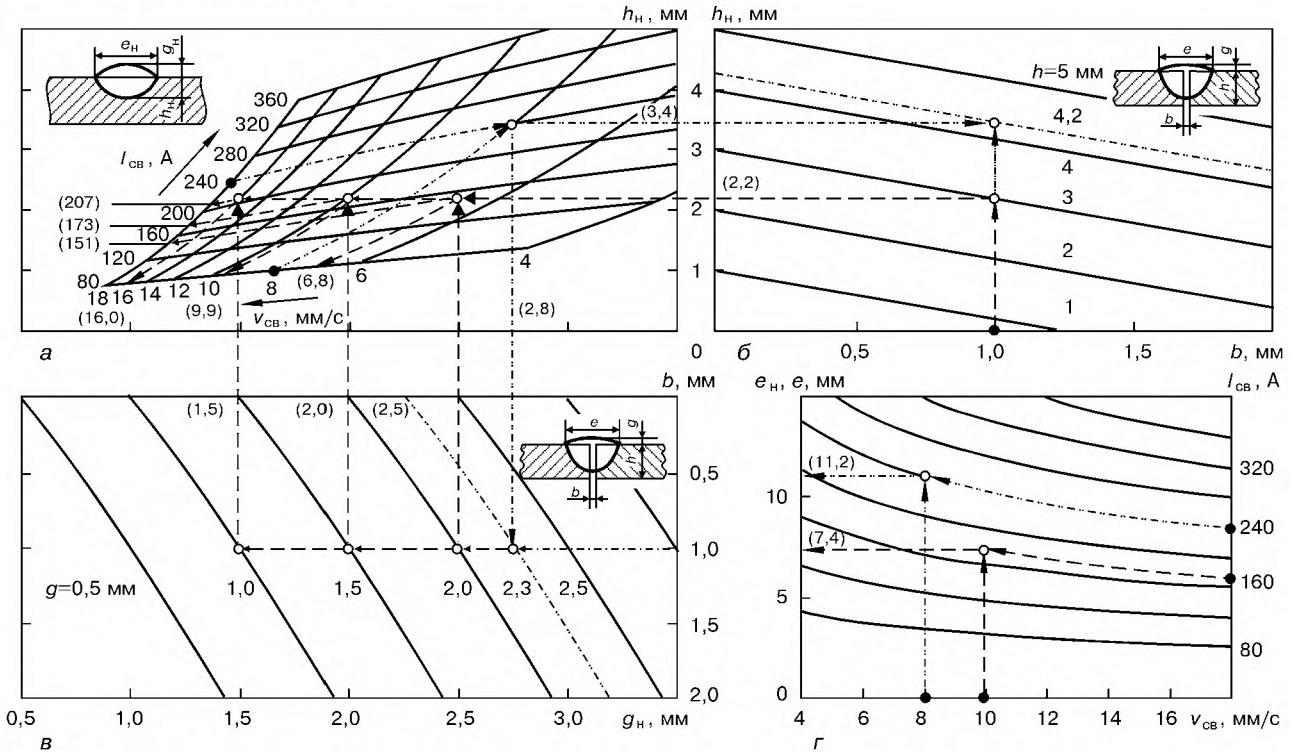

Рис. 2. Номограмма для определения режима сварки (штриховая кривая) и размеров шва (штрихпунктирная) при МАГ-сварке с учетом влияния зазора (*а–г* см. в тексте)

тимизацию на этой номограмме можно выполнить при изменении ширины шва или величины зазора.

Выводы

1. Разработана номограмма для определения основных параметров режима дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей в смеси Ar + 25 % CO_2 плавящимся электродом по размерам шва и величине зазора, которая отличается от существующих учетом всех основных геометрических параметров стыкового шва.

2. Номограмма может применяться также для решения обратной задачи — определению размеров шва по заданному режиму сварки и величине зазора в стыке.

3. Номограмма дает возможность оптимизировать режим сварки, например, по производительности.

4. Возможна разработка номограмм подобного типа для оптимизации по погонной энергии сварки, площади наплавленного металла, расходу сварочных материалов, затратам электроэнергии и другим критериям.

1. *Сергацкий Г. И., Дубовецкий С. В.* Счетная линейка для определения параметров режима сварки в CO_2 // Автомат. сварка. — 1981. — № 4. — С. 41–43.
2. *Коринец И. Ф.* Разработка инженерных методов расчета режимов дуговой сварки // Математические методы в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1988. — С. 80–86.
3. *Коринец И. Ф., Цзи Чжень Чун.* Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 44–50.
4. *Коринец И. Ф., Цзи Чжень Чун.* Влияние зазора на размеры стыкового шва при дуговой сварке в смеси Ar + 25 % CO_2 плавящимся электродом // Там же. — 2002. — № 8. — С. 16–19.
5. *Коринец И. Ф., Охай Ю. И.* Номограммы для определения режимов дуговой сварки в углекислом газе // Там же. — 1995. — № 10. — С. 46–48.
6. *Шраерман М. Р.* Номограммы для определения режимов сварки под флюсом стыковых соединений // Свароч. пр-во. — 1981. — № 8. — С. 17–20.

Determined-statistical mathematical model of weld shape was used to develop a nomogram, which allows establishing the main parameters of the mode of arc welding of a square butt joint in a mixture of Ar + 25 % CO_2 by the specified weld parameters (penetration depth, reinforcement height and weld width), taking into account the size of the gap in the butt, its optimization by weld size, and, contrarily, determination of weld dimensions by the known welding mode.

Поступила в редакцию 26.06.2002

УДК 347.77.018

О СЛУЖЕБНЫХ ИЗОБРЕТЕНИЯХ, ПОЛЕЗНЫХ МОДЕЛЯХ И ПРОИЗВЕДЕНИЯХ

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

Действующее украинское законодательство в области интеллектуальной собственности, как и вся система правовой охраны, находится в стадии становления и развития. Основная задача реформы заключается в обеспечении конституционного права граждан на свободу творческого самовыражения и защиту результатов творчества, моральных и материальных интересов, возникающих в результате творческой деятельности конкретного человека или коллектива, физического или юридического лица [1].

Изобретатель или автор произведения, как правило, работает не индивидуально, а по найму, в фирме, предприятии, в институте и т. д., последние обобщенно принято называть работодателем. Понятно, что автор изобретения, научного или иного произведения, безусловно, использует коллективный опыт, знания, оборудование, пользуется библиотекой и т. д., находящимися в собственности у работодателя. Закон, защищая права автора, творца, не должен «забывать» и об интересах работодателя.

Закон об изобретениях служащих впервые был принят в ФРГ в 1957 г. [2]. Из-за рубежа в Украину пришли такие понятия, как *служебное изобретение*, *полезная модель* и *служебное произведение*. О международном признании упомянутых понятий свидетельствует тот факт, что количество европейских заявок на служебные изобретения, поданных в Европейское патентное ведомство, составляет 90 % их общего количества. Доля заявок на служебные изобретения составляет в Японии — 97,2; в США — 94,4; в ФРГ — 88,4; в Италии — 74 % [2]. С юридической точки зрения служебное изобретение устанавливает правовые отношения в форме договора о трудовом найме между юридическим лицом, получающим изобретение на правах материальной собственности, и его автором. В результате этого договора возникает «shopright» — право работодателя на изобретение, созданное на тех или иных условиях автором. В Украине права работодателя определены рядом законов [3, 4]. Согласно статье 1 Закона Украины «Об охране прав на изобретения и полезные модели» [3] под служебным изобретением, полезной моделью понимается изобретение, полезная модель, созданное(ная) работником в следующих случаях:

— в связи с исполнением служебных обязанностей или поручением работодателя при условии, если трудовым договором (контрактом) иное не предусмотрено;

— с использованием опыта, производственных знаний, секретов производства и оборудования работодателя.

Согласно статье 9 упомянутого закона, определяющей права работодателя, именно последний имеет право на получение патента на служебное изобретение, полезную модель. Изобретатель подает работодателю (администрации предприятия, в котором он работает) уведомление о созданном им служебном изобретении, полезной модели с описанием, раскрывающим его суть достаточно ясно и полно (п. 2). Работодатель должен (п. 3) в течение четырех месяцев со дня получения уведомления от изобретателя подать в учреждение (Госпатент) заявку на получение патента, передать право на его получение другому лицу или принять решение о сохранении служебного изобретения, полезной модели как конфиденциальной информации, т. е. «придержать» у себя. В этот же срок работодатель должен заключить с изобретателем письменный договор о размере и условиях выплаты ему или его правопреемнику вознаграждения в соответствии с экономической ценностью изобретения, полезной модели и (или) другой выгоды, которую может он получить. Если работодатель не выполнит указанные в п. 3 требования в установленный срок, право на получение патента на служебное изобретение, полезную модель переходит к изобретателю или его правопреемнику. В этом случае за работодателем сохраняется преимущественное право на приобретение лицензии. Срок сохранения работодателем или его правопреемником служебного изобретения, полезной модели как конфиденциальной информации в случае его неиспользования не должен превышать четырех лет. В противном случае право на получение патента переходит к изобретателю или его правопреемнику. В любом случае за изобретателем сохраняется личное неимущественное авторское право без ограничения срока действия.

Из изложенного выше следует, что если, например, сотрудник института, работая в одном из его отделов, занимающихся дуговой сваркой, разработал изобретение в области дуговой сварки и подал заявку на него от своего имени, не соблюдая изложенной процедуры, это квалифицируется как нарушение закона. Тем более, если тема заявки соответствует теме задания (госбюджетной теме), над которой он работал. В равной степени незаконным является осуществление или инициирование подачи заявки на изобретение от имени другого предприятия, на котором изобретатель не работает, но с которым может поддерживать партнерские отношения. Даже если тема заявки на изобретение не совпадает в момент подачи с тематикой подразделения предприятия, где изобретатель работает, тем не менее, он неизбежно использует опыт, производственные знания, оборудование, библиотеку, различные подразделения инфраструктуры этого предприятия. Поэтому согласно статье 1 указанного выше закона заявляемое изобретение не может не квалифицироваться как служебное. Изобретатель свободен подавать заявку на изобретение, полезную модель на свое имя, не согласовывая ее с работодателем только в том случае, если предмет изобретения не подпадает под определение, данное статьей 1. У предприятия-работодателя могут быть различные причины или основания не претендовать на владение изобретением, полезной моделью: отсутствие интереса, дефицит денежных и иных средств и т. д.

Согласно статье 1 Закона Украины «Об авторском праве и смежных правах» [4] под служебным понимается произведение, созданное автором в порядке исполнения служебных обязанностей в соответствии со служебным заданием или трудовым договором (контрактом) между ним и работодателем.

В соответствии со статьей 8 этого закона к объектам авторского права относятся произведения в области науки, литературы и искусства, а именно: литературные письменные произведения научного, технического или другого характера (книги, брошюры, статьи и т. д.); выступления, лекции, базы данных; иллюстрации, карты, планы, чертежи, эскизы, относящиеся к технике и другим сферам деятельности; производные произведения; сборники произведений, сборники обычных данных, другие произведения. Охране по этому закону подлежат все произведения, упомянутые выше, как опубликованные, так и незавершенные, независимо от назначения, объема, жанра, цели. Правовая охрана не распространяется на любые идеи, теории, принципы, методы, процедуры, процессы, способы, концепции, открытия (правовая защита на которые обеспечивается другими законодательными актами).

В соответствии со статьей 16 указанного закона автору принадлежит только личное неимущественное авторское право на служебное произведение. Исключительное имущественное право на служебное произведение принадлежит работодателю, если иное не предусмотрено трудовым договором (контрактом) и (или) гражданско-правовым договором между автором и работодателем. Автору за создание и использование служебного произведения предусмотрено авторское вознаграждение, размер и порядок уплаты которого устанавливаются трудовым соглашением (контрактом) и (или) гражданско-правовым договором

© В. С. Сидорук, 2003

между автором и работодателем. Отсюда следует, что все экспериментальные данные, вся научно-техническая информация, полученная и опубликованная (или неопубликованная) сотрудниками предприятия (института), является имущественной собственностью работодателя (предприятия, на котором работает сотрудник), и без его разрешения (администрации предприятия) сотрудник не имеет права распоряжаться упомянутой информацией, даже если он ее получил сам или в коллективе в результате производственной (технической или научной) деятельности. В противном случае это нарушение закона. Тем более, он не имеет права публиковать данные, полученные не им самим, что однозначно квалифицируется как плагиат.

Становление правового регулирования отношений, связанных со служебными изобретениями, полезными моделями и произведениями, — одна из важнейших тенденций в развитии современного патентного права, которой в Украине уделяется серьезное внимание. Верховной Радой приняты Криминальный кодекс Украины, Законы Украины «О внесении изменений в некоторые законодательные акты относительно усиления ответственности за нарушение прав на объекты интеллектуальной собственности» и «О внесении изменений в Закон Украины «Об авторском праве и смежных правах». Кабинет Министров Украины принял соответствующие постановления, определяющие механизмы реализации законодательных норм. Указом Президента Украины [5] поручено предусмотреть:

обеспечение надлежащего сопровождения в Верховной Раде проекта Закона о порядке установления прав интеллектуальной собственности на объекты, созданные за счет средств государственного бюджета и государственных целевых фондов;

создание в составе МВДУ и СБУ специальных подразделений для борьбы с правонарушениями в сфере интеллектуальной собственности;

создание в составе Государственного департамента интеллектуальной собственности подразделения инспекторов по вопросам интеллектуальной собственности;

изучение вопросов относительно создания специального патентного суда.

1. *Паладій М.* Розвиток державної системи правової охорони інтелектуальної власності в Україні: здобутки та проблеми // Тематична добірка для підприємств і організацій м. Києва до семінару «Захист інтелектуальної власності: стан, проблеми та шляхи вирішення», 13 груд. 2001. — Київ, КДЦНТІ, 2001. — С. 3–6.
2. *Бондаренко С.* Система захисту авторського права і суміжних прав в Україні // Там же. — С. 7–12.
3. *Про* охорону прав на винаходи і корисні моделі: Закон України № 3687-XII 15.12.93.
4. *Про* авторське право і суміжні права»: Закон України № 2627-III 01.07.2001.
5. *Про* заходи щодо охорони інтелектуальної власності в Україні: Указ Президента України № 2368-III від 05.04.2001.

Поступила в редакцию 27.09.2002

Разработано в ИЭС

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Возможность плавного и независимого регулирования параметров импульсов тока при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом (ИДСПЭ) позволяет целенаправленно управлять плавлением и переносом электродного металла, активно влиять на протекание физико-химических и металлургических процессов на электроде и в сварочной ванне, что в итоге улучшает качество и повышает производительность дуговой сварки плавящимся электродом. Выпускавшиеся источники питания ИУП-1, ВДГИ-302 имеют ограниченные возможности по регулировке параметров импульсов, особенно по частоте их следования. В результате не достигаются в полном объеме преимущества способа ИДСПЭ.

Расширение использования в технологии машиностроения ИДСПЭ потребовало создания источника питания с улучшенными возможностями по регулировочным характеристикам. Такой источник разработан в ИЭС им. Е. О. Патона. Он позволяет плавно и независимо регулировать такие параметры процесса ИДСПЭ, как длительность, амплитуда, частота следования импульсов тока, средние значения сварочного тока и напряжения на дуге. В результате обеспечивается легкое, точное задание и регулирование требуемых по технологии оптимальных режимов сварки, что позволяет целенаправленно программировать процессы расплавления и переноса капель электродного металла с оптимальными значениями их массы, диаметра и температуры. Это обеспечивает лучший состав, структуру и свойства металла шва и сварных соединений в целом.

Предусмотрена также возможность программного управления работой и параметрами источника от внешних программирующих устройств со стандартным выходом от 0 до 10 В. Это позволяет применять источник в системах синергетического программного управления, например, неповоротных стыков трубопроводов и в роботизированных комплексах. Параметры режима сварки контролируются по стрелочным приборам и цифровым световым индикаторам, по которым проводится настройка на режим до сварки и контролируются и регулируются параметры в процессе сварки.

Технические характеристики источника питания

Напряжение питающей сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц, В	380
Средний ток сварки, А:	
минимальный	50
максимальный при ПВ 60 % и 10-минутном цикле	400
максимальный при ПВ 100 %	315
Среднее значение напряжения на дуге, В:	
минимальное	16
максимальное	40
Частота следования импульсов плавно регулируемая, Гц	30...300
Длительность импульсов плавно регулируемая, С	$(1,5...5)\cdot10^{-3}$
Амплитуда импульсов тока плавно регулируемая, А	400...800
Диаметры сварочных проволок, мм:	
при сварке алюминиевых, титановых, медных сплавов	1,0...2,5
при сварке сталей	0,8...2,0
Габаритные размеры, мм	850×630×1600
Масса, кг, не более	400

Полуавтоматическая, автоматическая и роботизированная ИДСПЭ изделий из сплавов на основе алюминия, титана, меди в аргоне, гелии и их смесях, низкоуглеродистых, низко-, средне- и высоколегированных сталей в аргоне и смесях Ar + CO_2; Ar + CO_2 + O_2. Более широкий диапазон плавного регулирования параметров режима позволяет использовать преимущества ИДСПЭ при изготовлении изделий из различных материалов в большом диапазоне толщин. Сварку можно выполнять во всех пространственных положениях. Качество сварных соединений соответствует требованиям, предъявляемым к швам первой категории изделий ответственного назначения.

За дополнительной информацией просьба обращаться по тел: 227-44-78, 261-52-31.

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины С. В. Ахонин (ИЭС) защитил 29 января 2003 г. докторскую диссертацию на тему «Процессы рафинирования в вакууме и оптимизация режимов электронно-лучевой плавки высокореакционных и тугоплавких металлов».

В работе получены кинетические уравнения выделения азота, водорода, кислорода и углерода из редких металлов в вакууме, которые одновременно учитывают массоперенос атомов примесей в расплаве, реакции молизации на межфазной поверхности и массоперенос молекул примесей в газовой фазе, и описывают процессы выделения газов с изменением во время рафинирования звеном лимитирующей реакции, а также процессы, протекающие в промежуточной области реакции.

Диссертантом создана математическая модель растворения неметаллических включений, содержащих азот, в жидком титане в условиях электронно-лучевой плавки (ЭЛП) и определены скорости растворения этих включений в зависимости от температуры расплава и размера включений. Экспериментально определены численные значения кинетических констант процессов удаления азота, водорода и алюминия из расплавов тугоплавких металлов и титана в условиях ЭЛП.

В диссертации приведены построенные математические модели процессов выделения азота, кислорода и углерода из тугоплавких металлов во время ЭЛП, а также десорбции водорода и испарения легирующих компонентов из титановых сплавов во время ЭЛП с промежуточной емкостью, позволяющие определить концентрацию этих элементов в слитках в зависимости от параметров процесса плавки.

Результаты исследований позволили автору разработать оптимизированные технологии многократного переплава тантала в электронно-лучевых установках с радиальным нагревом и вертикальной подачей заготовки, что позволяет повысить выход годного металла на 3,7 %, увеличить производительность установок на 17%, а также уменьшить потребляемую энергию на 23 %. Разработаны оптимизированные режимы ЭЛП титана и титановых сплавов, гарантирующие получение высококачественных слитков с заданным химическим составом и соответствующие требования мировых стандартов.

УДК 621.79(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Устройство для термоимпульсного удаления заусенцев с изделий, отличающееся тем, что в межрубашечном пространстве устройства в срединной части высоты смонтировано кольцо с возможностью перемещения вверх-вниз, ограничивающее уровень жидкости, а полость над кольцом заполнена сжатым воздухом заданного давления, на нижней поверхности плавающего дна теплоотводящего стакана смонтирована штанга, взаимодействующая с концевым выключателем, установленным за пределами объема рабочей камеры. Патент РФ 2192944. И. А. Чегета, В. Л. Зенин, В. В. Бородкин и др. (Воронежский ГТУ) [32].

Способ управления износостойкостью пар трения при динамических нагрузках, включающий наплавку износостойкого материала и его динамическую рекристаллизацию при контакте фрикционных поверхностей. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2192945. Ю. Н. Зайченко (ИЦ «Сплав») [32].

Индукторная генераторная установка, отличающаяся тем, что узел регулирования выходного напряжения включает датчик сварочного тока, датчик сварочного напряжения, пороговое устройство по току, формирователь опорного напряжения, компаратор напряжения, широтно-импульсный модулятор и импульсный стабилизатор напряжения. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2192946. В. П. Осипенко, Е. М. Платонов, Л. Ф. Филимонов, С. А. Кафитулин [32].

Способ индукционно-металлургической наплавки, при котором на изделие наносят заданный слой шихты, включающей гранулы износостойкого сплава, с последующим расплавлением ее индуктором, отличающийся тем, что гранулы износостойкого сплава предварительно обрабатывают смесью борной кислоты 88...90 % и кальцинированной соды 10...12 % с добавлением в механическую смесь упомянутых компонентов воды из расчета 250 г на 1 кг смеси и нагревают до 250 °С для обеспечения кристаллизации борсодержащих компонентов на поверхности гранул износостойкого сплава. Патент РФ 2192947. Ю. А. Зайченко Л. Н. Очкина, В. В. Косаревский (ИЦ «Сплав») [32].

Сплав для наплавки, содержащий углерод, хром, молибден, ванадий и железо, отличающийся тем, что дополнительно содержит никель и титан при следующем соотношении компонентов, %: 0.6...1.2 углерода; 4.5...5.0 хрома; 3.4...5.0 молибдена; 2.2...2.6 ванадия; 1.5...2.0 никеля; 0.5...0.8 титана; остальное железо. Патент РФ 2192948. С. С. Горючкин, В. В. Другаль, Ву Гуй Лан и др. (Курский ГТУ) [33].

Способ пайки тонкостенных труб при телескопическом соединении, включающий размещение припоя, сборку труб и их пайку, отличающийся тем, что предварительно на стенке внешней трубы в зоне пайки выполняют точечные выштамповки, образующие на внутренней поверхности внешней трубы выступы. Патент РФ 2193477. Б. Н. Марьин, В. И. Муравьев, В. И. Меркулов (Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение) [33].

Способ сварки (дуговой импульсной) труб (концов двух труб). Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2193478. П. Никольсон, Э. К. Ставa (Линкольн глобал, инк., США) [33].

Неплавящийся электрод для сварки в инертных газах, включающий корпус и рабочую часть, причем корпус выполнен в виде водоохлаждаемого стержня, а рабочая часть — в виде вставки, отличающийся тем, что вставка выполнена в виде вольфрамовой пластины или двух вольфрамовых пластин. Патент РФ 2193479. Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Б. Н. Марьин и др. (Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение) [33].

Способ сварки плавлением деталей, преимущественно каркасных конструкций, при котором в процессе сварки подогревают свариваемую деталь дополнительным источником тепла до температуры, при которой происходит пластическая деформация металла, отличающийся тем, что осуществляют подогрев поверхности детали со стороны, противоположной свариваемому стыку, причем подогревающий источник тепла располагают в плоскости, проходящей через стык и перпендикулярной к подогреваемой поверхности. Патент РФ 2193954. Ю. В. Ка-

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели», № 32–36, 2002 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).

заков, А. С. Климов, О. И. Нижегородцева (ЗАО «Авиационные технологии») [34].

Плазмотрон для резки, отличающийся тем, что электрододержатель его снабжен дефлектором, в котором выполнен входной канал, соединенный с центральной кольцевой полостью через торцевой зазор между дефлектором электрододержателя и электродом, а плазмотрон снабжен дополнительной кольцевой полостью, расположенной между центральной и средней полостями и через которую эти полости соединены друг с другом, при этом средняя полость соединена с атмосферой через завихритель. Патент РФ 2193955. Н. М. Камышный, А. Б. Клейменов, В. Г. Павлов и др. (ООО «КСТ-Авиа») [34].

Устройство для лазерной сварки тонких проводников, отличающееся тем, что оно снабжено фокусирующей линзой, размещенной в оптическом канале корпуса, отражатель выполнен коническим с отверстием на входе диаметром, равным диаметру лазерного луча, прямоугольное основание призматического делителя имеет длину основания $A = D_{л.л}$, где $D_{л.л}$ — диаметр лазерного луча. Патент РФ 2193956. В. А. Гребенников, С. С. Бабаков, Г. И. Джанджгава, А. А. Ефанов (ОАО Раменское приборостроительное КБ) [34].

Способ изготовления поглотителя энергии в СВЧ-приборах, отличающийся тем, что формирование поглотителя осуществляют путем контурной лазерной резки импульсами лазерного излучения наносекундной длительности, с энергией менее 2 мДж/импульс и плотностью мощности в зоне обработки, превышающей $5 \cdot 10^7$ Вт/см^2. Патент РФ 2193957. С. И. Пархоменко, В. М. Жариков (ГНПП «Исток») [34].

Припой на основе никеля, содержащий кремний, бор, хром, отличающийся тем, что он дополнительно содержит алюминий, ниобий, вольфрам при следующем соотношении компонентов, мас. %: 3.0...6.3 кремния; 1.5...2.4 бора; 2.5...8.0 хрома; 0.5...4.0 алюминия; 0.5...4.5 ниобия; 0.3...5.0 вольфрама; остальное никель. Патент РФ 2193958. Е. Н. Каблов, В. И. Лукин, В. С. Рыльников и др. [34].

Способ подготовки к пайке изделий с серебряным покрытием, заключающийся в удалении с поверхности сульфидной пленки Ag_2S, отличающийся тем, что изделия перед пайкой отжигают в кислороде при 250...350 °С в течение 15...45 мин. Патент РФ 2194597. В. В. Зенин, Ю. Е. Сегал, В. Н. Беляев (Воронежский ГТУ, ООО Консультационный центр «Электроника») [35].

Сварочная головка для сварки и наплавки изделий в среде защитного газа, отличающаяся тем, что шаровой подшипник головки образован корпусом и крышкой, в шаровом подшипнике установлена сферическая втулка, а наконечник установлен в сферической втулке с возможностью продольного перемещения и снабжен подпружиненным фиксатором зазора между рабочим концом электрода и свариваемым изделием, фиксатор выполнен в виде втулки, наружная поверхность которой контактирует с расточкой в крышке шарового подшипника и определяет траекторию перемещения рабочего конца электрода. Патент РФ 2194598. В. В. Башкатов (ОАО «Уралхиммаш») [35].

Способ роликовой электросварки обечаек резервуаров из жести, предпочтительно из луженой жести, отличающийся тем, что внутренний ролик воспринимает усилие прижима при сварке и внутренний ролик прижимают к наружному ролику, причем нетокопроводящий внутренний ролик устанавливают подвижно и его прижимают к наружному ролику с заранее определенным усилием. Патент РФ 2194599. П. Тайана (Эльпатроник АГ, Швейцария) [35].

Способ получения композиционного сталеалюминиевого переходника последовательной сваркой взрывом плакируемого листа с плакирующими листами, отличающийся тем, что плакируемый стальной лист предварительно азотируют до получения по всей поверхности слоя глубиной 0,4...0,6 мм, а первый плакирующий лист выполняют трехслойным, состоящим из соединенных между собой слоев алюминия, солидола и кальки. Патент РФ 2194600. В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Н. Кривенцов и др. (Волгоградский ГТУ) [35].

Способ контроля сварного шва, включающий регистрацию дефектов сварного шва стыкового соединения деталей из листового металла при глубокой сварке лазерным лучом, отличающийся тем, что регистрацию дефектов производят путем непрерывного считывания высоты сварного шва вдоль стыкового соединения. Патент РФ 2194601. Д. Вильдман (Эльпатроник АГ, Швейцария) [35].

Состав сварочной проволоки, отличающийся тем, что в состав проволоки дополнительно введен никель, алюминий, азот, кислород и свинец при следующем содержании компонентов, мас. %: 0.07...0.12 углерода; 0.15...0.40 кремния; 0.30...1.20 марганца; 1.5...2.5 хрома; 0.01...0.20 никеля; 0.40...1.20 молибдена; 0.05...0.25 ванадия; 0.01...0.15 титана; 0.01...0.06 меди; 0.005...0.05 алюминия; 0.003...0.012 азота; 0.001...0.005 кислорода; 0.001...0.01 свинца; 0.001...0.006 серы; 0.001...0.006 фосфора; 0.0001...0.01 олова; 0.001...0.008 сурьмы; 0,001...0,01 мышьяка; 0,005...0,02 кобальта; остальное железо. Патент РФ 2194602. И. В. Горынин, Г. П. Карзов, Ю. М. Журавлев и др. (ГУП ЦНИИКМ «Прометей») [35].

Плазмотрон, отличающийся тем, что в его корпусе по всей высоте выполнены дополнительные каналы для подвода плазмообразующего газа, при этом все каналы тангенциальные и наклонены к оси плазмотрона. Патент РФ 2195391. А. М. Иванов, И. Е. Киренский (ИФТПС СО РАН) [36].

Способ непрерывного изготовления биметаллических многослойных заготовок, в котором осуществляют сборку цилиндрической заготовки из основного материала и трубной заготовки из материала покрытия, сваривают полученную заготовку по торцевым краям, нагревают, прокатывают и подвергают термообработке. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2195392. В. П. Востриков, К. И. Грамотнев, Е. В. Экк и др. (ЗАО «Транском») [36].

Способ соединения пластин в полублоки химического источника тока, включающий дозированное заполнение полости борна припоем, размещение токовыводов пластин в полости борна и последующий нагрев паяемого узла до температуры плавления припоя. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2195393. Л. Б. Райхальсон, Н. И. Петров, П. Г. Левинфиш (ОАО «Аккумуляторная компания «Ригель») [36].

Дисперсно-упрочненный композиционный материал для электродов контактной сварки, отличающийся тем, что он дополнительно содержит углерод при следующем соотношении компонентов, мас. %: 0,4...0,7 алюминия; 2,0...2,8 оксида меди; 0,2...0,3 углерода; остальное медь. Патент РФ 2195394. Е. П. Шалупов, А. Л. Матросов, В. А. Давыденко и др. [36].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

(Австралия), 2002. — Vol. 47, Second Quarter (англ. яз.)

Aitchison A., Cooper N. I. Изготовление подводных клапанов из деформируемой стали с помощью электронно-лучевой сварки, с. 4–9.

Ремонтная сварка приводных валов полосовых станов горячей прокатки, с. 18–19.

Alam N., Ion J. C. Продление срока службы компонентов, подверженных износу, эрозии, окислению или коррозии, с помощью лазерной наплавки, с. 26–27.

Lowke J. J., Tanaka M., Ushio M. Моделирование дуги для прогнозирования изменения глубины шва при сварке ТИГ, с. 33–37.

Alam N., Jarvis L., Harris D., Soltan A. Лазерная наплавка для ремонта технических объектов, с. 38–47.

(Англия), 2002. — Sept./October (англ. яз.)

Rostami S. Быстрая сушка полимерных материалов с помощью СВЧ переменной частоты, с. 3–5.

Kallee S., Nicholas D., Thomas W. Сварка трением с перемешиванием в авиационно-космической промышленности. Ч. 2, с. 13–18.

JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2002. — Vol. 71, № 4 (яп. яз.)

Техническая записка. Особенности истории термического цикла при непрерывной сварке с возвратно-поступательным движением горелки, с. 6.

Imai Y. et al. Новые тонкопленочные технологии. Лазерное осаждение из паров и фотолиз, с. 7–11.

Takano I. et al. Ионное осаждение, с. 12–16.

Kamijo M. Высокочастотное ионное осаждение, с. 17–22.

Inagaki M. Напыление высокочастотной плазмой покрытий из биоактивной керамики, с. 22–26.

Nakagawa T. Курс лекций. Скоростное получение моделей металлических изделий, с. 27–31.

Takeda T. Лекции для инженеров. Метод оценки растрескивания цинковых покрытий, с. 32–38.

Kataoka H. Составление англоязычной документации. Ч. 3. с. 39–45.

(Япония), 2002. — Vol. 71, № 5 (яп. яз.)

СВАРКА В ЯПОНИИ (Обзор за 2001 г.)

I. Деятельность в области сварки.
I-1. Научная деятельность, с. 45.
I-2. Деятельность Японского сварочного общества, с. 45.
I-3. Деятельность в области промышленности, с. 46.
I-4. Международная деятельность, с. 47.
II. Материалы.
II-1. Железо и сталь, с. 48.
1. Конструкционная сталь, с. 48.
2. Криогенная сталь, с. 48.
3. Высокотемпературная сталь, с. 49.
4. Нержавеющая сталь и суперсплавы, с. 49.
5. Плакированная сталь, с. 50.
6. Другие материалы, с. 50.
II-2. Цветные металлы, с. 51.
1. Алюминий и магний и их сплавы, с. 51.
2. Никель и его сплавы, с. 52.
3. Титан и его сплавы, с. 52.
4. Медь и ее сплавы, с. 52.
5. Другие материалы, с. 53.
II-3. Сварочные материалы, с. 53.
1. Покрытые электроды для дуговой сварки, с. 54.
2. Материалы для дуговой сварки под флюсом, с. 54.
3. Материалы для дуговой сварки в защитном газе, с. 54.
4. Другие материалы, с. 55.
II-4. Новые материалы, с. 55.
1. Керамика, с. 55.
2. Композиционные материалы с металлической матрицей, с. 56.
3. Другие материалы (ультрамикродисперсные, с памятью формы), с. 58.
III. Оборудование и способы сварки, соединения и резки.
III-1. Сварка плавлением (низкоэнергетические технологии), с. 59.
Основные направления развития технологий и оборудования.
1. Дуговая сварка покрытыми электродами, с. 59.
2. Дуговая сварка под флюсом, с. 59
3. Электрошлаковая и газоэлектрическая сварка, с. 60.
4. Дуговая сварка самозащитной проволокой, с. 60.
5. Сварка МИГ, МАГ и в CO_2 (включая порошковой проволокой), с. 60.
6. Сварка ТИГ, с. 62.
7. Другие способы, с. 63.
Основные направления создания систем.
1. Роботы, с. 64.
2. САПр/АСУпр, с. 64.
3. Другие, с. 65.
III-2. Сварка плавлением (высокоэнергетические технологии), с. 65.
1. Лазер, с. 65.
2. Электронный луч, с. 68.
III-3. Сварка давлением и твердофазное соединение, с. 69.
1. Контактная сварка, с. 69.
2. Сварка трением, с. 70.
3. Диффузионная сварка, с. 71.
4. Горячая и холодная сварка давлением, с. 71.
5. Другие способы, с. 72.
III-4. Пайка, с. 72.
1. Низкотемпературная пайка, с. 72.
2. Высокотемпературная пайка, с. 73.
3. Пайка керамики, с. 74.
III-5. Микросоединение, с. 75.
1. Проволочное соединение, с. 75.
2. Соединение высокой плотности, с. 75.
3. Микропайка, с. 76.
4. Другие способы, с. 76.
III-6. Напыление, наплавка, модификация поверхномти, с. 77.
1. Напыление, с. 77.
2. Наплавка, с. 78.
3. Модификация поверхности, с. 79.
III-7. Склеивание, с. 80.
1. Химический состав клеев и их свойства, с. 80.
2. Склеиваемость, с. 80.
3. Метод испытаний, с. 81.
4. Оценка прочности, с. 81.
5. Усталостная прочность клеевых соединений, с. 81.
6. Применение металлических клеевых соединений, с. 81.
III-8. Резка, с. 82.
1. Способы резки, с. 82.
2. Автоматизация, рационализация, с. 82.
3. Точность, с. 82.
4. Стандарты, нормы, с. 82.
5. Разное, с. 82.
IV. Оценка свойств соединений.
IV-1. Оценка прочности и ударной вязкости, с. 83.
1. Статическая прочность, с. 83.
2. Прочность на продольный изгиб, с. 83.
3. Вязкость и характеристики разрушения, с. 84.

Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044)) 227-07-77, НТБ ИЭС.

IV-2. Оценка сварочных деформаций и остаточных напряжений, с. 85.
1. Сварочные деформации, с. 85.
2. Остаточные напряжения, с. 85.
IV-3. Усталостная прочность, с. 86.
1. Распространение усталостных трещин, с. 86.
2. Зарождение усталостных трещин и долговечность, с. 87.
3. Усталостная прочность под переменной нагрузкой и усталость конструкций, с. 88.
4. Другое., с. 88.
IV-4. Оценка факторов окружающей среды, с. 89.
1. Высокотемпературная прочность, с. 89.
2. Коррозионная стойкость, с. 89.
V. Гарантия качества сварных швов.
V-1. Гарантия и контроль качества, с. 90.
1. Деятельность в области гарантии качества, с. 90.
2. Контроль качества сварки, с. 90.
V-2. Методы контроля, с. 90.
1. Основные направления развития методов, с. 90.
2. Радиационный контроль, с. 90.
3. Ультразвуковая дефектоскопия, с. 91.
4. Другие методы испытаний, с. 91.
VI. Стандартизация в области сварки.
VI-1. Материалы и способы, с. 91.
VI-2. Безопасность, с. 92.
VI-3. Разное, с. 93.
VII. Применение.
VII-1. Судостроение и строительство морских платформ, с. 93.
VII-2. Трубопроводы, с. 94.
VII-3. Авто- и вагоностроение, с. 95.
VII-4. Авиационная и космическая техника, с. 97.
VII-5. Строительство, с. 98.
VII-6. Мостостроение, с. 66.
VII-7. Хранение продуктов, с. 100.
VII-8. Сосуды давления, котлы, химическое оборудование, с. 101.
VII-9. Строительная техника, с. 102.
VII-10. Электроника, бытовая техника, с. 103.
VII-11. Атомная энергетика и энергетическое оборудование, с. 104.
VIII. Деятельность в области образования.

KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT (Япония), 2002. — № 46 (англ. яз.)

Shiotani K., Kawabata F., Amano K. Новые стали, стойкие против атмосферной коррозии, бейнитного типа с очень низким содержанием углерода, отличающиеся хорошей свариваемостью, с. 49–55.

QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония), 2002. — Vol. 20, № 2 (яп. яз.)

Terasaki H. et al. Влияние паров металла на состояние плазмы в дуге при сварке вольфрамовым электродом в гелии, с. 201–206.

Fukaya Y. et al. Численный расчет корреляционной зависимости между прочностью соединения и свариваемостью для сварки медных пластин сверхтонкой обработки. Ч. 2. Диффузионная сварка меди, с. 207–212.

Ono K. et al. Лазерная сварка стали с оксидной пленкой. Ч. 1. Влияние оксидной пленки на сварку мощным CO_2-лазером, с. 213–219.

Takahashi K. et al. Визуальный контроль расплавления алюминиевого сплава и проволоки при сварке CO_2-лазером с использованием присадки, с. 220–227.

Hayashi T. et al. Механизм подавления порообразования при сварке в тандем сдвоенным лазерным пучком, с. 228–236.

Nakamura T. et al. Разработка технологии дуговой сварки плавящимся электродом с контролируемым химическим составом защитного газа. Ч. 3. Сварка в сверхузкий зазор, с. 237–245.

Nakamura T., Hiraoka K. Управление распределением тепловложения от дуги в кромках при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе с регулированием фазы. Ч. 4. Сварка в сверхузкий зазор, с. 246–258.

Suita Y. et al. Статистический анализ свойств валка при стыковой сварке с подкладками, с. 259–265.

Tamaki K. et al. Влияние содержания углерода и перитектической реакции на высокотемпературное растрескивание швов на высокоуглеродистой стали, с. 266–275.

Kamo T. Распределение твердости в ЗТВ при сварке стали, легированной бором, с. 276–281.

Mohri M. et al. Повышение усталостной прочности крестообразных ненагруженных соединений при использовании сварочных материалов с низкой температурой превращения, с. 282–286.

Muramatsu Y., Kuroda S. Изучение механизма отслоения напыленных пленок при локальном нагреве подложки. Ч. 4. Применение пятнистости лазерного излучения для измерения сварочных деформаций, с. 287–294.

Kitagawa A. et al. Изучение деформации при лазерной сварке нержавеющей стали 304, с. 295–300.

Kitagawa A. et al. Изучение возможностей применения лазерной сварки для производства сосудов давления из нержавеющей стали 304, с. 301–308.

Aritoshi M. et al. Влияние толщины ниобиевой прокладки на свариваемость вольфрама с медью при сварке трением. Ч. 1. Сварка трением с использованием ниобиевой фольги толщиной 7...25 мкм, с. 309–316.

Tanaka Y. et al. Влияние изменения состояния поверхности подложки вследствие повышения ее температуры на механизм расплющивания напыляемых частиц, с. 317–321.

rivista italiana della saldatura

(Италия), 2001. — № 6 (итал. яз.)

Vedani M. Микроструктурные и механические свойства сварных швов на нержавеющей стали, выполненных контактной рельефной сваркой, с. 717–725.

Colitti M. Экономика, технология и стандартизация, с. 727–729.

Barsanti L. Сварка микролегированных сталей X100, с. 731–738.

Mandina M., Tolle E. Мартенситные стали с 9 % Cr–1Mo–Nb–V с более высокой стойкостью против окисления под воздействием высоких температур — проблемы поставки, сварки и контроля, с. 743–750.

Bach F., Versemann R. Применение газопламенной подводной резки, с. 763–768.

(Италия), 2002. — № 1 (итал. яз.)

Raspa A. Сварка алюминия лазером Nd:YAG, с. 31–34.

Cappello A. Продукция фирмы CASTROLIN — плиты, стойкие против абразивного и эрозионного износа благодаря наплавке с помощью сварки открытой дугой или с помощью процесса напыления и расплавления распыленных частиц, с. 41–45.

Ginocchio M. Основные рекомендации по применению анализа конечными элементами конструкций любой формы, находящихся под давлением, с. 49–54.

Lanciotti A. Метод структурных напряжений как наиболее простой и эффективный метод оценки усталостной долговечности точечных сварных соединений, с. 59–67.

Farrar J. C. M., Marshall A. W., Zhang Z. Основные рекомендации по необходимости контроля висмута в сварных швах аустенитной нержавеющей стали для некоторых областей применения при повышенных температурах, с. 71–78.

Методы сварки электронных компонентов печатных плат, с. 81–88.

(Италия), 2002. — № 2 (итал. яз.)

Tovo R., Gambaro C., Volpone M. Сварка трением с перемешиванием — новая технология последних лет, с. 161–168.

Costa G., Tolle E. Новые требования к повторной сертификации персонала на уровне 1 и 2 в стандарте UNI EN 473:2001, с. 171–174.

Franceschi E., Del Lucchese A., Montenovi P. et al. Исследование древнего топора, принадлежащего бронзовому веку и найденному вблизи Сасселло, с. 177–183.

Bergmann J.P., De Souza C., Guyenot M. et al. Обзор механических свойств торцевых стыков швов алюминиевых сплавов, аустенитных сталей и промышленно чистого титана, с. 187–195.

Abbate A., Lanza M. Сложная, но необходимая оценка взаимодействия оборудования, подсоединенного к трубопроводам, с. 199–212.

SOUDAGE ET TECHNIQUES CONNEXES

(Франция), 2001. — Vol. 55, № 7/8 (франц. яз.)

Отчет о деятельности Института сварки в 2000 г., с. 3–16.

Takanashi M. et al. Релаксация остаточных сварочных напряжений за счет усталостного нагружения сварных стыковых соединений, с. 19–25.

(Франция), 2001. — Vol. 55, № 9/10 (франц. яз.)

Kannengiesser T., Bollinghaus T., Florian W., Herold H. Влияние прочности присадочного металла и режимов сварки на усилия жесткого закрепления и распределение натяжений в жестко закрепленных компонентах, с. 3–11.

Dinechin G. et al. Оценка допусков при использовании процесса сварки А-ТИГ применительно к трубопроводам толщиной 6 мм из нержавеющей стали, с. 13–19.

Статистические данные SYMAP — итоги 2001 года (сентябрь), с. 21–23.

Bramat M., Weber H. Неоспоримый успех выставки в Эссене в 2001 году, с. 25–35.

Lixing H. et al. Улучшение усталостных характеристик сварных соединений благодаря ударной ультразвуковой обработке, с. 39–43.

(Франция), 2001. — Vol. 55, № 11/12 (франц. яз.)

Marshall A. W., Farrar J. C. M. Сварка ферритных и мартенситных сталей с 11...14 % хрома, с. 3–27.

Статистические данные SYMAP — итоги 2001 года (октябрь–ноябрь), с. 31–36.

Roche R., Delvat R. Разработка системы сертификации COFREND агентов по неразрушающему контролю. Ч. 1, с. 39–40.

Delvat R. Разработка системы сертификации агентов по неразрушающему контролю. Ч. 2, с. 44–46.

Jastrzebski R. et al. Использование познавательной психологии и мускульных движений при обучении сварщиков, с. 47–51.

(Франция), 2002. — Vol. 56, № 1/2 (франц. яз.)

Bramat M., Weber H. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ 2002 — первая пробная выставка по промышленным достижениям, которая состоится в г. Вилльпенте с 19 по 23 марта 2002 г., с. 3–38.

Fouquet F., Mayer C., Robin M. Оптимизация процесса стыковой сварки CO_2-лазером листов из алюминиево-магниевых сплавов, с. 39–43.

Франция — первые оценки деятельности в 2001 году, с. 45–46.

Статистические данные SYMAP — итоги 2001 года (декабрь), с. 47–49.

(Франция), 2002. — Vol. 56, № 3/4 (франц. яз.)

Potente H., Becker F., Fieler G., Korte J. Исследование нового метода сварки путем пропускания лазерного излучения, с. 3–8.

Nawroski J. G. Трещинообразование ферритной стали в процессе термообработки для снятия напряжений, с. 13–21.

Farkas J., Jarmai K. Предложения по изменению некоторых частей лекций для европейских инженеров-сварщиков, касающихся проектирования и расчета сварных конструкций, с. 23–27.

Выставка «EuroBLECH 2002», Ганновер, 22–26 октября 2002 г. Первая всемирная выставка по листовым материалам, с. 32–33.

Статистические данные SYMAP — итоги 2001 года (февраль–март), с. 42–47.

sudura

(Румыния), 2002. — № 3 (Septembrie/September) (рум. яз.)

Campurean A. et al. Сварка трубопроводов большого диаметра с использованием процесса механизированной импульсной сварки МАГ с колебанием порошковой проволоки, с. 34–43.

Luca R., Milici D., Craus L. Исследование величины и распределения внутренних напряжений в сварных соединениях труб, с. 47–51.

TRANSACTIONS OF JWRI (Япония), 2001. — Vol. 30, № 2 (англ. яз.)

Fan D., Ma Y., Chen J., Ushio M. Регулирование по замкнутому циклу нейронной сети разбрызгивания при CO_2-сварке с помощью потрескивания дуги, с. 1–15.

Sadek A. et al. Влияние параметров процесса дуговой сварки порошковой проволокой и типа защитного газа на геометрию валика сварного шва и распределение твердости, с. 45–52.

Woo I., Horinouchi T., Kikuchi Y. Склонность сварных соединений из аустенитной нержавеющей стали с высоким содержанием азота к ликвационному трещинообразованию в ЗТВ, с. 53–58.

Deng D., Serizawa H., Murakawa H. Теоретическое прогнозирование сварочной деформации с учетом позиционирования и зазора между деталями, с. 89–96.